

Universitatea Politehnica din București

Contract CNCSIS IDEI 98/01.10.2007

Cod CNCSIS ID_912

**PROCESE DE LUBRIFICAȚIE ÎN STRATURI POROASE, FOARTE COMPRESIBILE,
SUPUSE LA SARCINI DE IMPACT**

2007 - 2010

SINTEZĂ FINALĂ

Director

Prof. dr. ing. Mircea D. PASCOVICI

Echipa de cercetare

Prof. dr. ing. Traian CICONI

S.l. dr. ing. Victor G. MARIAN

Drd. ing. Cristian S. POPESCU

Drd. ing. Maria-Brîndușa ILIE

Drd. ing. Alex-Florian CRISTEA

Drd. ing. Christian RUSSU

Prezentul Grant a avut ca obiectiv aprofundarea studiilor **lubrificației ex-poro-hidrodinamice (XPHD)** în condiții de **încărcare prin impact/șoc**. Acest mecanism original de lubrificație autoportantă care are loc în medii extrem de compresibile și poroase, îmbibate cu un fluid/lubrifiant a fost sesizat și analizat, în mod independent, de profesorul Pascovici de la UPB și profesorul Weinbaum de la City University din New York. **În esență, este vorba de curgeri într-un mediu poros a cărui fază solidă, reprezentată de fibre¹, induce forțe elastice de compresiune neglijabile, în comparație cu forțele de presiune hidrodinamice generate în interiorul mediului (stratului) poros.** La baza explicației fenomenului XPHD stă următoarea succesiune de corelații: variația grosimii stratului în spațiu sau timp, conduce la variația porozității și deci a permeabilității, lucru ce generează în final un câmpului de presiuni staționar, sau variabil în timp.

Printre aplicațiile întrevăzute până acum se enumără: pompe de viscozitate, lagăre axiale, circulația eritrocitelor în microcapilare, articulațiile umane naturale sau protezate, schiatul pe zăpadă afânată sau pe materiale sintetice, trenurile de mare viteză, amortizoare de socuri.

Cea mai elocventă sinteză a activitatilor desfășurate pe parcursul celor 3 ani de derulare a activitatilor la acest proiect poate fi efectuată prin prezentarea **Obiectivelor** și a **Metodologiei** propuse în urma cu peste 3 ani în paralel cu realizările raportate.

OBIECTIVE Propuse și realizate

Principalele obiective ale proiectului așa cum au fost definite la momentul depunerii propunerii, au fost îndeplinite fără excepții, după cum urmează:

Obiectivul 1. Studiul teoretic, analitic și numeric, al amortizării în condiții XPHD a sarcinilor cu caracter de impact (șoc), de configurații diferite, axial-simetrice.

În cadrul acestui obiectiv a fost analizat procesul de expulzare pentru diferite configurații plane (circulare, înelare, dreptunghiulare) și sferice, după cum urmează:

1.1. Modelarea analitică a procesului de expulzare prin impact în straturi poroase foarte compresibile, pentru contacte de configurație circulară cu simetrie axială (disc rigid/suprafață poroasă puternic deformabilă, îmbibată cu fluid) – Fig. 1 (2007).

S-au abordat succesiv două situații practice, definite prin două condiții la limita diferite:

- (i) condiții la limita restransă adică la frontiera contactului disc/suprafața poroasă presiunea fluidului este nulă ($p=0$ la $r=R$);
- (ii) condiții la limita extinse adică la frontiera contactului suprafeței poroase presiunea este nulă ($p=0$ la $r=R_e$).

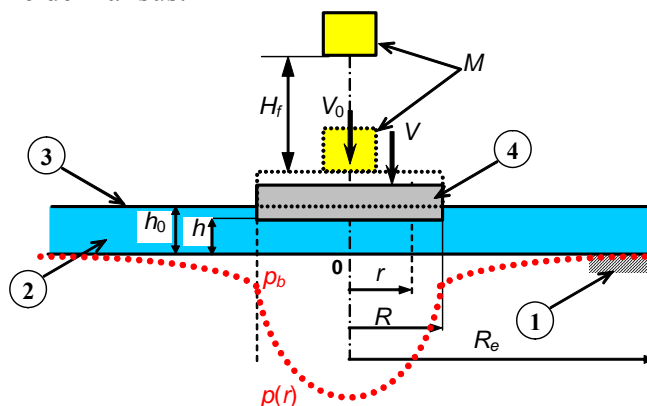
1.2. Modelarea analitică a procesului de expulzare prin impact în straturi poroase foarte compresibile, pentru contacte de configurație rectangulară cu condiții la limita restransă.

