



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI



**FACULTATEA DE INGINERIE MECANICĂ ȘI
MECATRONICĂ**



CATEDRA DE ORGANE DE MAȘINI ȘI TRIBOLOGIE

Contribuții la elasto-poro-hidrodinamica lubrificației

Contributions to Elasto-Poro-Hydrodynamic Lubrication

Teză de doctorat

REZUMAT

Doctorand

Ing. CHRISTIAN RUSSU

Conducător științific

Prof. Dr. Ing. MIRCEA D. PASCOVICI

2011

CUVÂNT ÎNAINTE

În anul 2002, la finalizarea cursurilor de Masterat, am decis să urmez un stagiul doctoral în cadrul Catedrei de Organe de mașini și Tribologie, Universitatea Politehnică din București, și am avut onoarea de a fi acceptat ca discipol de către Prof. Dr. Ing. Mircea D. Pascovici.

Tema de cercetare inițială a fost legată de procesele termo-hidrodinamice în lubrificația cu fluide nenenewtoniene, sens în care au fost demarate studii atât teoretice, cât și experimentale, inclusiv în cadrul unui stagiul de cercetare desfășurat la IUT Angoulême, Universitatea din Poitiers, Franța. După doi ani însă, din motive obiective, legate de direcția principală de studii din cadrul colectivului condus de profesorul Pascovici, o nouă temă de doctorat a fost propusă: „Contribuții la elasto-poro-hidrodinamica lubrificației”.

Evenimente ulterioare, ce au produs schimbări și agitație, atât în viața personală, cât și în cea profesională a subsemnatului, au dus la amânarea finalizării tezei cu patru ani, lucru ce mi-l asum și mi-l reproșez integral.

Dar iată, acum și aici, prezenta lucrare, ce reflectă munca mea depusă în cadrul colectivului de cercetare pe durata a 8 ani. Teza îmbină, într-o fericită sinergie, studiile referitoare la lubrificația cu fluide nenenewtoniene cu cele referitoare la lubrificația în prezența unor straturi poroase compresibile.

Cu această ocazie doresc să aduc mulțumiri domnului profesor Mircea D. Pascovici care, pe lângă îndrumarea științifică, mi-a oferit răbdarea, înțelegerea și sprijinul moral, ajutându-mă în acest fel în finalizarea doctoratului.

Domnului profesor Traian Cicone îi mulțumesc pentru sprijinul, nu numai pe plan științific, acordat pe toată perioada studiilor doctorale. O parte importantă din materialul prezentat în această teză nu ar fi existat fără contribuția sa.

De asemenea, mulțumesc și celorlalți membri ai Catedrei ce, în perioada în care am făcut parte din colectivul acesteia, au dovedit colegialitate și mi-au oferit amintiri plăcute. Adesea regret că drumurile noastre s-au despărțit.

Doresc să mulțumesc și domnului profesor Mohamed Hajjam de la IUT Angoulême, Universitatea din Poitiers, Franța ce mi-a oferit sprijin și îndrumare științifică pe perioada în care am efectuat stagiul de studii sub tutela sa.

Mulțumesc și domnilor profesori Emanuel Diaconescu, membru corespondent al Academiei Române, de la Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava și Dumitru Pop de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, care m-au onorat acceptând să facă parte din comisia de doctorat.

Familiei, care m-a susținut și m-a înțeles pe toată perioada studiilor și mai ales în anul de foc 2010, aduc mulțumiri, de asemenea. Contribuția soției mele, Ana-Maria Russu, a fost esențială, ea m-a încurajat și m-a impulsionat permanent, în final ajutând la corectarea greșelilor de ortografie comise de un inginer mecanic.

În final, vă mulțumesc dumneavoastră pentru interesul pe care ați decis să-l arătați prezentei Teze de Doctorat. Sper ca lectura acesteia să vă dezvăluie elemente pertinente și utile pentru știința ingineriei mecanice.

Notății principale utilizate

B	lungimea secțiunii normale la direcția principală a procesului de lubrificație
D	parametrul complex al permeabilității
d_s	diametrul mediu al particulelor solide din mediul poros
$\Delta x, \Delta z$	dimensiunile elementului finit pe cele două direcții
F, F_r, F_m	forța, forța reală, forța măsurată
h, h_0, h_m, h_a	grosimea filmului/stratului poros, grosimea inițială, grosimea minimă, grosimea admisibilă
L	lungimea secțiunii pe direcția principală a procesului de lubrificație
m	coeficientul de viscozitate (ecuații reologice)
n	coeficientul de plasticitate (ecuații reologice)
$p, \Delta p, dp$	presiunea, diferența de presiune, gradientul de presiune
q	debit volumic unitar
$q_{i+}, q_{i-}, q_{j+}, q_{j-}$	debiturile către elementele învecinate cu elementul curent, pe direcțiile x și respectiv z
T	perioada
U	viteza pe direcție tangențială (axa x)
V	viteza pe direcție normală (axa y)
x, y, z	coordonatele carteziene
$\varepsilon, \varepsilon_0$	porozitatea, porozitatea inițială
Φ, Φ_0	permeabilitatea, permeabilitatea inițială
η	viscozitatea dinamică
σ, σ_0	compactitatea, compactitatea inițială
τ	efort tangențial, tortuozitate, timp adimensionalizat
$\dot{\gamma}$	gradientul de viteze

Prescurtarea numelor modelelor teoretice de lubrificație:

HD	hidrodinamic
PHD	poro-hidrodinamic
EHD	elasto-hidrodinamic
XPHD	ex-poro-hidrodinamic
XPEHD	ex-poro-elasto-hidrodinamic

Capitolul 1. Introducere

Stadiul actual

Prin definiție, lubrificația este un proces sau o metodă de reducere a frecării și uzării a două suprafețe aflate în proximitate și în mișcare relativă una față de cealaltă, prin introducerea unei substanțe, numită adesea “al treilea corp”, ce are rolul de a prelua sau a ajuta la preluarea sarcinii dintre suprafețele respective. Filmul lubrifiant astfel creat poate fi format din materie aflată în diferite stări de agregare: solidă (ex. particule de grafit, sulfură de molibden – MoS_2 etc.), lichidă, medii visco-plastice (ex. unsori consistente) sau gazoasă (ex. aer).

Abordarea clasică a problemelor de lubrificație este cea a utilizării ecuațiilor analitice. Deși încă din anul 1849, Gustave Adolph Hirn a demonstrat experimental pe un lagăr radial dependența forței de frecare de viscozitatea fluidului și viteza de rotație, practic epoca definirii proceselor de lubrificație prin ecuații matematice a început spre sfârșitul secolului XIX când, prin definirea ipotezelor simplificatoare pentru filme subțiri de lubrifiant, Osborne Reynolds a extras din sistemul de ecuații Navier Stokes, ecuația ce îi poartă numele. Lucrarea publicată în anul 1886 a constituit baza pentru toate modelele analitice ale lubrificației clasice, începând cu modelul lagărului cu suprafețe plane înclinate de lungime infinită creat de Anthony George Maldon Michell, în anul 1905 și terminând cu cel al lagărului radial îngust, enunțat de către Ockvirk în 1952.

Modelarea teoretică bazată pe ecuații analitice dezvoltate din ecuația diferențială Reynolds a satisfăcut în bună măsură nevoile proiectanților în domeniul lubrificației. Totuși, acestea au limitări majore în ceea ce privește simplificările aplicate procesului considerat (ipotezele simplificatoare fiind cunoscute și sub numele de modelul filmului subțire [Pascovici M.D., 2001]).

Este evident că dorința de a depăși limitele stricte ale acestor modelări s-a împletit cu dezvoltarea noii tehnici de calcul digital, astfel că abordarea unor simulări ce iau în considerare variația unora din caracteristicile considerate constante prin ipotezele de mai sus, a devenit principala direcție de dezvoltare a științei lubrificației. Astfel, s-a ajuns la considerarea unor parametri fizici ce măresc gradul de complexitate al modelului, dar apropie procesul simulat de cel real. Aceste modelări sunt denumite după prefixul ce definește parametrul fizic luat în considerare sau, după caz, combinația de parametri. Cel mai des întâlnite prefixe sunt elasto-, termo-, gazo-, reo-, poro- și bio-, ultimul definind generic combinații complexe ce includ, de obicei, elemente de elasticitate, permeabilitate și reologie în analiza proceselor de lubrificație ce au loc în organisme vii.

Din această perspectivă, așa cum a fost explicat în preambul, prezenta teză modelează procesele apărute în cazuri speciale de lubrificație cu medii poroase deformabile și cu fluide având caracteristici nenewtoniene.

Referindu-ne la principala problemă studiată, a lubrificației în prezența straturilor poroase permeabile, precizăm că existența unor discontinuități/cavități umplute, după caz, cu aer/mediu gazos sau cu un lichid lubrifiant (figura 1) reprezintă principala cauză a transferului de fluide prin permeabilitate, o altă găsindu-se la nivel molecular, prin procese de difuzie, osmoză, osmoză inversă etc.

După mărimea lor, porii sunt clasificați ca [Bear J., 1972]:

- **macro-porozitate**, cu referire la pori cu diametru mediu mai mare de 50 nm ;
- **mezo-porozitate**, cu referire la pori cu diametru între 2 și 50 nm ;
- **micro-porozitate**, cuprinzând porii cu diametru sub 2 nm ;

În prezenta lucrare este tratată doar caracteristica de macro-porozitate, deoarece interacțiunile la nivel molecular fluid/solid sunt neglijabile. În acest sens, procesul de curgere prin mediul poros este guvernat de legile Darcy și Kozeny-Carman.

$$q = \frac{\Phi}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{D \cdot \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad D = \frac{d_s^2}{16 \cdot k}; k = 5 \div 10 \quad (2)$$

Relevant pentru domeniul lubrificației în prezența straturilor poroase deformabile este caracterul de noutate al acestuia. Practic, cercetările au fost dezvoltate în ultimii 20 de ani, iar la nivel mondial există doar două colective de cercetare ce dezvoltă studii pe acest domeniu, acestea fiind conduse de profesorii M.D. Pascovici (București) și S. Weinbaum (New York).

Modelul pompei de dislocație, derivat din cel al pompei de viscozitate

Colectivul condus de profesorul Pascovici a dezvoltat o activitate de pionierat în ceea ce privește lubrificația prin dislocație, mecanism de creare a portanței prin comprimarea unui strat poros compresibil. Astfel, cercetările inițiate încă de la începutul anilor '90 s-au valorificat în anul 1994 într-un brevet de invenție [Pascovici M.D., 1994] referitor la un procedeu de pompare prin dislocarea fluidului îmbibat în stratul poros.

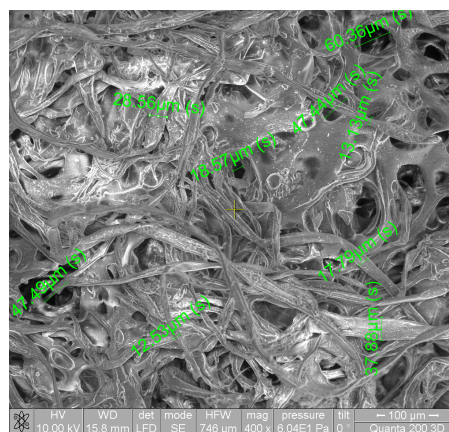


Fig. 1 Structura reală a unui mediu poros din material organic sintetic.[Chicet D., 2010]

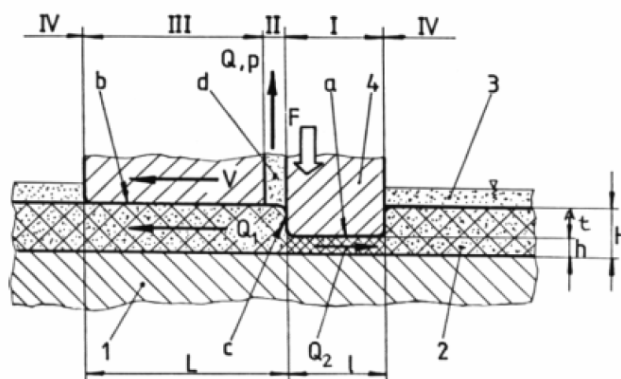


Fig. 2 Model pompă de viscozitate, conform brevetului de invenție. [Pascovici M.D., 1994]

Pentru generarea dislocării s-a apelat la o configurație tip Rayleigh – lagăr aflat în mișcare de translație pe o suprafață poroasă deformabilă (figura 2).

Prezența mediului poros deformabil are efectul amplificator de viscozitate, putând genera câmpuri de presiuni sau debite de până la 100 de ori mai mari decât în cazul unei configurații similare funcționând în regim hidrodinamic.

Modelarea analitică a unui lagăr Rayleigh cu mediu poros deformabil

În dezvoltarea acestui concept, inițial a fost elaborat un model unidimensional analitic, ce ia în considerare doar curgerea pe direcția mișcării. Acest model este în concordanță cu configurația tip buzunar, ce asigură un debit minim pe direcția perpendiculară pe cea de mișcare.

Plecând de la legea Darcy și considerând geometria din figura 3, a fost dezvoltat un model analitic ce oferă expresia forței portante:

$$\bar{F} = \frac{0.5 \cdot l \cdot (1-l)(H + \delta - \sigma_0) \cdot \delta \cdot \sigma_0^2}{(H + \delta)[(1-l)(H + \delta - \sigma_0)^3 + l(H - \sigma_0)^3]} \quad (3)$$

În baza acestei ecuații s-au realizat analize numerice privind eficacitatea acestui model de lubrificație. Astfel, a fost studiată evoluția forței adimensionalizate cu creșterea înălțimii treptei. Adimensionalizarea (ecuația 3) permite o evaluare obiectivă a parametrilor.

O altă comparație, considerată de interes în [Pascovici M.D., 2001], s-a realizat între modelul creat și cazul lubrificației hidrodinamice clasice. Astfel, raportul celor două forțe portante calculate teoretic este net favorabil modelului lubrificației prin dislocație:

$$\frac{F_{\max}^{XPHD}}{F_{\max}^{HD}} = 120 \div 800 \quad (4)$$

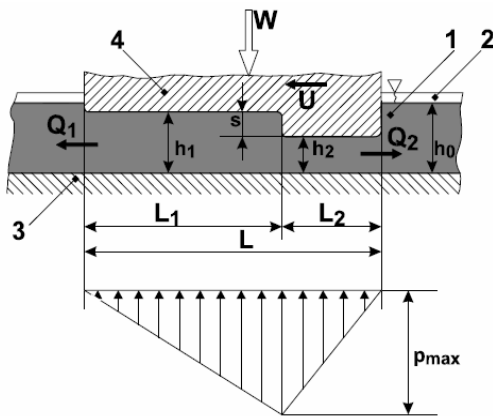


Fig. 3 Geometria considerată în modelul analitic unidimensional [Pascovici M.D., 2001]

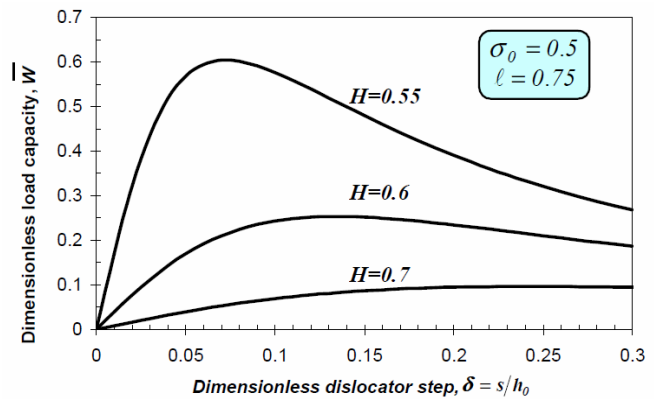


Fig. 4 Valoarea forței adimensionalizate funcție de raportul grosimilor de film și înălțimea treptei [Pascovici M.D., 2001]

Având în vedere cele prezentate, concluziile sunt că modelul respectiv se pretează pentru condiții de viteză de mișcare redusă, unde alte mecanisme de lubrificație sunt ineficiente și că există o zonă de nișă unde acest model de generare a portanței își găsește utilitatea.

