

Program PN IV

Programul 5.7. – Parteneriat pentru inovare

Subprogramul 5.7.1. Parteneriate pentru competitivitate

Contract nr. 23PED/2025

**DISPOZITIV DE IZOLARE LA VIBRAȚII PENTRU
ECHIPAMENTE ELECTRONICE SENSIBILE BAZAT PE
EFECTE VISCO-POROELASTICE**

RAPORT TEHNICO-ȘTIINȚIFIC

Etapa I de execuție 2025

PARTENERI

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București –

Coordonator

STIMPEX S.A. - Partener

CUPRINS

1.	INTRODUCERE	3
2.	PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE	3
3.	ELEMENTE CONSTRUCTIVE ALE DISPOZITIVELOR ANALIZATE	4
3.1.	Materialul poros.....	7
3.2.	Fluidul.....	8
3.3.	Materialul membranei.....	8
4.	MODELAREA TEORETICĂ A FUNCȚIONĂRII IN CONDIȚII CVASI-STATICE	9
4.1.	Dispozitiv cu acumulare exterioară.....	9
4.2.	Dispozitiv cu acumulare interioară	11
5.	EXPERIMENTE CVASI-STATICE ȘI COMPARAȚII CU PREDICȚIILE TEORETICE	12
6.	EVALUAREA SOLUȚIILOR DE TESTARE DINAMICĂ.....	15
7.	CONCLUZII.....	18

1. INTRODUCERE

Proiectul este dedicat dezvoltării unui model inovator de demonstrator pentru un amortizor/izolator pasiv de vibrații, bazat pe un mecanism de generare a unei forte de reacție prin expulzarea unui fluid îmbibat într-un strat de material poros supus compresiunii. Mecanismul a fost îndelung studiat în ultimele 2 decenii, în diferite forme și pentru diferite aplicații, atât teoretic cât și experimental, în cadrul Grupului de Lubrificație din POLITEHNICA București. Recent, aplicarea principiului la amortizarea secundară a impactului la echipamente militare a fost demonstrată în cadrul unor proiecte colaborative între POLITEHNICA și STIMPEX S.A., cele doua entități care constituie echipa prezentului proiect.

Elementul de noutate al acestui proiect îl reprezintă capacitatea de atenuare a șocurilor/vibrațiilor în mod continuu (repetitiv); soluțiile studiate anterior erau destinate utilizării de unică folosință.

Aplicațiile vizate, fără a fi limitative, sunt sistemele de protecție a echipamentelor electronice imbarcate.

Prezentul raport sintetizează activitățile și realizările primului an de finanțare a proiectului în care au fost prevăzute următoarele activități:

- Studii preliminare privind proprietățile materialelor componente utilizabile și interacțiunile dintre acestea.
- Proiectarea unor soluții constructive adecvate pentru dispozitivul demonstrator.
- Studii experimentale de caracterizare a comportării dispozitivului în condiții statice.
- Dezvoltarea unui model teoretic simplificat care să reproducă funcționarea dispozitivului în condiții cvasi-stactice.
- Evaluarea metodelor și a standurilor utilizabile, precum și identificarea parametrilor funcționali măsurabili.
- Proiectarea dispozitivelor de testare dinamică și stabilirea instrumentării necesare.

2. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Dispozitivul se bazează pe un mecanism de atenuare a șocului/vibrațiilor denumit lubrificație ex-poro-hidrodinamică (XPHD), ce constă în generarea unei forțe de rezistență la comprimarea unui material poros, îmbibat cu lichid. Forța are ca sursă rezistența la curgerea prin materialul poros a fluidului expulzat prin comprimare. Rezistența la comprimare depinde de permeabilitatea materialului, la rândul ei dependentă de porozitate, și are o evoluție progresivă pe măsură ce crește gradul de comprimare și implicit, scade permeabilitatea. Mecanismul necesită *materiale poroase ușor deformabile, elastice, cu pori deschiși și porozitate inițială relativ mare*, pentru a reveni rapid la forma inițială. Materialul poros îmbibat este plasat într-o alveolă cilindrică rigidă care constituie baza dispozitivului și care este etanșată cu o membrană elastică. Membrana elastică este componenta esențială care asigură colectarea fluidului expulzat și reîmbibarea forțată a acestuia la revenire. Toate aceste componente formează ceea ce numim *"celula de amortizare"*. Comprimarea este realizată cu un piston cilindric ale cărui formă și dimensiuni variază, și care constituie subiectul analizei statice din cadrul acestui proiect. Pistonul este ghidat pe diametrul interior al alveolei, ghidarea fiind asigurată de o piesă cilindrică inelară care asigură în același timp fixarea fermă a membranei elastice. Pentru compensarea întârzierii în revenirea membranei și accelerarea procesului de reîmbibare, un element elastic suplimentar (un arc metalic) poate fi inclus în acest montaj. La apăsarea pistonului cu o forță impusă, F , celula (stratul poros) este comprimată până la o adâncime, h , moment în care suma forțelor de reacțiune a celulei o egalează.

Efectul de atenuare a forței de excitație este realizat prin componentele elastice (membrana, arcul, mediul poros). Efectul de amortizare este obținut în primul rând prin expulzarea fluidului din mediul poros și prin comportarea vâscoasă a mediului poros.

Dispozitivul descris anterior poate avea mai multe variante constructive în funcție de forma membranei și zona de acumulare a fluidului: membrană cilindrică inelară cu acumulare într-o zonă laterală toroidală (cu *extindere radială*) respectiv membrană plană cu acumulare în zona superioară (cu *extindere axială*) (Fig. 1). Pe baza unei analize tehnico-economice comparative s-a ajuns la concluzia că această din urmă variantă este mult mai ușor de realizat și testat pe baza următoarelor argumente:

- Membrana plană este extrem de ușor de realizat la orice dimensiune, spre deosebire de varianta cu membrana cilindrică pentru care este necesară o matriță adaptată la o dimensiune unică.
- Membrana plană, în forma ei umflată prin acumularea lichidului expulzat, este protejată de către piston.
- Etanșarea prin strângere pe suprafață plană este mult mai eficientă decât etanșarea pe suprafață cilindrică realizată cu coliere.
- Printr-o evaluare simplificată a geometriei membranei umflate se dovedește că la cea toroidală, umflarea (extinderea radială) este generată și de deplasarea axială a pistonului, ceea ce face ca la deformări reduse umplerea ei să fie parțială, astfel că efectul asupra reîmbibării este mai redus.

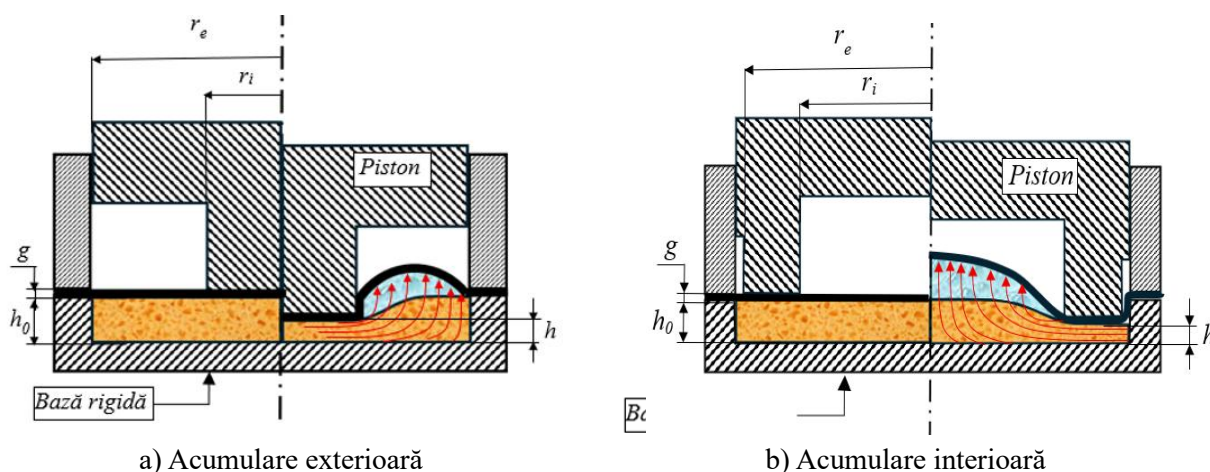


Figura 1. Schița de principiu a dispozitivului cu membrana plană cu două soluții constructive

