



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE
ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI



Școala Doctorală de Inginerie Mecanică
și Mecatronică

TEZĂ DE DOCTORAT

– REZUMAT –

ANALIZA NUMERICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A
COMPORTĂRII LA COMPRIMARE STATICĂ SAU DINAMICĂ A
MATERIALELOR POROASE, ÎMBIBATE CU LICHIDE

Doctorand: *Ing. Georgian-Cristian LUPU*

Conducător de doctorat: *Prof. dr. ing. Traian CICONE*

BUCUREȘTI
octombrie 2023

CUPRINS

CUVÂNT ÎNAINTE	4
INTRODUCERE	6
CAPITOLUL 1 STUDIU BIBLIOGRAFIC	8
1.1 PROPRIETĂȚILE MEDIILOR POROASE FOARTE COMPRESIBILE	8
1.1.1 <i>Definirea mediului poros</i>	8
1.1.2 <i>Porozitatea</i>	8
1.1.2.1 <i>Definire. Clasificări</i>	8
1.1.2.2 <i>Metode de determinare a porozității</i>	8
1.1.3 <i>Permeabilitatea</i>	9
1.1.4 <i>Corelarea permeabilității cu porozitatea</i>	9
1.1.4.1 <i>Corelații teoretice</i>	9
1.1.4.2 <i>Corelații experimentale</i>	9
1.1.4.3 <i>Porozitatea critică</i>	10
1.2 ECUAȚIILE CURGERII PRIN MEDII POROASE	10
1.2.1 <i>Modelul lui Darcy</i>	10
1.2.2 <i>Corecția Forchheimer</i>	11
1.2.3 <i>Studii privind curgerea prin materiale supuse comprimării</i>	11
1.3 LUBRIFICAȚIA XPHD	12
1.3.1 <i>Principii de bază</i>	12
1.3.2 <i>Modelul XPHD de expulzare la viteză constantă</i>	12
1.3.2.1 <i>Model analitic</i>	12
1.3.2.2 <i>Rezultate experimentale</i>	13
1.3.3 <i>Modelul XPHD de expulzare prin impact</i>	14
1.4 MATERIALE POROASE UȘOR DEFORMABILE CU APLICABILITATE ÎN LUBRIFICAȚIA XPHD ..	15
1.4.1 <i>Textile țesute și nețesute</i>	15
1.4.2 <i>Textile tridimensionale</i>	15
1.4.2.1 <i>Definirea textilelor tridimensionale</i>	15
1.4.2.2 <i>Metode de analiză și caracterizare a textilelor tridimensionale</i>	15
1.4.3 <i>Spume reticulate cu pori comunicanți</i>	17
1.4.3.1 <i>Elemente de teorie a materialelor poroase celulare</i>	17
1.4.3.2 <i>Comprimarea spumelor reticulate cu pori comunicanți</i>	17
1.4.3.3 <i>Permeabilitatea spumelor reticulate cu pori comunicanți supuse comprimării</i> ..	17
1.5 CONCLUZII	18
CAPITOLUL 2 EVALUAREA EFECTELOR INERȚIALE LA EXPULZAREA FLUIDELOR NEWTONIENE DIN STRATURI POROASE MOI, COMPRESATE. CONFIGURAȚIA DISC/ PLAN	18
2.1 MODELUL NUMERIC	18
2.2 ALGORITMUL DE CALCUL ȘI VALIDAREA MODELULUI NUMERIC	20
2.3 STUDIU PARAMETRIC	20
2.3.1 <i>Influența coeficientului Forchheimer și a porozității inițiale</i>	21
2.3.2 <i>Influența fluidului și a vitezei de comprimare</i>	21
2.4 CONCLUZII	23
CAPITOLUL 3 DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A LIMITEI DE PERMEABILITATE A SPUMELOR RETICULATE CU PORI COMUNICANȚI	23
3.1 DISPOZITIVUL EXPERIMENTAL	23
3.1.1 <i>Elemente constructive</i>	23
3.1.2 <i>Evaluarea frecării din dispozitivul experimental</i>	24
3.2 PROCEDURA EXPERIMENTALĂ	24
3.3 REZULTATE EXPERIMENTALE	24
3.4 CONCLUZII	26

CAPITOLUL 4 STUDIUL EXPERIMENTAL AL COMPORTĂRII LA COMPRESIE PERIODICĂ A SPUMELOR RETICULATE CU PORI COMUNICANȚI, ÎMBIBATE CU FLUIDE	26
4.1 STANDUL EXPERIMENTAL.....	26
4.2 MATERIALE UTILIZATE.....	28
4.3 PROCEDURA EXPERIMENTALĂ.....	28
4.4 REZULTATE EXPERIMENTALE.....	28
4.4.1 <i>Teste cu ulei</i>	30
4.4.1.1 Influența porozității.....	30
4.4.1.2 Influența amplitudinii camei și a comprimării inițiale.....	31
4.4.1.3 Repetabilitatea rezultatelor.....	32
4.4.2 <i>Teste cu apă</i>	32
4.4.2.1 Configurația modificată a celulei experimentale.....	32
4.4.2.2 Rezultate experimentale.....	32
4.5 CONCLUZII.....	33
CAPITOLUL 5 SIMULAREA NUMERICĂ A PERMEABILITĂȚII UNUI MATERIAL TEXTIL TRIDIMENSIONAL SUPUS COMPRESIUNII	34
5.1 CARACTERIZAREA MORFOLOGICĂ.....	34
5.1.1 <i>Determinarea materialului</i>	34
5.1.2 <i>Modul de tricotare a straturilor exterioare</i>	34
5.1.3 <i>Determinarea diametrului și a modulului de elasticitate la tracțiune al firelor de legătură</i>	35
5.1.3.1 Descrierea configurației și procedurii experimentale.....	35
5.1.3.2 Evaluarea diametrului mediu.....	35
5.1.3.3 Determinarea modulului de elasticitate.....	36
5.2 DETERMINAREA PROPRIETĂȚILOR MECANICE LA COMPRESIE CU VITEZĂ CONSTANTĂ.....	36
5.3 MODELAREA 3D A UNEI CELULE REPREZENTATIVE.....	38
5.3.1 <i>Scanarea pe computer tomograf și prelucrarea fișierului scanat</i>	38
5.3.2 <i>Definirea și modelarea 3D a unei celule reprezentative</i>	38
5.3.3 <i>Transferul modelului solid în programul Abaqus pentru analiza structurală neliniară</i>	39
5.4 SIMULAREA COMPORTĂRII LA COMPRESIE.....	40
5.4.1 <i>Fire de legătură cu înălțime egală</i>	40
5.4.2 <i>Fire de legătură cu înălțimi diferite</i>	42
5.5 SIMULAREA CURGERII UNUI LICHID NEWTONIAN PRIN CELULA REPREZENTATIVĂ.....	42
5.5.1 <i>Transferul modelului cu elemente finite în Ansys Fluent</i>	42
5.5.2 <i>Descrierea modelelor realizate în Fluent</i>	43
5.5.3 <i>Evaluarea numerică a permeabilității materialului S3DU-HI</i>	43
5.5.3.1 Compararea modelelor realizate cu diferite fluide și condiții la limită.....	43
5.5.3.2 Verificarea condițiilor la limită pentru cazul curgerii printr-o conductă.....	44
5.5.3.3 Influența numărului de celule reprezentative.....	45
5.5.4 <i>Analiza permeabilității utilizând extensia Dupuit-Forchheimer a legii Darcy</i>	45
5.6 COMPARAREA PERMEABILITĂȚII CALCULATE CU REZULTATE EXPERIMENTALE.....	47
5.7 CONCLUZII.....	49
CAPITOLUL 6 CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	49
6.1 CONCLUZII GENERALE.....	49
6.2 CONTRIBUȚII PERSONALE.....	51
6.3 DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....	52
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	53
DISEMINAREA REZULTATELOR	58

CUVÂNT ÎNAINTE

Teza de doctorat reprezintă sinteza activităților de cercetare științifică efectuate în perioada octombrie 2018 – septembrie 2023. Studiile doctorale s-au desfășurat în cadrul Dept. Organe de Mașini și Tribologie al Facultății de Inginerie Mecanică și Mecatronică din (fosta) Universitatea Politehnică din București. În această perioadă am avut șansa să particip la două stagii de cercetare în cadrul echipei TriboLub (Mécanique des Interfaces Lubrifiées) din locația Angoulême, parte a Dept. Génie Mécanique et Systèmes Complexes, Institut PPRIME (Université de Poitiers). Stagiile au fost finanțate prin programul Erasmus+ iar durata acestora a fost de 4, și respectiv 5 luni (perioada martie-iulie 2021 și ianuarie-mai 2023). De asemenea, pe parcursul ultimului an de studiu am beneficiat de sprijin financiar prin proiectul „Pregătirea doctoranzilor și cercetătorilor postdoctorat în vederea dobândirii de competențe de cercetare aplicativă – SMART”, cod MySMIS 153734, cofinanțat din Fondul Social European (FSE), prin Programul Operațional Capital Uman (POCU) 2014-2020.

Mă aflu acum într-un moment în care închei o etapă importantă și provocatoare a pregătirii mele profesionale și remarc, în primul rând, progresul pe care l-am făcut ca ființă socială. Pentru că studiile doctorale nu se rezumă doar la teorii, concluzii sau perspective. Înainte de orice, această perioadă este despre oamenii care mi-au stat alături și fără de care nu aș fi putut reuși nimic. Către ei se îndreaptă acum gândurile mele și recunoștința pe care o pot reproduce prin cuvinte.

Îi adresez mulțumiri conducătorului meu de doctorat, domnul prof. Traian CICONI, în primul rând, pentru că a acceptat acum 8 ani să mă îndrume către finalizarea masterului. În al doilea rând, îi mulțumesc pentru că mi-a oferit onoarea de fi primul student condus de dumnealui către finalizarea doctoratului. Îmi doresc ca într-o zi să răsplătesc încrederea și energia pe care a investit-o în mine! Colaborarea cu domnul profesor mi-a oferit privilegiul să am alături un om de o deosebită valoare profesională implicat atât științific, cât și uman. Prin pasiune și tenacitate, m-a inspirat să mă autodepășesc continuu. Îi mulțumesc pentru împărtășirea cunoștințelor dumnealui vaste din domeniul tribologiei, metodelor numerice și nu numai. Îi mulțumesc pentru sprijinul moral și pentru măiestria cu care a reușit să mă readucă mereu pe drumul ales, în special în momente în care îmi doream să renunț.

Participarea la stagiile de cercetare mi-a oferit oportunitatea de a colabora cu domnul prof. Aurelian FĂTU, coordonatorul celor două stagii. Stilul elegant, perseverent și vastele dumnealui cunoștințe în domeniul analizei numerice, tribologiei și nu numai, m-au ajutat să progrez către obținerea și deslușirea unor părți foarte importante ale rezultatelor complexe prezentate în cadrul lucrării. Îi sunt profund recunoscător pentru implicarea totală în problema modelării comprimării și a curgerii printre fire. Am avut enorm de învățat de la dumnealui și cu siguranță acest moment ar fi fost mult mai îndepărtat în timp dacă nu aș fi avut șansa să lucrez cu un profesionist desăvârșit și pasionat. Îi mulțumesc că a avut mereu grijă să îmi facă șederea mai plăcută pe parcursul celor două stagii. Apreciez în mod deosebit, energia pozitivă și simțul umorului, prin care a reușit adeseori să mă facă să trec peste dezamăgirile specifice încercărilor experimentale. Îi mulțumesc pentru analiza lucrării și observațiile valoroase și că m-a onorat acceptând participarea în cadrul comisiei de doctorat.

Am o stimă deosebită pentru domnul prof. Mircea D. PASCOVICI care a acceptat să analizeze lucrarea mea de doctorat și să fie parte din comisia de doctorat. Este o imensă onoare pentru mine ca mentorul profesorului meu și al atâtor generații de doctoranzi pe care i-a condus cu profesionalism, exigență științifică și rigoare academică în domeniul tribologiei și lubrificației XPHD să participe la procesul de evaluarea al rezultatelor studiilor mele doctorale. Dumnealui îmi port o imensă recunoștință pentru aprecierile constructive pe care mi le-a oferit pe parcursul rapoartelor susținute, pentru ideile creative împărtășite, dar în mod deosebit pentru zâmbetele și energia pozitivă pe care mi le-a transmis cu fiecare ocazie în care am avut oportunitatea de purta o conversație cu dumnealui.

Îi mulțumesc domnului prof. Ilie MUSCĂ de la Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava că m-a onorat acceptând să facă parte din comisia de doctorat, pentru timpul acordat citirii și analizei lucrării precum și pentru observațiile formulate. De asemenea, țin să îi mulțumesc domnului prof. Radu CHIRIAC pentru prezidarea comisiei.

Îi mulțumesc nespus domnului ș.l. Petrică TURTOI pentru sprijinul acordat și profesionalismul în redactarea articolelor scrise împreună, a interpretării datelor experimentale obținute dar mai ales pentru comentariile și observațiile valoroase primite pe parcursul susținerii rapoartelor de cercetare, în calitatea sa de membru al comisiei de îndrumare. De asemenea, îi sunt profund recunoscător pentru bunătatea, generozitatea și sprijinul moral oferit pe parcursul întregii perioade.

Doresc să le mulțumesc în mod deosebit membrilor comisiei de îndrumare, domnului prof. Adrian PREDESCU și ș.l. Nicolae STOICA, pentru sfaturile dumnealor valoroase și pentru critica constructivă a rapoartelor științifice care au crescut astfel valoarea lucrărilor elaborate.

Adresez mulțumiri membrilor laboratorului PPRIME, în special domnului MCF Yann HENRY pentru aportul decisiv și implicarea în realizarea standului de comprimare ciclică și nu numai, precum și domnului MCF Mohamed JARRAY pentru sfaturile și îndrumările valoroase de pe parcursul simulărilor numerice realizate în Fluent. Gânduri de recunoștință deosebită se îndreaptă și către Baptiste COUDERC pentru spiritul inovativ și cunoștințele tehnice care au ajutat la modificarea standului experimental. Pe această cale doresc să îi mulțumesc și domnului tehnician Cédric DELIAS pentru sprijinul oferit în asamblarea standului. Nu în ultimul rând aș vrea să adresez mulțumiri doctoranzilor din laboratoarele PPRIME și XLIM, pentru căldura cu care m-au primit în rândul lor, în special lui Maxime LANG, pentru amintirile frumoase și momentele amuzante.