Modelarea analitică a unui proces de expulzare în prezența unui strat poros deformabil

O altă modelare luată în considerare a fost cea a unui proces axial-simetric, de expulzare a unui fluid îmbibat într-un strat poros deformabil prin mișcarea de apropiere pe direcție normală a unui disc plan circular [Pascovici M.D., 2003]. Modelarea geometrică a ansamblului este prezentată în figura 5. Pentru acest model s-au dedus pe cale analitică parametrii procesului de apropiere, determinându-se caracteristica timpului de coborâre pentru sarcină constantă (fig. 6)

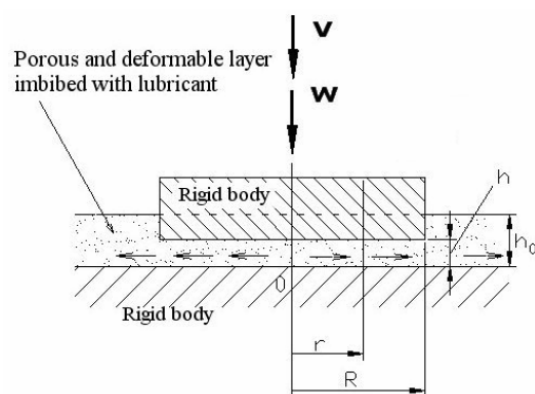


Fig. 5 Configurația geometrică a modelului de lubrificație prin expulzare în prezența mediului poros deformabil
[Pascovici M.D., 2003]

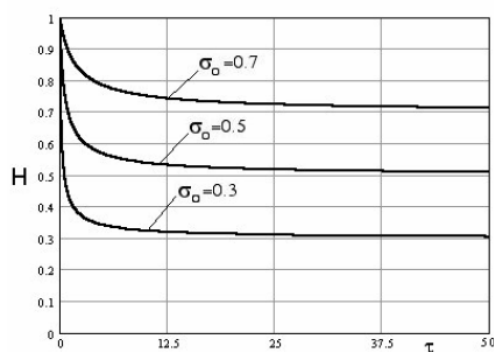


Fig. 6 Caracteristicile parametrilor adimensionali H/τ pentru diferite valori ale porozității inițiale
[Pascovici M.D., 2003]

Aplicarea mecanismului de dislocație pentru asigurarea portanței în anumite cazuri de locomoție terestră

În cadrul colectivului condus de S.Weinbaum, în urma studiului mișcării schiurilor pe stratul de zăpadă afânată, a fost trasă concluzia că mecanismul de lubrificație ce permite alunecarea este diferit de cel cunoscut pe larg pentru locomoția prin alunecare pe suprafețe înghețate. În cazul zăpezii nebătătorite, conform autorilor, se produce un proces de dislocare a aerului înglobat în stratul de fulgi, schiul acționând asemeni unei patine plane înclinate [Feng J., 2000].

Plecând de la această ipoteză, a fost imaginat un model de transport pe pernă poroasă deformabilă (fig. 7). În acest sens, în modelarea teoretică, s-a considerat ipoteza eliminării scurgerilor laterale prin realizarea unei bariere deformabile de etanșare longitudinale la limitele laterale ale zonei de contact, curgerea fluidului fiind considerată ca unidirecțională, pe direcția deplasării.

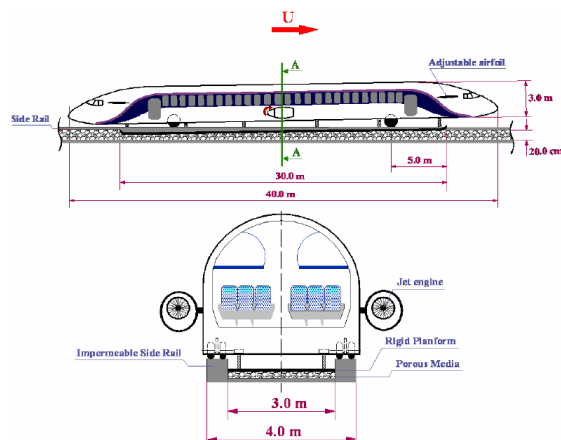


Fig. 7 Schița sistemului de propulsie propus
[Mirbod P., 2008]

Aplicații de biolubrificație: deplasarea celulelor roșii prin vasele capilare acoperite de structuri permeabile deformabile

Deplasarea celulelor roșii prin vasele capilare constituie de multă vreme unul dintre miracolele biomecanicii. Celulele, cu un diametru semnificativ mai mare decât al vaselor de sânge, se deformează

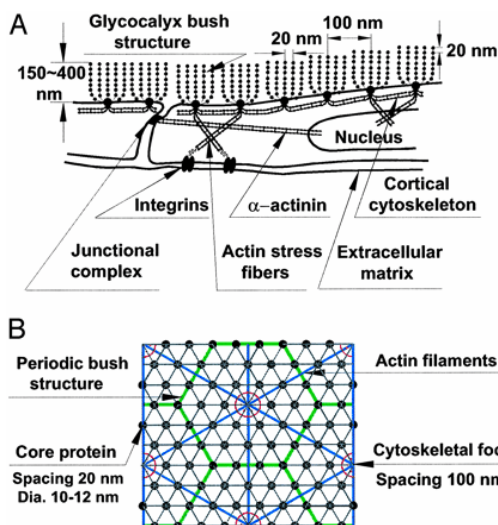


Fig. 8 Structura de glicocalix a peretelui capilarului sangvin [Weinbaum S., 2003]

În lucrarea [Weinbaum S., 2003] au fost analizate două cazuri distincte: studiul comportamentului hematiei în mișcare continuă de translație în vasul capilar și analiza procesului de relaxare a celulei roșii ce staționează ca urmare a încetării mișcării. Modelul de lucru consideră capilarul ca un tub cilindric rigid, acoperit cu stratul poros format din filamentele de glicocalix, și hematia un disc elastic deformabil.

Tema a fost reluată și în [Pascovici M.D., 2007] pentru cazul mișcării de translație, influența stratului poros permeabil format de filamentele de glicocalix fiind luată în considerare ca o creștere a viscozității aparente.

Experimente privind un lagăr axial tip Rayleigh funcționând în prezența unui mediu poros deformabil

În lucrarea [Pascovici M.D., 2001] au fost prezentate și rezultatele activității experimentale privind funcționarea unui lagăr axial tip Rayleigh cu trei trepte-buzunar. Geometria acestuia este schematizată în figura 9.

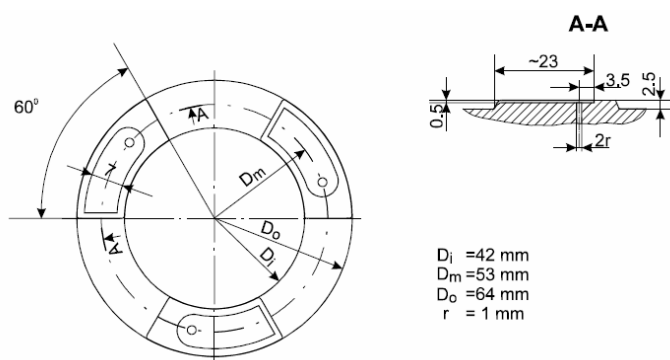


Fig. 9 Schița modelului experimental lagăr-axial [Pascovici M.D., 2001]

Experimentul realizat a demonstrat fiabilitatea lubrificației prin dislocație, ca mecanism eficient și durabil pentru asigurarea portanței în condiții de viteze de translație mici.

Nu au fost însă realizate nici determinări ale grosimilor de strat poros în stare comprimată, nici ale portanței maxime funcție de diferiți parametri cinematici și nu s-a determinat nici momentul de frecare, respectiv puterea consumată prin frecare, ceea ce lasă câmp liber pentru dezvoltarea unor experimente ce vor analiza parametric funcționarea unor astfel de lagăre.

Capitolul 2. Studii teoretice și experimentale asupra procesului de expulzare a filmului fluid nenewtonian

Studii teoretice privind lubrificația cu medii nenewtoniene

Procese de bio-lubrificație, dincolo de asemănarea cu cele tehnice, sunt definite de anumite caracteristici proprii. Astfel, din punctul de vedere al cuplei de frecare există două curente importante: primul consideră comportamentul nenewtonian al fluidului lubrifiant ca fiind definitoriu pentru proces, cel de al doilea analizează fenomenul punând accent pe caracteristicile poro-elastice ale suprafețelor cuplelor.

Plecând de la aceste premise, în cadrul tezei de doctorat, activitatea a fost orientată, în faza preliminară, către studiul teoretic și experimental al proceselor de lubrificație cu fluide prezentând un puternic caracter nenewtonian. Pentru a putea descrie matematic aceste procese, în lucrările de specialitate există conceptul de ecuații reologice, ce definesc dependența între tensiunea de forfecare și gradientul de viteze.

Marea majoritate a fluidelor de interes în aplicații de lubrificație pot fi modelate, cu un grad acceptabil de fidelitate, ca având un comportament **visco-plastic/pseudoplastic**. Pentru acest comportament a fost aleasă ca ecuație reologică Modelul Ostwald de Waele (Legea Puterii).

$$\tau = m \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

Modelarea analitică a procesului de expulzare a unui fluid lubrifiant visco-plastic prin apropierea a două suprafețe neconforme

Scopul propus pentru modelul analitic a fost simularea expulzării filmului fluid la mișcarea de apropiere în cazul contactului sferă/plan pentru un fluid nenewtonian prezentând un comportament pseudoplastic.

Geometria contactului, respectiv grosimea de film, este descrisă pentru cazul semicuplei sferă-plan folosind dezvoltarea în serie Taylor pe raza contactului, cu luarea în considerare a primilor 2 termeni.

$$h(r) = h_m + \frac{r^2}{d} \quad (7)$$

Fluidul considerat pentru simulări are un comportament pseudoplastic. Pentru rezolvarea matematică a problemei curgerii prin expulzare, soluția aplicată inclusiv în [Pascovici M.D., 2001] este cea a echilibrului de debite: fluidul fiind considerat incompresibil, debitul total ce trece prin frontiera unui volum dat este 0.

Debitului care curge în direcție radială se datorează unui proces pur Poiseuille. Ca urmare, considerând comportamentul reologic definit de ecuația 5, distribuția de viteze într-o secțiune oarecare a fost dedusă sub forma

$$u = \left(\frac{1}{m}\right)^n \cdot \left(\frac{dp}{dr}\right)^n \cdot \left(\left(\frac{h}{2}\right)^{n+1} - y^{n+1}\right) \quad (8)$$

și ulterior gradientul de presiuni corespunzător unei raze, r :

$$\frac{dp}{dr} = 2 \cdot m \cdot \left(\frac{v \cdot r \cdot (n+2)}{\left(h_a + \frac{r^2}{d}\right)^{n+2}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

Pentru aplicații numerice s-au luat în considerare două valori ale coeficientului exponențial: $n=1$, cazul fluidului newtonian și $n=2$, comportament pseudoplastic apropiat de valorile experimentale determinate pentru fluidul sinovial.

Studiind rezultatele obținute în urma integrării numerice, se poate observa că, prin comparație cu fluidul newtonian, pentru aceeași geometrie, curba distribuției de presiune pe direcție radială are, pentru cazul fluidului pseudoplastic, o zonă de platou centrală, ceea ce duce la o distribuție mai bună a efortului pe zona de contact, astfel încât pentru coborârea sub efectul unei forțe statice, presiunea maximă atinsă în centrul zonei de contact are valori mai mici (figura 10).

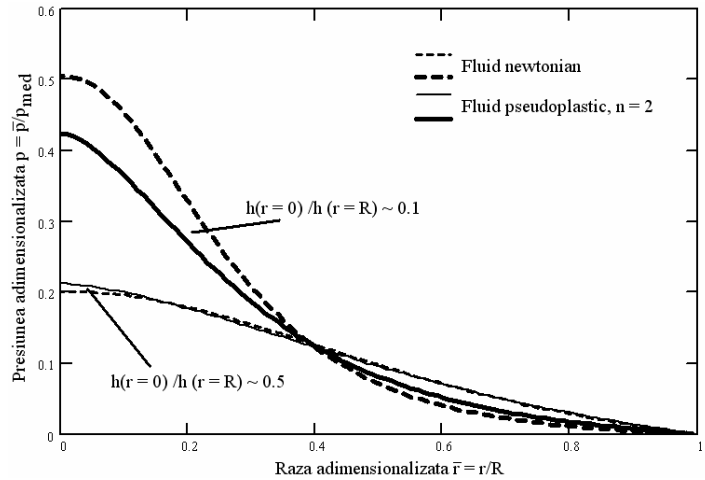


Fig. 10 Distribuția adimensionalizată de presiuni în interiorul unui contact sferă/plan pentru cazurile newtonian ($n=1$) și pseudoplastic ($n=2$)

Pentru a putea compara valorile, s-a procedat la adimensionalizare, prin raportarea razei la raza exterioară a contactului și a presiunii la presiunea medie.

În figura 10 se mai poate observa că, pe măsură ce procesul avansează și suprafețele se apropie (raportul între înălțimi 1/10), maximul presiunilor se modifică, dar pentru fluidul pseudoplastic creșterea acestuia este mai temperată, confirmând o mai bună distribuție a eforturilor în zona de contact.

Acest model și rezultatele numerice le-am prezentat în [Russu C., 2004].

Simulări numerice pentru procesul de expulzare a filmului fluid între două suprafețe neconforme cilindru-plan

Modelarea geometriei

Pasul următor abordat a fost modelarea unor geometrii fără simetrie radială, pentru care este necesară aplicarea unor metode numerice de calcul, cu discretizarea suprafeței contactului. Aceasta s-a făcut pe o rețea dreptunghiulară cu pas constant, fiecare element având laturile Δx și Δz (figura 11). Algoritmul construit a fost bazat pe metoda volumului de control, o variantă a metodei diferențelor finite, ce presupune aplicarea conservării debitului volumic pe fiecare element în parte.

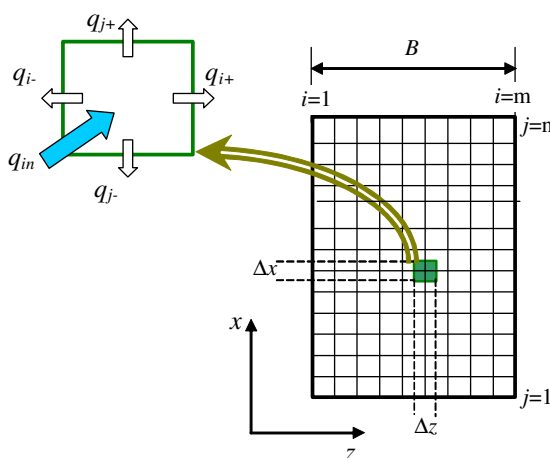


Fig. 11 Schematizarea modelului cu diferențe finite

Ecuția de conservare a debitului, scrisă pentru un volum de control oarecare din interiorul rețelei, este:

$$q_{j+} + q_{j-} + q_{i+} + q_{i-} = q_{in} \quad (10)$$

Aplicațiile numerice au făcut parte din studiul realizat de doctorand în cadrul stagiului de cercetare efectuat în anul 2004 în cadrul IUT Angouleme, Universitatea din Poitiers, Franța și au fost în complementaritate cu activitatea experimentală efectuată. Ca urmare, modelarea a urmărit preluarea ca date inițiale a caracteristicilor geometrico-cinematice și reologice ale experimentelor.

Pentru implementarea algoritmului de calcul numeric a fost folosit un mediu de programare Fortran, ales în principal datorită facilităților oferite pentru aplicațiile științifice, dintre care enumerăm: variabile standard cu precizie ridicată, posibilitatea de utilizare a unor tablouri mari și accesarea simplă a acestora, existența bibliotecilor specializate cu funcții matematice cu aplicare în știință și inginerie. Varianta Fortran utilizată folosește un modul Winteracter, prin intermediul căruia s-a creat o interfață Windows pentru introducerea datelor de intrare.