¹ de ex. materiale textile neșesute, de tipul păslei sau a lavetelor; zăpada proaspăt căzută; puful păsărilor; straturile endotheliale de glycocalyx ce căptușesc vasele sanguine, în special capilarele; cartilajul articular; etc.

(placa dreptunghiulara rigida/suprafata poroasa puternic deformabila, imbibata cu fluid) – (2008).

Aceasta problema a fost rezolvata atat analitic, pentru cazul simplu al configuratiei patrate cat si numeric, cu metoda diferentelor finite. Dezvoltarea acestei metode va permite in viitor analiza unor configuratii mai complexe pentru care nu permit solutii analitice (suprafete nealiniate, suprafete neplanare, etc.). In acest sens au fost realizate analize numerice de precizie si multiple comparatii cu solutiile analitice pentru cazurile de mai sus.

Fig. 1. Geometria configurației suprafeții plane circulare rigida/strat poros deformabil



1.3. **Procesul de expulzare prin impact în straturi poroase foarte compresibile, pentru contacte de configurație inelară (configurații plane).** Pentru aceasta configurație s-a pus în evidență un coeficient de corecție care intervine în formulele dezvoltate pentru suprafețe circulare pline. – (2009).

1.4. **Impactul unei sfere rigide asupra unui strat poros, puternic compresibil, îmbibat cu un fluid Newtonian.** (sfera rigida/suprafata poroasa puternic deformabila, imbibata cu fluid). – (2008, 2010)

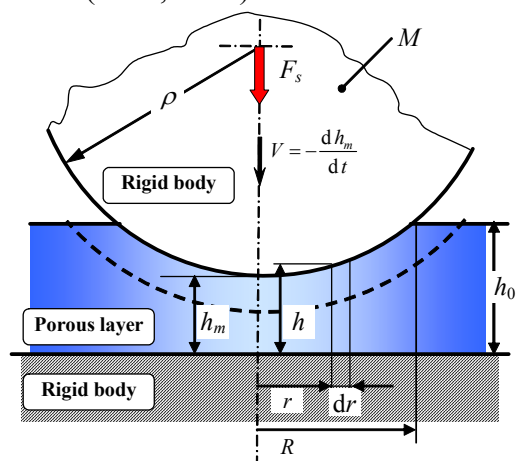


Fig. 2 Geometria configurației sfera rigida/strat poros deformabil

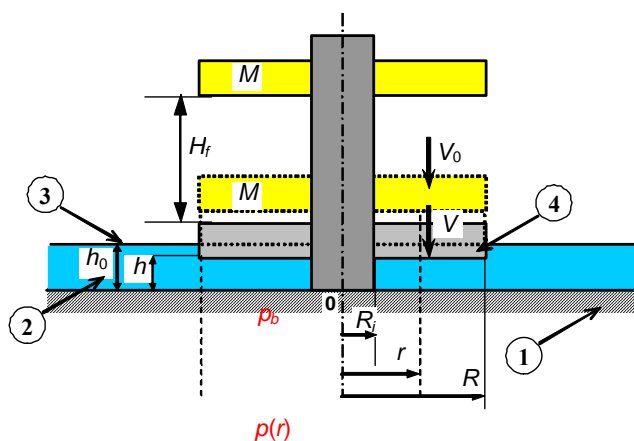


Fig. 3 Geometria configurației plane inelare

În cazul acestui model, s-au obținut soluții analitice simplificate, prin simplificări matematice uzuale (dezvoltarea în serie a unui logaritm). Într-o abordare ulterioară (2010), s-a analizat precizia acestor simplificări utilizând un model numeric bazat pe metoda diferențelor finite ce rezolvă mai riguros problema expulzării la impact în condițiile lubrificației XPHD pentru contactul sferă-plan. Pentru validarea preciziei acestora s-au elaborat programe de calcul numeric bazate pe metoda diferențelor finite. S-au stabilit limitele de aplicabilitate a ipotezelor simplificatoare. *Rezultatele au făcut obiectul unei prezentări la Conferința Internațională de Tribologie ROTRIB '10.*

În toate aceste abordări analiza s-a efectuat pentru trei cazuri de încărcare posibile:

- (a) mișcare cu viteză constantă $V=ct$.
- (b) încărcare cu forță constantă, $F=ct$.
- (c) încărcare cu impuls constant $M \cdot V=ct$ (*expulzare prin impact*).