3. ELEMENTE CONSTRUCTIVE ALE DISPOZITIVELOR ANALIZATE

Construcția primei versiuni de model experimental urmărește schița de principiu din Fig. 1, la care a fost adăugat un arc cu o caracteristică progresivă, care să transmită uniform forța către piston, să limiteze revenirea pistonului și (mai ales) să aibă un gabarit axial redus. Arcul proiectat (Fig. 2) este multilamelar plan (cu 3 lamele echidistante solidarizate în zona centrală) plasat la exterior în locașuri practicate în corpul dispozitivului (în partea superioară a inelului de etanșare) și central în piston. Pentru montajul membranei și a arcului este necesară secționarea axială a corpului dispozitivului în 3 componente: baza (alveola) și două inele concentrice a căror dimensiune este corelată cu grosimea materialului poros. Fixarea la raza exterioră a arcului este realizată cu inelul de ghidare a pistonului. Deformarea axială este limitată de zona teșită a pistonului dimensionată astfel încât să limiteze deformarea axială în raport cu grosimea minimă până la care poate fi comprimat materialul poros. Adâncimea alveolei este mai mare decât grosimea materialului poros pentru a permite plasarea a doua straturi sau a unor materiale poroase de grosime mai mare. Poziția acestuia este înălțată cu plăci distanțiere de compensare astfel încât suprafața superioară să atingă membrana (Fig. 2.c). Descrierea detaliată a componentelor se găsește în Fig. 2.a. Fixarea componentelor între ele este asigurată cu șuruburi de dimensiuni reduse (M3 și M4).

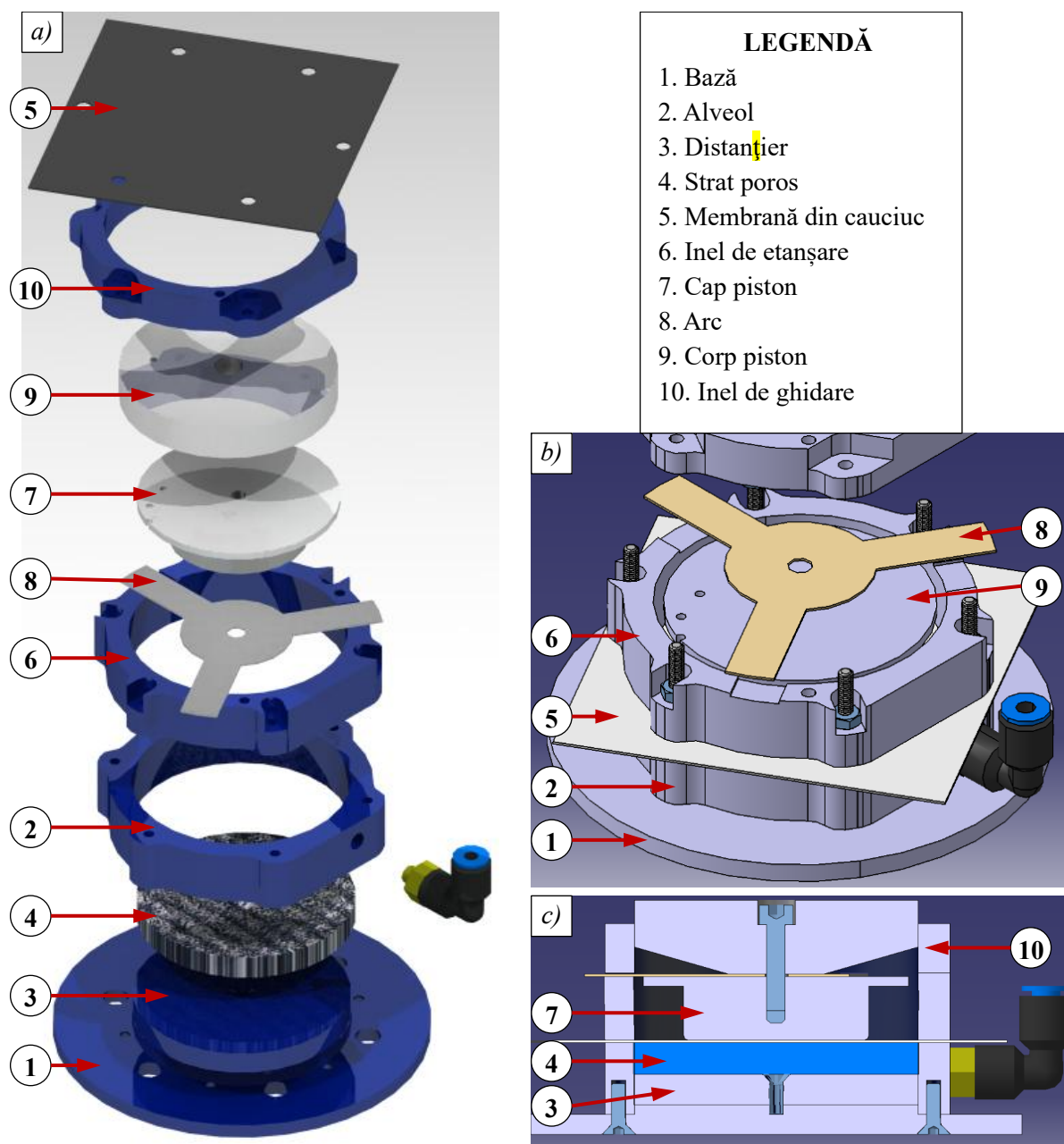


Figura 2. Modelul 3D al dispozitivului cu acumulare exterioară: a) Vedere explodată; b) Parțial demontat; c) Secțiune transversală

Principalele dimensiuni ale pieselor componente sunt indicate în Fig. 3.

Toate piesele componente (cu excepția arcului) sunt realizate din aluminiu și prelucrate cu tehnologii de precizie (jet de apă, laser, CNC).

Anterior realizării demonstratoarelor, proiectul a fost materializat prin imprimare 3D (Fig. 4.a), model care a permis simularea procedurii de montaj și a funcționării fără fluid. Ulterior, au fost realizate două modele cu dimensiuni diferite ale versiunii cu alimentare exterioară (Fig. 4.b) și un model pentru versiunea cu alimentare interioară (Fig. 4.c). Toate aceste modele au fost utilizate la testarea dispozitivului în condiții cvasi-statice (comprimare cu viteză constantă) cu aceeași alveola (Fig. 4.d).

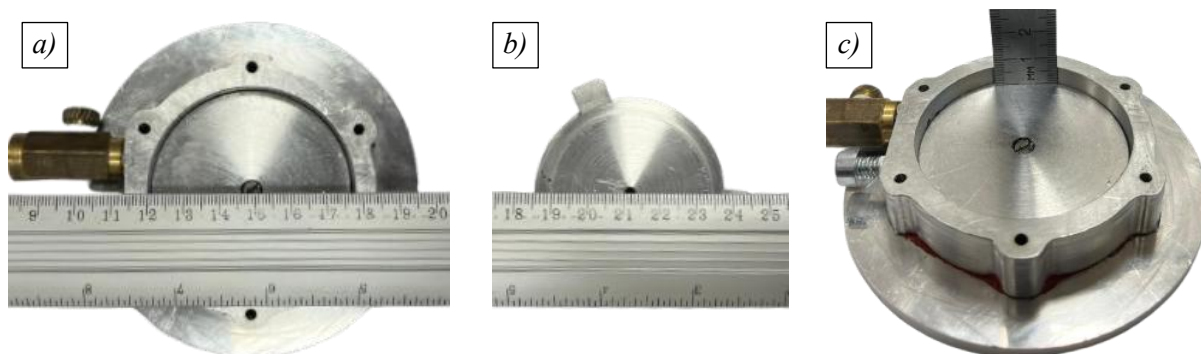
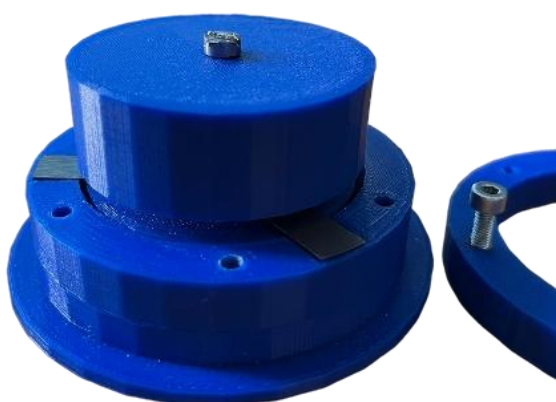


Figura 3. Dimensiuni componente: a) Diametru exterior alveolă; b) Diametru interior piston; c) Înălțime alveolă



a) Modelul printat 3D al dispozitivului



b) Ansamblul arc-piston – acumulare la exterior



c) Ansamblul arc-piston – acumulare la interior



d) Alveola cu stratul poros

Figura 4. Modelele fizice ale demonstratoarelor realizate

Din descrierea anterioară a principiului de funcționare rezultă că elementele active ale procesului de atenuare sunt materialul poros, fluidul, membrana și arc. Materialul acestora influențează decisiv comportarea dispozitivului, astfel că o parte relevantă a activității experimentale a fost dedicată evaluării unor materiale candidate prin prisma proprietăților lor mecanice, dar și a compatibilității dintre ele.