Programul a simulat mișcarea de apropiere - depărtare pentru:

- contactul dintre o suprafață plană și o suprafață cilindrică dreptunghiulară, având generatoarea paralelă cu suprafața plană (contact cilindru-plan);
- un contact sferă-plan.

Cinematica a fost, de asemenea, implementată în două variante:

- calculul distribuției de presiuni pentru o viteză normală instantanee și o grosime de film date, cu reținerea valorilor respective în fișier și exploatarea grafică ulterioară a acestora;

- impunerea unei mișcări sinusoidale de apropiere-depărtare (ce simula mișcarea reală, obținută pe stand) cu reținerea valorii forței de reacțiune.

Parametrii de caracterizare reologică a fluidului

În cadrul experimentelor au fost folosite ca fluid de lucru medii visco-plastice, unsori consistente achiziționate din comerț. Pentru caracterizarea reologică a acestora, necesară modelării numerice a proceselor, s-a procedat la testarea fluidelor respective în cadrul laboratorului de profil din cadrul Universității din Poitiers, Franța.

Aparatul utilizat pentru testare a fost un reometru REOLOGICA STRESSTECH digital și automatizat, care permitea controlul computerizat al parametrilor de intrare. Măsurarea s-a realizat în regim de control al vitezei de forfecare și utilizând un cuplu plan-con, cu diametrul exterior de 40 mm și un unghi la vârf de 1° . Această geometrie permite menținerea aceleiași tensiuni de forfecare în tot volumul fluidului [Vinogradov V., 1973].

Figura 12 prezintă valorile determinate experimental pentru cele 3 tipuri de unsori: Castrol 3, Codigraise și Degrip-oil, iar în figura 13 sunt prezentate, pentru una dintre unsori, respectiv Degrip-oil, suprapunerea curbei experimentale pe cele două curbe modelate cu legile teoretice de curgere Bingham și Legea Puterii.

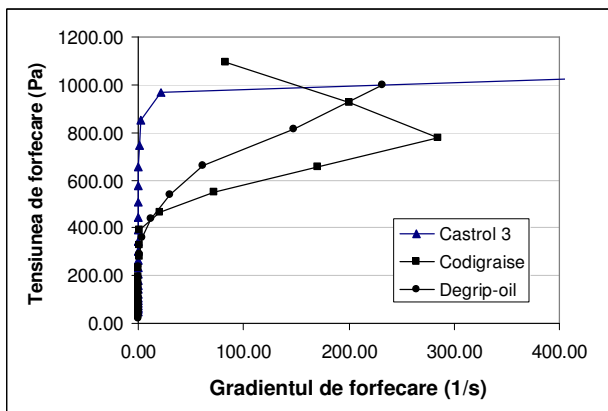


Fig. 12 Curbele reologice determinate experimental pentru cele 3 unsori utilizate în cadrul experimentelor

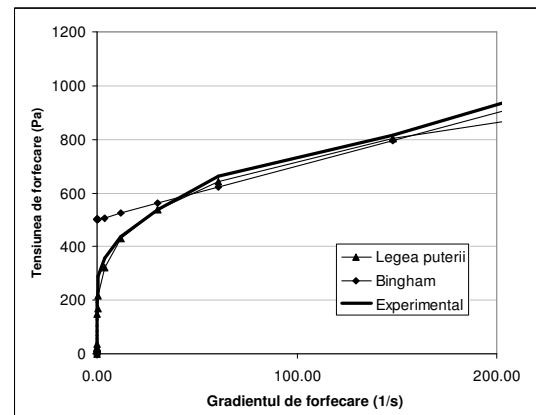


Fig. 13 Trasarea curbelor experimentale versus modelare matematică, pentru unsoarea Degrip-oil

Astfel, au fost determinați coeficienții pentru toate cele 3 unsori consistente. Valorile acestora, corespunzătoare modelului reologic Legea Puterii, sunt regăsite în tabelul alăturat.

	m	n
Castrol 3	750	0,08
Codigraise	240	0,2
Degrip-oil	230	0,25

Aplicația și rezultatele numerice

După cum am mai menționat, aplicația simulează procesul de expulzare a filmului lubrifiant ca urmare a unei mișcări alternative apropiere-depărtare, cu cinematică impusă, grosimea de film urmând o lege sinusoidală. Rezultatele aplicației au fost orientate către două obiective:

- obținerea hărții distribuției de presiuni pentru un moment dat;
- calculul forței de rezistență pentru un ciclu sinusoidal apropiere-depărtare.

În continuare sunt prezentate, succint, o parte dintre rezultatele numerice obținute utilizând aplicația descrisă anterior. Acestea se referă la geometrii sferă/plan și cilindru/plan, comportamentul reologic al fluidului fiind modelat folosind Legea Puterii. Distribuția de presiuni oferă o imagine a influenței geometriei interstițiului asupra procesului de curgere. În figura 14 este prezentată distribuția de presiuni pentru suprafața de contact cilindrică, de secțiune pătrată. Este de interes studierea evoluției presiunii în interiorul contactului pe măsura apropierii suprafețelor. Sunt prezentate în acest sens, pentru contactul sferă/plan distribuțiile radiale de presiuni pe segmentul de mișcare de apropiere $0...180^0$, cu un pas unghiular de 30^0 . De remarcat că valorile 0^0 și 180^0 nu sunt figurate întrucât, viteza relativă fiind 0, presiunea în interstițiu este nulă (figura 15).

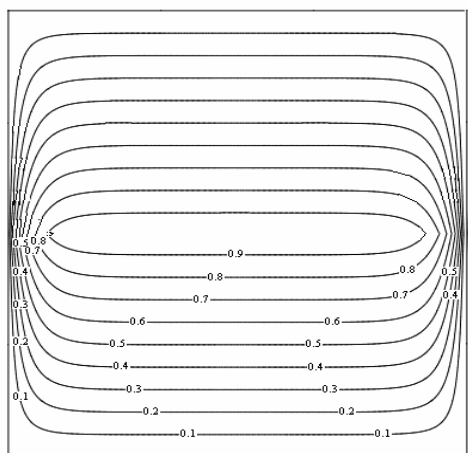


Fig 14. Distribuția de presiuni adimensionalizată $\bar{p} = p / p_{\max}$

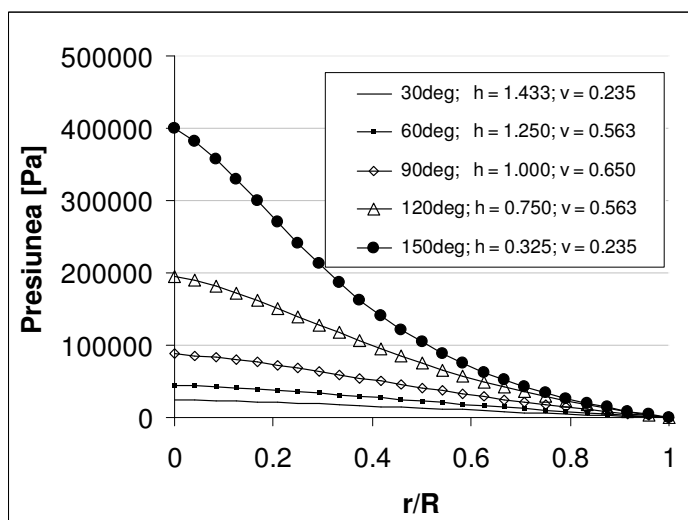


Fig. 15 Distribuția radială a presiunilor pentru diferite momente ale semi-ciclului de apropiere pentru cupla sferă /plan, grosimea filmului, h , în mm și viteza de apropiere, v , în mm/s

Este de interes, de asemenea, compararea curbelor pentru același fluid (este prezentată unsoarea Codigraise), considerând valori crescânde ale frecvenței, respectiv reducerea perioadei (2s, 1s, 0.5s). Caracteristicile prezentate în figura 16 arată creșterea valorilor forței cu reducerea perioadei, dar aceasta nu este semnificativă, ceea ce relevă importanța proprietăților de plasticitate în definirea comportamentului. Pentru cazul analizat, la creșterea de 4 ori a frecvenței, se înregistrează o creștere cu doar 25% a forței maxime calculate.

De asemenea, relevantă este și o comparare a rezultatelor pentru toate cele 3 unsoari utilizate în experimente (figura 17). Se observă că unsoarea Castrol, ce are un prag mai ridicat de curgere, prezintă o caracteristică de forță cu valori mai ridicate, existând o cvasi-proportionalitate cu valorile pragului de tensiune.

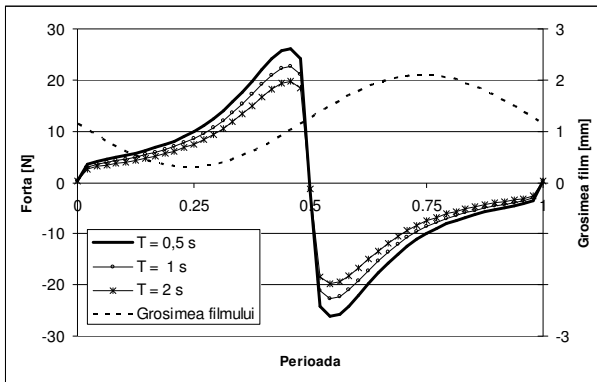


Fig. 16 Caracteristica de forță pe durata unui ciclu, pentru trei frecvențe
*Unsoare Codigraise; $k = 240$; $n = 0,2$;
 Contact sferă/plan; diametrul curburii $d=500$ mm;
 raza suprafeței de contact $R = 50$ mm*

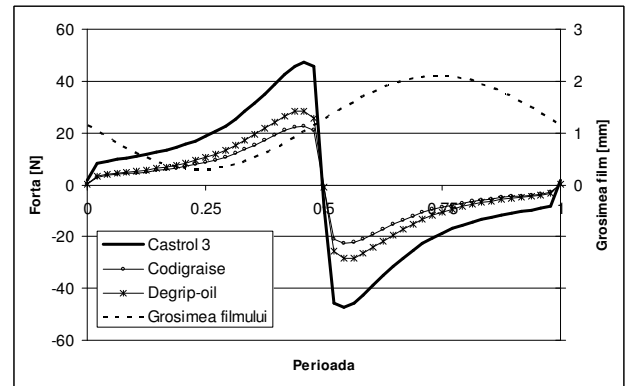


Fig. 17 Caracteristica de forță pe durata unui ciclu pentru cele trei unsori
*Perioada $T = 1$ s ;
 Contact sferă/plan; diametrul curburii $d=500$ mm;
 raza suprafeței de contact $R = 50$ mm*

Concluzii:

Deși modelarea folosește o lege reologică pseudoplastică, rezultatele prezintă o corectă reprezentare a laturii plastice (pragul de tensiune) din comportamentul fluidelor considerate. Astfel, se poate observa influența redusă a vitezei (frecvenței ciclurilor) în raport cu influența pragului de tensiune al fluidului. Această concordanță a rezultatelor numerice cu teoria curgerii fluidelor viscoplastice constituie un element de validare a modelării, validare ce va fi confirmată după cum se va vedea, prin compararea acestor rezultate cu cele experimentale.

Experimente privind procesul de expulzare a filmului fluid visco-plastic

Complementar cu studiile teoretice, prezentate în paragrafele anterioare, au fost efectuate experimente privind mișcarea de apropiere între suprafețe neconforme. Au fost analizate două cazuri:

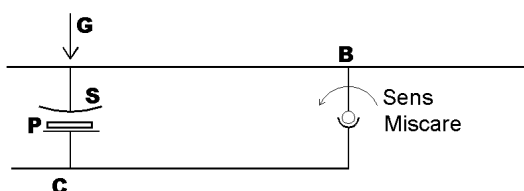
- mișcare de apropiere între suprafețe sub efectul unei sarcini constante, cu măsurarea grosimii filmului de lubrifianț funcție de timp;
- mișcare alternativă apropiere-depărtare, cu cinematică impusă - funcție sinusoidală, cu măsurarea parametrului global forță de rezistență.

Mișcare de apropiere sub sarcină constantă

Scopul dispozitivului experimental a fost de a simula procesul de portanță prin expulzarea lubrifianțului aflat în interstițiul sferă/plan. Contactul sferă/plan prezintă complicații din punct de vedere al ecuațiilor matematice ce guvernează curgerea, însă aplicația prezintă avantajul toleranței la erorile de poziționare. În timp ce în cazul contactului conform plan-plan o eroare de poziționare între planurile conjugate relativ redusă duce la erori mari în ceea ce privește comportamentul (viteza de apropiere în condiții de geometrie și de sarcină date), modelul contactului sferă-plan nu prezintă modificări în ceea ce privește caracteristicile geometrice ale contactului în cazul unor erori de poziționare unghiulare.

Soluția constructivă aleasă poate fi văzută în schița din figura 18. S-a realizat un element “balansoar” care este așezat în echilibru pe un lagăr-cuțit. Acest sistem este încărcat cu mase etalonate

ale căror centru de greutate se află pe axa contactului sferă/plan. Aceasta permite considerarea forței de încărcare ca fiind dată exclusiv de greutatea maselor etalonate. În figura 19 este prezentat dispozitivul experimental realizat, la care în prim-plan se pot observa cele 2 aparate de măsurare a deplasării: un ceas comparator mecanic și un senzor magnetic de deplasare. Ceasul comparator a fost utilizat pentru etalonarea senzorului electronic.



**Fig. 18 Dispozitivul experimental;
schița de principiu**

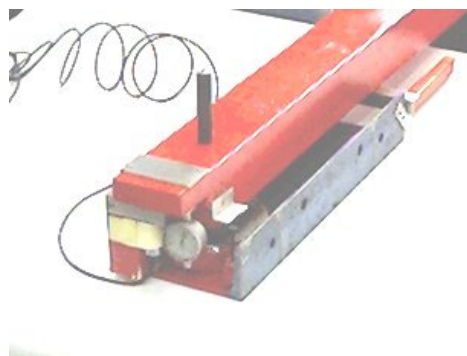


Fig. 19 Dispozitivul experimental; fotografie

În figura 20 este prezentată evoluția caracteristicii de coborâre cu variația sarcinii. Se poate observa că tendința teoretică de accentuare a coborârii cu creșterea sarcinii este respectată, mai ales în ceea ce privește viteza de coborâre. De asemenea, poziția finală este influențată, chiar dacă acolo valorile prezintă o relevanță mai redusă. Aceasta se datorează și rezoluției comparatorului, de doar 0.01 mm.

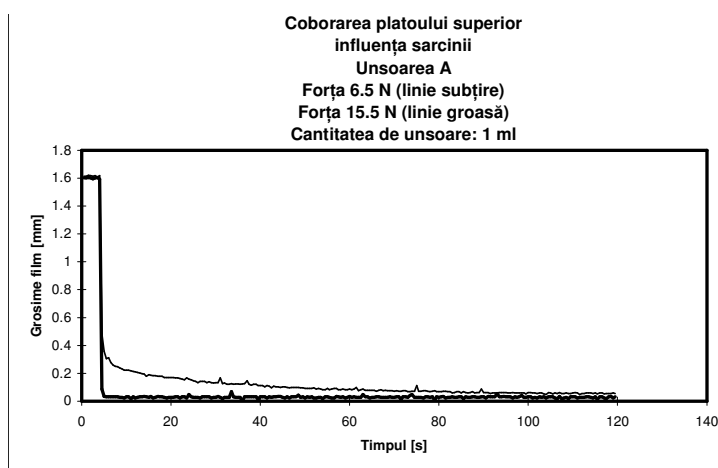


Fig. 20 Prezentarea curbelor pentru sarcini diferite

Mișcare sinusoidală de apropiere – depărtare cu cinematică impusă

Pentru realizarea experimentelor a fost adaptat și utilizat standul destinat studiului comportamentului fluidelor lubrifiante cu viscozitate ridicată în mișcare de expulzare alternativă (apropiere – depărtare), din dotarea laboratorului IUT Angoulême, Universitatea din Poitiers, Franța. Activitatea experimentală a fost efectuată în cursul anului 2004 și a fost coordonată de către prof. dr. ing. Mohamed Hajjam.