Îi mulțumesc respectuos domnului tehnician Mihai ROZOREA pentru ajutorul tehnic oferit pe parcursul întregii perioade. Dumnealui este un om și un specialist pe care îl admir foarte mult deoarece se pune mereu, cu pasiune și creativitate, la dispoziția studenților, pentru a realiza produsele ingenioase necesare în activitățile de cercetare.

Colegei drd. Alice MARINESCU îi sunt recunoscător pentru ajutorul oferit la realizarea testelor de comprimare la viteză constantă și implicarea în obținerea micro-tomografiei computerizate a materialului tip spacer. Îi mulțumesc, în special, pentru sprijinul moral în momentele dificile, pentru sfaturile și cuvintele alese, oferite cu sinceritate pe parcursul celui de-al doilea stagiu Erasmus, în care am avut șansa unor schimburi de opinii foarte reușite, atât științifice, cât și personale.

Doresc să mulțumesc domnului ș.l. Dragoș APOSTOL din Dept. de Rezistența Materialelor pentru sprijinul oferit în obținerea rezultatelor la comprimare cu viteză constantă. De asemenea țin în mod deosebit să îi mulțumesc doctorandului Cătălin ENESCU pentru măsurătorile de permeabilitate realizate în vederea comparației cu rezultatele numerice. Îi mulțumesc domnului Eduard MOSES pentru sfaturile valoroase privind utilizarea Ansys Fluent.

Adresez sincere mulțumiri domnilor ing. Octavian NICA și ing. Octavian URECHE de la ICPEST pentru ajutorul și suportul tehnic oferit în ultimul an. De asemenea aș dori să mulțumesc domnilor Florin PISICĂ și Florin SAMOILĂ de la Top Metrology (România) a căror contribuție generoasă cu o scanare 3D profesionistă a făcut ca rezultatele obținute să fie mai valoroase.

Le mulțumesc colegilor și managementului din Agenția de Cercetare pentru Tehnică și Tehnologii Militare pentru sprijinul și înțelegerea de care au dat dovadă în tot acest timp.

Aș dori să-mi îndrept gândurile de recunoștință către părinți, familia extinsă și prieteni care au înțeles eforturile mele din această perioadă și care m-au sprijinit și încurajat.

Nu în ultimul rând, aș dori să îi mulțumesc logodnicei mele BEATRICE, pentru răbdare, înțelegere și sprijinul necondiționat pe parcursul întregii perioade, fără de care nu aș fi reușit nimic!

În acest moment mă încercă stări contrarii, fiind fericit că finalizez o perioadă complicată, dar totodată trist pentru că se încheie ultimul ciclu al vieții mele de student. Însă, „orice nou început vine de la sfârșitul unui alt început” (Seneca). Întreaga mea pregătire academică a fost un drum tortuos, printre noțiuni complexe și provocatoare, plin de sușuri și coborâșuri dar care nu a fost niciodată prea greu pentru că am avut alături profesioniști desăvârșiți și oameni de o calitate extraordinară cărora doresc să le transmit încă o dată, cu stimă și deosebit respect, un simplu și sincer...

VĂ MULȚUMESC !

Cuvinte cheie: materiale poroase moi, textile 3D, spume reticulate, îmbibare cu lichide newtoniene, lubrificație ex-poro-hidrodinamică, expulzare prin comprimare, permeabilitate-porozitate, porozitate critică, frecvență de comprimare ciclică, reîmbibare, micro-tomografie computerizată, celulă reprezentativă periodică, analiză structurală neliniară, analiză CFD, curgere Darcy, curgere Darcy-Forchheimer

INTRODUCERE

La originea activităților desfășurate pe parcursul pregătirii doctorale se află studiile dezvoltate în ultimii 20 de ani în Laboratorul de Lubrificație (departamentul Organe de Mașini și Tribologie - OMTR) din UPB, focalizate pe utilizarea straturilor poroase foarte deformabile, îmbibate cu lichide, ca soluție de reducere a efectelor impactului.

Mecanismul care produce acest efect a fost denumit de cel care a inițiat și condus aceste studii, prof. M.D. Pascovici, lubrificație ex-poro-hidrodinamică (XPHD). Mecanismul are la bază rezistența la curgere prin structura poroasă, supusă comprimării normale. Comprimarea modifică continuu porozitatea și implicit permeabilitatea, ceea ce face ca rezistența la expulzarea fluidului să fie crescătoare.

Același mecanism poate avea efecte pozitive în generarea de presiuni hidrodinamice și în cazul unei mișcări de alunecare. Studiile în această direcție au fost demarate în urmă cu circa 10 ani în colectivul de la Angoulême din Institut Pprime, condus de prof. Aurelian Fătu.

De aici și interesul comun al celor două colective, care a condus la desfășurarea unor activități de cercetare comune asupra curgerii fluidelor prin materialele poroase. În acest cadru s-au derulat studiile prezentate în această teză, care au inclus două stagii de câte 4 luni în cadrul Institut Pprime.

Abordarea acestui subiect presupune studii multi-disciplinare asupra morfologiei și compresibilității materialelor poroase, asupra permeabilității acestora, corelată cu porozitatea, precum și studii de reologie a fluidelor și de modelare a curgerii prin structura poroasă în condițiile comprimării variabile.

Studiile prezentate în această lucrare încearcă să lămurească unele aspecte fundamentale ale curgerii fluidelor newtoniene prin porii comunicanți ai unor materiale poroase moi, supuse comprimării, în scopul utilizării acestora la atenuarea impactului, amortizare sau la generarea portanței prin mișcare de translație.

Aceste ultime observații relevate din studiul bibliografic au condus la obiectivele studiilor desfășurate în cadrul programului de doctorat, și anume:

- Determinarea, prin simulare numerică, a influenței efectelor inerțiale (curgere Darcy-Forchheimer) la expulzarea lichidelor prin medii poroase compresibile, care conduc și la stabilirea limitelor de utilizare a modelului Darcy de curgere (curgere laminară).
- Punerea în evidență, pe cale experimentală, a porozității limită efectivă (porozitate critică) de la care porii se închid iar curgerea prin stratul poros nu mai este posibilă.
- Studiul experimental al capacității de amortizare și de reîmbibare a materialelor poroase, îmbibate cu lichide, solicitate compresiunii ciclice.

- Simularea numerică complexă a evoluției structurale a textilelor tridimensionale solicitate la comprimare.
- Simularea numerică complexă (CFD) a curgerii fluidului prin structura fibroasă a textilelor tridimensionale corelată cu configurația structurală modificată prin comprimare.

Teza este structurată în cinci capitole importante:

- *Capitolul 1* prezintă stadiul actual al cercetărilor de interes pentru subiectul abordat, respectiv caracterizarea materialelor poroase de interes, modelarea curgerii prin materiale poroase. O parte importantă este dedicată descrierii textilelor tridimensionale și a încercărilor de modelare a comportării acestora la compresiune.
- *Capitolul 2* prezintă un model de analiză a curgerii unui fluid newtonian printr-un strat poros, axial simetric, în condițiile comprimării continue a acestuia, cu luarea în considerație a efectelor inerțiale (curgere Darcy-Forchheimer). Capitolul include și o analiză a influenței unor parametri funcționali asupra câmpului de presiune generat prin comprimare.
- *Capitolul 3* este dedicat analizei limitei de permeabilitate a materialelor poroase reticulate cu pori deschiși. Este prezentat un dispozitiv experimental original, metodologia utilizată și rezultatele obținute.
- *Capitolul 4* include o analiză experimentală a capacității de amortizare a două materiale poroase de interes (structuri reticulate respectiv textile 3D) în condițiile comprimării ciclice. Studiul pune în evidență capacitatea de reîmbibare a mediului poros în funcție de frecvența comprimării și nivelul de comprimare.
- *Capitolul 5*, cel mai amplu, cuprinde o simulare a comportării la comprimare a unui material textil tridimensional (Spacer 3D) digitalizat în urma unei prelucrări complexe a imaginilor obținute prin micro-tomografie computerizată și comparația cu rezultate experimentale proprii. În partea a doua a capitolului este simulată curgerea unui fluid newtonian, prin structura comprimată la diferite nivele, în scopul determinării variației permeabilității cu porozitatea. Rezultatele sunt comparate cu date experimentale din terțe surse.

Teza se încheie printr-un capitol de concluzii, o enumerare a principalelor contribuții, cu accent pe elementele de noutate, precum și cu creionarea unor direcții de evoluție în cunoașterea proceselor studiate.

CAPITOLUL 1 STUDIU BIBLIOGRAFIC

Începând cu 1994, prof. M.D. Pascovici (UPB) evidențiază calitatea materialelor poroase, ușor deformabile, de a genera efecte de portanță, când sunt îmbibate cu fluid, și analizează legătura între curgerea unui fluid prin porii comunicanți și deformarea accentuată a acestora [72]. Procesul a fost denumit lubrificație ex-poro-hidrodinamică¹ (XPHD) [73].

Comparativ cu regimul hidrodinamic clasic, forțele portante sunt mai mari (pentru aceeași geometrie, viteză și lubrifiant) [74]. Capacitatea materialelor poroase îmbibate de a asigura o portanță superioară a fost analizată independent și confirmată de rezultatele echipelor conduse de prof. S. Weinbaum (City University, New York [28],[103]) și L.J. Gibson (MIT [21]), oferindu-i astfel un caracter internațional.

Întrucât anumite rezultatele experimentale s-au dovedit dificil de corelat teoretic, este necesară testarea limitelor ipotezelor simplificatoare ale lubrificației XPHD, în scopul obținerii unui model cu o aplicabilitate extinsă.

1.1 PROPRIETĂȚILE MEDIILOR POROASE FOARTE COMPRESIBILE

1.1.1 Definirea mediului poros

Se prezintă câteva definiții mai importante ale mediului poros ([6], [7], [8]) și modul de abordare a fenomenelor de transport (la nivel micro și macro) asociate curgerii fluidelor prin porii structurii, punctând tendințele în domeniu și câteva aspecte critice ([83], [89]).

1.1.2 Porozitatea

1.1.2.1 Definiție. Clasificări

Se definesc porozitatea (ϵ), porozitatea efectivă (ϵ_{ef}) [88] și mărimea inversă a porozității (compactitatea). Se prezintă câteva aspecte mai importante despre structura mediilor poroase și impactul tipurilor de pori întâlniți asupra procesului de curgere prin acestea [85].

1.1.2.2 Metode de determinare a porozității

Sunt descrise succint metodele directe de determinare a porozității.

1.1.2.2.1 Determinarea porozității prin scanarea pe computer tomograf

Se prezintă câteva avantaje ale utilizării micro-tomografiilor computerizate pentru studiul porozității la diferite stadii de comprimare ale materialelor ([49]), cât și pentru reconstruirea structurii interne unor materiale poroase textile ([40]).

¹ Denumirea a fost obținută prin asocierea a trei termeni absolut necesari pentru apariția acestui mecanism: „ex-” (expulzarea/ extragerea fluidului), „poro-” (prin/ din porii structurii poroase) și „hidrodinamic” (prin dezvoltarea unor forțe generate de punerea în mișcare a fluidului din interstițiul poros). [73]

1.1.2.2 Determinarea porozității prin metoda volumetrică

Se descrie metoda utilizată în UPB pentru determinarea porozității inițiale efective ($\varepsilon_{0_{ef}}$) a unor materialelor de interes pentru lubrifiția XPHD. Se prezintă rezultatele unor măsurători efectuate în studii anterioare și câteva observații asupra preciziei metodei ([92], [81]).

1.1.3 Permeabilitatea

Se definește permeabilitatea (ϕ), sunt prezentate unitățile sale de măsură și este descrisă metoda de calcul a permeabilității intrinseci a materialelor poroase, din date determinate experimental și modelul de curgere Darcy [17].

Sunt amintite diferitele moduri de determinare ale permeabilității pentru categoria materialelor țesute sau cu fibre, în funcție de izotropia acestora ([32], [55]). De asemenea, se prezintă diferența dintre permeabilitatea statică și cea dinamică, ce apare la viteze de curgere mari datorate deformării rapide a matricei solide sau a apariției unei unde de șoc [101].

1.1.4 Corelarea permeabilității cu porozitatea

1.1.4.1 Corelații teoretice

Sunt subliniate limitările diferitelor variante de modele cu canale capilare, bazate pe teoria Hagen-Poiseuille, și sunt prezentate două noi proprietăți geometrice (suprafața ariei specifice medie și tortuozitatea) propuse în [88] pentru ameliorarea acestora.

Din modelele cu canale capilare derivă teoriile ce folosesc conceptul de rază hidraulică, bazate pe observația că permeabilitatea are dimensiunea unei arii. Se prezintă relația Kozeny-Carman ([48], [13]), utilizată în modelările teoretice ale grupului Pascovici în forma [34]:

$$\phi = \frac{D \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (1.1)$$

În relația (1.1) $D = d_f^2/16k$, d_f este diametrul mediu al fibrelor materialului și k , un factor determinat empiric (variază în intervalul 5÷10) pentru corelarea dependenței $\phi - \varepsilon$.

O ultimă categorie de modele este cea bazată pe teoria rezistenței la curgere, care consideră pereții porilor drept obstacole care se opun curgerii liniare a fluidului. Ele se diferențiază, în funcție de forma geometrică, în teorii cu obstacole sub formă de fibre [25] sau sub formă de sfere [12] și conduc la rezultate bune pentru materiale cu porozități mari.

1.1.4.2 Corelații experimentale

Sunt prezentate abordări din literatură privind determinarea permeabilității și corelarea acesteia cu porozitatea unor materiale poroase tehnice.

În studiile realizate pe materiale cu porozități foarte mari ([103], [104], [64]), îmbibate cu aer, corelarea permeabilității cu porozitatea la viteze de curgere reduse este descrisă precis de modele derivate din Kozeny-Carman, bazate pe legi de variație ale factorului k cu porozitatea ([39], [91]).

Se amintește că mecanismul XPHD necesită determinarea permeabilității în regim Darcy, pentru identificarea unor materiale potrivite și completarea relației Kozeny-Carman cu valoarea

parametrului D din relația (1.1). Omogenitatea și izotropia materialelor studiate a condus la construirea sau adaptarea unor standuri experimentale pentru măsurarea permeabilității.