S-au obținut soluții analitice pentru variația grosimii filmului în timp, respectiv variația forței de expulzare în funcție de grosimea filmului. Pe baza modelelor analitice s-au efectuat analize parametrice care au pus în evidență **existența și localizarea unei permeabilități optime pentru minimizarea forței maxime de expulzare**, caracteristică esențială pentru amortizarea șocurilor. De asemenea, la configurația 1.1., s-a evidențiat **efectul foarte important de reducere a forței maxime de expulzare în cazul condițiilor la limită extinse**.

În cadrul aceluiași demers teoretic s-a analizat aplicabilitatea utilizării soft-ului comercial FLUENT în modelarea unor probleme de curgere prin medii poroase puternic deformabile (deci cu porozitate variabilă) – (2007). Rezultatele obținute sunt promițătoare dar nu sunt pe deplin edificatoare, având în vedere implementarea restrictivă a legilor constitutive ale mediilor poroase. Soluția propusă, de scrierea de subrutine în cadrul FLUENT, extrem de complicată și care necesită resurse de timp extrem de mari, nu a mai fost aplicată în continuare, preferându-se de fiecare dată scrierea unui cod propriu într-un limbaj de programare standard (FORTRAN în majoritatea cazurilor).

Obiectivul 2. Studiul experimental de validare a modelelor menționate la obiectivul (1).

Activitățile experimentale s-au desfășurat pe mai multe planuri situație impusă de originalitatea subiectului abordat.

(a) Experimente destinate caracterizării permeabilității materialelor posibil de utilizat

Încercările au fost efectuate pentru două categorii de materiale textile (țesute și nețesute) pe două standuri dedicate realizate prin eforturi proprii (nu există metode experimentale standardizate pe plan mondial). Ambele standuri au fost concepute pentru evaluarea permeabilității la curgere în condiții statice: primul stand, cu curgere longitudinală radială, (axial-simetric) a fost dedicat materialelor nețesute, Fig. 4a (2008). Cel de-al doilea stand unidirecțional (2009) este dedicat materialelor țesute, Fig. 4b. Principiul de evaluare a permeabilității este același, respectiv măsurarea debitului de fluid ce traversează materialul poros la presiune constantă obținută gravitațional.

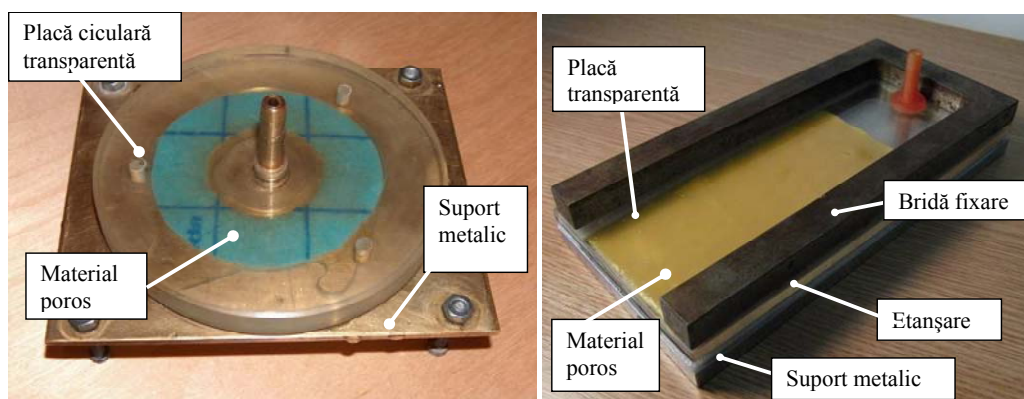


Fig. 4 Componentele principale ale standurilor de curgere longitudinală – a. axial-simetric; b. unidirecțional

La standul unidirecțional s-au îmbunătățit condițiile de alimentare prin utilizarea unei pompe peristaltice și s-au pus în evidență, prin soluții originale de vizualizare a curgerii, fenomene de instabilitate menționate în literatura de specialitate („fingering”). Au fost testate mai multe tipuri de materiale poroase țesute și nețesute considerând presiuni diferite și grosimi diferite de material.