3.1. Materialul poros

Materialele poroase candidate trebuie să prezinte o porozitate ridicată, să aibă pori comunicanți, fiind ușor deformabile, elastice, durabile (rezistente la comprimări repetate). Experiența acumulată de grupul nostru de cercetare a limitat aria de investigare la două categorii de materiale: spumele reticulate, respectiv textilele tridimensionale (S3D).

Spumele poliuretanice reticulate analizate sunt pe bază de poliesteri, au structura celulară deschisă și sunt caracterizate prin porozități foarte mari: FILTREN® TM 25133 – $\varepsilon_0=0,982$, FILTREN® TM 25280 – $\varepsilon_0=0,976$ și FILTREN® TM 25450 – $\varepsilon_0=0,997$.

Pe baza caracteristicii forță-deformație la comprimare (Fig. 5) s-a optat în final pentru materialul S3D care prezintă o mai mare viteză de revenire și o rezistență mecanică superioară la comprimări mari. Ulterior, au fost procurate și evaluate două produse similare de tip S3D (Fig. 6), diferite prin grosime și densitatea firelor, ale căror caracteristici sunt sintetizate în Tabelul 1. Pentru ambele variante, a fost determinată caracteristica forță – deformație la mai multe cicluri de comprimare. După cum se poate observa din Figura 6, după circa 10 cicluri de comprimare, caracteristica rămâne practic constantă.

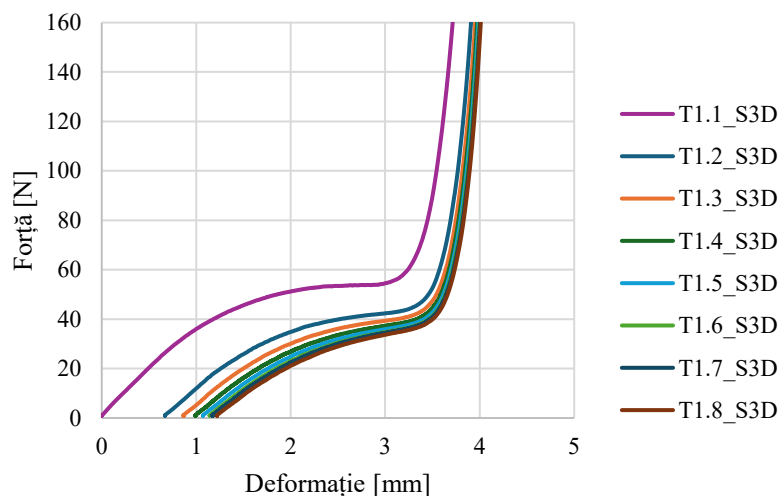


Figura 5. Caracteristica forță – deformație S3D ($h_0=6,4\text{mm}$)

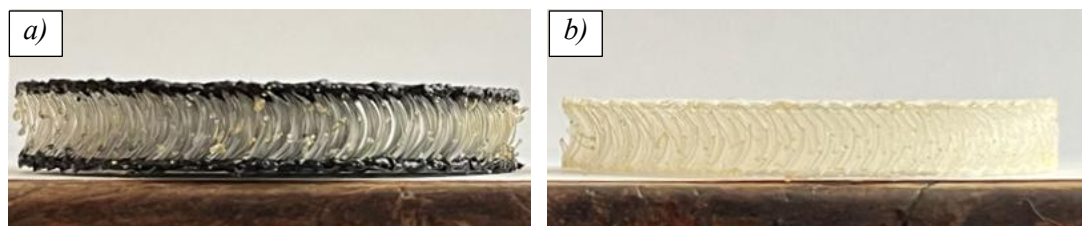


Figura 6. a) Vedere laterală S3D, $h_0=6,4\text{mm}$ b) Vedere laterală S3D, $h_0=5,3\text{mm}$

Tabelul 1. Proprietățile textilelor tridimensionale conform cu informațiile obținute de la utilizatori/ producători

Material poros	Nume	Cod	Porozitate inițială, ε_0 [–]	Diametru fibre $[\mu\text{m}]$	Grosime inițială, h_0 [mm]
Textile tridimensionale	SPACETEK™	S3D	0,90	143÷164	≈6,4/ 5,3

3.2. Fluidul

Fluidul ales pentru aceste experimente a fost **glicerina**; este un fluid compatibil atât cu materialul textil cât și cu cauciucul natural al membranei, neavând efecte agresive în contact cu metalul sau țesutul uman. Proprietățile de interes ale glicerinei utilizate sunt prezentate în Tabelul 2

Tabelul 2. Proprietățile fluidului

Fluid	Densitate [g/cm ³]	Vîscozitate la 20°C [Pa·s]
Glicerină	1,263	0,816

3.3. Materialul membranei

Membrana de cauciuc trebuie să îndeplinească mai multe cerințe: elasticitate ridicată, plasticitate redusă (pentru a reveni la forma inițială), rezistență ridicată la oboseală (în special la întinderi multiple), impermeabilitate și compatibilitate cu fluidul utilizat. Materialele candidate evaluate au fost cauciuc natural și cauciuc siliconic. După testele de tracțiune și in-situ pe dispozitiv a fost reținut un cauciuc natural care poate fi procurat la grosimile necesare și ale cărui caracteristici sunt prezentate în Tabelul 3 (2 variante de grosime). Teste multiple pentru determinarea caracteristicii elastice pe o mașină de tracțiune au arătat o reproductibilitate foarte bună a rezultatelor (Fig. 7.a). Pentru deformațiile uzuale ale membranei din dispozitiv (deformație relativă maximă < 40%) caracteristica este practic liniară, deci modulul de elasticitate este constant (Fig. 7.b).

Tabelul 3. Proprietățile materialului membranei

Tip cauciuc	Grosime [mm]	Rezistență la tracțiune [MPa]	Alungire la rupere [%]	Duritate [°ShA]	Modul de elasticitate [MPa]
Natural	1/ 1,5	14	500	40±5/ 60±5	2,6 /3,3

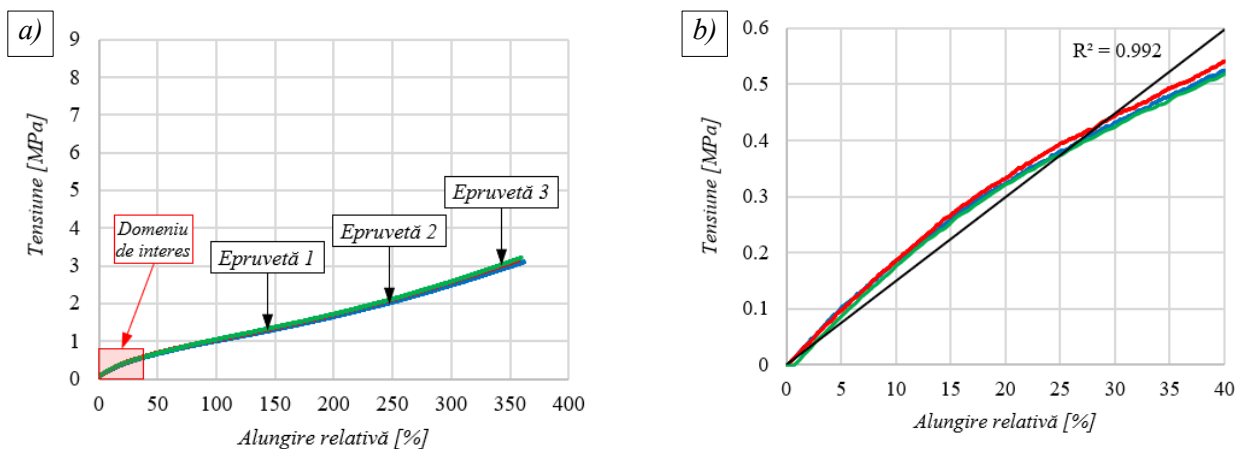


Figura 7. Caracteristica tensiune – alungire relativă pentru cauciucul natural cu grosimea de 1mm: a) Trei teste consecutive; b) Domeniu de interes

4. MODELAREA TEORETICĂ A FUNCȚIONĂRII ÎN CONDIȚII CVASI-STATICE

Analiza teoretică cvasi-statică are ca obiectiv determinarea presiunii din interiorul celulei și a forțelor de reacțiune dezvoltate la o deplasare impusă a pistonului, definită prin grosimea h a mediului poros comprimat. Acestea din urmă sunt:

- Forța de rezistență la expulzarea fluidului prin structura poroasă cu permeabilitate variabilă F_{XPHD} .
- Forța de rezistență la compresie a structurii poroase F_{MP} .
- Forța elastică a arcului F_{arc} .
- Forța elastică a membranei generată de întinderea acesteia prin acumularea de fluid expulzat F_e .