Pentru materialele analizate de grupul Pascovici, modelul Kozeny-Carman asigură un nivel bun de corelare al determinărilor experimentale. Pentru valori medii ale porozității, observația este valabilă și atunci când vitezele de curgere ale fluidului nu mai variază liniar cu gradientul de presiune impus [93]. Pentru porozități reduse, chiar și în condiții de curgere Darcy, modelul Kozeny-Carman subestimează permeabilitatea cu câteva ordine de mărime, fiind necesară identificarea altor modele de corelare sau utilizarea unor valori ale factorului de corecție empiric k , diferit de intervalul indicat în literatură [26].

Se emite concluzia că modelul Kozeny-Carman nu reușește întotdeauna corelarea precisă a permeabilității cu porozitatea și că majoritatea modelelor teoretice prezintă limitări, datorate condițiilor particulare de desfășurare a măsurărilor. În literatură se observă că se obțin valorile diferite ale permeabilității, chiar și cu un ordin de mărime, între experimente realizate în aceleași condiții ([45], [59]).

Complexitatea standurilor, costurile experimentale și limitările practice de măsurare a debitului conduc la necesitatea unor abordări diferite, prin metode statistice sau deterministe.

1.1.4.3 Porozitatea critică

Se prezintă un aspect discutabil al modelărilor teoretice de corelare a permeabilității cu porozitatea, ce presupun că permeabilitatea devine nulă atunci când porozitatea este de asemenea nulă. Această limitare a fost observată și din studii care analizează procesul de consolidare a materialelor compozite laminate, în care se evidențiază apariția unei compactități critice de la care curgerea fluidului nu se mai produce ([37], [38], [32]).

Se subliniază necesitatea determinării valorii nule (critice) a porozității, în special pentru materialele cu porozități mari, de la care nu mai există pori comunicanți (deschiși) prin care fluidul să mai poată curge.

1.2 ECUAȚIILE CURGERII PRIN MEDII POROASE

Se discută utilitatea abordării macroscopice pentru a analiza curgerea prin medii poroase și se prezintă conceptul de volum elementar reprezentativ (VER) [68]. Se accentuează condiția esențială pentru curgerea prin medii poroase (existența porilor comunicanți de-a lungul mediului) și sunt introduse materialele care au toți porii conectați, care mai sunt denumite și materiale poroase reticulate ([18], [19], [20], [21]).

1.2.1 Modelul lui Darcy

Se prezintă forma diferențială a legii lui Darcy pentru un mediu omogen și izotrop, ocupat de un fluid incompresibil, când se neglijează influența forței gravitaționale ([88], [68]):

$$\text{grad } P = -\frac{\eta}{\phi} \vec{u} \quad (1.2)$$

Se analizează aplicabilitatea modelului, limitat la medii cu permeabilități reduse și la curgere laminară cu viteze mici. Sunt prezentate și alte aspecte reprobabile ale modelului,

precum neconsiderarea influenței frecării fluidului în zona pereților sau a efectelor inerțiale ale fluidului care duc la o creșterea neliniară a vitezei de curgere.

1.2.2 Corecția Forchheimer

Se prezintă cea mai potrivită modificare a relației (1.2) pentru a ține cont de efectele inerțiale ([46], [47]), cunoscută sub numele Darcy-Forchheimer:

$$\nabla P = -\frac{\eta}{\phi} \vec{u} - \frac{C_f \rho}{\sqrt{\phi}} |\vec{u}| \vec{u} \quad (1.3)$$

Parametrul adimensional C_f este o denumit coeficient Forchheimer ([23], [29]). Termenul $C_f/\sqrt{\phi}$ reprezintă factorul de compensare a formei, provenit din teoria rezistenței la curgere ([4], [10]). Sunt prezentate diverse încercări de a defini ale parametrului C_f , fie sub forma unei constante universale (0.55) cât și în formă variabilă ([102], [9], [52], [68]).

Se observă tendința de a folosi numărul Reynolds specific curgerii prin materiale poroase (Re_p) pentru a analiza abaterile de la liniaritatea modelului Darcy și este prezentată formula acestuia, când este exprimat în funcție de permeabilitate ([102], [50], [10]):

$$Re_p = \frac{\rho \sqrt{\phi}}{\eta} u \quad (1.4)$$

Re_p poate fi definit și de alte dimensiuni caracteristică ale mediului poros, precum porozitatea sau un diametru mediu al constituenților matricei, dar există unele critici asupra folosirii diametrului mediu, care ar conduce la valori supraapreciate ([14], [71]).

Este realizată o analiză a limitei superioare a legii Darcy, funcție de valoarea Re_p . Consensul general este că după $Re_p > 1$ viteza de curgere nu mai variază direct proporțional cu gradientul de presiune ([31], [6], [90]), însă curgerea rămâne laminară [24]. După această valoare, apare un regim mixt în care coexistă efectele viscoase și cele inerțiale, însă limita intervalului este încă supusă dezbaterii, cele mai întâlnite valori fiind $Re_p = 1 \div 5$ ([99], [30]) sau $Re_p = 1 \div 10$ ([6], [14], [24]).

Se concluzionează că aceste limite sunt specifice mediilor poroase analizate și nu ar trebui considerate universal valabile, fiind identificate valori critice ale Re_p foarte diferite [100]. În privința modelului Darcy-Forchheimer, există tot mai multe opinii care supun că acesta este permanent prezent, efectul predominant viscos sau inerțial evoluând cu creșterea regimului de curgere ([100], [70], [51]).

1.2.3 Studii privind curgerea prin materiale supuse comprimării

Subiectul curgerii prin medii poroase este abordat în multe studii, teoretice sau experimentale, iar o descriere exhaustivă a acestora ar fi imposibilă. Dintre acestea, doar câteva abordează însă ecuațiile curgerii unui fluid prin materiale poroase supuse comprimării, atunci când acestea se deformează semnificativ.

Sunt prezentate câteva studii în care a fost abordată deformarea materialului poros și analiza permeabilității, însă în acestea matricea solidă este rigidă și nu își mai revine după deformare ([4], [10], [50]).

O altă abordare întâlnită în literatură, inspirată din funcționarea articulațiilor sinoviale, se referă la studiul curgerii prin materiale poroase atunci când un strat de fluid, aflat în suspensie deasupra unui material poros rigid, este forțat să treacă prin material prin comprimare la viteză constantă ([66], [65], [67]). Problema curgerii prin materialul poros se rezolvă prin cuplarea simultană, la interfața film fluid – disc poros, a ecuațiilor curgerii în filmul fluid cu cele care descriu curgerea în mediul poros.

1.3 LUBRIFICAȚIA XPHD

1.3.1 Principii de bază

Sunt prezentate studiile privind aplicabilitatea mecanismului XPHD în domenii complexe, precum: pompe de viscozitate [72], lagăre axiale [73], lubrificația eritrocitelor în microcapilare [75], articulațiile umane naturale sau protezate [76]. Sunt prezentate studiile referitoare la efectul autoportant generat de lubrificația XPHD, pe multiple configurații, cu mișcare de comprimare pe direcție normală sau tangențială. Pentru mișcarea tangențială au fost abordate configurațiile sferă/plan [87], treaptă [73] și suprafețe înclinate [74]. Pentru mișcarea normală au fost analizate configurațiile disc/plan ([76], [95], [61], [15]), sferă/plan ([76], [42], [43], [77], [62]), cilindru/interior cilindru ([44]), cilindru perpendicular/cilindru ([82]). Toate studiile folosesc ipotezele simplificatoare enunțate în [73]:

- fluidul este Newtonian având curgere laminară, izotermă, izovâscoasă
- comparativ cu forțele de rezistență la curgere, forțele elastice sunt neglijabile
- pe grosimea materialului, presiunea fluidului este constantă
- legea lui Darcy [17] caracterizează curgerea fluidului
- legea Kozeny-Carman ([13], [48]) descrie variația permeabilității cu porozitatea
- curgerea are loc în planul perpendicular direcției de comprimare
- pe timpul deformării fracția solidă a mediului poros se conservă

1.3.2 Modelul XPHD de expulzare la viteză constantă

1.3.2.1 Model analitic

Modelarea teoretică a expulzării la comprimarea pe direcție normală a fost orientată către: contacte conforme în configurație disc/plan [78], contacte neconforme de tip sferă/plan [76], [77] sau o configurație neuniformă pe o suprafață plană [80]. Studiul expulzării unui fluid din materialul poros, poziționat între suprafețe în mișcare relativă normală, s-a ramificat în: expulzarea fluidului la solicitări constante (viteză sau forță de comprimare) și prin impact.

Întrucât studiile prezentate în această lucrare sunt focalizate pe expulzarea la viteză constantă, se prezintă modelul teoretic pentru configurație disc/plan, dezvoltat de echipa Pascovici. În timpul comprimării normale, geometria structurii poroase se modifică dar componenta solidă a stratului poros rămâne constantă pe grosimea stratului:

$$h(1 - \varepsilon) = h_0(1 - \varepsilon_0) = \text{const.} \quad (1.5)$$

Ecuția (1.5), cunoscută drept conservarea fracțiunii solide, permite determinarea valorii minime a grosimii (h_{min}) la care se atinge porozitatea zero prin comprimarea materialului.

Lubrificația XPHD se petrece doar în intervalul (h_0, h_{min}) [81], deși materialul poate fi comprimat și după atingerea valorii zero a porozității.

Configurația modelului analitic, în cazul expulzării cu viteză constantă, pe o configurație disc/plan, este prezentată în Figura 1.1. Modelarea expulzării la viteză constantă pentru suprafețe paralele folosește ecuația de conservare a debitului [81]. Volumul matricei solide și volumul ocupat de fluid reprezintă volumul total, iar debitul dislocat de material se regăsește în debitul ce curge în direcție plană.

Relația analitică se obține considerând un disc din material poros, de rază R , grosime inițială h_0 și porozitate inițială ε_0 , îmbibat cu un fluid newtonian de viscozitatea η . Materialul este supus comprimării cu viteza W între o suprafață plană și un disc, considerate rigide și impermeabile. Întrucât discul este subțire (relativ la rază), presiunea pe grosime este constantă.

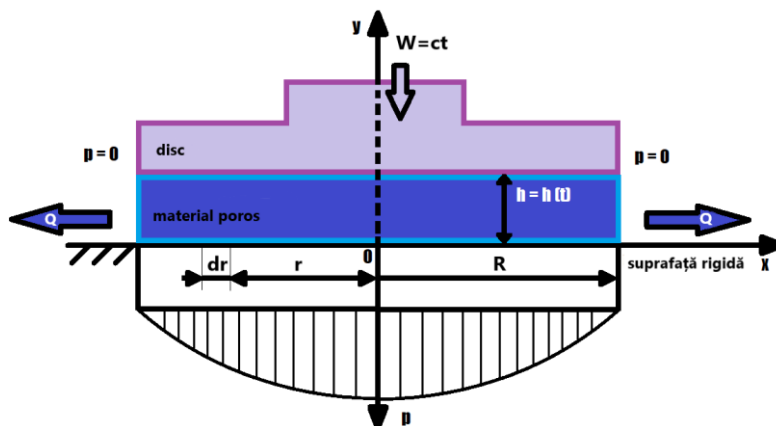


Figura 1.1 Configurația disc/plan

În modelul analitic (axial-simetric) presiunea variază între zero (la $r = R$) și valoarea maximă (în centru, la $r = 0$). Ținând cont că permeabilitatea variază cu porozitatea conform relației (1.1) se obține distribuția parabolică de presiuni pe suprafața discului. După integrare (pe suprafața discului) se obține forța portantă pentru un anumit nivel de comprimare:

$$F = 2\pi \int_0^R rP dr = \frac{\pi\eta W}{8D} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 h} R^4 \quad (1.6)$$

Folosind expresia adimensională a grosimii (din $1.5 \bar{h} = h/h_0$) și a forței portante scrisă în forma $\bar{F} = FDh_0/\eta WR^4$ ([60]) rezultă forța adimensională:

$$\bar{F} = \frac{\pi(1 - \varepsilon_0)^2}{8(\bar{h} - 1 + \varepsilon_0)^3} \quad (1.7)$$

Conform (1.7), forța adimensională în funcție de \bar{h} , depinde doar de ε_0 .

1.3.2.2 Rezultate experimentale

În UPB, testele de comprimare la viteză constantă s-au efectuat pe standul CETR-UMT2 Multi-Specimen Test System. Sunt prezentate câteva observații ale acestor teste, dintre care cele mai importante sunt:

- la porozități mici (≈ 0.2) fluidul este dislocat în întregime însă o cantitate mică de lichid rămâne pe canalele formate [79]

- la decomprimare se observă valori tot mai mici ale forței normale cu creșterea vitezei și apariția unor cavități, lichidul fiind absorbit în interiorul acestora [41]
- viscozitatea mare afectează începutul procesului de reîmbibare, când apar fenomene de depresiune (cavitație) mai accentuate și mai îndelungate [41]
- reducerea nivelului de îmbibare evidențiază diminuarea efectului XPHD [92]
- la grosimea critică de la care porii se închid, materialul devine asemenea unui corp solid care inițial se deformează inițial elastic [60]

Se prezintă o concluzie generală asupra testului de comprimare la viteză constantă, ce are rolul de a aproxima o funcție de variație a permeabilității în raport cu diverse variabile.

1.3.3 Modelul XPHD de expulzare prin impact

Geometria pentru cazul expulzării prin impact este cea din Figura 1.1. Deplasarea discului rigid superior se produce în urma impactului cu o masă, M , aflată în cădere cu viteză inițială W_0 . Pe lângă ipotezele XPHD [73], se consideră că masa discului rigid superior este neglijabilă și că după ciocnire, componentele aflate în contact își continuă deplasarea cu aceeași viteză inițială W_0 ([15]). Ipoteza principală este considerarea energiei cinetice consumate de discul superior egală cu lucrul mecanic al fluidului expulzat, în aceeași unitate de timp, abordare utilizată în [11] pentru procesul de expulzare prin impact în condiții hidrodinamice.