Rezultatele experimentale sunt comparate cu funcțiile de variație ale permeabilității cuprinse în modelele teoretice, iar corelarea cu acestea este bună, Fig. 5. *Rezultatele au fost prezentate în parte la Simpozionul Leeds-Lyon– Sept. 2009.*

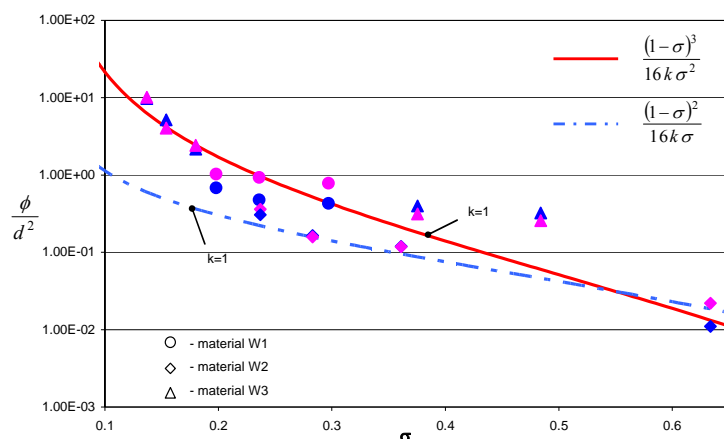


Fig. 5 Permeabilitatea statică în funcție de compactitate (punctele experimentale sunt obținute pentru materialele țesute)

- (b) *Investigarea capacității de amortizare a șocurilor prin amprentare în condițiile folosirii unor corpuri sferice / bile lansate gravitațional (2008)*, realizată pe un dispozitiv original compus dintr-un cilindru susținut de un suport metalic în interiorul căruia este poziționat ansamblul ce preia șocul, Fig. 6. Amprentarea se face prin căderea liberă a unei bile de la o anumită înălțime pe ansamblul de preluare a șocului.

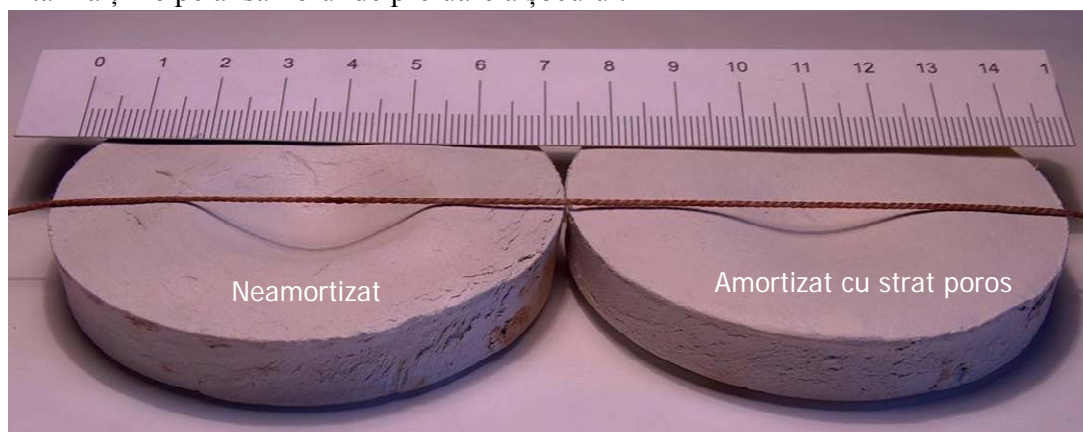


Fig. 6 Evaluarea amortizării prin procesul de amprentare

Experimentele au fost efectuate prin două metode:

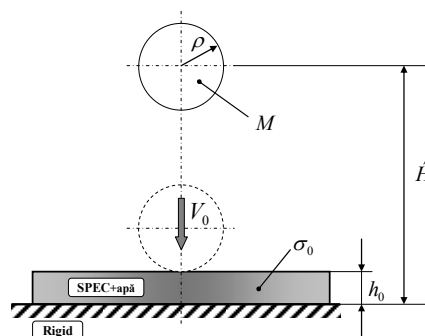
- (i) cu amprenta lasată pe pastă de modelare.
- (ii) cu folosirea filmelor foto sensibile la presiune.