Prezentat în figura 21, standul avea următorul lanț cinematic:

1. Variatorul digital de frecvență,
2. Motoreductorul electric sincron,
3. Transmisia cu curele dințate,

4. Sistemul cu excentric reglabil, ce permitea transformarea mișcării de rotație în mișcare de translație alternativă cu amplitudinea impusă,
5. Cupla inferioară, fixă,
6. Cupla superioară, mobilă,
7. Ghidaj vertical cu bile, ce permitea mișcarea relativă între cele două cuple cu o pierdere prin frecare minimă și fără efecte de stick-slip,
8. Zona activă, ce conținea, pe lângă partea activă a celor două cuple și fluidul lubrifiant, instrumentele de măsurare a parametrilor macroscopici grosime de film și forță instantanee.

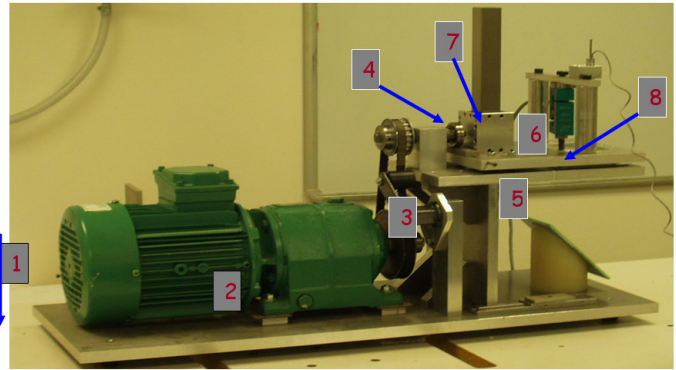


Fig. 21 Standul experimental. Fotografie

În fig. 22 sunt prezentate caracteristicile de forță determinate pentru o frecvență de oscilație de 0.4 Hz, pentru cele 3 unsori consistente folosite: Degrip-oil, Codigraise și Castrol. Se poate observa că valorile maxime atinse pentru fiecare substanță sunt în corelație cu pragul de tensiune caracteristic fiecărui fluid, însă dependența nu este liniară. Astfel, dacă între valorile extreme ale acestui prag (corespunzătoare unsoirilor Degrip-oil – minim și respectiv Castrol – maxim) există un raport de 2.2, între valorile maxime ale forțelor înregistrate acesta este de doar 1.6. Privitor la analiza evoluției forței cu modificarea (creșterea) frecvenței, s-a procedat la o analiză comparativă pentru fiecare dintre cele 3 fluide newtoniene considerate. În continuare este prezentată, prin selecție, una din figuri, corespunzătoare unsoirii Codigraise (fig. 23).

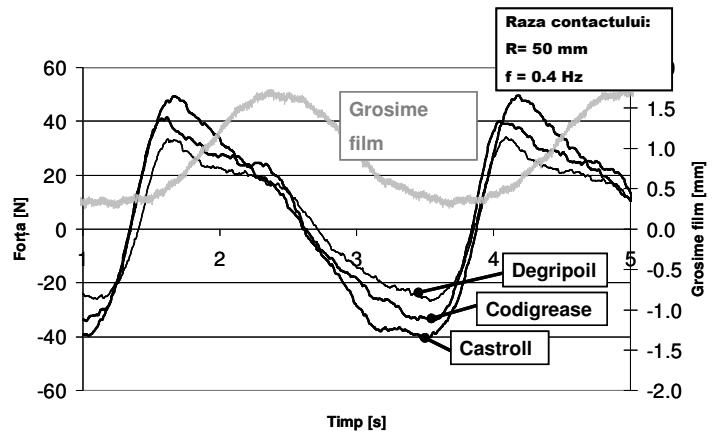


Fig. 22 Caracteristicile de forță pentru cele 3 unsori considerate. Contact plan/sferă

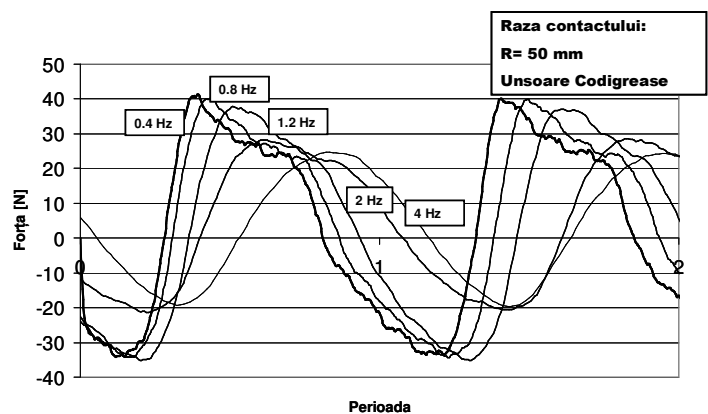


Fig. 23 Caracteristicile de forță pentru unsoarea Codigraise. Contact plan/sferă

Compararea curbelor experimentale cu valorile calculate numeric

Prezintă interes compararea valorilor determinate pe cale experimentală cu cele calculate teoretic, cu ajutorul algoritmului numeric prezentat anterior. În acest fel se face și o validare a ipotezelor teoretice ce au stat la baza creării respectivului algoritm. În figura 24 este prezentată o caracteristică determinată experimental, prin comparație cu valorile calculate numeric, atât cele ale forței din cuplă, cât și cele obținute prin aplicarea coeficientului de atenuare corespunzător răspunsului dinamic al traductorului.

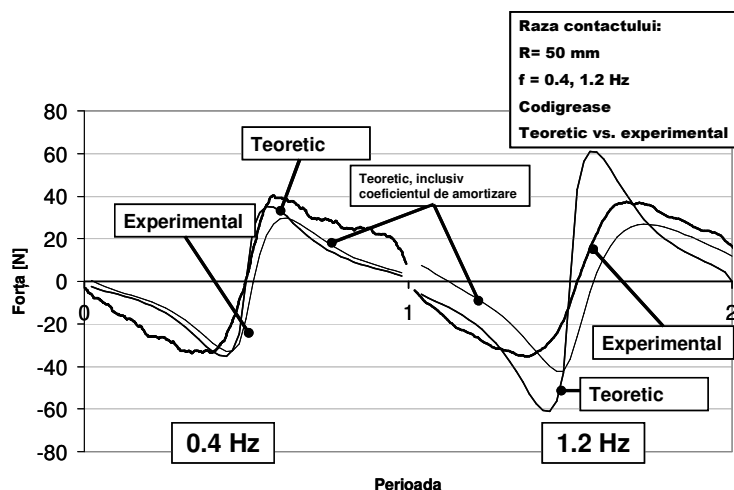


Fig. 24 Comparație între curbele trasate experimental și cele calculate teoretic. Contact plan/sferă

Din analiza figurii se pot trage 2 concluzii :

- valorile și tendința pentru curbele trasate experimental și cele calculate teoretic, inclusiv cu luarea în considerare a răspunsului dinamic al senzorului, sunt apropiate ca formă și valoare;
- dacă pentru valoarea de 0.4 Hz toate cele 3 curbe sunt suficient de apropiate, pe măsura creșterii frecvenței (1.2 Hz), între valorile teoretice calculate și cele determinate experimental apare o discrepantă majoră. Cauza acesteia, după cum am demonstrat, este comportamentul traductorului de forță care, din păcate, a viciat rezultatele obținute.

Totuși, se poate concluziona că, prin compararea rezultatelor numerice cu cele experimentale s-a realizat validarea algoritmului de calcul teoretic, cu modelarea fluidului prin ecuația reologică Legea Puterii.

Observații experimentale asupra ruperii și regenerării filmului fluid

În cursul experimentelor cu unsori consistente, în anumite condiții (legate de natura lubrifiantului, gradientii de viteze maximi atinși la frontiera contactului și posibile discontinuități - bule sau cavități), în zona de frontieră a stratului de lubrifiant (ce asigură etanșeitatea procesului de expulzare) apare în mod natural un fenomen de rupere a filmului lubrifiant, prin crearea unei breșe în zona de frontieră a contactului. În interiorul filmului apare o structură dendritică, procesul fiind însoțit de pierderea portanței. La intervenția operatorului de a reface discontinuitatea de pe frontieră, filmul din interiorul contactului se reface rapid, pe durata a 1-2 cicluri, aerul rămas în interiorul contactului concentrându-se sub forma unei bule unice de dimensiuni relativ reduse. În figurile 25 și 26 sunt prezentate aspectele filmului de lubrifiant în diferite stadii ale evoluției sale, inclusiv refacerea sa ca urmare a intervenției umane și evoluția portanței, ca urmare a fenomenului de rupere/regenerare a filmului.

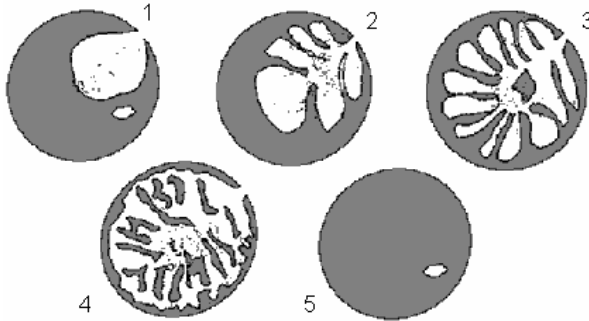


Fig. 25 Fenomenul ruperii și regenerării filmului portant. Vizualizarea cuplei pe stadii ale procesului.

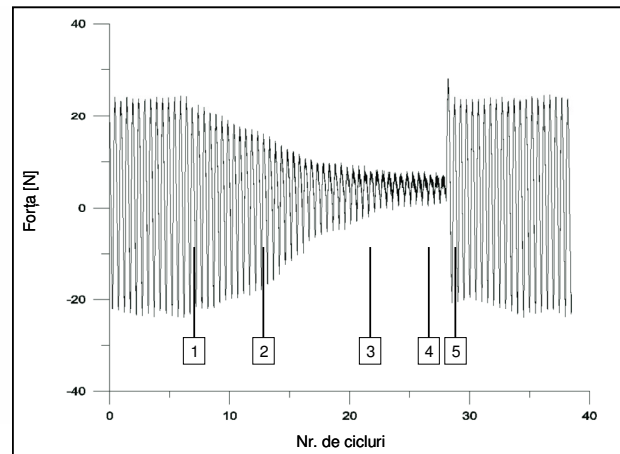


Fig. 26 Fenomenul ruperii și regenerării filmului portant. Evoluția forței

Capitolul 3. Studii teoretice asupra procesului de lubrificație prin dislocație în mișcare tangențială

Lubrificația prin dislocație a constituit elementul central de studiu al prezentei teze, în principal datorită caracterului de noutate pe care îl prezintă. Spre deosebire de lubrificația clasică, în cazul lubrificației prin dislocație este vorba de un proces de “stoarcere” a fluidului lubrifiant îmbibat în stratul poros extrem de compresibil, constrâns între două suprafețe rigide, aflate în mișcare relativă una față de cealaltă. În acest fel se crează un câmp de presiuni în stratul poros, generându-se portanța dorită. Procesul este împărțit în două subprocese:

- Dislocarea fluidului prin comprimarea stratului poros. Acest proces este tratat ca invariabil pe grosimea stratului, neinfluențat de fenomene precum elasticitatea materialului solid și tensiunea superficială a fluidului lubrifiant și bazat pe ipoteza conservării volumului materialului solid.
- Curgerea prin stratul poros ca urmare a gradientului de presiune apărut. Spre deosebire de lubrificația cu medii fluide, în cazul lubrificației prin dislocație nu există componentă Couette a curgerii. Viteza peretelui aflat în mișcare nu are influență asupra procesului din interiorul stratului poros. De asemenea, o altă ipoteză de lucru este ignorarea caracterului discret al materialului, acesta fiind tratat ca un mediu continuu, în care curgerea este guvernată de legea Darcy.

Constructiv, o astfel de aplicație este constituită din: stratul poros permeabil și deformabil, fixat pe un substrat rigid impermeabil și cupla superioară, rigidă și impermeabilă, considerată în mișcare față de cupla inferioară. Substratul este plan, iar grosimea și permeabilitatea stratului poros în stare nedeformată sunt constante.

În prezenta lucrare vor fi analizate două tipuri de generare a portanței prin dislocație:

- a) dislocarea fluidului prin mișcare de apropiere a celor două cuple, pe direcție normală la suprafețe. În acest caz, suprafața cuplei superioare poate avea diverse forme (plană, sferică etc).

b) dislocarea fluidului prin mișcarea tangențială a cuplei superioare față de suprafața nedeformată a stratului poros.

În acest caz, pentru asigurarea portanței este necesară obținerea unui interstițiu convergent în zona de contact, lucru ce se realizează prin forma cuplei superioare alunecătoare (există și posibilitatea creării unui astfel de interstițiu convergent între două suprafețe, static paralele, prin efect elasto-hidrodinamic).

Pentru cazul mișcării tangențiale au fost realizate modelări teoretice prin metode numerice și analitice pentru trei tipuri de geometrie a patinei:

- treaptă, similar modelului utilizat la lagărele hidrodinamice clasice dar cu o mărime mult mai mare a saltului;
- plan înclinat;
- suprafață sferică, unde s-a studiat comportamentul unei geometrii cu simetrie radială aflată într-o mișcare ce rupe această simetrie.

Modelarea numerică pentru cazul patină-treaptă

Modelarea mișcării unei patine-treaptă aflate în mișcare de translație tangențial la o suprafață poroasă deformabilă a fost abordată analitic în cadrul Catedrei de Organe de mașini și Tribologie, în ipoteza curgerii unidirecționale (1D) corespunzătoare unei patine-treaptă, de lățime infinită, în condițiile mișcării de translație [Pascovici M.D., 2001], [Pascovici M.D., 2002].

În completarea acestei modelări am procedat la realizarea unui model numeric bidimensional, bazat pe metoda diferențelor finite, ce ia în considerare și curgerea laterală (pe direcția z), cu scopul evaluării erorilor induse de simplificările impuse în modelul analitic unidimensional. Activitatea s-a realizat în cadrul grantului CNCSIS A-463, etapa aferentă anului 2003, și a fost coordonată de profesorii M.D. Pascovici și T. Cicone.

Prezentăm, în continuare, rezultatele aplicațiilor numerice dezvoltate. De interes este prezentarea distribuției de presiuni în interiorul contactului. Se poate observa în figura 27 că, pe măsură ce lățimea patinei se reduce, influența curgerii laterale devine preponderentă și astfel, în timp ce la rapoarte B/L egale cu 2 sau mai mari se poate vorbi doar de efecte la capete, pe măsură ce această valoare se apropie de unitate, apoi devine subunitară, întreaga suprafață a contactului este caracterizată de o curgere bidirecțională.

Prin comparație cu modelarea analitică 1D, această caracteristică face ca rezultatele obținute pentru modelul treaptă de lungime infinită să se constituie în limită asimptotică pentru o treaptă de lungime finită. Pentru un raport unitar între lățime și lungime, presiunea maximă este apropiată de cea obținută analitic ($p_{max\ 2D}=0.95...0.99\ p_{max\ 1D}$). Figura 28 prezintă distribuțiile de presiuni în secțiunea centrală a unei astfel de patine, calculate prin cele două metode.