Soluția se deduce folosind o abordare cvasi-statică, pornind de la relația (1.7). Se consideră că forța este constantă, pe un interval de timp infinitesimal, astfel încât variația forței pe timpul impactului să poată fi exprimată folosind modelul teoretic al expulzării cu viteză constantă pentru fiecare pas de timp. Folosind abordarea din [11], se obțin viteza discului pe timpul impactului care introdusă în expresia forței adimensionale (1.7) conduce la determinarea variației forței de impact pentru un impuls dat în formă adimensională:

$$\bar{F}_i = \frac{\pi(1 - \varepsilon_0)^2}{8(\bar{h} - 1 + \varepsilon_0)^3} \left\{ 1 - \frac{\pi(1 - \varepsilon_0)^2}{16\bar{M}} \left[\frac{1}{(\bar{h} - 1 + \varepsilon_0)^2} - \frac{1}{\varepsilon_0^2} \right] \right\} \quad (1.8)$$

În relația (1.8), $\bar{F}_i = F_i D h_0 / \eta W_0 R^4$ și $\bar{M} = M D W_0 / \eta R^4$ sunt parametri adimensionali. Valoarea maximă a \bar{F}_i din relația (1.8) este specifică ε_0 și crește cu mărirea impulsului, fiind utilă pentru caracterizarea capacității de amortizare a materialelor poroase îmbibate [15]. Se dorește obținerea unei valori maxime cât mai reduse pentru o amortizare mai bună.

Capacitatea de amortizare este evaluată prin energia adimensională absorbită la comprimare, în care $\varepsilon_{0,opt}$, numit valoarea optimă a porozității care minimizează forța maximă de impact, ce depinde de impulsul \bar{M} . Cu cât impulsul inițial este mai mare, e necesară o porozitate mai redusă pentru a atenua complet impactul prin efectul de expulzare [15].

Este prezentată o comparație a rezultatelor analitice cu experimente. Testele, realizate pe eșantioane de material tip spacer îmbibate cu glicerină și încapsulate în membrane subțiri ([96], [15]) arată că forțele de impact sunt cu 60-70% mai reduse față de cazul neîmbibat. Rezultatele analitice arată o bună predictibilitate a forțelor maxime de impact, obținute experimental. Este necesară determinarea nivelului de comprimare de la care modelul XPHD nu mai este valid. După acest nivel prag, forțele elastice trebuie considerate deoarece în interiorul porilor mai rămâne fluid, după ce curgerea fluidului încetează.

1.4 MATERIALE POROASE UȘOR DEFORMABILE CU APLICABILITATE ÎN LUBRIFICAȚIA XPHD

Condițiile ca un material poros să fie util în formarea mecanismului lubrificației XPHD sunt să fie ușor comprimabil și să aibă porozitate mare și pori comunicanți.

1.4.1 Textile țesute și nețesute

În general, colectivele conduse de M.D. Pascovici au fost interesate de materiale sintetice caracterizate de macro-porozitate, din rândul materialelor celulare și fibroase. Sunt prezentate aspectele mai importante ale materialelor textile, țesute și nețesute, caracterizate în activități experimentale, cu potențial de a fi folosite în lubrificația XPHD ([41], [81], [92]).

În activitățile experimentale desfășurate de-a lungul timpului în UPB se evidențiază o serie de spume reticulate, cu pori comunicanți și porozități mari, ce au condus la rezultate promițătoare, atât cu fluide newtoniene, cât și ne-newtoniene [92]. De asemenea, prezentând un potențial ridicat de a fi utilizat în aplicații de amortizare la impact, materialele tip S3D sunt analizate în detaliu în cadrul tezei [60].

1.4.2 Textile tridimensionale

Pentru diferențierea textilelor bidimensionale (2D) de cele tridimensionale (3D) nu există o definiție standard, deși varietatea structurală sau procesul de producție arată necesitatea uneia. Există o mare varietate de materiale textile 3D cu diferite structuri [86].

1.4.2.1 Definierea textilelor tridimensionale

Se prezintă o definiție a țesăturilor distanțate cu fibre de legătură și modurile de obținere. Materialul analizat în această lucrare este un *spacer* tricotat din urzeală (Figura 1.2), denumit în continuare *Spacer 3D* ([54],[69],[105],[106]). Materialul (abreviat S3DU) este compus din două fețe paralele din fibre multifilare interconectate de un strat de mijloc format prin tricotarea verticală a unor fire textile, în general monofilare, care asigură o anumită distanță între acestea.

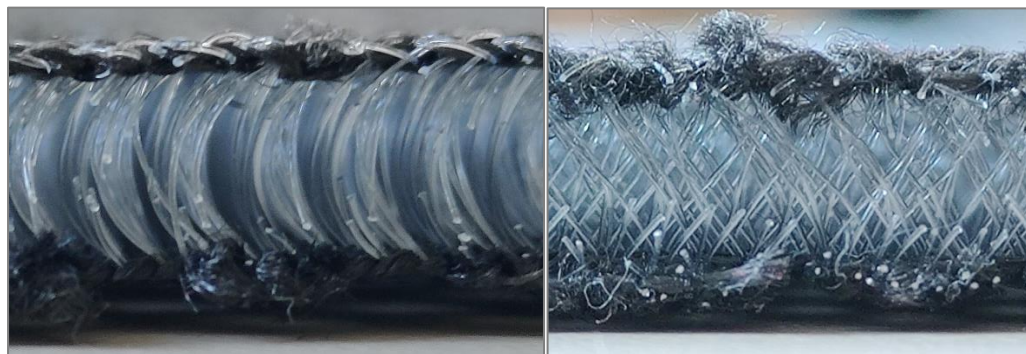


Figura 1.2 Tricot distanțat din urzeală S3DU (vederi laterale)

1.4.2.2 Metode de analiză și caracterizare a textilelor tridimensionale

Sunt prezentate succint cele mai importante metode de analiză și caracterizare a materialelor S3DU. Este analizat un studiu ([40]) asupra comprimării unui material tip S3DU și influența unor parametri structurali asupra răspunsului neliniar al acestuia. Curbele de

comprimare specifice S3DU neîmbibate (Figura 1.3, stânga) prezintă 4 etape distincte, delimitate de schimbările apărute în panta curbei ([40],[54]):

- etapa I (inițială): tricotate printre firele multifilare, firele de legătură alunecă ușor în grosimea fețelor întrucât nu sunt suficient constrânse;
- etapa a II-a (liniar elastică): firele de legătură se curbează și se fixează mai bine în fețe, crescând rigiditatea materialului, pe măsură ce tensiunea crește liniar cu deformația;
- etapa a III-a (aparitia platoului): tensiunea relativ constantă intră pe o zonă de platou firele de legătură trecând prin mai multe transformări (flambaj, rotire sau forfecare);
- etapa a IV-a (densificare): când tensiunea începe să crească brusc, întregul material începe să se densifice datorită „prăbușirii” firelor de legătură iar, spre final, acestea intră în contact unele cu celelalte și cu fețele materialului

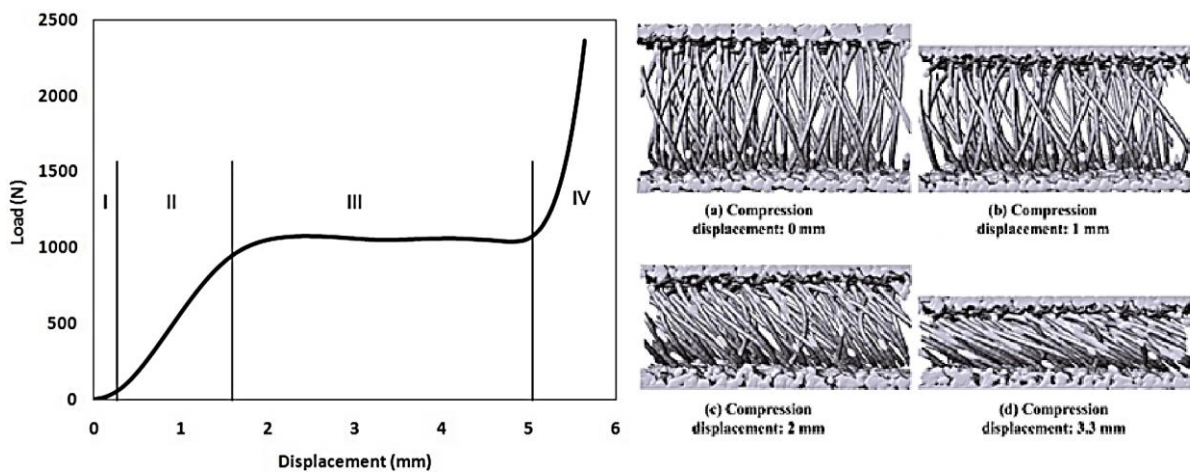


Figura 1.3 Etapele de comprimare ale S3DU (stânga); Material comprimat, scanat cu μ CT (dreapta) [40]

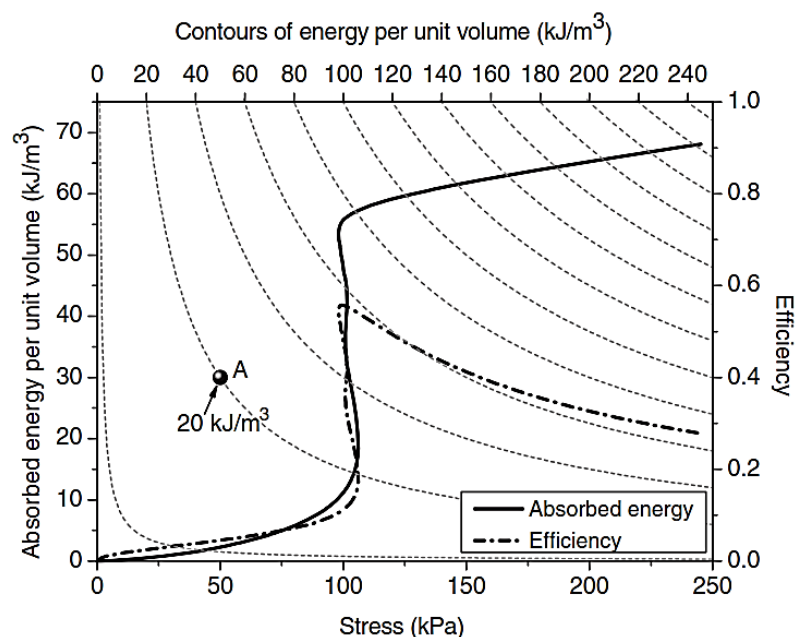


Figura 1.4 Diagrame de variație a energiei absorbite și de eficiență cu tensiunea pentru un material S3DU [54]

Pentru caracterizarea materialelor S3DU, când sunt utilizate în aplicații de amortizare sau de protecție la impact, se folosesc diagrame de energie absorbită și de eficiență (Figura 1.4) [54]. Dezvoltate dintr-un model utilizat pentru spume poliuretanică [63], aceste diagrame rezultă din curbele experimentale obținute în urma comprimării materialului.

Tensiunea constantă în condițiile unei comprimări mari (aprox. 50% din grosimea inițială) face aceste materiale potrivite pentru aplicații de amortizare. Aria de sub curbă, pentru primele trei etape, reprezintă energia absorbită de material, fiind relativ echivalentă cu energia cinetică absorbită a unei mase care ar putea lovi materialul.

Este prezentată o abordare utilizată pentru predicția teoretică a proprietăților macroscopice ale unui S3DU, prin considerarea proprietăților microscopice ale fibrelor și structura materialului [69]. Materialele analizate prezintă particularitatea că firele de legătură sunt dispuse simetric în structura materialului, ceea ce permite o modelare parametrică a periodicității, diametrului fibrelor și grosimii materialului. Variația permeabilității cu deformarea materialului este studiată pe o celulă reprezentativă, care se repetă cu periodicitate în material, iar rezultatele sunt extrapolate la întregul material.

1.4.3 Spume reticulate cu pori comunicanți

1.4.3.1 Elemente de teorie a materialelor poroase celulare

Sunt prezentate aspectele care au condus la nevoia de a exprima permeabilitatea în funcție de deformație, în special în cazul materialelor poroase celulare. Acestea sunt predominant rigide, dar există și materialele ușor deformabile, denumite spume reticulate poliuretanic, studiate și de echipele de cercetare conduse de prof. M.D. Pascovici ([81], [92]).

La nivel structural, aceste spumele sunt formate din celule poliedrice. Proprietățile spumelor depind de [35]: forma celulei (în general anizotropă), mărimea și felul acesteia (închisă sau deschisă/ cu pori comunicanți), densitatea relativă (calculată față de materialul solid din care sunt fabricate), geometria celulei (structuri Voronoi, tetradecaedru, etc.).

1.4.3.2 Comprimarea spumelor reticulate cu pori comunicanți

Comportamentul la compresiune al spumelor reticulate cu pori comunicanți, neîmbibate, este descris prin trei regimuri diferite, ce depind de fenomenele din interior [35]:

- etapa de deformație liniară: muchiile celulelor se încovoie/ curbează;
- palierul/platoul deformațiilor neliniare: structura solidă se deformează elastic/flambează; pentru elastomeri, acțiunea este parțial reversibilă;
- densificarea: porii se închid iar muchiile celulelor se ating.

Prima etapă este delimitată de modul lui Young caracteristic structurii poroase E^* . Acesta determină variația liniară a deformațiilor, fiind dependent de proprietățile matricei solide, densitatea relativă și condițiile geometrice [35].

Un al doilea parametru de interes este tensiunea specifică deformațiilor elastice neliniare (σ_{el}^*), ce apare la o deformație de aproximativ 5%. Deformația de densificare δ_D depinde de densitatea materialului de bază. În etapa de densificare, E^* se apropie al solidului din care este fabricată spuma (E_S), fără a-l egala datorită imposibilității anulării totale a porozității.

1.4.3.3 Permeabilitatea spumelor reticulate cu pori comunicanți supuse comprimării

Sunt prezentate rezultatele unor studii realizate asupra variației permeabilității cu deformarea, din care se remarcă puternica influență a formei celulei și a dimensiunilor porilor prin care circulă fluidul [33]. Este descris un mecanism întâlnit în literatură, bazat pe regiuni cu

densități diferite ale materialului, ce conduce la o deformare neomogenă a spumelor din cauza flambajului celulelor, observație confirmată de rezultate experimentale ([36], [53], [20], [21]).

În final sunt prezentate câteva rezultate ale unor studii experimentale, realizate cu fluide ne-newtoniene pentru a caracteriza comportamentul acestora în aplicații de impact. Se evidențiază o dificultățile la îmbibare inițială a materialului precum și de aplicare a acestui mecanism în sisteme de amortizare reutilizabile ([22], [97], [98]).

1.5 CONCLUZII

Utilizarea cu succes în testele de atenuare a impactului cu textile tridimensionale îmbibate cu lichide și comparația cu rezultate numerice obținute teoretic au arătat diferențe sensibile, în special la viteze mai mari de impact. Acestea pot avea trei surse importante:

- La viteze mari de impact efectele inerțiale pot fi importante astfel că modelele teoretice bazate toate pe curgere de tip Darcy (curgere laminară) devin mai puțin precise.
- La grade mai mari de comprimare, porii inițial comunicanți încep să se închidă iar curgerea se anulează înainte de a se ajunge la porozitate nulă, limita teoretică a permeabilității folosită în marea majoritate a modelelor teoretice.
- Valorile discutabile ale permeabilității din lipsa unor experimente realizate în condiții similare celor experimentale.