Evaluările au permis o estimare a amortizării de aproximativ 50%. De asemenea, s-a încercat determinarea distribuției de presiuni utilizând tehnologia *Prescale Measurement Pressure Film* de la *FujiFilm* cu care se poate măsura presiunea local putând astfel să fie creată o distribuție globală a presiunii. Cu toate că încercările la șoc sunt procese dinamice, trebuie precizat că experimentele efectuate au fost realizate cu șoc unic, deoarece măsurarea presiunilor cu acest film exclude încercarea la șocuri multiple. Dificultățile de control a preciziei rezultatelor obținute au condus la limitarea acestei categorii de experimente.

- (c) *Investigarea capacității de amortizare a șocurilor în condițiile folosirii unor corpuri sferice / bile lansate gravitațional - filmare ultra rapidă la Poliethnica București (și la Universitatea din Poitiers (Franța) - 2009*

Investigarea capacității de amortizare a straturilor poroase extrem de compresibile, îmbibate cu un fluid newtonian, a fost realizată prin efectuarea unui test de impact cu bile lansate gravitațional, Fig. 7, pentru: determinarea înălțimii maxime la care energia bilei a fost absorbită în totalitate respectiv determinarea poziției bilei pe durata impactului. În ambele experimente s-au testat materiale poroase nețesute îmbibate cu apă. Primul experiment s-a realizat utilizând aparatul cu filmare rapidă Casio Exilim Pro EX-F1 (1200 poziții pe secundă), achiziționat în cadrul proiectului, iar cel de-al doilea experiment a fost realizat în cadrul “Laboratorului de Mecanica Solidelor” (LMS), al Universității din Poitiers, cu o cameră de filmare rapidă la 6000 cadre/secundă.

Fig. 7 Configurația testului de impact cu bile lansate gravitațional



(d) *Investigarea capacității de amortizare în condiții XPHD, pentru suprafețe circulare plane și contacte sferice, pe un stand dedicat (CETR-UMT-2) – (2009)*

Utilizând standul tribologic CETR-UMT-2 s-a analizat procesul de expulzare la viteză constantă pentru două configurații (circulară plană, respectiv sferică), Fig. 8, utilizând trei materiale și doi lubrifianți (apă respectiv ulei SAE20W50 la temperatura de 25C°). Experimentele în cazul configurației circulare plane au permis determinarea permeabilității dinamice pe baza modelului Kozeny-Carman (K-C) respectiv pe baza unui model original propus, Pseudo Kozeny-Carman (PKC). Rezultatele obținute sunt în bună concordanță cu cele obținute prin procedeele de la obiectivul 1 și 2 și au fost prezentate la Simpozionul Leeds-Lyon – sept. 2009, iar ulterior prezentate în cadrul unei lucrări ce este în curs de publicare la Tribology International.

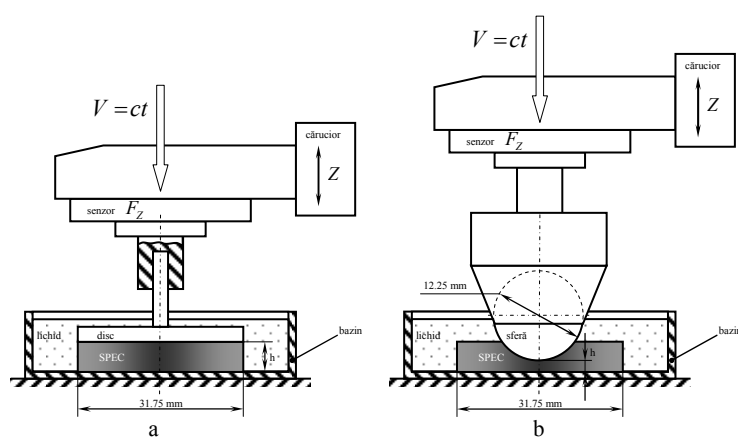


Fig. 8 Configurația pentru expulzare la viteză constantă,

(a) **cazul suprafețelor plane circulare,**

(b) **cazul suprafețelor sferice**

Obiectivul 3. Aplicarea rezultatelor de la obiectivelor (1) și (2) pentru realizarea unor amortizoare de șoc XPHD cu următoarele destinații potențiale: echipament sportiv și/sau de protecție, componente pentru protezare articulară și roboți antropomorfi evoluți. – (2009)