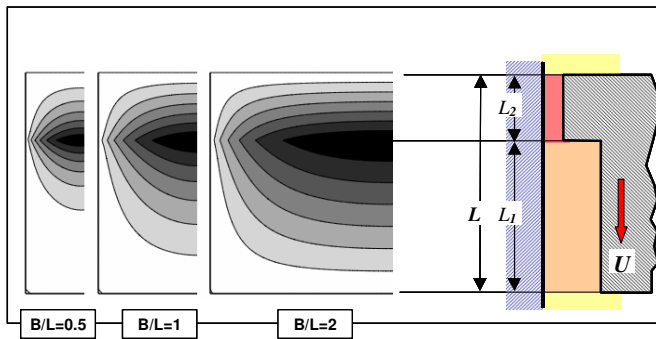


Fig. 27 Distribuția de presiuni. Hărțile de presiuni pentru diferite rapoarte B/L

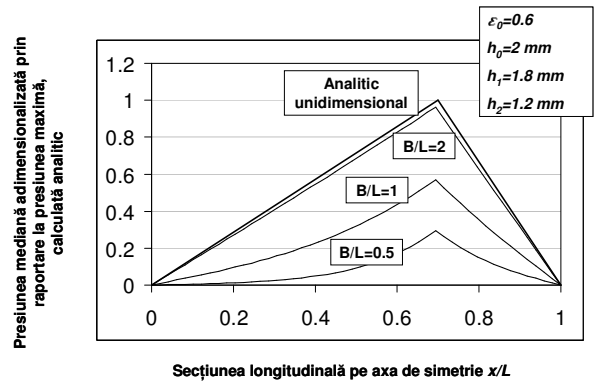


Fig. 28 Distribuția mediană, adimensionalizată de presiuni. Compararea cu valorile calculate utilizând modelul analitic unidimensional

Modelul numeric bidimensional pentru patina tip suprafață plană înclinată

Dezvoltarea unui model numeric bidimensional pentru cazul suprafețelor plane convergente s-a bazat pe aceleași ipoteze aplicate la modelul patinei treaptă, cu excepția definirii grosimii de strat și a debitului.

Analiza rezultatelor obținute pe cale numerică permite estimarea influenței curgerii pe direcție perpendiculară pe cea a mișcării. Astfel, similar cu modelarea patinei treaptă sunt prezentate hărțile de presiuni pentru diferite rapoarte B/L (figura 29). Se poate observa că influența acestei curgeri pe direcția z are drept consecință și deplasarea punctului de presiune maximă. Acest lucru este evidențiat mai clar în figura 30 unde sunt prezentate curbele de presiune definite de secțiunile mediane ale patinelor adimensionalizate prin raportare la presiunea maximă, calculată cu modelul analitic unidimensional.

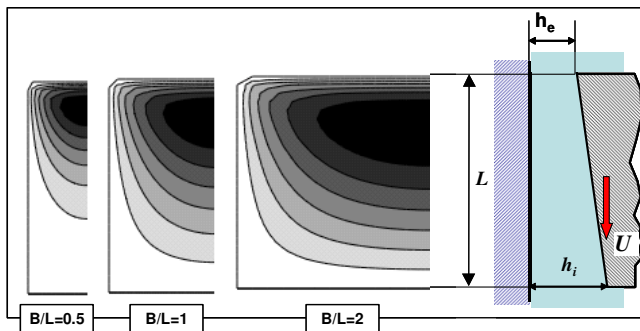


Fig. 29 Hărțile de presiuni pentru diferite lățimi ale patinei. Suprafețe plane convergente.

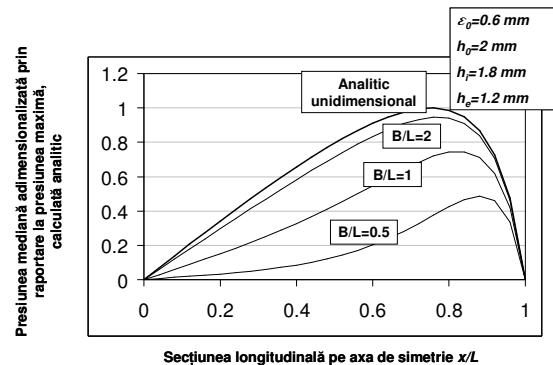


Fig. 30 Distribuția mediană de presiuni prin raportare la modelul analitic unidimensional. Suprafețe plane convergente.

Modelarea numerică pentru cazul patină sferică

O dezvoltare ulterioară a celor două modele numerice precedente a fost direcționată către scopul natural al aplicațiilor numerice bazate pe discretizarea domeniului – caracteristici geometrice care nu permit rezolvarea prin metode analitice aproximative.

În acest sens, a fost ales cazul unui contact similar cu cele prezentate anterior, dar în condițiile în care suprafața patinei este sferică. Între motivele alegerii acestei geometrii regăsim:

- oferă posibilitatea de a studia o geometrie axial simetrică aflată într-o mișcare ce nu mai respectă această geometrie;
- prezintă interes practic, deoarece o astfel de geometrie asigură portanța indiferent de orientarea patinei față de direcția de mișcare. Patina și corpul susținut de aceasta pot efectua mișcări complexe plan-paralele, singura condiție fiind menținerea unei viteze minime pentru asigurarea portanței.

În urma analizei numerice a rezultat că:

- pentru o configurație geometrică dată, inclusiv afundarea (dată prin grosimea minimă a filmului, h_a), forța portantă este proporțională cu viteza tangențială și viscozitatea fluidului;
- portanța maximă se atinge pentru cazul în care afundarea este maximă, respectiv $h_a = h_0 \cdot \sigma_0$, unde h_0 este grosimea inițială în stare nedeformată a stratului poros și σ_0 este gradul de compactitate inițial (în practică, acest caz trebuie însă evitat deoarece duce la apariția frecării limită în zona de grosime minimă de film);
- pe măsură ce porozitatea inițială crește, respectiv σ_0 scade, se observă că, prin afundarea mai mare, aria contactului crește și de aici și portanța maximă. Pentru același raport h_a / h_0 portanța este însă mai mică.

Alăturat sunt prezentate hărțile de presiuni pentru contacte sferice pentru 3 valori diferite ale scufundării patinei în stratul poros.

Se poate observa că, pe măsură ce scufundarea patinei crește, distribuția de presiuni ia formă de fluture. În zona divergentă, situată pe dreapta centrului patinei, se produce

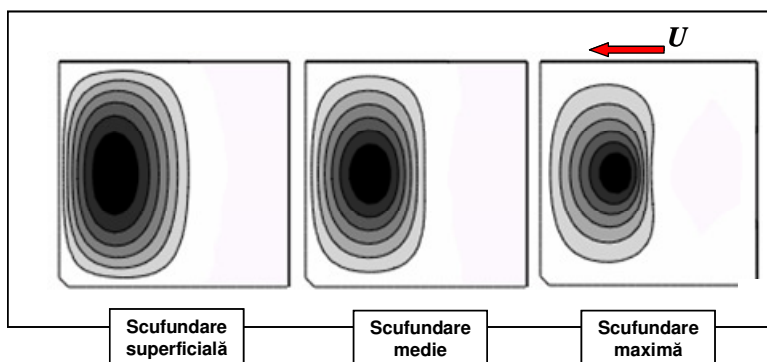


Fig. 31 Distribuțiile de presiuni pentru diferite scufundări ale patinei

fenomenul de rupere a continuității fazei lichide din stratul poros, presiunea fiind cea a mediului înconjurător.

Comparație între cele trei modele: treaptă, suprafețe paralele convergente și sferă

Compararea distribuției de presiuni pentru condiții dimensionale, cinematice și de material/fluid identice permite o evaluare a eficienței modelelor considerate din punctul de vedere al generării portanței. Astfel, în figura 32 sunt prezentate comparativ curbele de presiune din secțiunea mediană pentru modelele studiate în acest capitol.

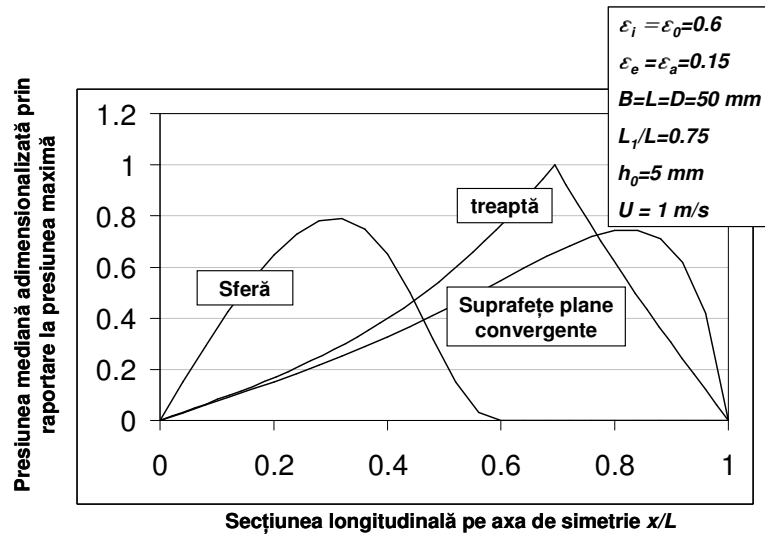


Fig. 32 Distribuția de presiuni în planul median.

Capitolul 4. Studii teoretice asupra procesului de expulzare în prezența unui strat poros permeabil ușor deformabil

Modelarea analitică a procesului de curgere în condiții ex-poro-elasto-hidrodinamice

În cadrul colectivului condus de profesorul Pascovici, a fost abordată modelarea unui proces de lubrificație prin expulzare în condiții ex-poro-elasto-hidrodinamice, ce ia în considerare atât modificarea grosimii filmului fluid ca urmare a deformării elastice a stratului poros permeabil, cât și modificarea, concomitent cu grosimea stratului poros, a proprietăților de permeabilitate ale acestuia. Din punct de vedere geometric, avem în vedere un proces de expulzare a fluidului prin mișcarea relativă de apropiere pe direcție normală a două semicuple plane cu secțiunea circulară, una dintre acestea având atașat la suprafața rigidă un strat poros permeabil deformabil în condiții elastice.

Din punct de vedere fizico-matematic, procesul este tratat distinct în cele două medii: filmul fluid și mediul poros. În ambele medii curgerea se consideră a fi pur Poiseuille, pe direcție radială, sub influența gradientului de presiune.

Studiul acestui model, prin prisma ecuațiilor analitice ce caracterizează curgerea în simetrie radială, s-a concretizat în deducerea ecuației distribuției deformației și implicit a presiunii în interiorul contactului ex-poro-elasto-hidrodinamic prezentată în forma sa adimensională (ecuația 11).

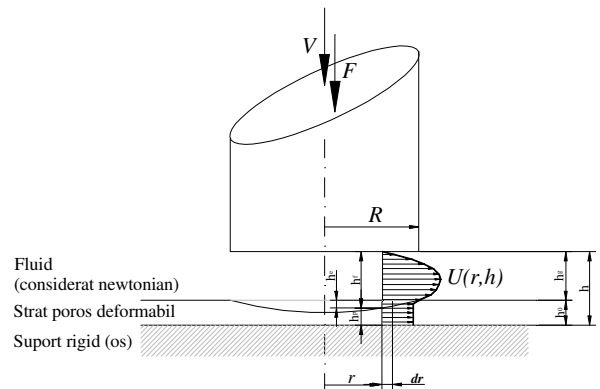


Fig. 33 Modelul geometric al contactului

$$\frac{3 \cdot \eta \cdot V \cdot k \cdot R^2}{h_0^4} (1 - \bar{r}^2) = -\frac{6 \cdot D}{\sigma_0^2 \cdot h_0^2} \left(\frac{H}{3} (1 - X^3) - \frac{3H\sigma_0}{2} (1 - X^2) + 3H\sigma_0^2 (1 - X) - H\sigma_0^3 \ln(X) + \frac{H}{4} ((1 - \sigma_0)^4 - (X - \sigma_0)^4) \right) - \frac{1}{4} ((H - 1)^4 - (H - X)^4) \quad (11)$$

Prin reducerea ecuației generale (11) la cazuri particulare în care se elimină permeabilitatea, respectiv elasticitatea stratului poros, se ajunge la modele cunoscute din lubrificație: poro-elasto-hidrodinamic (PEHD), ex-poro-hidrodinamic (XPHD), elasto-hidrodinamic (EHD), poro-hidrodinamic (PHD) și hidrodinamic (HD). În figura 34 sunt prezentate comparativ distribuțiile de presiuni pentru aceste cazuri.

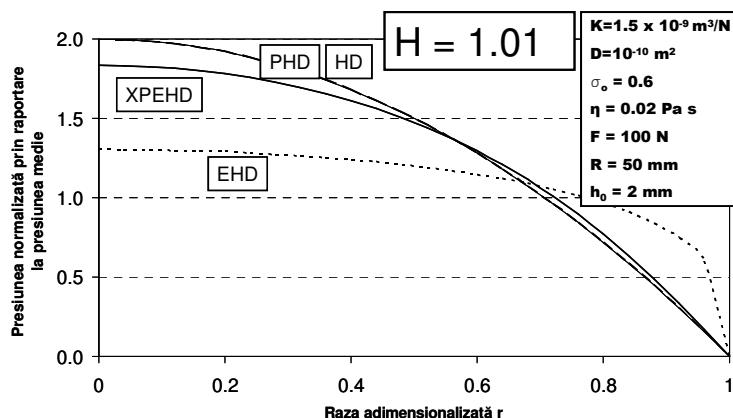


Fig. 34 Distribuția de presiuni pentru modelul XPEHD și cazurile particulare de referință

Modelul și aplicațiile numerice prezentate în cadrul acestui paragraf au fost dezvoltate sub coordonarea profesorilor M.D. Pascovici și T. Cicone, ca parte a grantului de cercetare CNCIS A-463, “MODELE AVANSATE, TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE, PENTRU FUNDAMENTAREA LUBRIFICAȚIEI ELASTO-PORO-HIDRODINAMICE”, FAZA 2003, și au fost prezentate în articolul [Pascovici M.D., 2004]

Analiza numerică a procesului de expulzare prin șoc pentru modelul strat poros deformabil între două suprafețe paralele de secțiune dreptunghiulară

Pentru procesul de expulzare, indiferent de condițiile geometrice și de mediu lubrifianț considerate, analiza comportamentului la șoc reprezintă una dintre cele importante probleme. Modul în care un astfel de sistem adsoarbe energia impactului, caracteristica sa de amortizare precum și modalitățile în care sistemul ajunge/este adus la starea inițială, preimpact, reprezintă ținte ale studiilor pe această temă. În ceea ce privește procesul de expulzare cu mediu poros permeabil deformabil, acesta are o bună caracteristică de amortizare plecând însăși de la grosimea mare a stratului poros, ceea ce permite o cursă lungă față de, spre exemplu, cazul HD clasic (mm față de μm).

Dezvoltarea modelului pentru secțiuni dreptunghiulare și pătrate s-a făcut de către colectivul de cercetare din cadrul Catedrei de Organe de mașini și Tribologie, condus de prof. dr. ing. Mircea Pascovici și din care au făcut parte prof. dr. ing. Traian Cicone, sl. dr. ing. Victor Marian, ing. Cristian Popescu și autorul prezentei teze, activitatea realizându-se în cadrul grantului IDEI 912/2007.

Modelarea procesului a fost abordată prin metoda diferențelor finite. Ținând cont de forma contactului, dreptunghi, în modelarea numerică s-a decis utilizarea celor două axe de simetrie pentru reducerea ariei pe care se face modelarea. Astfel, calculul se efectuează pe $L/2$ și $B/2$ din contact, de la marginea liberă a acestuia până la axa de simetrie, în felul acesta obținându-se o reducere de aproximativ 4 ori a numărului de noduri considerate și a cantității de calcule efectuate.