Efectele pozitive de atenuare a impactului puse în evidență teoretic și experimental au generat extinderea interesului utilizării mecanismului XPHD în cazul mișcărilor oscilatorii (repetitive), situație în care regenerarea capacității de atenuare prin reîmbibare devine esențială.

CAPITOLUL 2

EVALUAREA EFECTELOR INERȚIALE LA EXPULZAREA FLUIDELOR NEWTONIENE DIN STRATURI POROASE MOI, COMPRIMATE. CONFIGURAȚIA DISC/ PLAN

Ipotezele simplificatoare (amintite în capitolul 1) au stat la baza modelelor analitice ale configurațiilor studiate anterior și presupun că fluidul curge prin mediul poros conform modelului Darcy. Deoarece s-a observat că acest model are aplicabilitate limitată la viteze de curgere mici, la creșterea regimului de curgere trebuie inclusă corecția Dupuit-Forchheimer. Configurația analizată în acest capitol este un disc poros, ușor deformabil, îmbibat cu un fluid newtonian comprimat între două suprafețe plan-paralele. Ipoteza conservării componentei solide (1.5) pe timpul comprimării este utilizată pentru determinarea grosimii minime.

2.1 MODELUL NUMERIC

A fost realizat un model numeric pentru configurația studiată în care materialul poros este supus unei viteze de comprimare constante, W . Plăcile sunt considerate rigide, impermeabile și rămân paralele pe parcursul comprimării, astfel că distribuția de presiuni este simetrică față de axa OY. Astfel, modelul numeric (Figura 2.1) este considerat axial-simetric. Întrucât stratul de

material poros este subțire, pe timpul comprimării presiunea nu variază pe direcție radială, curgerea fluidului realizându-se doar în plan axial.

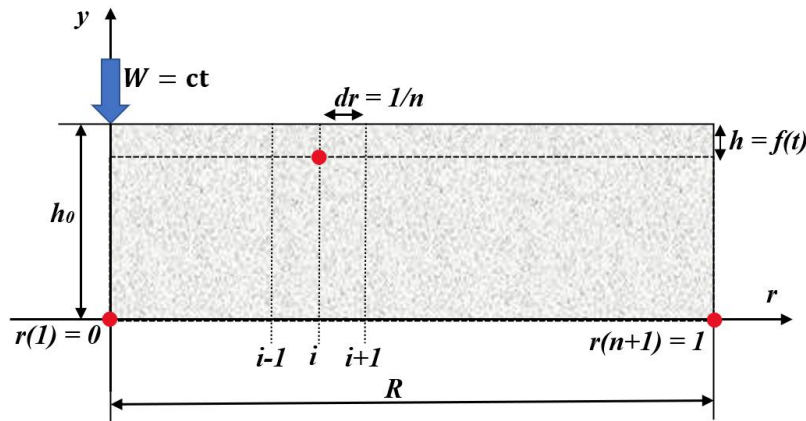


Figura 2.1 Configurația disc/plan a modelului numeric

Pentru obținerea modelului matematic se pornește de legea de conservare a masei pentru un fluid incompresibil, scrisă în coordonate radiale, pentru cazul curgerii axial-simetrice:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr}(ru) + \frac{dv}{dy} = 0 \quad (2.1)$$

În relația (2.1) r și y reprezintă coordonate radiale și axiale, iar u și v componente radiale și axiale ale vectorului vitează în filmul fluid. Componenta axială a vectorului vitează se reduce integrând ecuația (2.1) pe grosimea materialului rezultând:

$$\int_0^h \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(ru) = \int_0^{-W} \frac{dv}{dy} \Leftrightarrow h \frac{d}{dr}(ru) = rW \quad (2.2)$$

Modelul Darcy-Forchheimer (1.3) caracterizează curgerea fluidului care, pentru modelul axial-simetric și notațiile utilizate, are forma:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{\eta}{\phi} u - \frac{C_f \rho}{\sqrt{\phi}} u^2 \quad (2.3)$$

Permeabilitatea se determină folosind ecuația Kozeny-Carman scrisă în funcție de grosimea locală a stratului poros. Pentru sistemul de ecuații format din relațiile (2.2) și (2.3) nu există o soluție analitică posibilă, iar problema se rezolvă numeric prin metoda diferențelor finite. Înainte de rezolvarea numerică, relațiile (2.2) și (2.3) se scriu în formă adimensionalizată introducând următoarele variabile adimensionale:

$$\bar{r} = \frac{r}{R}; \bar{h} = \frac{h}{h_0}; \bar{v} = \frac{v}{W}; \bar{u} = \frac{u}{W}; \bar{P} = \frac{PD}{\eta \mathcal{V} R}; \bar{\phi} = \frac{\phi}{D} \quad (2.4)$$

Cu aceste notații ecuațiile (2.2) și (2.3) devin:

$$\bar{h} \frac{d}{d\bar{r}}(\bar{r} \bar{u}) = \bar{r} \frac{R}{h_0} \quad (2.5)$$

$$\frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} = -\frac{\bar{u}}{\bar{\phi}} - \frac{C_f \rho W \sqrt{D}}{\eta \sqrt{\bar{\phi}}} \bar{u}^2 = -\frac{\bar{u}}{\bar{\phi}} - C_f K \frac{1}{\sqrt{\bar{\phi}}} \bar{u}^2 \quad (2.6)$$

Parametrul $K = \rho W \sqrt{D} / \eta$ din relația (2.6) are semnificația unui număr Reynolds local, definit în funcție de caracteristica D a materialului, care variază cu viteza de comprimare W .

În continuare se consideră o rețea de noduri echidistante, r_1, \dots, r_{n+1} . Ecuațiile (2.5) și (2.6), discretizate prin metoda diferențelor finite, conduc la relațiile pentru calculul vitezei u și a presiunii P , necesare pentru rezolvarea numerică a problemei propuse:

$$\bar{u}_i = \left(\bar{u}_{i-1} \bar{r}_{i-1} + \frac{\Delta \bar{r}}{\bar{h}_j} \frac{\bar{r}_i + \bar{r}_{i-1}}{2} \frac{R}{h_0} \right) / \bar{r}_i \quad (2.7)$$

$$\bar{P}_i = \bar{P}_{i+1} + \left(\frac{1}{\bar{\phi}_i} \bar{u}_i + C_f K \frac{1}{\sqrt{\bar{\phi}_i}} \bar{u}_i^2 \right) / \Delta \bar{r} \quad (2.8)$$

În relațiile (2.7) și (2.8) \bar{u}_i și \bar{P}_i reprezintă viteza și presiunea corespunzătoare fiecărui nod iar j reprezintă un contor al pasului de timp. Condițiile la limită pentru presiune sunt:

$$\partial \bar{P} / \partial \bar{r} = 0, \text{ la } \bar{r} = 0 \quad (2.9)$$

$$P = 0, \text{ la } \bar{r} = 1 \quad (2.10)$$

Ținând cont de ecuația de continuitate (2.1) și de condițiile la limită pentru presiune, viteza de curgere adimensională are o variație liniară în direcție radială și atinge valoarea maximă atunci când gradientul de presiune este maxim (la limita discului poros).

2.2 ALGORITMUL DE CALCUL ȘI VALIDAREA MODELULUI NUMERIC

Modelul numeric a fost scris în limbajul de programare Fortran95. Rezolvarea modelului numeric se realizează prin metoda iterativă Gauss-Seidel (fără relaxare). Distribuția de presiuni este integrată la fiecare pas de timp în care se reduce grosimea de material adimensională. După obținerea distribuției de presiuni și a vitezei de curgere, corespunzătoare valorii modificate a permeabilității, se determină forța adimensionalizată. Convergența algoritmului este satisfăcută dacă, între două iterații consecutive, variația relativă a \bar{F} este mai mică de 10^{-9} . Independența soluției de rețeaua de noduri este considerată satisfăcută pentru un număr $N > 1000$.

Validarea modelului numeric se realizează prin considerând nul termenul inerțial al relației (2.8). Rezultatele se compară cu soluția analitică a forței adimensionale (1.7) pentru modelul Darcy (pentru aceeași configurație). Variația \bar{F} se evaluează cu deformația relativă δ :

$$\delta = 1 - \frac{h}{h_0} = 1 - \bar{h} \quad (2.11)$$

Abaterea relativă între curbele numerice și analitice este sub 0.02%.

2.3 STUDIU PARAMETRIC

Din analiza modelului rezultă următorii parametri de influență: coeficientul Forchheimer, porozitatea inițială, proprietățile fluidului și viteza de comprimare. Pentru analiza parametrică s-a considerat raportul dintre raza discului poros și grosimea inițială (sau raza relativă) $\bar{\rho} = 5$ iar viteza de comprimare $W = 1 \text{ m/s}$. Fluidul considerat este apa, pentru care $K \cong 11$. S-au considerat câte trei valori pentru C_f (0, 0.2 și 0.3) și pentru porozitatea inițială (0.8, 0.9 și 0.95).

2.3.1 Influența coeficientului Forchheimer și a porozității inițiale

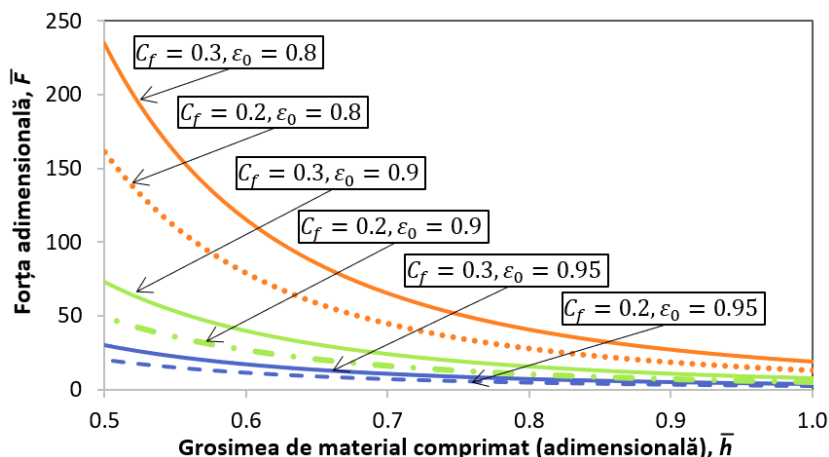


Figura 2.2 Influența coeficientului Forchheimer și a porozității inițiale asupra forței portante adimensionale

Figura 2.2 arată că la aceeași valoare a porozității inițiale (care intră în calculul permeabilității), influența coeficientului Forchheimer nu poate fi neglijată. Pentru ordinul de mărime al coeficienților Forchheimer aleși, presiunile din filmul fluid cresc considerabil față de modelul Darcy (valoarea maximă pentru Darcy este $\bar{F} < 0.5$). Analizând rezultatele pentru cu variația porozității inițiale (Figura 2.2 și Figura 2.3) se remarcă faptul că impactul coeficientului Forchheimer asupra parametrilor de interes este mai redus decât cel al porozității.

Valorile presiunii și ale forței cresc cu scăderea porozității și creșterea coeficientului Forchheimer. În privința porozității, acest comportament este în concordanță cu teoria.

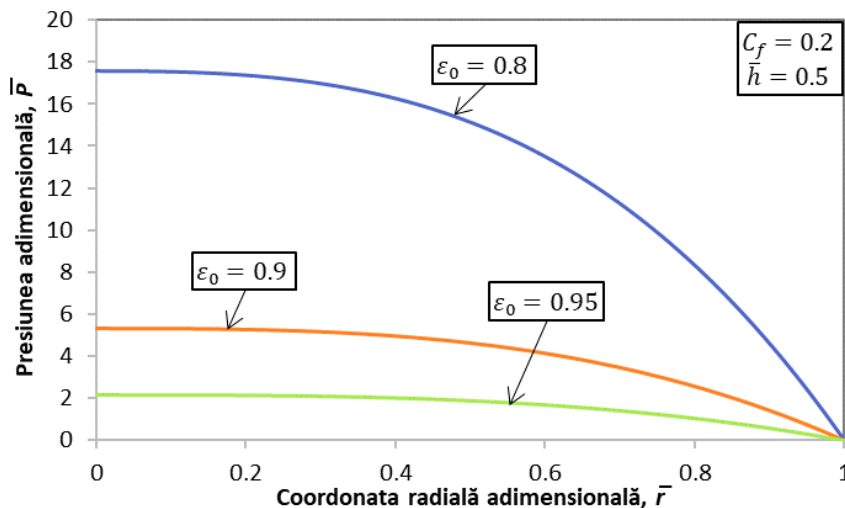


Figura 2.3 Influența porozității asupra câmpului de presiuni adimensionalizat (modelul Darcy-Forchheimer)

2.3.2 Influența fluidului și a vitezei de comprimare

Un al doilea studiu parametric a fost realizat pornind de la configurația disc/plan utilizată în articolul [15] în care a fost utilizat un eșantion de material cu raza adimensională $\bar{\rho} = 3.84$. Materialul utilizat este un spacer S3DU îmbibat cu glicerină supus ulterior unei forțe de impact în vederea evaluării porozității optime pentru aplicația considerată. Pentru o viteză de comprimare $W = 1 \text{ m/s}$ pentru glicerină se obține $K \cong 0.015$. Pentru aceeași viteză a fost considerat și un fluid mai puțin vâscos pentru care se obține $K \cong 0.07$.