În cadrul acestui obiectiv cea mai importantă realizare este depunerea cererii de brevet de invenție intitulat „Procedeu și dispozitive pentru amortizarea șocurilor realizate pe baza lui”

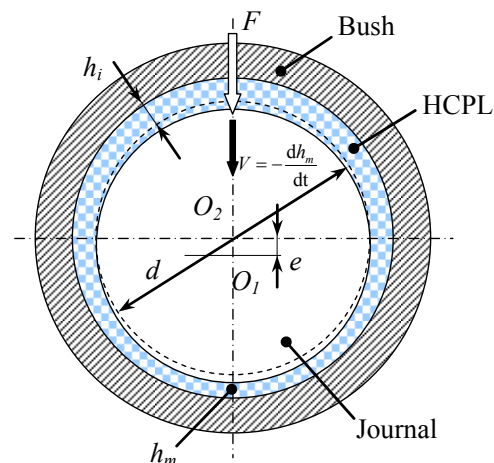
depus la OSIM cu nr. AP/00548 din 15-07-2009 (Titulari M.D. Pascovici, C.S. Popescu și P. Andronache).

Obiectivul 4. Inițierea studiilor teoretice și experimentale dedicate unor extensii ale amortizoarelor XPHD pentru configurații diferite celor da la obiectivul (1): multistrat (2009), suprafețe cilindrice (2010), etc.

(a) Pe plan teoretic s-au analizat doua configuratii de mare interes:

- *configuratia multistrat*, Fig. 2, prin modelarea *procesului de expulzare prin impact în straturi poroase foarte compresibile, pentru suprafețe circulare plane multiple*. In acest caz se demonstreaza imediat ca, daca nu se ia in considerare masa inelelor rigide, forta portanta a z inele inseriate este suma algebrica a fortei pentru o pereche de inele.
- *configuratia cilindrica aliniata*, Fig. 9. In cadrul acestui subiect au fost realizate mai multe analize pe doua modele:
 - i. *modelul amortizorului XPHD cilindric ingust*. In acest caz au fost analizate doua ipoteze simplificatoare, ipoteza *excentricitatii reduse*, respectiv, ipoteza *compactitatii reduse*, ambele conducand la solutii analitice compacte. In paralel, a fost evaluate aceste simplificari prin compararea cu rezultate obtinute prin metode numerice, fara impunerea acestor conditii restrictive.
 - ii. *modelul amortizorului XPHD cilindric de latime finita*. In acest caz au fost posibile doar solutii numerice, bazate pe metoda diferentelor finite.

Fig. 9 Amortizor XPHD cilindric



In cadrul acestui obiectiv s-a studiat teoretic comportarea la impact a unui amortizor XPHD tip bușă care reprezintă o alternativă la amortizoarele hidrodinamice cunoscute sub denumirea de "squeeze film dampers". Studiul teoretic cuprinde un model simplificat pentru amortizorul de latime redusă ("amortizor XPHD îngust") pentru care se poate obține o soluție analitică ce cuprinde unele aproximații. Partea a doua a studiului include modelul mai complex al amortizorului de latime finită, pentru care distribuția presiunii și forța de impact se obțin doar prin rezolvări numerice. Studiul teoretic se încheie cu o analiză comparativă a celor două modele și evidențierea condițiilor de amortizare maximă. Rezultatele obținute au fost prezentate la Simpozionul de Tribologie Leeds-Lyon – Sept. 2010 și respectiv au fost prezentate la Conferința Internațională de Tribologie ROTRIB'10, Nov. 2010.

(b) Analiza experimentală a unor amortizoare cu suprafețe cilindrice aliniată (2010)

Echipamentul experimental a fost achiziționat în vederea testării capacității de amortizare la încercări prin impact a materialelor SPEC (straturi poroase extrem de compresibile) realizate prin

căderea ghidată pe arc de cerc a unei mase controlate. Standul experimental pendular achiziționat a necesitat o serie întreagă de adaptări pentru a putea fi utilizat în scopul menționat anterior,

Au fost concepute, realizate și puse în funcțiune dispozitivele experimentale (2 variante diferite) montate pe standul pendular de încercări prin soc achiziționat în etapa precedentă (2009). S-a conceput și realizat sistemul de achiziție de date care include preluarea semnalelor de la traductoare, condiționarea acestora, precum și înregistrarea lor pe calculator. S-au elaborat procedurile experimentale de achiziție de date și programele aferente în mediul de programare LABVIEW. S-au realizat experimente cu diferite materiale poroase, imbibate cu apă respectiv cu ulei, pentru diferite condiții experimentale definite prin impulsul la impact. Experimentele s-au efectuat pe două configurații de montaj a buclei testate:

- poziționând materialul SPEC între un arbore și o bucă exterioră rigidă, contactul realizându-se pe bucă exterioră;
- poziționând materialul SPEC direct pe un arbore rigid, contactul fiind rigid/material SPEC;

Rezultatele experimentale au fost sistematizate și prelucrate, rezultând concluzii importante privind capacitatea de amortizare a materialelor și lubrifianților studiați. **Rezultatele obținute vor fi prezentate la o conferință internațională de Tribologie din 2011, vor fi publicate într-o revistă cu vizibilitate și vor face parte din teza de doctorat a M.B. Ilie, membra a echipei.**

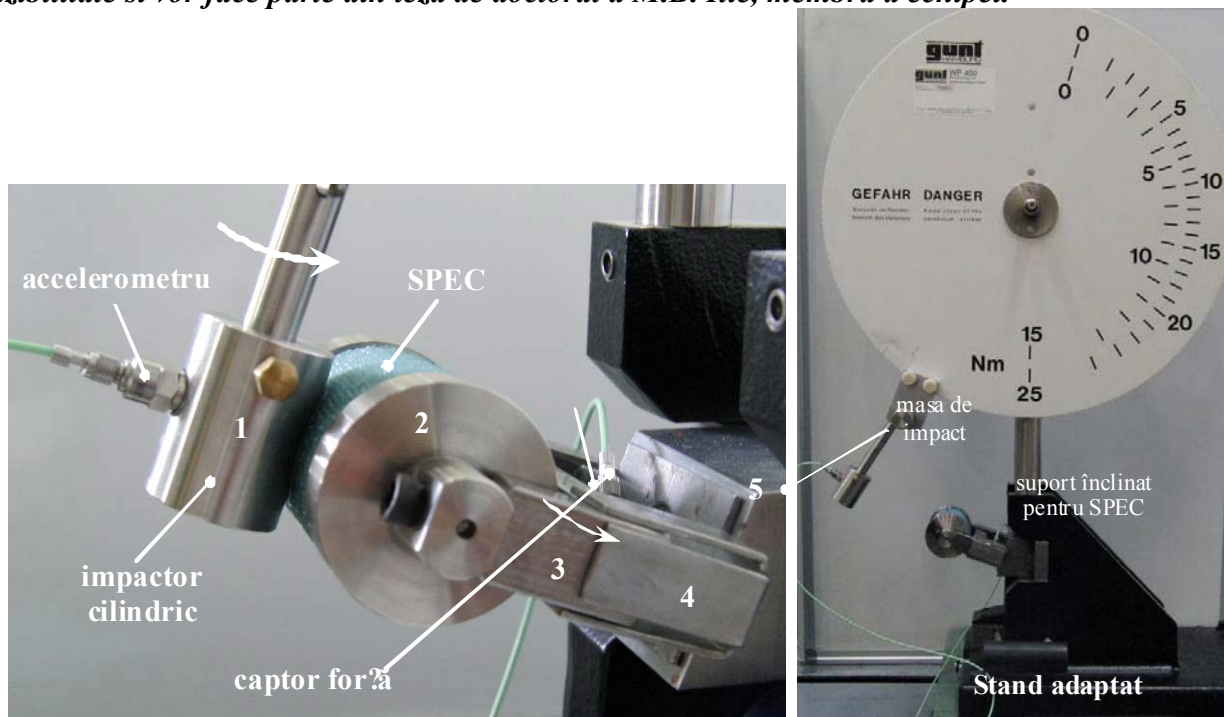


Fig. 10 Standul pendular pentru încercări la soc

Rezultatele analitice obținute asociate cu cele experimentale, demonstrează originalitatea subiectului abordat, complexitatea acestuia, ceea ce permite extensii importante pentru viitor.

REZULTATELE CERCETARII

BREVET

„*Procedeu si dispozitive pentru amortizarea șocurilor realizate pe baza lui*” depus la OSIM cu nr. AP/00548 din 15-07-2009 Titulari M.D: Pascovici, C.S. Popescu și P. Andronache.