Determinarea curbelor forță / timp sau forță / grosime strat poros reprezintă scopul principal al oricărui studiu al amortizării șocului, fie el teoretic sau experimental. În cazul nostru, relevantă este o comparație a modelării numerice prin metoda prezentată mai sus, pentru o secțiune pătrată, cu analiza analitică corespunzătoare cercurilor înscris și respectiv circumscris pătratului (figura 35). Se poate observa că toate curbele au aceeași alură, iar rezultatele obținute prin

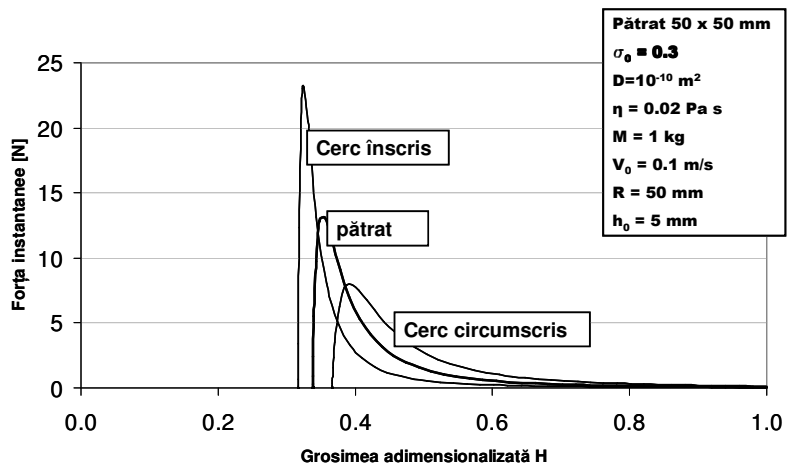


Fig. 35 Compararea rezultatelor numerice pentru contur pătrat cu cele analitice corespunzătoare cercurilor înscris și respectiv circumscris

modelare numerică sunt încadrate de cele două curbe corespunzătoare cercurilor considerate.

Analiza numerică a procesului de expulzare prin șoc pentru modelul strat poros deformabil între două suprafețe dreptunghiulare nealiniate (încălate)

Plecând de la versatilitatea modelării numerice, care permite studiul configurațiilor asimetrice, s-a dezvoltat o aplicație de calcul ce simulează comportamentul la șoc al unor suprafețe nealiniate, încălate una față de cealaltă.

Suprafețele dreptunghiulare au fost considerate încălate după una din laturi (figura 36), iar această asimetrie se menține pe toată durata procesului de amortizare. Rezultatul va fi o distribuție neuniformă a presiunii, cu modificarea parametrilor curbei de amortizare a energiei de șoc, în condițiile păstrării parametrilor geometrici și fizici (viscozitatea fluidului, permeabilitatea și porozitatea stratului poros).

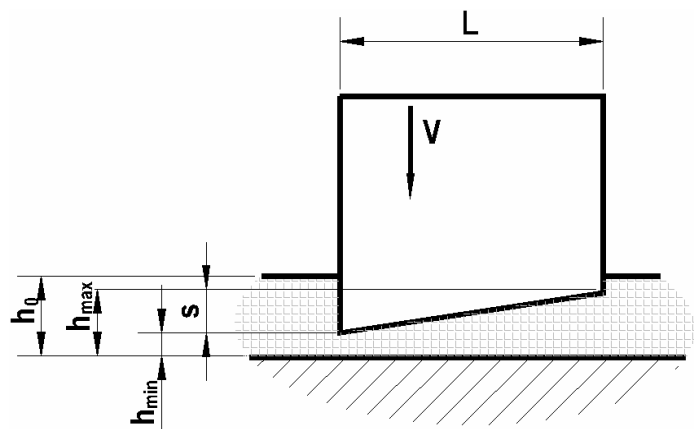


Fig. 36 Geometria configurației suprafețe nealiniat

Funcție de valoarea nealinerii și a gradului de scufundare a cuplei superioare în materialul poros deformabil, vom avea două cazuri:

- în cazul în care înclinarea, s , este mai mare decât afundarea maximă, atunci partea mai înaltă a cuplei superioare rămâne în afara stratului poros (fig. 37 a). Aria contactului este determinată de lățimea, B , și lungimea, L' . Pentru valori mari ale nealinerii, această situație persistă pe toată durata procesului de apropiere, până la

atingerea grosimii de strat $h^* = h_0 \cdot \sigma_0$, moment în care energia de șoc se descarcă prin distrugerea/penetrarea stratului poros deformabil ajuns la compactitate unitară;

- în cazul în care înclinarea, s , este mai mică decât afundarea, interstițiul este format din întreaga suprafață a cuplelor (fig. 37 b) .

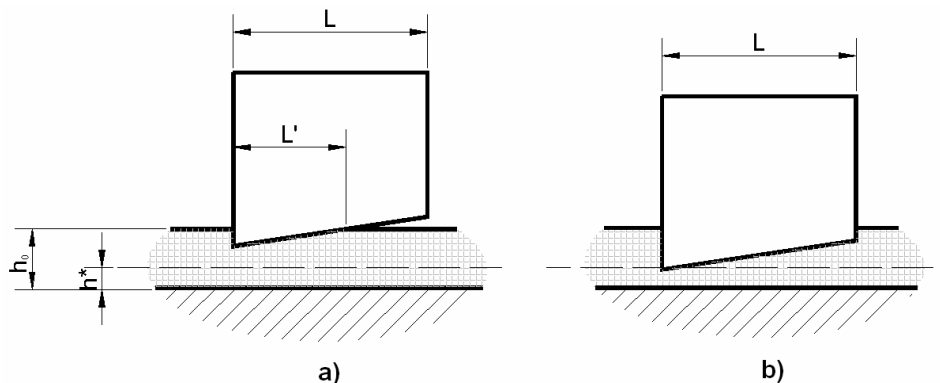


Fig. 37 Cazurile considerate pentru modelul suprafețe nealiniate:
a) parțial imersat; b) complet imersat

Modelarea numerică a geometriei s-a realizat prin considerarea a jumătate din geometrie, în lungul axei de simetrie.

Analizând distribuțiile de presiuni pe axa de simetrie (fig. 38) se poate observa că, pentru nealinieri moderate avem același proces ca și pentru suprafețe paralele, cu atingerea unui maxim și reducerea presiunii după acest moment. Pentru cazul unei nealinieri extreme, egale sau mai mari decât $h_0 - h^* = h_0 \cdot \varepsilon_0$, maximum presiunii nu mai este atins, practic se produce comprimarea până la valoarea $\varepsilon = 0$ (fig. 39).

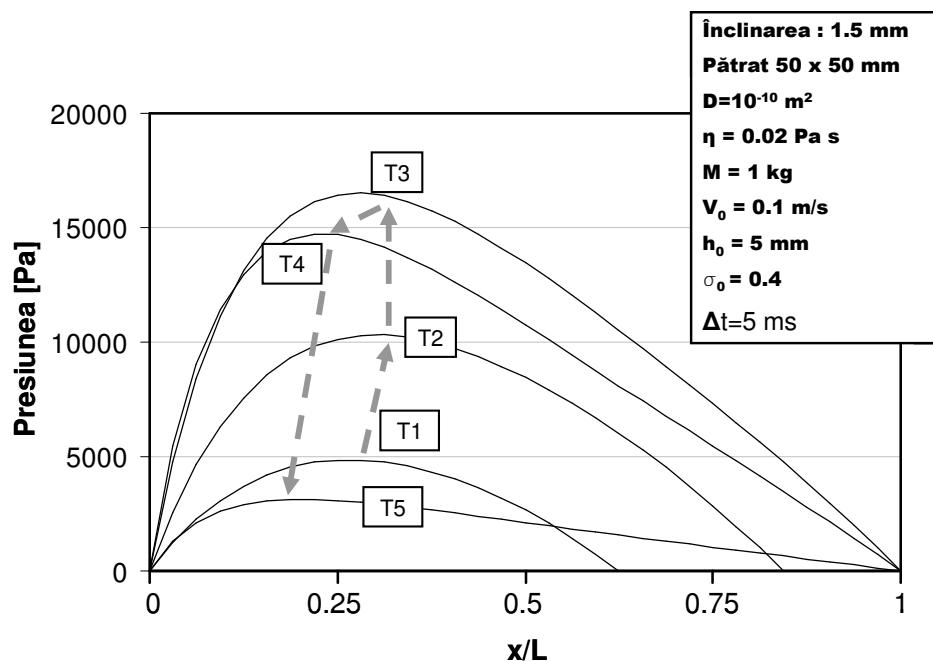


Fig. 38 Presiunile în lungul axei secțiunii de simetrie. Înclinare moderată

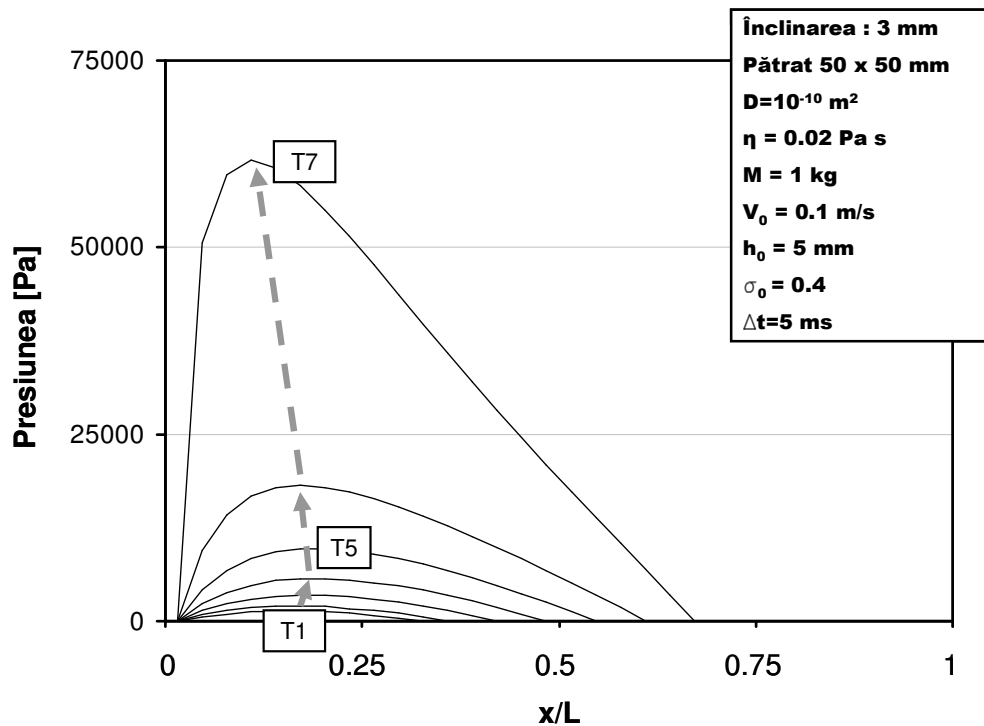


Fig. 39 Presiunile în lungul axei secțiunii de simetrie. Înclinare extremă

Comparând valorile maxime ale presiunilor în interiorul contactului pentru cazurile simetric, înclinare moderată și înclinare extremă (fig. 40) se poate observa că aspectul general al curbei este similar pentru primele două cazuri, prezentând valori mai mari pentru modelul moderat nealinat.

Pentru modelul puternic asimetric însă, după o zonă cu valori mici ale presiunii, corespunzătoare unei lipse a eficienței amortizării, valorile presiunii cresc brusc ieșind din grafic (urmează indentarea stratului poros comprimat până la compactitate egală cu unitatea).

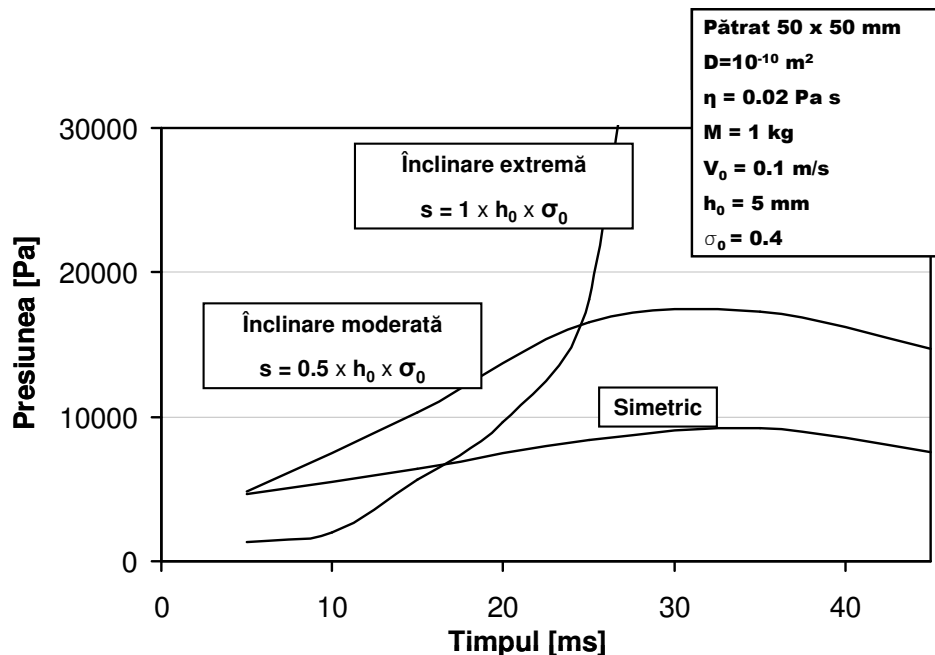


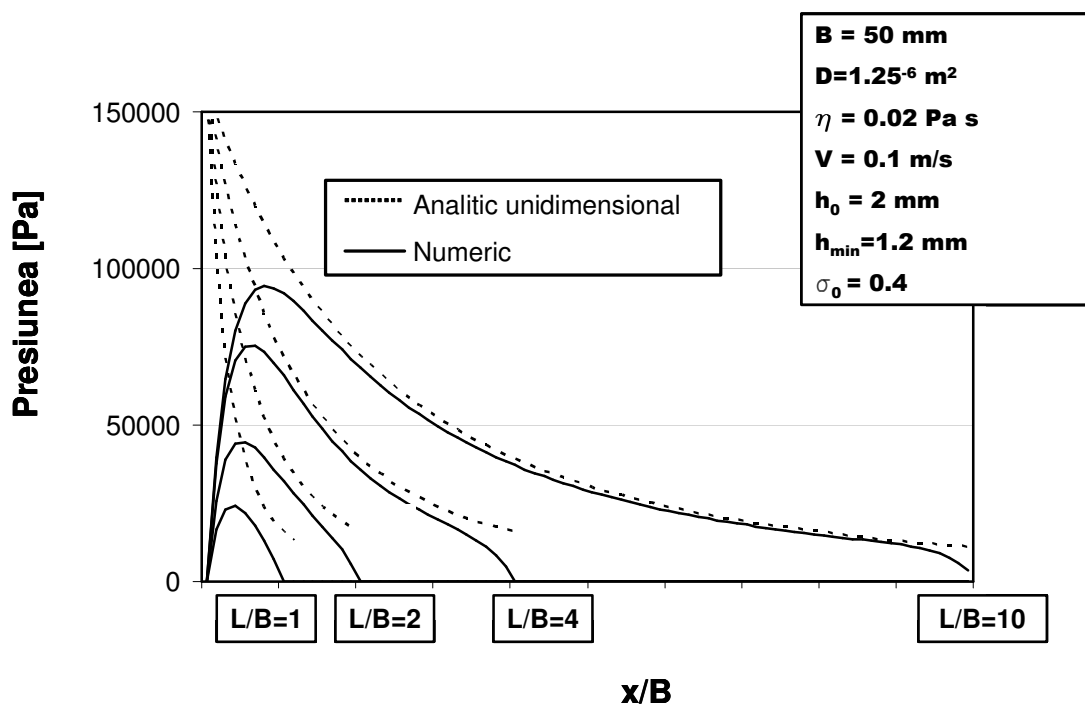
Fig. 40 Compararea evoluției valorilor presiunii maxime pentru cele trei cazuri considerate

Compararea rezultatelor cu modelul analitic unidimensional

Pentru validarea modelului numeric s-a apelat la compararea rezultatelor obținute cu cele ale modelului analitic unidimensional dezvoltat de profesorul Pascovici. Respectivul model consideră curgerea doar pe direcție normală la pantă, fiind valabil pentru cuple superioare, dreptunghiulare cu $L \gg B$.