Calcul teoretic al celei din urmă este similar pentru cele două soluții constructive analizate, astfel că va fi prezentat în detaliu pentru varianta cu acumulare exterioară, cu notațiile din Fig. 8. Pe lângă ipoteze generale ale modelelor XPHD, se admit următoarele condiții:

- Configurația este axial simetrică, ceea ce presupune că suprafața activă a pistonului este permanent paralelă cu materialul poros, a cărui grosime este constantă indiferent de nivelul de comprimare.
- Materialul poros este îmbibat complet de fluid.
- Materialul membranei este perfect elastic, comportamentul ei fiind guvernat de legea lui Hooke.
- Presiunea este constantă în tot volumul celulei.
- Se neglijează frecarea membranei cu pereții pistonului și subțierea ei prin alungire.
- Se neglijează raza de racordare a pistonului la marginea suprafeței de contact.
- Materialul poros este comprimat doar în zona de contact cu suprafața activă a pistonului, iar grosimea, respectiv porozitatea stratului poros, nu sunt modificate semnificativ în afara acestei zone; în consecință, volumul de fluid expulzat corespunde doar zonei în contact cu pistonul.

Pentru calculul presiunii fluidului acumulat în membrana umflată se consideră deformarea acesteia în două faze definite prin forma secțiunii radiale. În prima fază, secțiunea membranei are o formă de arc de cerc a cărui rază scade până când se ajunge la un semicerc. În faza a doua, membrana continuă întinderea, fiind în contact cu pereții laterali (Fig. 8.b).

4.1. Dispozitiv cu acumulare exterioară

Admițând că fluidul expulzat de piston se regăsește integral în umflătura membranei, obținem:

$$\begin{cases} \pi r_i^2 \Delta h = \pi (r_e + r_i) \frac{\rho^2}{2} (\theta - \sin \theta), \theta \leq \pi \text{ și } x = 0 \\ \pi r_i^2 \Delta h = \pi (r_e + r_i) \left[\frac{\pi}{8} (r_e - r_i)^2 + (r_e - r_i)x \right], \theta = \pi \text{ și } x > 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

unde:

$\Delta h = h_0 - h$ – deformația materialului poros.

r_e – raza exterioară a pistonului.

r_i – raza interioară pistonului

ρ – raza de curbură a membranei

θ – unghiul la centru

x – extensia axială a membranei

Aplicând ipoteza conservării de volum pentru ecuațiile (4.1) și trecând într-o formă adimensională, se poate obține unghiul la centru θ , în funcție de grosimea adimensională a materialului poros:

$$\frac{\theta(H) - \sin \theta(H)}{1 - \cos \theta(H)} = \frac{4\chi R^2}{(1 - R)^2} \frac{(1 - H)}{(1 + R)} \quad (4.2)$$

unde:

$H = h/h_0$ – grosimea adimensională a materialului poros

$R = r_i/r_e$ – raza adimensională a pistonului circular

$\chi = h_0/r_e$ – factorul de formă al materialului poros

Soluțiile ecuației (4.2) se obțin numeric, folosind software-ul Mathcad.

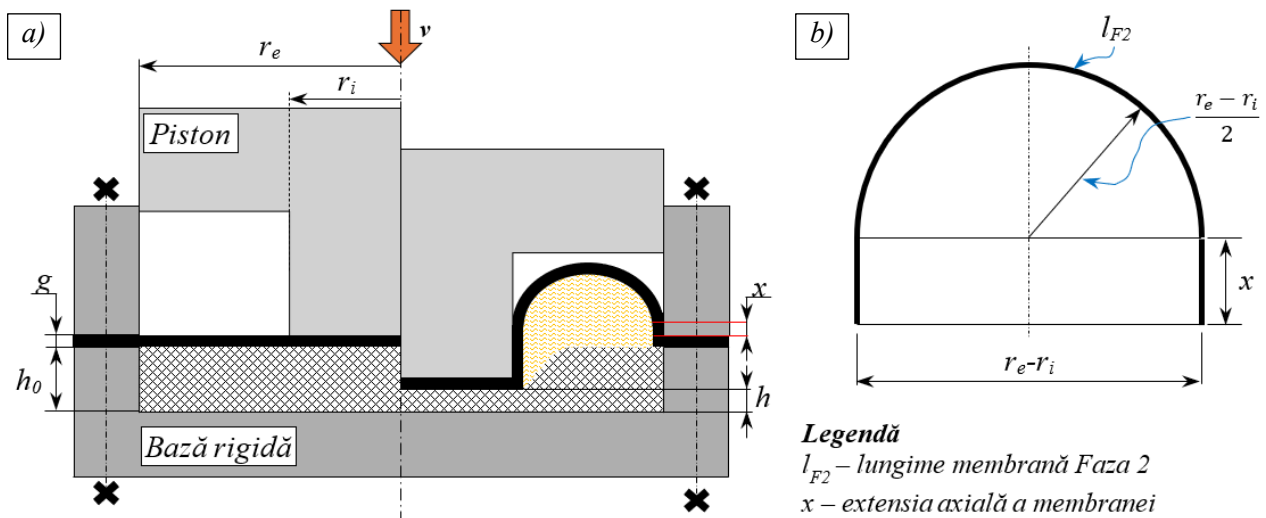


Figura 8. Schematizarea de calcul a deformației membranei la varianta cu acumulare exterioara (piston circular)

Grosimea limită adimensională a materialului poros, H_{lim} care corespunde tranziției dintre cele două faze de extensie a membranei este:

$$H_{lim} = 1 - \frac{\pi (1 + R)(1 - R)^2}{8 \chi R^2} \quad (4.3)$$

Presiunea din alveolă se determină din legea lui Pascal pentru deformarea elastică a corpurilor de revoluție:

$$p_{el} = E \frac{\delta \cdot g}{\rho} \quad (4.4)$$

unde:

E – modulul de elasticitate secant al cauciucului

g – grosimea membranei

δ – alungirea relativă a membranei

După calcule algebrice complexe, rezultă forma adimensională a presiunii fluidului:

$$\begin{cases} P_{el_{F1}}(H) = \frac{2G}{1-R} \sin \frac{\theta(H)}{2} \left[R + \chi(1-H) - R + \frac{(1-R)}{2} \frac{\theta(H)}{\sin \frac{\theta(H)}{2}} - 1 \right] \text{dacă } H < H_{lim} \\ P_{el_{F2}}(H) = \frac{2G}{1-R} \left[R + \chi(1-H) \left(1 + \frac{2R^2}{1-R^2} \right) + \frac{3\pi}{4} (1-R) - 1 \right] \text{dacă } H > H_{lim} \end{cases} \quad (4.5)$$

unde:

$G = g/r_e$ – factorul de formă al membranei.

4.2. Dispozitiv cu acumulare interioară

Procedând în mod similar cu versiunea de la punctul 4.1. și aplicând formulele pentru configurația prezentată în fig. 9, se determină presiunea adimensională.