PUBLICATII

- Pascovici, M. D., Cicone, T., Marian, V., 2009, *Squeeze process under impact, in highly compressible porous layers, imbibed with liquids*, **Tribology International** 42, 1433-1438. – lucrare prezentată anterior la **NORDTRIB 2008** (13th Symposium on Tribology, 10-13 June 2008, Tampere, Finlanda, Paper on CD).
- Pascovici, M.D., Popescu, C.S. and Marian, V.G., 2009, *Impact of a rigid sphere on a highly compressible layer imbibed with a newtonian liquid*, **4th World Tribology Congress**, Kyoto -6-11 sept. Paper C1-133. – publicată **Proc. IMechE-Part J–J.** of Enging Tribology, 224, 8, 2010).
- C.S. Popescu, 2010, *Dynamic permeability of highly compressible porous layers under squeeze at constant velocity and under impact*, **Tribology International** (acceptata pentru 2010).
- C.S. Popescu, V. Marian, M.D. Pascovici, 2008, *Experimental and theoretical analysis of the permeability for highly compressible porous layers*, **BALKANTRIB'08** 6th Int. Conf. on Tribology, 12-14 June, Sozopol, Bulgaria, Paper BT-64/CD (publicata J. of Balkan Tribology).
- C.S. Popescu, *Numerical Study of Dynamic Loading in ex-poro-hydrodynamic lubrication. 3D Case Study: Human footprint impact over a highly compressible porous layer saturated with water*. **Bul. UPB Seria D** 2010 (acceptata pentru 2010).
- M.B. Ilie, Mircea D. Pascovici and Victor G. Marian, *Squeeze processes in narrow circular damper with highly compressible porous layer imbibed with liquids*, **37th Leeds-Lyon Symposium on Tribology**, 7-10 September 2010, Leeds, in curs de evaluare la **Proc. IMechE- Part J – J.** of Engineering Tribology.
- Pascovici, M.D., Predescu, A., Cicone, T., Popescu, C.S. *Experimental evidence of cavitation effects in a Rayleigh step slider*, **37th Leeds-Lyon Symposium on Tribology**, 7-10 September 2010, Leeds, in curs de evaluare la **Proc. IMechE- Part J – J.** of Engineering Tribology.
- M.D. Pascovici, C.S. Popescu, M.B. Ilie, *Squeeze process in highly compressible porous layer imbibed with liquid*, **36th Leeds-Lyon Symp.**, 1-3 sept. 2009 (invited lecturer M.D. Pascovici).
- M. D. Pascovici V. Marian, C.S. Popescu , 2008, *Impact of A Rigid Sphere on a Highly Compressible Porous Layer Imbibed With a Newtonian Liquid*, **VAREHD '08** 14th Int. Conf. on Tribology, 10-11 oct 2008, Suceava, Romania, Paper 08-11 on CD Proceedings.
- M.B. Ilie, T.Cicone, M.D. Pascovici, *The accuracy of analytical models for squeeze of rigid spheres on highly compressible porous layers imbibed with liquid*, **ROTRIB -10**, nov. 2010.
- Marian, V. G., Ilie, M. B., Pascovici, M. D., *Squeeze under impact in exporohydrodynamic conditions for a finite width circular damper*, prezentată la **ROTRIB -10** - nov. 2010.

TEZE DE DOCTORAT

Doua teze de doctorat realizate de catre membrii echipei au fost finalizate, urmand a fi sustinute in perioada imediat urmatoare.

- **Cristian Sorin Popescu** a finalizat teza de doctorat cu titlul "*Procese de curgere in straturi poroase foarte compresibile supuse la sarcini de impact*". Teza a fost prezentata si aprobata in colectivul Catedrei in luna Iulie si va fi sustinuta public in luna noiembrie.
 - **Christian Russu** a finalizat teza de doctorat cu titlul "*Contributii la reologia si poro-hidrodinamica lubrificatiei*". Teza a fost prezentata si aprobata in colectivul Catedrei in luna septembrie si va fi sustinuta public in luna ianuarie.
- O a 3-a teză de doctorat se va finaliza în decursul anului 2011:
- **Maria-Brîndușa Ilie** se află în derularea programului doctoral având ca teză de doctorat lucrarea „*Capacitatea de amortizare a straturilor poroase, foarte compresibile, îmbibate cu lichide, pentru configurații cilindrice*”. Teza se va finaliza și va fi susținută în 2011.