În scopul comparării valorilor obținute prin cele două metode, au fost realizate modelări numerice pentru diverse rapoarte L/B . Se poate astfel evidenția influența acestui raport asupra distribuției de presiuni în secțiunea simetrică și compara valorile obținute prin cele două metode de calcul analitic unidimensional și numeric (fig. 41).

Concluzia este că pentru valori $L/B > 2$, se formează o zonă de „platou”, unde valorile obținute prin metode numerice sunt similare cu cele calculate analitic. Aceasta este limitată de pante relativ abrupte, corespunzătoare zonelor de capăt, unde curgerea pe direcția x are efect preponderent. Pentru rapoarte $L/B \leq 2$ curgerea este preponderent bidimensională pe toată suprafața contactului.



*Fig. 41 Comparația distribuției de presiuni.
Analitic vs. Numeric*

Observând convergența rezultatelor obținute prin cele două metode, analitică și numerică, putem trage concluzia validării celor două modele matematice, în condițiile aplicabilității ipotezelor de lucru ce au stat la baza elaborării acestora.

Capitolul 5. Studii experimentale

Experimente privind procesul de expulzare a filmului fluid prin șoc, în prezența unui strat poros permeabil deformabil

Scopul experimentului este de a studia efectele disipării energiei cinetice, pentru cazul impactului între un corp sferic rigid și un plan acoperit de strat poros permeabil deformabil.

Pentru transferul de energie către impactor s-a apelat la acumularea de energie cinetică prin cădere în câmp gravitațional. Ca impactor a fost folosită o sferă ceramică cu miez metalic având diametrul de 48 mm și masa de 560 g. S-a ales soluția impactorului sferic deoarece în acest caz nu este necesar controlul poziției unghiulare în momentul impactului. Căderea se poate realiza deci liber, fără necesitatea utilizării unor ghidaje, care să mențină într-o poziție determinată suprafața de contact a impactorului.

Pentru studiul efectelor s-a apelat la soluția analizei post-impact, prin studierea amprentei produse în stratul deformabil. În acest sens, stratul poros a fost așezat deasupra unui substrat plastic, având inițial suprafața plană. În urma șocului, pe acest substrat apar amprente de forma unor depresiuni.

Studiul amprentelor respective a permis:

- analiza calitativă a distribuției de presiuni;
- aproximarea energiei adsorbite, prin considerarea proporționalității între energia transferată către substratul plastic și volumul dislocat.

Sfera, având caracteristicile menționate mai sus, a fost lăsată să cadă liber asupra suprafeței plane a substratului deformabil de la 2 înălțimi diferite : 390 mm și 750 mm. S-au făcut experimente pentru 3 situații:

- cu substratul expus, fără strat poros cu rol de amortizare;
- substrat deformabil acoperit de stratul poros uscat;
- substrat deformabil acoperit de stratul poros îmbibat în lichid (apă).

Pentru verificarea repetabilității experimentelor, s-au realizat seturi de 3 experimentări pentru fiecare caz considerat.

Prelucrarea rezultatelor

Analiza rezultatelor s-a realizat prin interpretarea fotografică a amprentelor. S-a pus în evidență o secțiune transversală ce trece prin centrul amprentelor. În acest sens, s-a apelat la o procedură ce include 2 etape majore: etapa fizică și etapa de prelucrare digitală.

Etapă fizică

Presupune evidențierea unei secțiuni transversale și fotografierea acesteia la un unghi cât mai apropiat de orizontală.

În acest sens, s-a folosit adaptat soluția fantei de lumină, prin generarea unei lame de umbră. Sursa luminoasă folosită a fost soarele, oferind un bun paralelism al razelor, ceea ce a permis ca, prin amplasarea unui fir cvasi-unidimensional perpendicular pe direcția razelor solare, să se obțină un plan umbrat cu orientare verticală. Umbra acestui plan a fost proiectată (în practică mostra a fost amplasată în bătaia umbrei) pe suprafața de contact, în așa fel încât să “taie” centrul amprente.

Pentru etapa următoare de determinare a conturului este necesară amplasarea, în același cadru fotografic, a unui etalon de măsurare. Acesta permite, prin comparație, determinarea dimensiunilor reale ale conturului. Pentru experimente a fost folosită o bandă de măsurare (ruletă), gradată în milimetri. Pentru a evita erori de paralaxă, banda gradată a fost situată cât mai aproape de amprentă și în același plan cu secțiunea evidențiată. În figura 42 se poate vedea fotografia unei amprente, cu evidențierea secțiunii centrale și etalonul gradat situat deasupra.

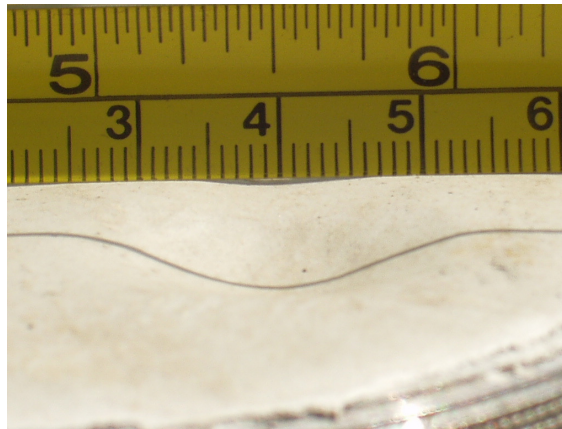


Fig. 42 Etapa fizică de prelucrare a unei amprente pentru evidențierea în secțiune a deformației

Etapa de prelucrare digitală

Pentru extragerea informației utile, etapele următoare presupun prelucrarea fotografiei într-un program specializat de grafică computerizată. Etapele prelucrării sunt următoarele:

- fotografia este importată în program;
- se procedează la scalarea acesteia, astfel încât milimetrii de pe rigla etalon să corespundă cu unitățile utilizate de program; în acest mod, curba evidențiată poate fi măsurată direct;
- sunt retrasate curba și linia de referință orizontală, ce definesc limita suprafeței înainte de amprentare; aceasta se realizează manual definindu-se puncte succesive, situate pe mijlocul conturului umbrat;
- etapa finală presupune îndepărtarea (ștergerea) fotografiei-fundal și rotirea ansamblului curbă/dreaptă de referință până la orizontalizarea dreptei.

În urma prelucrării, rezultatele experimentelor au fost triate după calitatea amprentelor (simetrie, fisuri, margini suprapuse etc).

Rezultate

Rezultatele evidențiază calitativ introducerea unei amortizări, prin reducerea adâncimii amprente. Dacă la încercarea fără material, s-a obținut o curbă sferică de aceeași rază cu cea a bilei impactor, lucru așteptat, în celelalte cazuri s-au obținut curbe având caracteristici distincte însă, în mod evident, de adâncimi mai mici, ceea ce dovedește existența unui proces de adsorbție a energiei de șoc. În figura 43 se pot observa rezultatele prelucrate pentru un material poros permeabil obținut din comerț și cele 2 înălțimi de cădere.

În cazul amortizării șocului, se poate observa că utilizarea stratului de amortizare nu duce la valori mărite ale deformației în zona centrală (fenomen de amplificare cunoscut în cazul unui șoc pur hidrodinamic), repartizarea efortului făcându-se mai uniform pe suprafața contactului.

Pentru analiza cantitativă a procesului de deformare s-a analizat adsorbția energiei de impact prin deformarea plastică a substratului. Pentru aceasta s-a procedat la generarea volumului dislocat prin rotirea unei jumătăți de secțiune în jurul axei de simetrie. În figura 44 se pot observa volumele generate astfel, pentru cazul contact neamortizat (fără strat poros) și contact amortizat cu strat poros îmbibat în fluid.

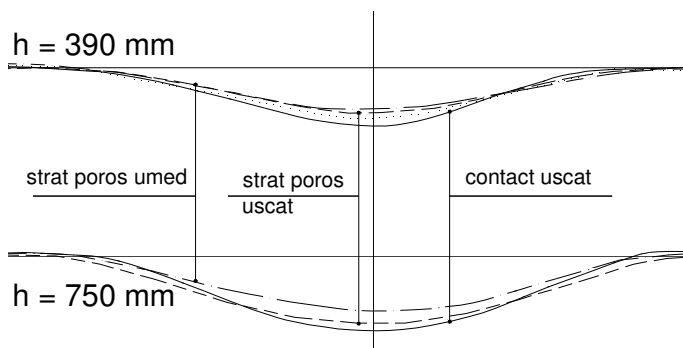


Fig. 43 *Reprezentarea secțiunilor amprentelor pentru două înălțimi de cădere: 390 mm și 750mm*

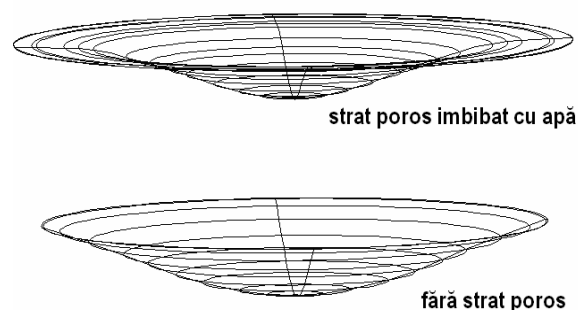


Fig. 44 *Volumele amprentelor generate computerizat*

Un prim pas constă în validarea corespondenței între energia de impact și volumul dislocat. Prima este dată de ecuația energiei potențiale a unui corp situat în câmp gravitațional :

$$E_c = \Delta E_p = m \cdot g \cdot h \quad (12)$$

Volumele sunt calculate de program pentru cele două amprente considerate. Comparația a validat ipotezele privind corespondența între energia adsorbită și volumul de material din substrat dislocat, cu diferență mai mică de 1% între cele două determinări.

Efectul amortizării este prezentat în figura 45, unde se poate vedea că, odată cu creșterea energiei de impact, crește și energia adsorbită de stratul poros, dar nu și ponderea acesteia în energia totală. Motivul se regăsește în deformația relativ mare a substratului. Astfel, în timp ce stratul poros avea o grosime medie estimată de 1.8 mm și o deformație maximă de 1.2-1.4 mm, în experimente substratul s-a deformat cu valori maxime situate între 1.85 și 3 mm.

Practic, în toate cazurile deformația substratului a fost mai mare decât deformația maximă posibilă a stratului poros amortizant. Consecința este că o mare parte a energiei s-a transferat în masa corpului plastic înainte de a putea fi amortizată de materialul poros.

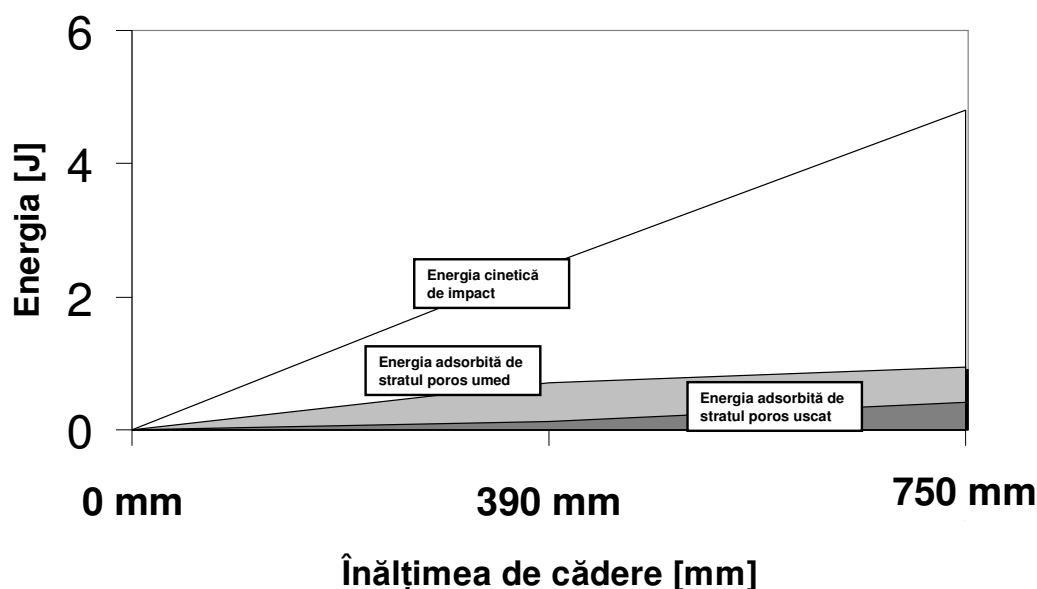


Fig. 45 Dependența energiei amortizate de energia cinetică totală

Studiile experimentale expuse în acest capitol au fost continuate și dezvoltate de către ing. Cristian Popescu rezultatele fiind prezentate în teza sa de doctorat și în lucrarea [Pascovici M.D., 2010].

Capitolul 6. Regulator de debit pe bază de medii poroase deformabile

Destinațiile restrictorilor în sistemele de lagăre hidrodinamice. Soluții clasice. Limitările și dezavantajele acestora.

Restrictorii sunt elemente esențiale în funcționarea sistemelor de lubrificație hidrostatică. Ei funcționează ca o rezistență hidrodinamică între sursa de alimentare, de regulă un sistem de alimentare la presiune constantă, și punctul de inserție a fluidului în buzunar. Rolul acestora este de a regulariza funcționarea sistemului atât în regim staționar, cât și în regimurile tranzitorii sau de avarie (momentul de ridicare, cazul pierderii presiunii în unul dintre lagăre etc.).

Din punct de vedere funcțional restrictorii se împart în [Stanciu S., 1985]:

1. **Dispozitive de alimentare fixe, numite și drosele** – care reprezintă rezistențe hidraulice fixe. În funcție de comportamentul lor la variația căderii de presiune acestea se împart în:
 - a. **liniare sau laminare**, în care curgerea fluidului se produce în regim laminar.
 - b. **Nelineare**, la care nu mai există o proporționalitate între căderea de presiune și debit.

Drosele prezintă avantajul principal al relativei simplități constructive, dar sistemele echipate cu acest gen de rezistențe hidraulice se caracterizează prin performanțe reduse în ceea ce privește asigurarea rigidității filmului portant - reflectată prin modificarea puternică a grosimii filmului de lubrifianț cu sarcina.

2. **Regulatele de debit** sau sistemele automate de alimentare sunt dispozitive ce își variază rezistența hidraulică astfel încât să mențină parametrii filmului portant în limite cât mai apropiate de condițiile de funcționare nominale.

Regulatele prezintă avantaje în ceea ce privește stabilitatea dinamică reflectată în menținerea grosimii filmului lubrifiant pentru o plajă mare a sarcinii, dar au dezavantaje legate de complexitatea constructivă, precizia de fabricație a componentelor și întreținerea acestora, ceea ce se reflectă în costurile de achiziție și exploatare.

În teză este prezentat un concept de regulator cu comandă de presiune, care este simplu de realizat, fiabil și tolerant la prezența impurităților solide în fluidul lubrifiant. Ca soluție constructivă s-a ales cea a unui strat poros de grosime redusă, inelar, comprimat între carcasa regulatorului și placa liberă, de formă circulară (figura 46). Curgerea se realizează prin materialul poros de la zona de presiune p_a , către zona de presiune p_b , de la periferie către centru, unde se găsește priza ce preia fluidul către lagărul hidrostatic propriu-zis.