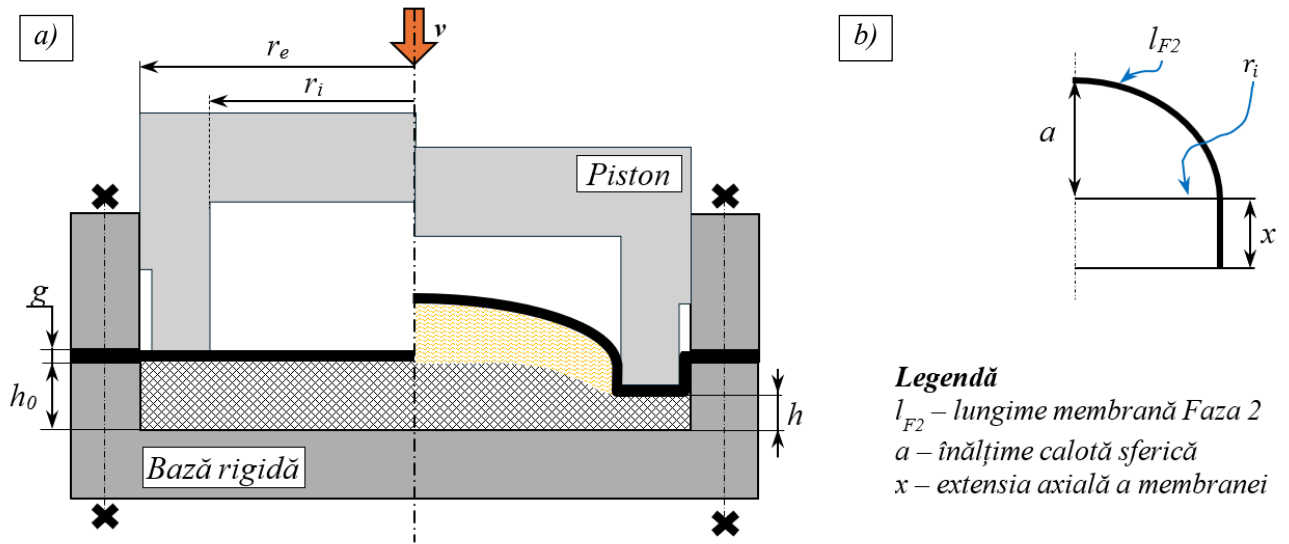


Figura 9. Schematizarea de calcul a deformației membranei la varianta cu acumulare interioară (piston inelar)

$$\begin{cases} P_{el_{F1}}(H) = G \frac{2A}{R^2 + A^2} \left(\chi(1-H) - R + \frac{(R^2 + A^2) \cos^{-1} \frac{R^2 - A^2}{R^2 + A^2}}{2A} \right), \text{dacă } H < H_{lim} \\ P_{el_{F2}}(H) = \frac{G}{R} \left(\chi(1-H) - R + \frac{\pi \cdot R + 2X}{2} \right) \text{dacă } H > H_{lim} \end{cases} \quad (4.6)$$

unde:

$$H_{lim} = \chi - \frac{2R^3}{3(1-R^2)} \quad (4.7)$$

$$A = \sqrt[3]{P + \sqrt{R^6 + P^2}} + \sqrt[3]{P - \sqrt{R^6 + P^2}} \quad (4.8)$$

unde:

$A = a/r_e$ – înălțimea adimensională a calotei sferice

$R = r_i/r_e$ – raza adimensională a pistonului inelar

$X = x/r_e$ – extensia axială adimensională a membranei

$P = 3\chi(1-H)(1-R^2)$ – factor de calcul

5. EXPERIMENTE CVAASI-STATICE ȘI COMPARAȚII CU PREDICȚIILE TEORETICE

Modelele experimentale realizate au fost folosite pentru evaluarea funcțională și determinarea parametrilor principali la comprimarea cu viteză constantă (condiții cvasi-statice de încărcare). Experimentele au fost realizate pe o mașină de tracțiune-comprimare Zwick/ Roell Z010, adaptată corespunzător.

Principalele obiective ale acestor experimente au fost:

- Evaluarea funcțională a ansamblului și verificarea etanșeității dispozitivului.
- Determinarea contribuțiilor fiecărei componente pentru generarea forței de reacțiune la comprimare.
- Determinarea presiunii fluidului din alveola la diferite nivele de comprimare.
- Determinarea aproximativă a formei deformate a membranei umflate într-o secțiune radială.

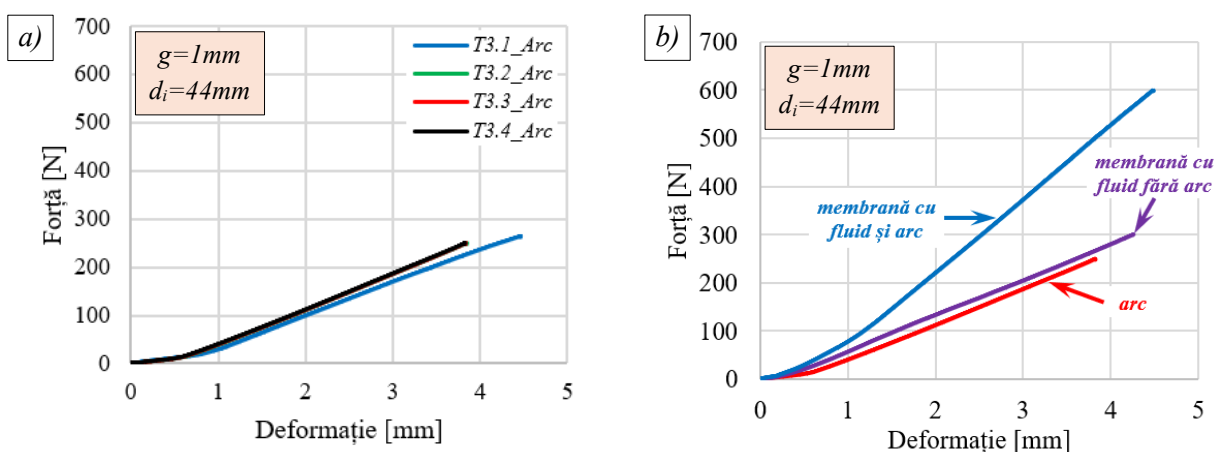


Figura 10. Caracteristica componentelor separate a) Arc b) Membrana cu fluid și arc

Pentru determinarea contribuției fiecărui mecanism de reacțiune, au fost efectuate comprimări în regim cvasi-static, până la valori ale comprimării ce nu depășesc limita de solidificare a materialului poros, pentru următoarele configurații:

- Arc lamelar – caracteristica obținută este prezentată în Fig. 10.a.
- Stratul de material poros uscat – v. Fig. 5.
- Alveola umplută cu fluid (fără stratul poros) și etanșată cu membrana elastica v. Fig. 10.b.
- Dispozitivul complet – v. Fig. 12.

Rezultatele, mediate pentru un număr de 5 experimente succesive, sunt prezentate în Fig. 11, de unde se observă că prin însumarea efectului celor 3 componente rezulta o forță de reacțiune sensibil mai redusă decât cea determinată pe dispozitivul complet, ceea ce ne conduce la concluzia că această diferență o reprezintă efectul expulzării fluidului din stratul poros (efectul XHPD).

O a doua campanie de experimente a fost destinată măsurării presiunii și deformației membranei. În acest scop, dispozitivul a fost prevăzut cu o priză de presiune în zona superioară a alveolei unde este conectat un traductor de presiune ale cărui semnale sunt preluate de un sistem de achiziții de date prin intermediul unei aplicații LABVIEW. Priza de presiune se folosește și pentru umplerea finală și aerisirea dispozitivului. În Fig. 12 este ilustrat aranjamentul experimental folosit.