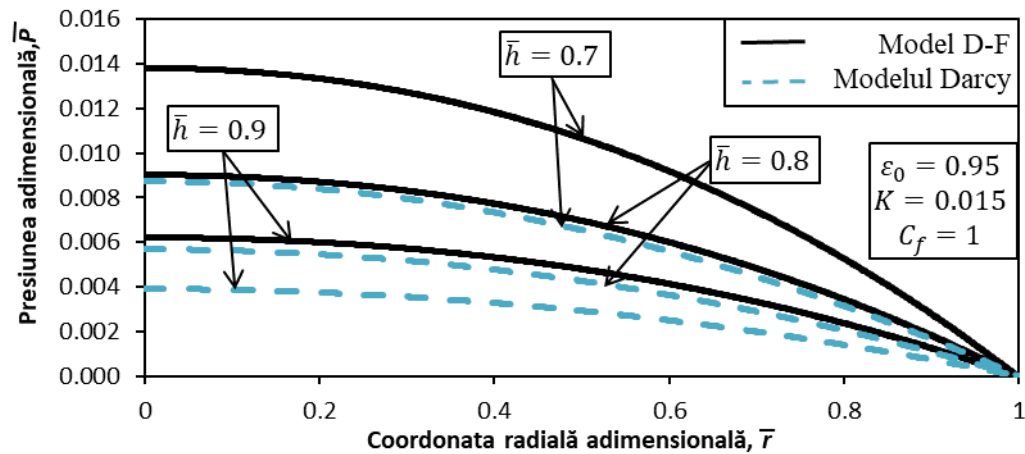


Figura 2.4 Variația presiunii adimensionale la diferite valori ale grosimii adimensionale [58]

În Figura 2.4 sunt prezentate comparativ valorile obținute cu cele două modele teoretice (Darcy și Darcy-Forchheimer) pentru glicerină, la diferite valori ale grosimii adimensionale \bar{h} . Se remarcă mărirea presiunii generate de apariția forțelor viscoase în filmul fluid (peste 50%). Comparativ cu apa, valoarea maximă a presiunii adimensionale este mult mai redusă, deși vitezele de comprimare sunt egale. Acest lucru se datorează viscozității ridicate a glicerinei, care reduce semnificativ valoarea parametrului K ($0.015 \ll 11$) ceea ce înseamnă că este nevoie de presiuni mai mari pentru obține viteze de curgere de același ordin de mărime.

Din distribuția de presiuni corespunzătoare valorii grosimii adimensionale impuse la sfârșitul comprimării, se determină forța adimensională. Influența efectelor inerțiale asupra acesteia, se evidențiază prin forța relativă definită prin:

$$\bar{F}_r = \frac{\bar{F}(C_f \neq 0)}{\bar{F}(C_f = 0)} \quad (2.12)$$

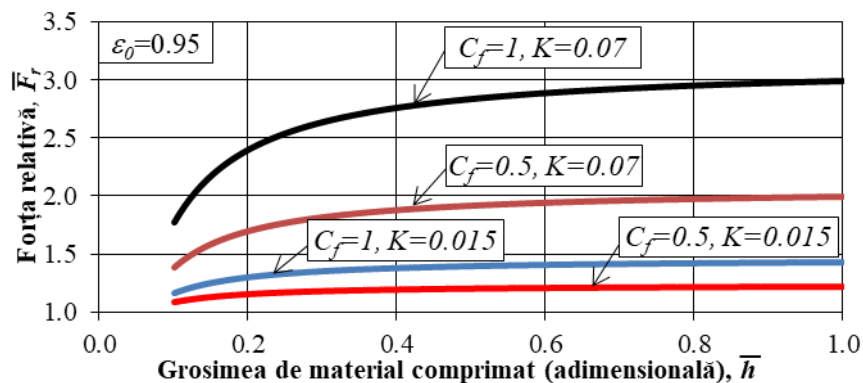


Figura 2.5 Variația forței relative cu grosimea adimensională pentru porozitatea inițială $\varepsilon_0 = 0.95$ [58]

În relația (2.12) forțele determinate corespund modelului Darcy ($C_f = 0$) și modelului Darcy-Forchheimer. Variația forței relative este studiată pentru porozitatea inițială 0.95, două valori ale C_f (0.5 și 1) și cele două fluide analizate.

Din Figura 2.5 se observă că influența efectelor inerțiale se reduce cu micșorarea porozității (grosimii) pe timpul comprimării. Forțele adimensionale obținute cu modelul Darcy-Forchheimer sunt mai mari decât pentru cazul Darcy ($\bar{F}_r > 1$), indiferent de valorile \bar{h} , C_f și K . Creșterea termenului inerțial (prin C_f și K) conduce la creșterea \bar{F}_r în special când fluidul are o viscozitate mai redusă. Variația coeficientului C_f se reduce cu grosimea adimensională \bar{h} .

2.4 CONCLUZII

Rezultatele obținute în acest capitol arată că efectele inerțiale au o influență importantă asupra forței și a câmpului de presiuni generate pe timpul comprimării unui material poros, ușor deformabil. Acest efect este mai vizibil în cazul materialelor cu porozitate ridicată, îmbibate cu fluide cu viscozitate scăzută. Un alt aspect observat este că la niveluri mari de comprimare, apropiate de sfârșitul procesului de expulzare, termenul inerțial tinde să își piardă din efect.

CAPITOLUL 3

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A LIMITEI DE PERMEABILITATE A SPUMELOR RETICULATE CU PORI COMUNICANȚI

Din studiul bibliografic prezentat în subcapitolul 1.1.4.3, una din problemele majore în studiul curgerii prin materiale poroase supuse comprimării este definirea porozității critice, adică acea limită până la care comprimarea conduce la expulzarea fluidului.

În acest capitol este prezentat un studiu al efectelor deformațiilor asupra porozității unor spume reticulate cu pori comunicanți, interesul fiind definirea limitei de permeabilitate. Pentru evaluarea volumului porilor materialelor a fost realizat un dispozitiv experimental original în care au fost poziționate eșantioane îmbibate cu glicerină. Dispozitivul a fost supus comprimării cu viteză constantă pe standurile CETR-UMT2 și Zwick/Roell Z010 TN.

3.1 DISPOZITIVUL EXPERIMENTAL

3.1.1 Elemente constructive

Dispozitivul experimental (Figura 3.1), de tip piston-cilindru, are o structură deschisă la bază ce permite curgerea radială a fluidului din structura poroasă și colectarea sa separat. Dimensiunile fantelor de evacuare practicate în corpul cilindrului au fost alese astfel încât debitul de fluid să fie cât mai puțin obstrucționat.

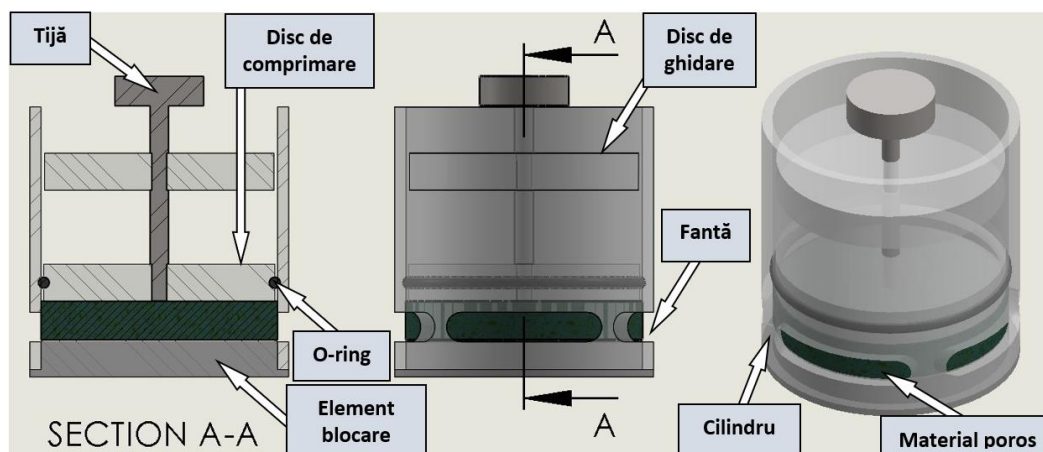


Figura 3.1 Schița dispozitivului experimental

Pe discul inferior al pistonului, un inel „O” împiedică expulzarea fluidului în spatele pistonului, conducând la apariția unei forțe de frecare suplimentară forței de comprimare.

3.1.2 Evaluarea frecării din dispozitivul experimental

Pe standul CETR-UMT2 echipat cu un senzor de forță a fost evaluată forța de frecare dintre inelul „O” și suprafața cilindrului. Concomitent a fost evaluat și efectul abaterilor de la concentricitate și de la cilindricitate, în 4 poziții egal distanțate pe circumferința cilindrului, aliniat succesiv cu un marcaj realizat pe discul de ghidare.

Influența forței de frecare este redusă pe timpul experimentelor, însă a fost identificată o poziție în care valoarea este minimă. Alinierea componentelor s-a realizat doar în acea poziție iar valoarea determinată (10 N) a fost utilizată pentru corectarea rezultatelor.

3.2 PROCEDURA EXPERIMENTALĂ

Au fost testate eșantioane de material în formă de disc ($d = 64 \text{ mm}$) din două materiale de tip spume reticulate comunicante. Proprietățile materialelor sunt prezentate în Tabelul 3.1.

Tabelul 3.1 Proprietățile eșantioanelor de material testate [94]

Denumire comercială (Simbol)	Mărimea porilor* [mm]	Porozitatea inițială, (ϵ_0)	Grosimea inițială, (h_0) [mm]
FILTREN® TM 25133 (F133)	1.06 ÷ 1.66	0.9854	11.5
FILTREN® TM 25450 (F450)	3.40 ÷ 5.60	0.9870	10.5

* conform fișelor tehnice ale materialelor furnizate de EUROFOAM România

Porozitatea inițială a materialelor a fost determinată utilizând metoda volumetrică (cu apă) descrisă în capitolul 1. Procedura de testare presupune parcurgerea mai multor pași.

Este necesară o predeterminarea a capacității intrinseci a materialelor de a reține fluid este necesară pentru a asigura o masă constantă de fluid în interiorul porilor. S-a determinat astfel, că spuma F450 poate reține maxim 32 g de fluid sau 72% din cantitatea teoretică la îmbibare totală iar spuma F133 reține 45.1 g sau 92% din valoarea teoretică.

Efectuarea unui test constă în comprimarea cu viteză constantă redusă eșantionului până la o anumită grosime, înregistrarea forței și determinarea cantității de fluid rămasă în interior, cântărind componentele în ordinea inversă de realizare a montajului: ansamblul piston, eșantionul de material, cilindrul, recipientul de colectare. Cantitatea introdusă inițial trebuie să se regăsească la final în material sau în recipientul colector și pe suprafețele dispozitivului. Dacă pierderile sunt mai mari de 5% testul se reia.

Standul CETR-UM2 permite comprimarea materialelor până la grosimi de 1.5 mm (se atinge limita de 200 N a senzorului). Pentru a continua la grosimi mai reduse (0.2 – 0.4 mm) s-a utilizat o mașină de compresiune Zwick/Roell Z010 TN. Aceasta a permis și comprimarea materialului uscat pentru obținerea curbelor de variație tensiune-deformație relativă caracteristice celor două spume.

3.3 REZULTATE EXPERIMENTALE

Comportamentul la compresiune al spumelor se diferențiază în funcție de o serie de parametri, prezentați în Subcapitolul 1.4.3.2. În Figura 3.2 se pot observa curbele caracteristice la compresiune ale spumelor neîmbibate peste care se suprapun valorile maxime înregistrate în

testele de compresiune pentru grosimi succesive. Valorile experimentale urmăresc îndeaproape cele două curbe ceea ce arată că presiunea nu apare datorită efectului de expulzare.

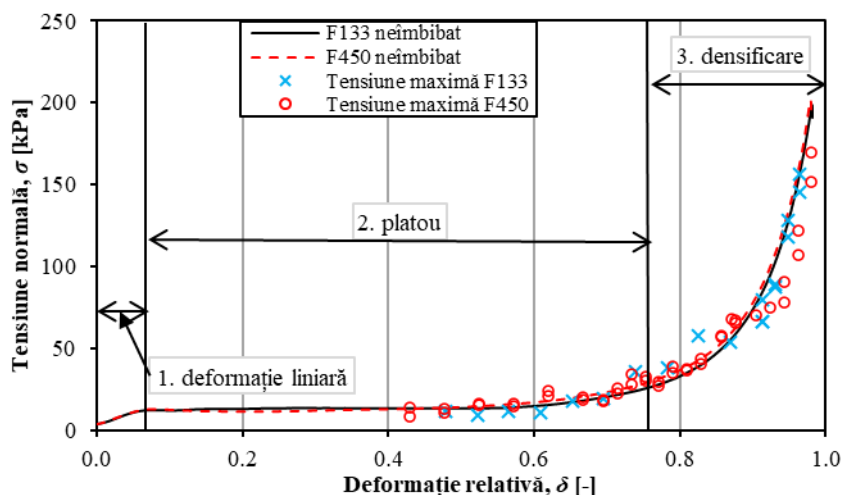


Figura 3.2 Curba tensiune-deformație pentru eșantioanele de material (uscate și îmbibate) [94]

Volumul porilor funcție de deformație se obține pe baza volumului de fluid rămas în material, acceptând ipoteza că toți porii deschiși sunt ocupați cu glicerină și că nu mai există aer în interiorul lor.

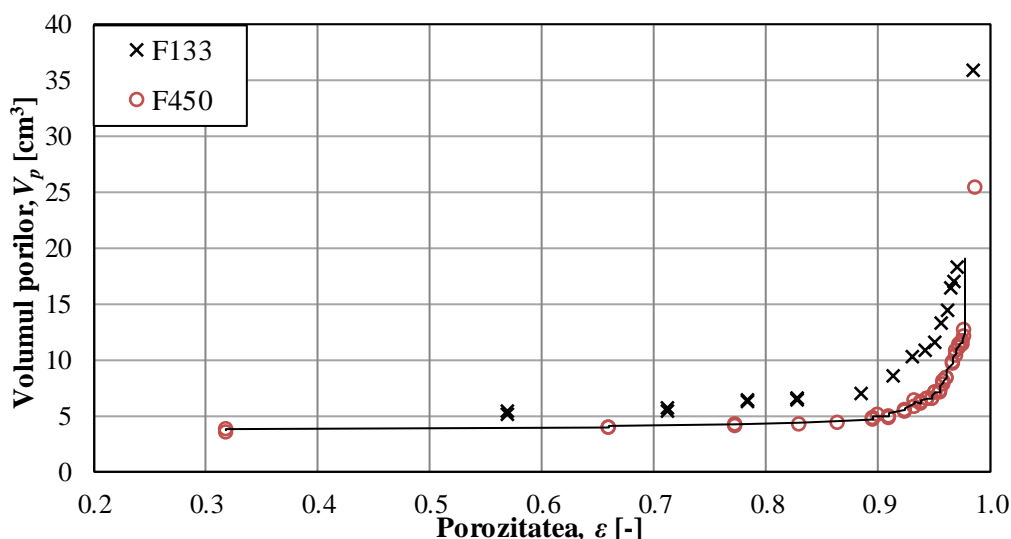


Figura 3.3 Variația volumului de glicerină rămas în interiorul structurii funcție de porozitate [94]

Obiectivul studiului a fost de a determina porozitatea critică de la care porii materialelor nu mai permit curgerea fluidului. Figura 3.3 evidențiază limita de la care volumul de fluid rămas în interiorul materialului devine aproximativ constant. Variația porozității a fost determinată folosind grosimea minimă obținută prin comprimare și relația (1.5). Ambele materiale prezintă variații asimptotice ale volumului porilor cu porozitatea. Studiile realizate asupra porozității reduse din zona de densificare arată că, deși materialele sunt comprimate mult peste limita de densificare, în interiorul structurii rămâne un volum liber neocupat de matricea solidă, denumită porozitate remanentă (engl. residual porosity) [5]. Valorile întâlnite sunt și de 40% din porozitatea inițială, dar procentul crește cu cât porozitatea este mai mare.