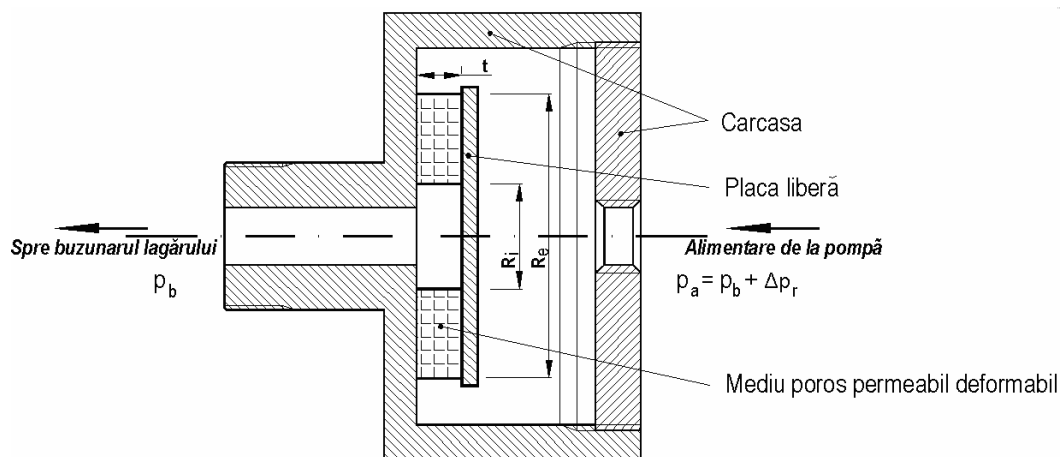


Fig. 46 Soluția constructivă. Geometria.

Placa liberă este atașată de materialul poros prin lipire, același procedeu fiind folosit și la interfața dintre materialul poros și carcasa.

Aplicații numerice

În analiza utilității unui astfel de regulator, s-a studiat comparativ utilizarea unor soluții clasice de restricori, de tip tub capilar și diafragmă, cu cea bazată pe permeabilitatea variabilă a unui mediu poros deformabil. A fost modelată funcționarea a trei regulate pe bază de medii poroase deformabile, diferențiate prin valoarea compactității inițiale σ_0 : 0.4, 0.5 și 0.6. Parametrii funcționali ai regulatelelor au fost ajustați în așa fel încât, pentru căderea de presiune în condiții nominale, de 1 MPa, să se asigure un debit de fluid $Q = 6.5 \text{ ml/s}$, corespunzător unei grosimi de film, $h = 42 \text{ }\mu\text{m}$, și unei presiuni în buzunar, $p_b = 1 \text{ MPa}$. Au mai fost modelați și un restrictor de tip capilar și unul tip diafragmă, ce îndeplinesc aceleași condiții funcționale.

Plecând de la aceste ipoteze, în figura 47 sunt prezentate caracteristicile *debit/cădere de presiune*. Se poate observa că, dacă sistemul funcționează în condițiile unei căderi de presiune mai mari decât cea nominală (corespunzătoare reducerii sarcinii sau depresurizării lagărului), utilizarea unui

restrictor de tip capilar ar conduce la creșterea semnificativă a debitului, ajungându-se la dublarea acestuia. În cazul utilizării reguletoarelor cu medii poroase deformabile, această creștere a debitului nu există, producându-se chiar o scădere a acestuia la anumite regimuri de funcționare. Restrictorul de tip diafragmă are un comportament mai apropiat de cel al reguletoarelor, dar nu asigură aceeași reducere a debitului la creșterea căderii de presiune în restrictor peste valoarea nominală.

În continuare, considerând aceleași caracteristicile celor 5 rezistențe hidraulice analizate mai sus, se poate face o comparație între rigiditățile filmului lubrifiant exprimate prin dependența grosimii filmului de sarcina preluată (fig. 48).

Se poate observa că pentru reguletoarele de debit bazate pe principiul permeabilității variabile a mediului poros, pe o plajă mare a sarcinii, situată în jurul valorii nominale, grosimea de film variază mai puțin cu sarcina, ceea ce se traduce prin creșterea rigidității filmului.

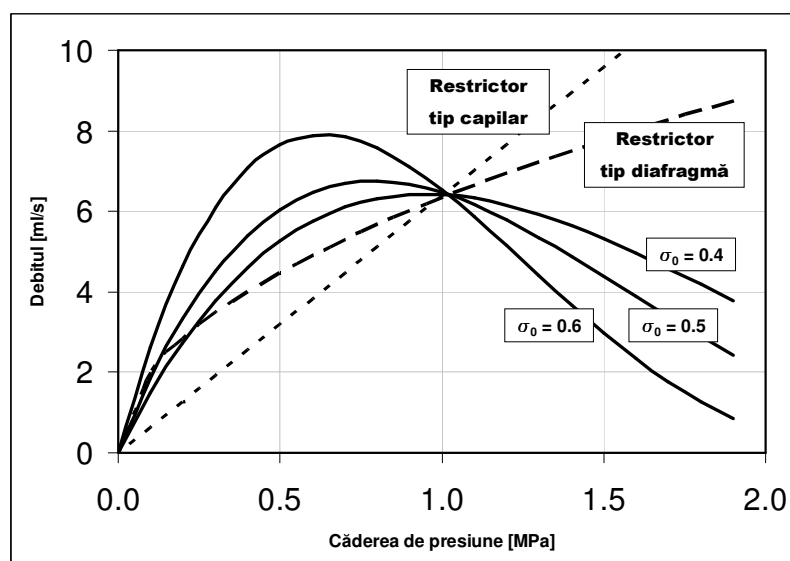


Fig. 47 Caracteristicile de debit pentru 3 reguletoare cu medii poroase deformabile, prin comparație cu restrictori echivalenți tip capilar și diafragmă

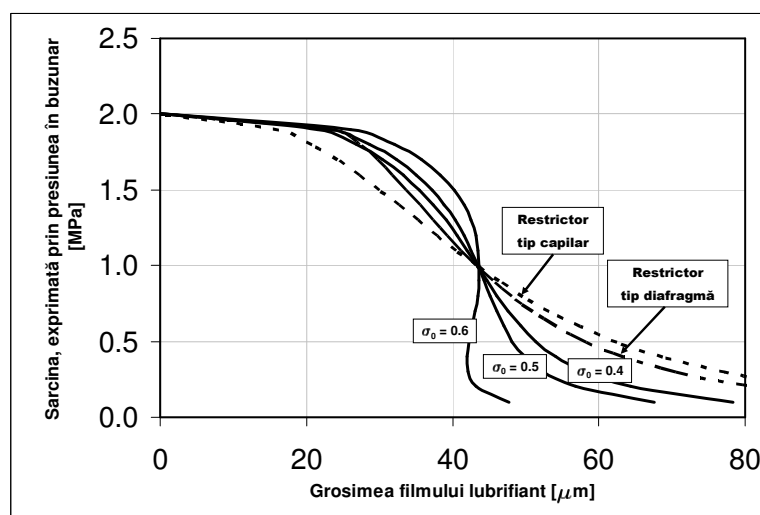


Fig. 48 Variația grosimii filmului de lubrifiant cu sarcina. Caracteristicile a 3 reguletoare cu medii poroase deformabile, prin comparație cu restrictori echivalenți tip capilar și diafragmă

Capitolul 7. Concluzii și perspective

Contribuții personale

În cadrul prezentei teze de doctorat au fost abordate atât studii teoretice, cu elaborarea unor modele analitice și dezvoltarea unor aplicații numerice, cât și experimentale. Punctual pe cele două direcții dezvoltate, studiile preliminare privind reodinamica și cele privind elasto-poro-hidrodinamica lubrificației, au fost atinse următoarele obiective:

I. Pe linia studiilor privind lubrificația în condiții reodinamice:

- a fost creat un model analitic privind procesul de expulzare a fluidelor lubrifiante cu un comportament visco-plastic, între suprafețe neconforme de revoluție (contact plan/sferă). Cu acest model s-au realizat aplicații numerice privind distribuția de presiuni în interiorul contactului și caracteristica de coborâre sub forță constantă;
- au fost concepute aplicații numerice bazate pe metoda diferențelor finite care să simuleze comportamentul unor cuple sferă-plan și cilindru/plan într-o mișcare cu cinematică impusă – mișcare alternativă apropiere-depărtare cu o funcție sinusoidală;
- s-au realizat experimente de determinare a timpului de coborâre sub acțiunea unei forțe constante;
- s-au realizat experimente privind mișcarea alternativă de apropiere și distanțare în configurațiile sferă-plan și cilindru-plan. Rezultatele experimentale au fost comparate cu cele calculate prin algoritmi numerici, obținându-se o concordanță satisfăcătoare între acestea.

II. Pe linia studiilor privind lubrificația în condiții elasto-poro-hidrodinamice:

- au fost realizate studii numerice privind un model de expulzare a filmului fluid în condiții complexe, ex-poro-elasto-hidrodinamice;
- au fost elaborați algoritmi semi-analitici pentru studiul amortizării șocului prin procese de expulzare a filmului fluid în condiții de lubrificație prin dislocație (pentru configurație axial-simetrică);
- au fost creați algoritmi numerici pentru procesele de expulzare a filmului fluid pentru alte configurații decât cele axial-simetrice, fiind realizate aplicații pentru configurații dreptunghiulare. Aplicațiile furnizează date despre distribuția de presiuni și caracteristica de forță, pentru cazurile viteză impusă de coborâre, forță constantă și amortizarea șocului. Modelarea a fost validată prin compararea rezultatelor cu cele obținute pe cale semi-analitică pentru configurații axial-simetrice similare;
- au fost create modelări numerice, iar în unul dintre cazuri și analitice, pentru studiul portanței create prin mișcare tangențială pentru diferite configurații ale patinei alunecătoare: treaptă Rayleigh, suprafețe înclinate și sferă;

- au fost realizate experimente privind adsorbția energiei de șoc pentru cazul sferă-plan prin analiza post-impact a amprentelor lăsate în substratul plastic;
- a fost imaginată o soluție de regulator de debit pe bază de medii poroase permeabile, puternic deformabile și au fost elaborate ipoteze analitice și aplicații numerice pentru predicția comportamentului acestuia în funcționare, prin comparare cu restrictori clasici de tip capilar și diafragmă.

Studiile au fost realizate și în cadrul a trei granturi de cercetare acordate de Ministerul Educației și Cercetării, precum și al unei Burse de Studiu tip Erasmus pe o perioadă de 3 luni, stagiul de cercetare fiind efectuat la IUT Angoulême, Universitatea din Poitiers, Franța.

Activitatea a fost valorificată în trei lucrări științifice, dintre care una în curs de publicare.

Concluzii și perspective

Activitatea desfășurată a demonstrat existența unor aplicații de nișă cu reală valoare de aplicabilitate în inginerie. Atât în cazul mișcării pe direcție normală, unde aplicațiile de amortizare a șocului reprezintă principala direcție de cercetare, cât și în cazul generării portanței prin mișcare tangențială, utilitatea lubrificației în condiții de dislocare a fluidului îmbibat în strat poros deformabil se transpune în mai buni parametri funcționali și costuri reduse de fabricație. Dacă vorbim de domeniul bio-lubrificației, analiza majorității proceselor, fără considerarea permeabilității mediului sau a frontierelor în care acestea au loc, nu poate duce la rezultate realiste ale modelărilor considerate.

În ceea ce privește modelele teoretice dezvoltate în cadrul prezentei teze, acestea au fost validate în mare parte prin comparație cu rezultate experimentale proprii sau cu valori preluate din literatură, ceea ce demonstrează corectitudinea ipotezelor ce au stat la baza elaborării lor.

Continuarea studiilor ar trebui orientată spre elucidarea unor aspecte precum:

- procesul la interfața mediu poros - patină glisantă;
- corectitudinea aproximării procesului de curgere prin mediul poros cu legea Darcy și ecuația Kozeny-Carman; construirea unor modele noi care să satisfacă mai exact rezultatele experimentale;
- studiul comportamentului în timp și al procesului de uzură și deteriorare a mediilor poroase puternic permeabile supuse la solicitări repetate. Stabilirea unor criterii privind solicitările maxime la care acestea pot fi supuse fără a se obține deteriorarea acestora.

De asemenea, plecând de la modelele teoretice existente și validarea acestora pe cale experimentală este necesară trecerea către aplicarea principiilor respective în produse tehnice cu aplicabilitate efectivă: lagăre, restrictori, pompe de viscozitate etc.

Bibliografie selectivă

- [Bear J., 1972] Dynamics of Fluids in Porous Media. *Bear J.*, Dover Publications, New York, 1972
- [Chicet D., 2010] Material obținut prin amabilitatea drd. Ing. Daniela Chicet, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi, Iași.
- [Darcy H., 1856] Les Fontaines publique de la ville de Dijon, Anexa D : Determination des lois d'écoulement de l'eau a travers le sables. *Darcy H.*, Editura Dunod, Paris, 1856
- [Feng J., 2000] Lubrication Theory in Highly Compressible Porous Media: The Mechanics of Skiing, from Red Cells to Humans. *Feng, J., Weinbaum S.*, J. Fluid Mech. Vol. 422, pp. 281-317, 2000.
- [Ghaddar C.K., 1995] On the Permeability of Unidirectional Fibrous Media. A Parallel Computational Approach, *Ghaddar C.K.*, Phys. Fluids, 7, 11, 2563-2586. 1995
- [McCutchen C.W., 1962] The Physical Properties of Animal Joints, *McCutchen C.W.*, Wear, 5, 1062, pp.1-17, 1962
- [Mirbod P., 2008] An Airborne Jet Train that Flies on a Soft Porous Track. *Mirbod P., Andreopoulos Y., Weinbaum S.*, The American Physical Society – 61th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, San Antonio/Texas November 23-25, 2008
- [Pascovici M.D., 1994] Procedeu de pompare prin dislocarea fluidului si dispozitiv pentru realizarea lui. Brevet de invenție. *Pascovici M.D.*, 109469, 1994.
- [Pascovici M.D., 2001] Elemente de tribologie. *Pascovici M.D., Cicone T.*, Ed. Brenn, 2001
- [Pascovici M.D., 2002] Squeeze-Film of Unconformal, Compliant and Layered Contacts. *Pascovici M.D.*, NORTRIB 2002, The 10th Nordic Symp. On Tribology, Stockholm June 9-12, 2002.
- [Pascovici M.D., 2003] Squeeze-Film of Unconformal Compliant and Layered Contacts. *Pascovici M.D., Cicone T.*, Tribology International 36, pp. 791-799, 2003
- [Pascovici M.D., 2004] Squeeze Film of Conformal, Layered, Compliant and Porous Contacts. *Pascovici M.D., Russu C., Cicone T.*, MTM, 2004
- [Pascovici M.D., 2007] Lubrication of Red Blood Cells in Narrow Capillaries. A Heuristic Approach. *Pascovici M.D.*, 2nd Vienna Intern. Conf. on Micro and Nano-technology, 95-100. 2007
- [Russu C., 2004] Theoretic Analysis of Squeeze-Flow inside Non-Conform Sphere-Plane Contact. *Russu C.*, Conferința VAREHD 12, 2004
- [Scheidegger A.E., 1974] The Physics of Flow through Porous Media, 3rd edition. *Scheidegger A.E.*, University of Toronto Press 1974
- [Stanciu S., 1985] Sisteme hidrostatice portante. *Stanciu S., Dumbravă M., Mazilu I.*, Editura Tehnică, București, 1985
- [Vinogradov V., 1973] Critical Regimes of Deformation of Liquid Polymeric Melts. *Vinogradov V.*, Acta Rheologica, vol. 12, p. 363, 1973
- [Weinbaum S., 2003] Mechanotransduction and Flow across the Endothelial Glycocalyx. *Weinbaum S., Xiaobing Zhang, Yuefeng Han, Vink H.*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003

CUPRINS

Capitolul 1. Introducere	1
Capitolul 2. Studii teoretice și experimentale asupra procesului de expulzare a filmului fluid newtonian	6
Capitolul 3. Studii teoretice asupra procesului de lubrificație prin dislocație în mișcare tangențială ...	15
Capitolul 4. Studii teoretice asupra procesului de expulzare în prezența unui strat poros permeabil ușor deformabil	19
Capitolul 5. Studii experimentale	25
Capitolul 6. Regulator de debit pe bază de medii poroase deformabile	28
Capitolul 7. Concluzii și perspective	31
Bibliografie selectivă	33