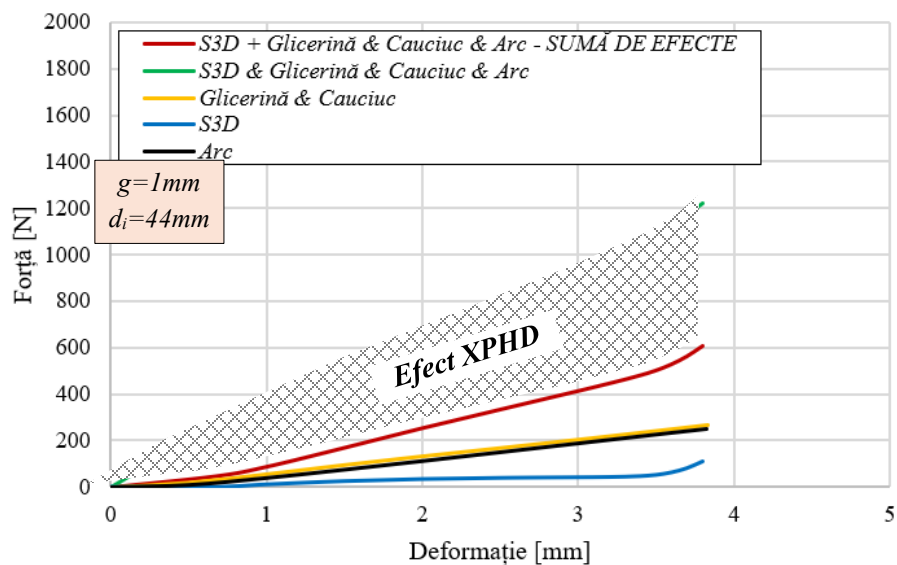


Figura 11. Caracteristicile forta-deformatie individuale si combinate

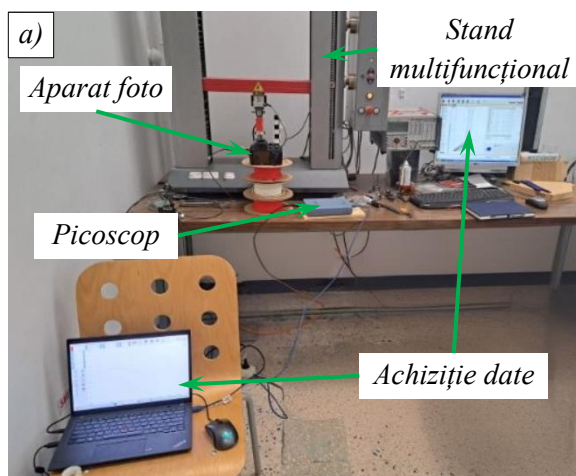


Figura 12. Aranjament experimental a) Imagine de ansamblu b) Detaliu dispozitiv

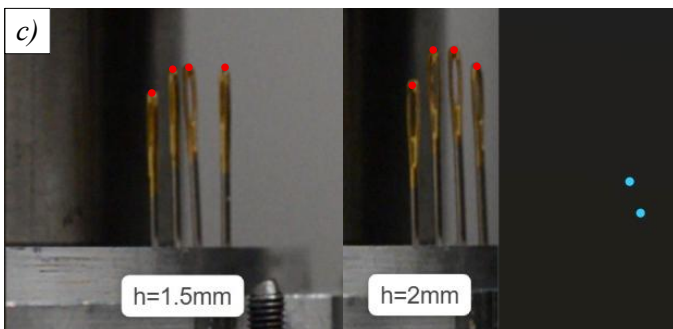
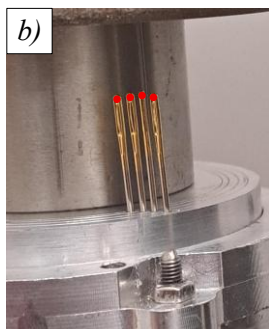
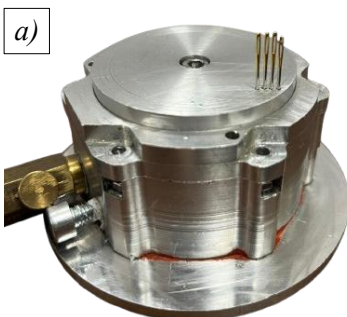


Figura 13. Aranjamentul experimental pentru determinarea deformației membranei a)Pini in-situ b)Poziția inițială a pinilor c)Măsurătoare deformație membrană pentru $\Delta h=1,5mm$ și $\Delta h=2mm$

Pentru determinarea deformației membranei s-au realizat 4 orificii cu diametrul de 1mm in zona de umflare a membranei, în care s-au plasat pini calibrați de 0.9mm (Fig. 13.a). Prin filmarea capetelor pinilor in timpul

comprimării și analiza imaginilor la diferite nivele de comprimare s-au obținut informații privind forma deformată a membranei (Fig. 13.b-c). Rezultatele experimentale brute au fost prelucrate urmărind în primul rând repetabilitatea și precizia măsurătorilor.

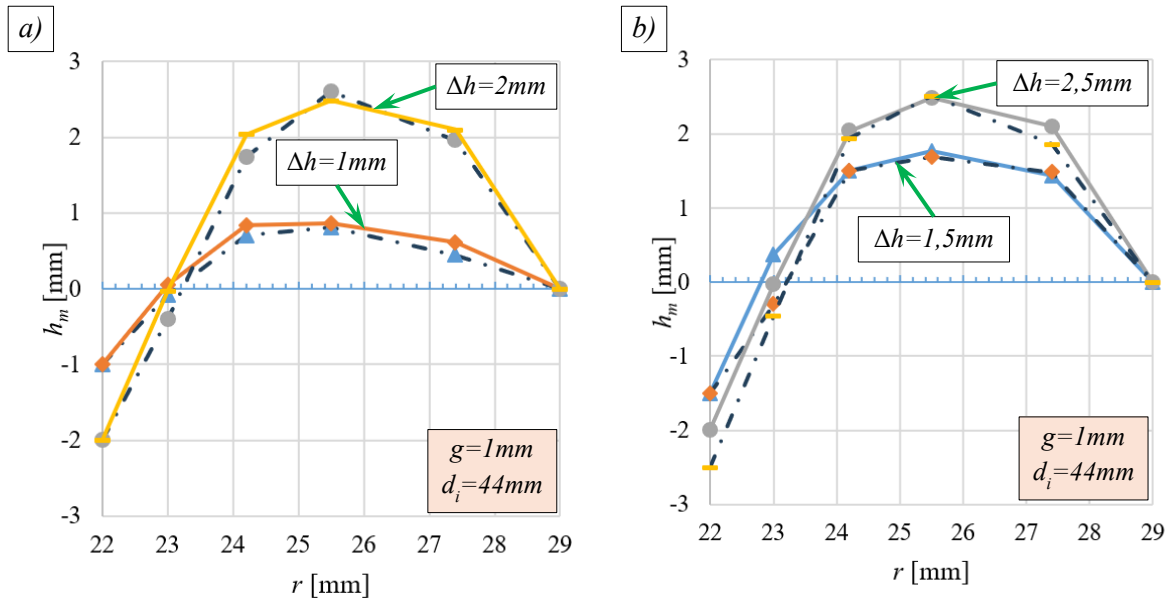


Figura 14. Forma deformată a membranei de grosime $g=1\text{mm}$ în două experimente succesive a) $\Delta h=1\text{mm}$ și $\Delta h=2\text{mm}$ b) $\Delta h=1.5\text{mm}$ și $\Delta h=2.5\text{mm}$

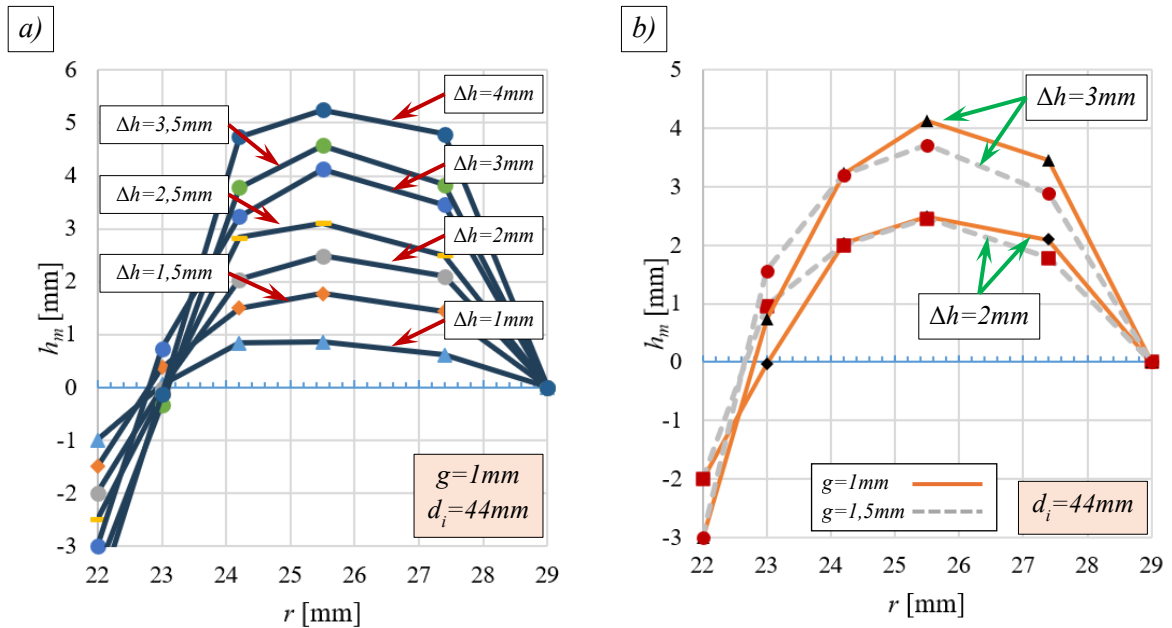


Figura 15. Forma deformată a membranei: a) $g=1\text{mm}$, la 7 experimente progresive; b) Analiză comparativă $g=1\text{mm}$ vs. $g=1.5\text{mm}$ pentru $\Delta h=2\text{mm}$ și $\Delta h=3\text{mm}$

În Fig. 14 este ilustrată forma deformată la 4 valori diferite ale deplasării pistonului, obținută în două teste succesive, realizate cu membrana de grosime $g=1\text{mm}$. Se observă, pe de o parte, justețea aproximării cu o formă circulară în modelul teoretic, iar pe de altă parte, repetabilitatea acceptabilă a valorilor obținute. Pentru a avea o imagine completă asupra formei deformată, aceasta este reprezentată în Fig. 15a pentru tot intervalul de nivele de

comprimare testate cu membrana de grosime $g=1\text{mm}$ și pistonul cu diametrul $d_i=44\text{mm}$. Din comparația a doua teste efectuate cu membrane de grosimi diferite (Fig. 15 b) se observă că forma deformată este aproape identică la aceeași comprimare, ceea ce este de așteptat având în vedere că deformația depinde doar de volumul de fluid expulzat. Un al doilea parametru de interes măsurat în cadrul experimentelor cvasi-statice a fost presiunea fluidului. Valorile obținute pentru cele două grosimi de membrană sunt reprezentate în Fig. 16.