Pentru materialele analizate, valoarea porozității remanente de la care volumul de fluid devine aproape constant este de $\varepsilon \cong 0.55$ pentru F133 și corespunde unei comprimări a materialului până la o grosime de 0.4 mm ($\delta = 0.97$). Pentru materialul F450, mai puțin

îmbibat, volumul porilor se apropie de 4 cm^3 iar valoarea porozității remanente este $\varepsilon \cong 0.5$ (la o grosime de 0.2 mm).

Chiar dacă ar fi fost tehnic posibilă o comprimare a materialului până la valori finale mai mici de 0.1 mm (fără a distruge dispozitivul) volumul de fluid rămas în interior porilor nu ar putea fi complet evacuat chiar dacă se atinge valoarea $\varepsilon = 0$. Porozitatea critică de la care se oprește complet curgerea este estimată în intervalul $\varepsilon_{cr} \approx 0.1 \div 0.2$.

3.4 CONCLUZII

Variațiile tensiunii de comprimare în funcție de grosimea materialelor îmbibate se obțin cu ajutorul unui dispozitiv experimental realizat special pentru aceste activități. Valorile obținute se înscriu pe curbele caracteristice ale eșantioanelor uscate, reușindu-se astfel corelarea comportării mecanice la comprimare cu gradul de îmbibare. Deși dispozitivul experimental prezintă un concept relativ simplu, cu ajutorul acestuia se pune în evidență corelației dintre nivelul de comprimare, forța de comprimare și volumul fluidului prezent în straturile poroase.

Volumul de fluid, prezent chiar și la deformații foarte mari, arată limita modelului XPHD, întrucât curgerea fluidului din material se oprește înainte de atingerea porozității nule, una din ipotezele de bază ale modelărilor teoretice.

CAPITOLUL 4

STUDIUL EXPERIMENTAL AL COMPORTĂRII LA COMPRIMARE PERIODICĂ A SPUMELOR RETICULATE CU PORI COMUNICANȚI, ÎMBIBATE CU FLUIDE

Datele experimentale ale studiului au fost obținute pe un stand original, special conceput pentru a studia influența frecvenței de comprimare asupra caracteristicilor filmului fluid prin materiale poroase, ușor deformabile precum și a capacității de reîmbibare a acestora.

Pe timpul funcționării bancului sunt alternate ciclic încărcări pozitive și negative. Atunci când suprafețele se apropie pe direcție normală presiunea în filmul de fluid crește (efect de expulzare pozitivă), iar când acestea se îndepărtează fluidul este reabsorbit în material generând un efect de sucțiune (expulzare negativă). Pe timpul fazei de îndepărtare a suprafețelor, în anumite condiții, poate apărea cavitația și chiar ruperea filmului de fluid.

În literatură nu au fost identificate preocupări asupra studiului materialelor poroase saturate cu fluid și comprimate ciclic. Prin urmare, există multe aspecte de analizat și investigat pentru a înțelege fenomenele de pe timpul comprimării și decomprimării precum și a modului în care pot fi controlate performanțele filmului fluid. Rezultatele prezentate au fost obținute pe parcursul unui stagiu Erasmus+ de 5 luni desfășurat în Institut Pprime (Univ. de Poitiers, FR).

4.1 STANDUL EXPERIMENTAL

Sunt prezentate principale funcții ale standului, realizat în Institut Pprime. Contribuția personală cea mai importantă în realizarea standului a fost identificarea soluției tehnice optime

pentru transmiterea mișcării de comprimare periodică, optând pentru utilizarea unei came frontale cu canal interior (Figura 4.1 b).

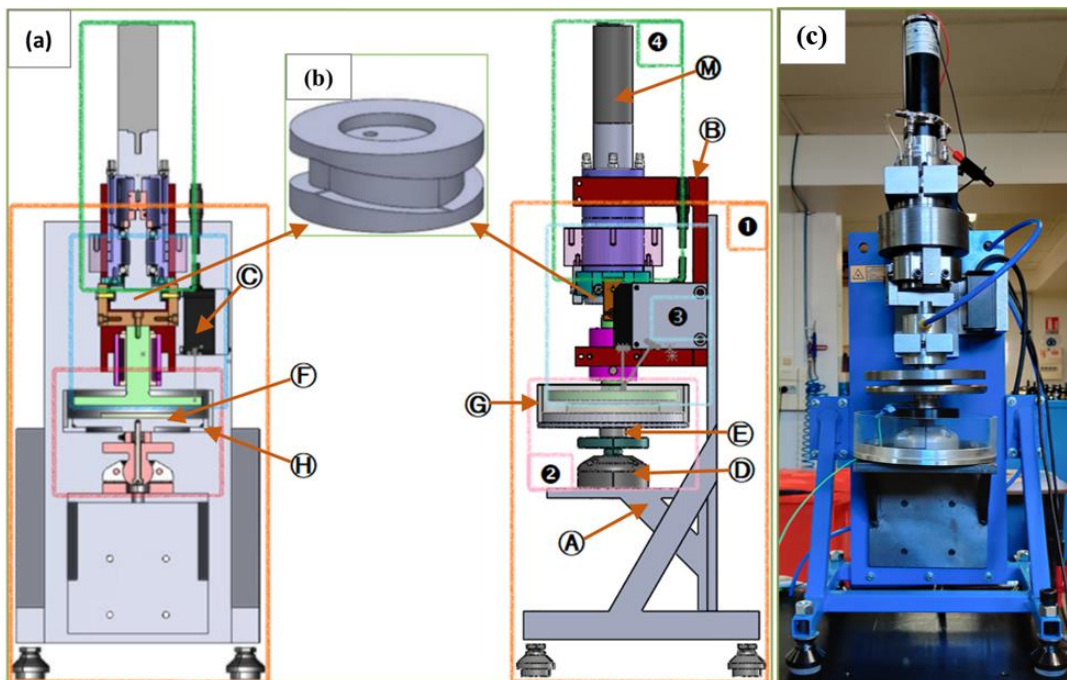


Figura 4.1 Standul experimental: (a) Vedere în secțiune și vedere laterală; (b) Cama; (c) În stare asamblată

Aceasta convertește rotația unui arbore conducător în mișcare periodică pentru a pune în funcțiune placa de compresiune. Cama a fost realizată în două variante: cu o cursă de comprimare de 2.2 mm și de 4.5 mm. Pentru a obține frecvențe de comprimare mari, cama are un profil simetric ce asigură două curse de comprimare pe timpul unei rotații complete.

Principalele ansambluri ale standului, dispuse în plan vertical (Figura 4.1 a), sunt cadrul de susținere ❶, placa fixă ❷, placa mobilă (de compresie) ❸ și motorul electric ❹.

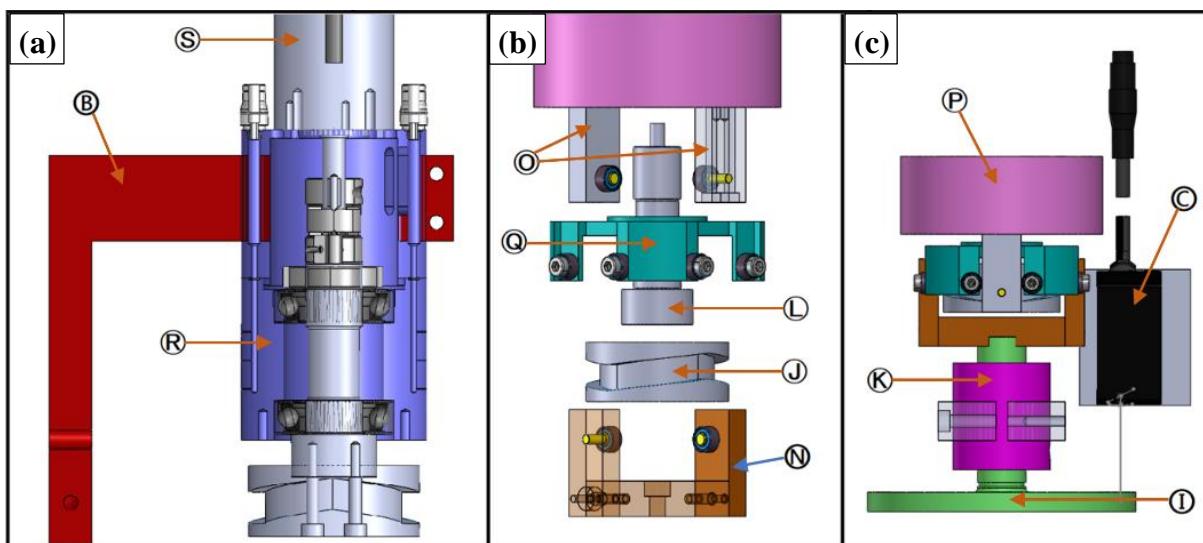


Figura 4.2 (a) Secțiune ansamblu motor; (b) Ansamblul de conversie a mișcării; (c) Ansamblul plăcii mobile;

Ansamblul plăcii fixe ❷ este susținut de o rotulă cu articulație sferică ❸. În partea centrală, rotula are practicat un canal ce permite montajul și pretensionarea senzorului pentru

determinarea forței axiale normale ⑤, plasat între flanșa rotulei și placa fixă ⑥. Un tub transparent ⑦ montat pe un cadru ⑧ formează rezervorul de fluid.

Ansamblul plăcii mobile (de compresie) ③ (Figura 4.2 b și c) conține placa superioară ①, cama frontală ②, sensorul de deplasare ④ și elementele conducătoare ale plăcii. Tija plăcii este ghidată de un lagăr aerostatic ⑫. Cama frontală este montată la capătul arborelui conducător ⑬ cuplat la motorul electric ⑭ (Figura 4.2 a).

Doi rulmenți montați pe furca ⑮ deplasează placa de compresie, conduși de cama cu ghidaj circumferențial. Concomitent, o altă pereche de rulmenți, montați pe două prelungiri paralelipipedice ⑯, deplasează o contragreutate ⑰ în sens opus. Deplasarea platoului este înregistrată cu ajutorul fasciculului laser al sensorului de deplasare. Pentru a asigura mișcarea de translație, furca și prelungirile sunt încadrate lateral de câte doi rulmenți montați pe corpul blocatorului de rotație ⑱, fixat în carcasa rulmenților ⑲ a arborelui.

Principala funcție a sistemului de măsură și colectare a datelor standului este de a înregistra variația forței cu amplitudinea și frecvența de comprimare. Pentru determinarea forței axiale s-a utilizat un traductor de forță piezoelectric Kistler 9031A. Deplasarea plăcii de comprimare a fost înregistrată cu sensorul optic Keyence LK-H050. Pe timpul testelor, variația maximă a temperaturii a fost $1.5^{\circ}C$ iar viscozitatea fluidului a fost considerată constantă.

4.2 MATERIALE UTILIZATE

În activitățile de testare, au fost analizate materialul textil S3DU (prezentat în capitolul 1) și două spume reticulate asemănătoare, utilizate în [49] și denumite în continuare S2404, respectiv S2406. Proprietățile celor două spume cu pori deschiși, sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1 Proprietățile spumelor reticulate utilizate în experimente [49], [1]

Proprietate	Unitate de măsură	Collar®2404	Collar®2406
Grosime	mm	~ 10	
Rezistență la compresie (40%)	kPa	4.5	5.3 ÷ 6.3
Porozitate inițială (μ CT precizie 5. 74 μ m)	–	0.960	0.970
Diametru mediu pori	mm	0.667	0.549

Experimentele au fost realizate succesiv cu două fluide, apă și un ulei sintetic de motor (cu $\eta = 0.105 Pa \cdot s$ la $23^{\circ}C$). Eșantioanele testate cu ulei au avut același diametru (60 mm).

4.3 PROCEDURA EXPERIMENTALĂ

Sunt descriși pașii procedurii experimentale. Se variază voltajului sursei de laborator care alimentează motorul pentru a mișca placa de compresie cu o frecvență impusă. Primele curse sunt realizate la frecvențe mici pentru a fi eliminat cât mai mult aer din interior și a asigura îmbibarea completă cu fluid. Repetabilitatea rezultatelor a fost verificată de minimum trei ori.

4.4 REZULTATE EXPERIMENTALE

Este prezentat mai întâi modul de procesare a unor date experimentale brute.

Frecvența de comprimare. S-a folosit în reprezentările grafice frecvența medie de comprimare (\bar{f}) specifică fiecărei achiziții calculată ca:

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_n \frac{1}{T_n} \quad (4.1)$$

În relația (4.1), T este intervalul de timp scurs între două puncte consecutive de minim (sau de maxim) iar n este numărul de intervale înregistrate. Valoarea minimă a lui $n = 5$ pentru a determina frecvența a 2 rotații complete ale camei.