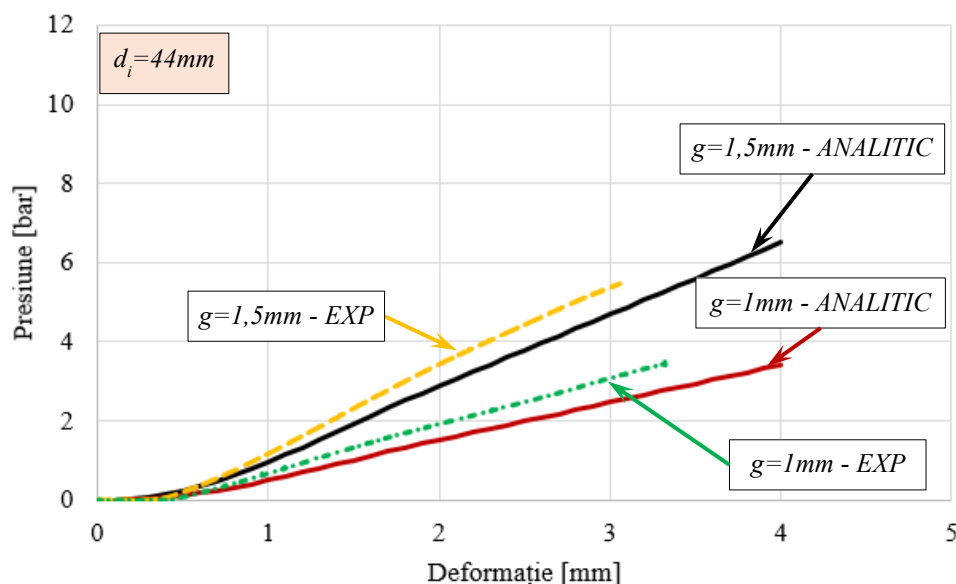


Figura 16. Variația presiunii cu deformația: Experimental vs. Analitic

6. EVALUAREA SOLUȚIILOR DE TESTARE DINAMICĂ

Testarea amortizoarelor din elastomeri sau alte materiale visco-elastice se bazează în general pe determinarea unor proprietăți dinamice esențiale: factorul de pierdere, factorul de amplificare la rezonanță etc. în condiții controlate, cu scopul de a le corela cu proprietățile materialului. Caracterizarea răspunsului cu amortizare (histerezis) sau atenuare permite evidențierea dependenței de frecvența vibrației, amplitudinea, sau mărimea pre-încărcării. Pentru validitatea rezultatelor, se impune utilizarea unor dispozitive reprezentative, construite special pentru punerea în valoare a proprietății materialelor de amortizare/atenuare. Evaluarea performanțelor se face prin măsurători de deplasare, forță, și fază, asigurând o evaluare comparabilă și reproductibilă a performanței.

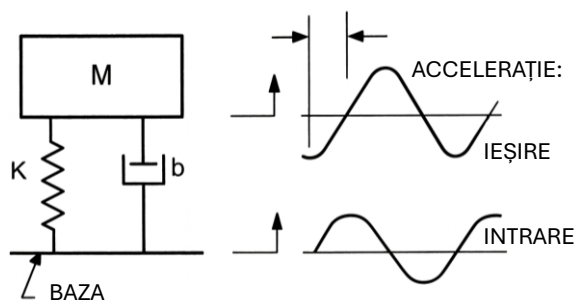


Figura 17. Modelul sistemului masă rezonantă cu excitație la bază pentru analiza de reducere a datelor

Metodele experimentale consacrate¹ includ **testele în rezonanță** cu vibrații forțate sau libere, **testele non-rezonante** cu excitație sinusoidală și, în mod particular, **metoda masei rezonante** cu excitație la bază, considerată în literatură ca fiind cea mai versatilă și mai puțin susceptibilă la erori de instrumentație. Din metodele enumerate, pentru prezentul proiect a fost selectată pentru testarea dispozitivelor **metoda masei rezonante cu excitație la bază**. Această procedură presupune montarea specimenului între o masă rigidă (Fig. 17), cu proprietăți dinamice bine caracterizate, și o bază supusă unei excitații controlate. Metoda permite testarea pe o gamă largă de frecvențe și condiții de mediu. Complexitatea montajului cu scopul alinierii componentelor este ridicat, iar orice nealiniere între dispozitiv, masă și sursa de excitație poate distorsiona răspunsul măsurat.

Pentru testele la vibrații în cadrul proiectului a fost utilizat un stand experimental (shaker) Dongling ES-3-230. Acesta este un dispozitiv cu acționare electrodinamică (electromagnetică), conceput pentru a genera excitații vibraționale controlate sau de tip șoc prin intermediul unei mese mobile.

Condițiile de operare ale standului experimental sunt următoarele:

- Forță de excitație maximă: pentru vibrații sinusoidale/aleatorii 3kN, pentru șocuri 6kN;
- Viteză maximă: 1,5 m/s;
- Accelerație maximă: 350 m/s;
- Deplasare maximă (peak-to-peak): 51 mm;
- Greutate maximă pe masa mobilă: 300kg;
- Alte funcționalități standard: suportă teste de tip sinusoidal, aleatoriu și șoc, este răcit cu aer.

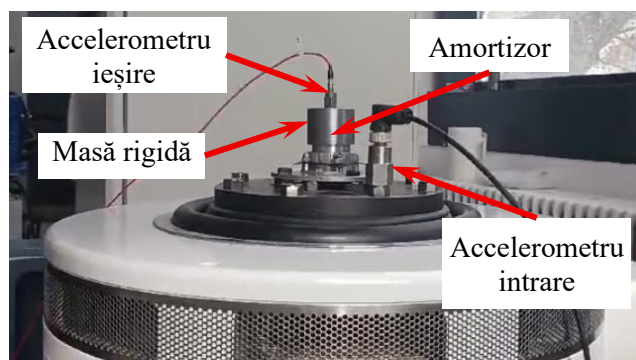


Figura 18. Testare pe shaker a dispozitivului experimental

Pentru testarea demonstratorului în configurația masei rezonante cu excitație la bază (Fig.18) au fost proiectate și fabricate elementele de prindere necesare: suporturile pentru fixarea amortizorului pe masa mobilă a shakerului, elemente de prindere pentru masa rigidă, precum și alte elemente auxiliare de montaj (pentru prinderea accelerometrelor de masa rigidă în vederea măsurării accelerației la ieșire.)

Rezultatele experimentale preliminare au arătat că amplasarea masei în poziție superioară, sprijinită pe un singur amortizor (elastomer sau dispozitivul experimental), conduce la instabilitatea sistemului, astfel că această soluție constructivă a fost abandonată. Pentru a elimina neajunsurile observate la aranjamentul anterior, s-a optat pentru un aranjament de **masă rigidă așezată pe patru amortizoare generice**. O serie mai extinsă de teste a fost realizată pentru a studia stabilitatea și capacitatea de excitație a shaker-ului în aceste condiții cu o masă rezonantă semnificativ mai mare (>4kg). Definirea procedurii experimentale și selecționarea condițiilor de testare (frecvența, amplitudinea) s-a făcut prin teste preliminare cu sprijinirea pe un suport rigid (fig.19.a), urmată ulterior de sprijinirea pe un set de 4 amortizoare generice, cilindrice din cauciuc (fig.19.b). Experimental s-a dovedit că acest aranjament este fezabil și masa rigidă poate fi crescută simplu prin adăugarea unor plăci suplimentare fără a afecta stabilitatea,

¹ M. Darlow and E. Zorzi, Mechanical Design Handbook for Elastomers, NASA CR-3423, Volumul 3423 din NASA contractor report

cu asigurarea unei distribuiri egale a greutateii pe cele patru puncte de sprijin. Rezultatele preliminariei au evidențiat că plasarea masei rigide pe patru amortizoare, într-un aranjament aproximativ axial-simetric, este mult mai stabilă.

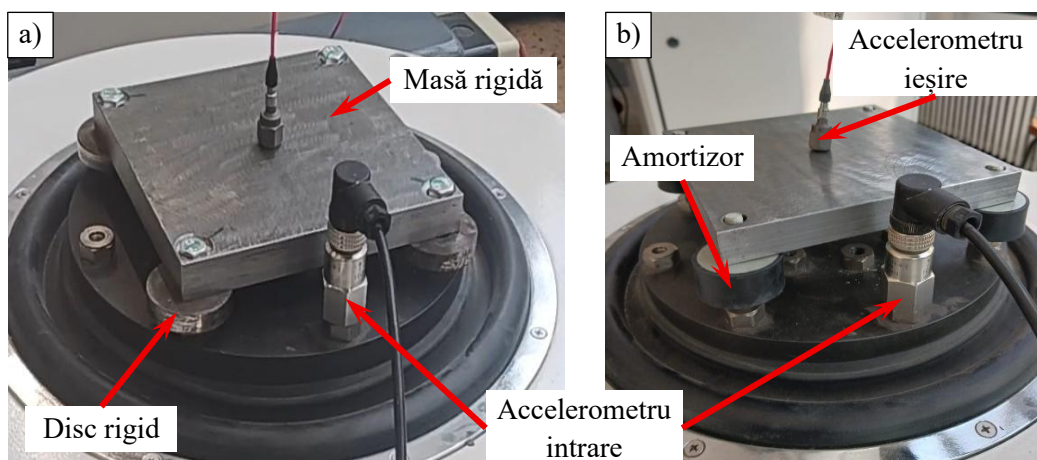


Figura 19. Masa rezonantă: a) Sprijinită pe 4 suporti rigizi; b) Sprijinită pe 4 amortizoare din elastomeri

S-a pus în evidență și o limitare în cea ce privește frecvențele maxime care pot fi atinse, determinată de masa totală pe care shakerul trebuie să o deplaseze în aceste condiții. În fig. 20 sunt ilustrate rezultate preliminariei pentru sprijinirea pe amortizoare generice folosind un spectru larg de vibrații 5-150Hz. Evaluarea răspunsului la vibrații a fost realizată prin compararea vibrației generate de shaker cu răspunsul structurii, măsurat cu un accelerometru montat centrat și într-o poziție superioară pe placa de încărcare. Rezultatele din Fig. 20 arată că până la frecvența de rezonanță (aprox. 100Hz) structura rămâne stabilă, iar masa este susținută uniform pe cele 4 puncte de sprijin, fără apariția unor fenomene aleatorii. Acest comportament confirmă că sistemul poate fi utilizat pentru punerea în evidență a proceselor specifice dispozitivelor care urmează să fie testate.

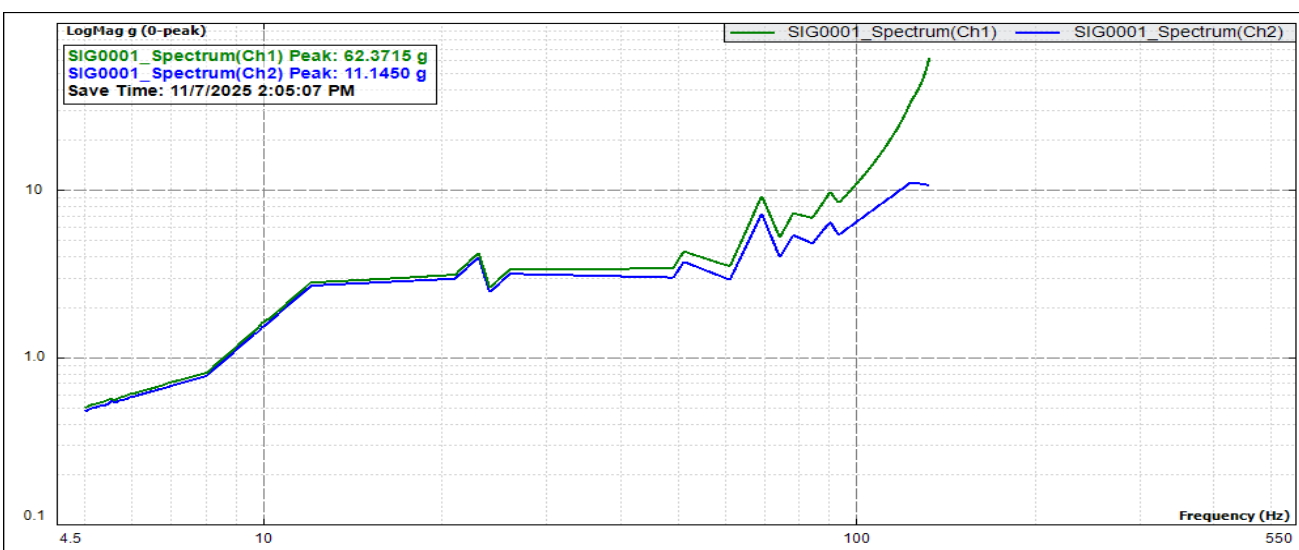


Figura 20. Rezultate preliminare pentru evaluarea capacității de amortizare pe Shaker folosind un spectru larg de frecvențe (5-150Hz)

7. CONCLUZII

Studiile teoretice și experimentale din această primă etapă a contractului au acoperit, și uneori, chiar depășit obiectivele propuse.

Pe latura teoretică au fost analizate comparativ materialele candidate pentru componentele active ale dispozitivului (stratul poros, fluidul îmbibat, membrana) și au fost determinate proprietățile de interes ale acestora. În paralel, au fost analizate metodele de evaluare experimentală a comportării amortizoarelor în condiții dinamice, concluzionând că o primă campanie de experimente trebuie realizată pe generatorul de vibrații (shaker) pe amortizoare generice.

Au fost, de asemenea, proiectate componentele și realizată metodologia pentru experimentele dinamice care vor fi realizate la începutul celei de-a doua etape a proiectului.

Activitatea teoretică a inclus și o dezvoltare a soluțiilor constructive posibile pentru dispozitivul care păstrează principiul de funcționare propus, astfel că, printr-o analiză comparativă tehnologică și funcțională, s-au definit cele două variante pentru care vor fi dezvoltate dispozitive demonstratoare a căror funcționare va fi simulată teoretic și evaluată experimental.

Un al doilea vector de dezvoltare teoretică a fost orientat spre modelarea deformației membranei și a evoluției presiunii în condiții cvasistatice (la comprimarea cu viteză constantă). Pe baza unui pachet de ipoteze simplificatoare sunt propuse modele simple, cu soluție analitică, pentru calculul formei aproximative a membranei deformate și a presiunii generate la un anumit nivel de comprimare. Soluțiile propuse, în formă adimensională, permit o dimensionare rapidă și elegantă a dispozitivului, precum și optimizarea dimensională în funcție de încărcarea axială maximă.

Pe plan experimental, eforturile au fost îndreptate spre realizarea mai multor modele experimentale, în două variante constructive diferite (fiecare variantă având, la rândul său, două dimensiuni diferite) care au fost instrumentate cu un traductor de presiune și un sistem de măsurare a deformației radiale a membranei. Testele s-au rezumat la funcționarea în regim cvasi-static pentru diferite dimensiuni ale pistonului, respectiv ale grosimii membranei. Rezultatele au fost comparate cu cele prezise teoretic, diferențele dintre acestea fiind în limite acceptabile. Pentru apropierea modelului de simulare de rezultatele experimentale a rezultat necesitatea rafinării ipotezelor modelului.

O a doua direcție de analiza experimentală a fost focalizată pe demararea testelor dinamice exploratorii pe shaker. Pentru început, a fost analizată comportarea dispozitivului, iar pe baza primelor concluzii acesta a fost îmbunătățit prin includerea unui arc lamelar cu o construcție particulară, care să fixeze pistonul în mișcarea de revenire și să amplifice efectul de atenuare.