Porozitatea pe timpul testelor depinde de nivelul de comprimare. Porozitatea maximă (ε_{max}) și minimă (ε_{min}) corespund poziției maxime, respectiv poziției minime a plăcii mobile pe timpul cursei de comprimare. Valorile lor se determină din comprimarea inițială a materialului (c_0) și amplitudinea canalului camei (A), folosind relația (1.5). Grosimea maximă și minimă ale eșantionului de material se calculează cu formulele:

$$h_{max} = h_0 - c_0 \quad (4.2)$$

$$h_{min} = h_0 - c_0 - A = h_{max} - A \quad (4.3)$$

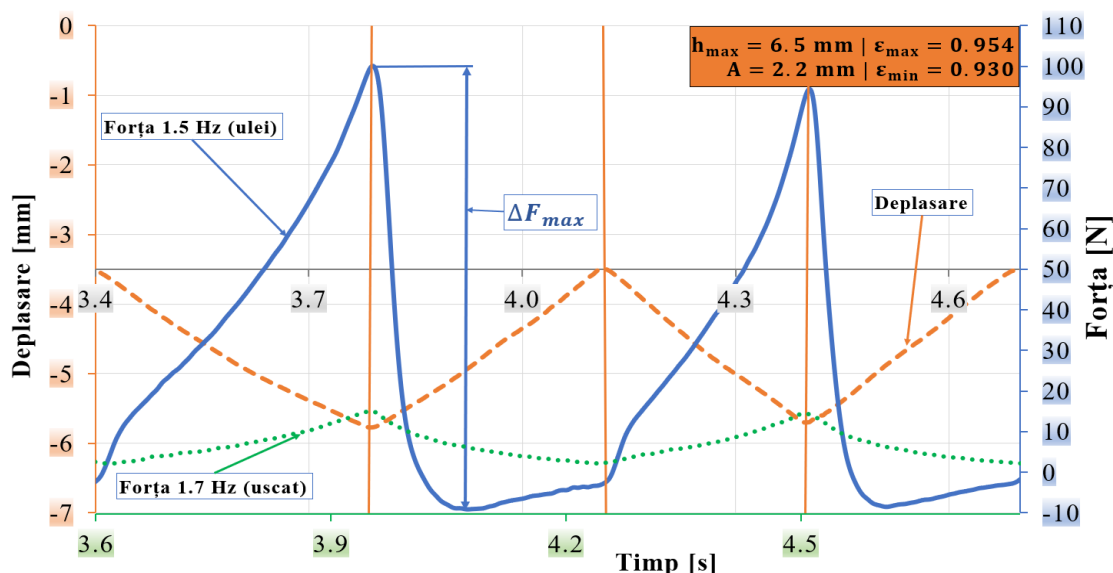


Figura 4.3 Variația în timp a forței și a deplasării pentru o spumă S2406 îmbibată și neîmbibată [56]

Forța. În Figura 4.3 valoarea 0 pe axa deplasării corespunde grosimii inițiale a eșantionului (h_0) iar axa orizontală o intersectează la 3.5 mm sub h_0 pentru a marca h_{max} . Efectul îmbibării materialului este evidențiat prin prezentarea variației forței pentru un eșantion de material neîmbibat. Profilul forței pentru materialul îmbibat, pe timpul cursei de revenire, marchează apariția unor valori negative ale forței.

Valoarea minimă (negativă) depinde forța de sucțiune ce acționează pe direcție radială și axială. Prezența acestei rezistențe la mișcarea de revenire duce la scăderea bruscă a forței în prima parte. Pe măsură ce fluidul este reabsorbit și se acumulează în interiorul porilor, forța trece de la o evoluție negativă la una în creștere (pozitivă), înainte de finalizarea revenirii, pentru că procesul de reîmbibare devine mai lent decât deplasarea plăcii.

Forța (presiunea) maximă. Se determină diferența maximă absolută (ΔF_{max}) între valorile pozitive și negative ale forței înregistrate la o anumită frecvență într-un interval de achiziție. Reacția materialului la compresie, înregistrată ca forță normală, este utilizată pentru a calcula ulterior presiunea normală, și ulterior ΔP_{max} .

4.4.1 Teste cu ulei

4.4.1.1 Influența porozității

Porozitatea și structura materialului influențează atât procesul de expulzare a fluidului din materialul poros, cât și cel de reîmbibare cu fluid. Pentru materialul S3DU, porozitatea inițială $\varepsilon_0 = 0.907$ și grosimea inițială este 6.35 mm .

Structura interioară a materialului S3DU nu creează condiții suficiente pentru apariția regimului XPHD la comprimare ciclică. Este necesară reanalizarea capacității de reîmbibare a acestui material cu un alt tip de fluid. Rezultatele experimentale obținute pe celulele închise de S3DU au arătat că materialul poate fi o soluție în sisteme de atenuare la impact [15].

Figura 4.4 prezintă rezultatele obținute pentru cele două spume îmbibate cu ulei, testate în aceleași condiții precum eșantioanele uscate. Limita inferioară a axei presiunii pornește de la valoarea de 5 kPa care reprezintă valoarea medie a presiunii obținute pe eșantioane uscate.

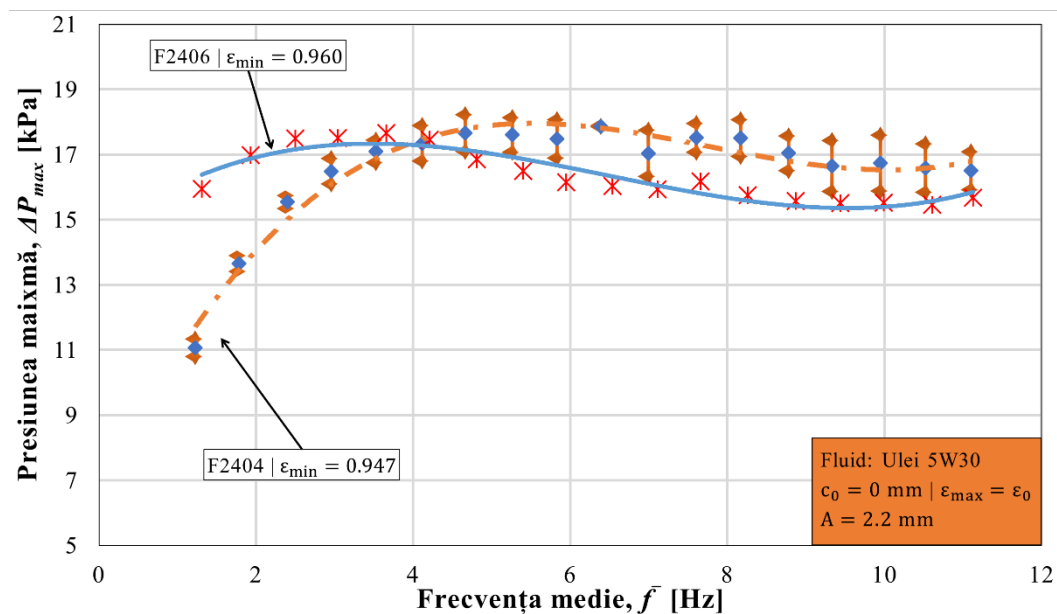


Figura 4.4 Variația presiunii maxime cu frecvența medie pentru spume cu diferite porozități inițiale [56]

Pentru S2404, sunt prezentate rezultatele a trei secvențe consecutive, în formă mediată, cu includerea deviației standard (0.5 kPa). Pentru materialul S2406 variația presiunii maxime cu frecvența este asemănător cu cel obținut pentru spuma S2404, dar valoarea maximă a presiunii se obține la o frecvență mai redusă. Comparativ cu materialul neîmbibat, presiunile maxime obținute în cazul ambelor spume sunt de $2 \div 3$ ori mai mari.

Diferența dintre porozitățile celor două spume (S2404 are valoarea mai mică) în conjuncție cu diametrul mediu al porilor (în acest caz S2406 are valoarea mai mică) poate oferi o explicație pentru comportamentul diferit al celor două spume la frecvențe reduse. Pe măsură ce frecvența de comprimare crește, ambele spume încep să se comporte similar, întrucât nici una din ele nu mai reușește să se îmbibe complet.

Rezultatele obținute pun în evidență importanța reîmbibării materialului pe timpul comprimării periodice precum și capacitatea superioară de reîmbibare a spumelor reticulate cu pori comunicanți față de materialele S3DU. Avantajul provine din structura internă a spumelor.

Aceste rezultate arată în plus importanța alegerii unei perechi fluid-material potrivite.

4.4.1.2 Influența amplitudinii camei și a comprimării inițiale

Figura 4.5 prezintă rezultatele a două teste cu amplitudini diferite, dar aceeași grosime minimă ($\varepsilon_{min} = 0.926$) pentru spuma F2404. Variației presiunii maxime cu frecvența medie este similară. Pentru cama frontală cu $A = 4.5 \text{ mm}$ presiunile maxime sunt de $6 \div 8$ ori mai mari decât în cazul uscat (5 kPa), iar pentru eșantionul comprimat inițial și cama de 2.2 mm , valorile presiunii sunt de $5 \div 6$ ori mai mari.

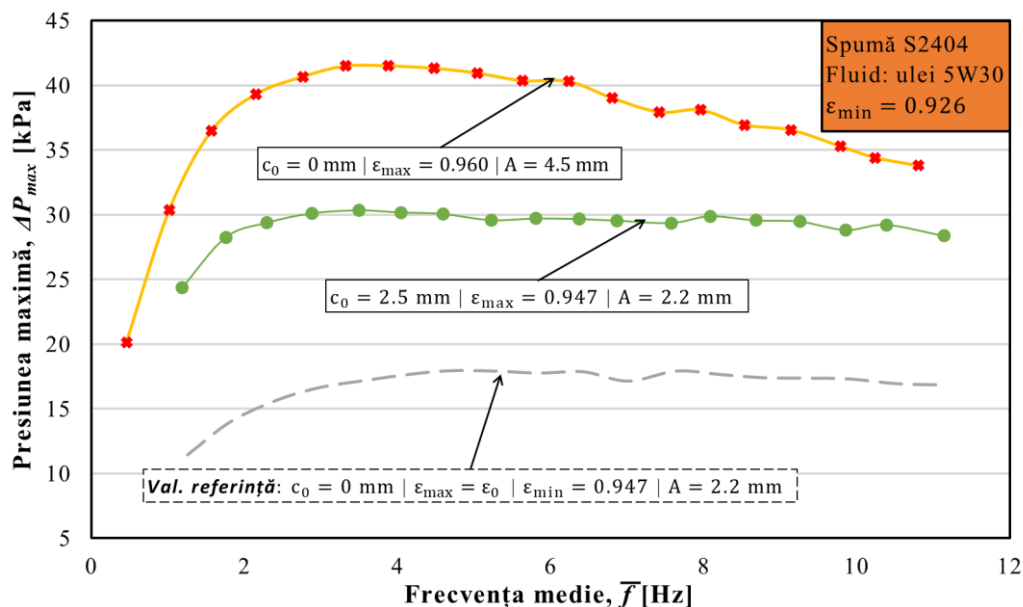


Figura 4.5 Variația presiunii maxime cu frecvența, amplitudinea camei și comprimarea inițială (S2404)

Valorile mai mari obținute în cazul camei de 4.5 mm se pot explica prin faptul că, în zona de mijloc a spumei, rămân mai mulți pori blocați cu fluid, crescând răspunsul spumei pe timpul comprimării. Un alt avantaj este reprezentat de faptul că placa mobilă are o cursă mai amplă ceea ce oferă materialului mai mult timp pentru a reabsorbi fluidul expulzat.

În Figura 4.5 mai este prezentat și un test făcut pe același material, comprimat cu amplitudinea $A = 2.2 \text{ mm}$, dar fără comprimare inițială (configurația prezentată în Figura 4.4), pentru a compara rezultate obținute la comprimări inițiale diferite pentru S2404. Se observă că, la dublarea cursei de comprimare, și raportul dintre presiunile maxime obținute în cele două configurații este aproape de un factor egal cu 2.

Pentru a studia influența comprimării inițiale asupra variației presiunii maxime cu frecvența au fost făcute teste la două poziții noi ale plăcii mobile (la $c_0 = 3.5 \text{ mm}$ și $c_0 = 4.5 \text{ mm}$ față de grosimea inițială) utilizând cama cu amplitudinea de 2.2 mm pe spuma S2406.

La $c_0 = 3.5 \text{ mm}$, grosimea materialului S2406 se modifică între $h_{max} = 6.5 \text{ mm}$ și $h_{min} = 4.3 \text{ mm}$. Când valoarea $c_0 = 4.5 \text{ mm}$ comprimarea are loc între $h_{max} = 5.5 \text{ mm}$ și $h_{min} = 3.3 \text{ mm}$. Rezultatele pentru aceste poziții sunt comparate cu cele obținute fără comprimare inițială și la $c_0 = 2.5 \text{ mm}$. Pentru toate pozițiile, mai puțin $c_0 = 4.5 \text{ mm}$, variația presiunilor maxime cu frecvența crește cu modificarea punctului de minim al cursei de compresiune, care influențează porozitatea minimă atinsă. Pentru cazul cel mai mare al comprimării inițiale, în care se atinge $h_{min} = 3.3 \text{ mm}$, variația presiunii cu frecvența crește

brusc, fiind de două ori mai mari decât poziția cea mai apropiată ($h_{\min} = 4.3 \text{ mm}$), deși modificarea punctului de minim este de doar 1 mm .

Explicația pentru această creștere bruscă a presiunii maxime vine tot din etapele de comprimare ale spumelor prezentate în capitolul 1. Pe măsură ce materialul ajunge la grosimi minime tot mai mici, porii materialului se densifică iar tensiunea aplicată începe să crească la infinit (teoretic). Cum deformația specifică la $h_{\min} = 3.3 \text{ mm}$ este foarte aproape de valoarea $\delta = 0.7$, eșantioanele „lucrează” la confluența dintre platou și etapa de densificare.

4.4.1.3 Repetabilitatea rezultatelor

Sunt prezentate rezultate experimentale pentru cinci, respectiv nouă cicluri de compresie efectuate pe F2404, respectiv F2406 la $c_0 = 3.5 \text{ mm}$ cu cama de 2.2 mm . Pentru aceste teste abaterea standard medie nu depășește 1 kPa (presiunile maxime sunt în intervalul $38 \div 42 \text{ kPa}$), ceea ce arată un bun grad de repetabilitate.

4.4.2 Teste cu apă

Folosind observații din testele cu ulei, au fost operate câteva modificări asupra bancului, pentru a asigura un nivel continuu de îmbibare al materialelor analizate.

4.4.2.1 Configurația modificată a celulei experimentale

Traductorul de forță piezoelectric a fost înlocuit cu unul de tip capacitiv. A fost modificat rezervorul de fluid pentru a asigura un volum de expansiune mărit, pe timpul comprimării. Din același motiv, diametrul plăcii mobile a fost redus iar grosimea plăcii a fost mărită.

4.4.2.2 Rezultate experimentale

Testele au fost făcute pe S2404 cu cama de amplitudine $A = 4.5 \text{ mm}$. Au fost încercate mai multe diametre ale discurilor (98 mm , 105 mm și 130 mm) din material poros, pentru a obține cele mai bune condiții de reîmbibare.

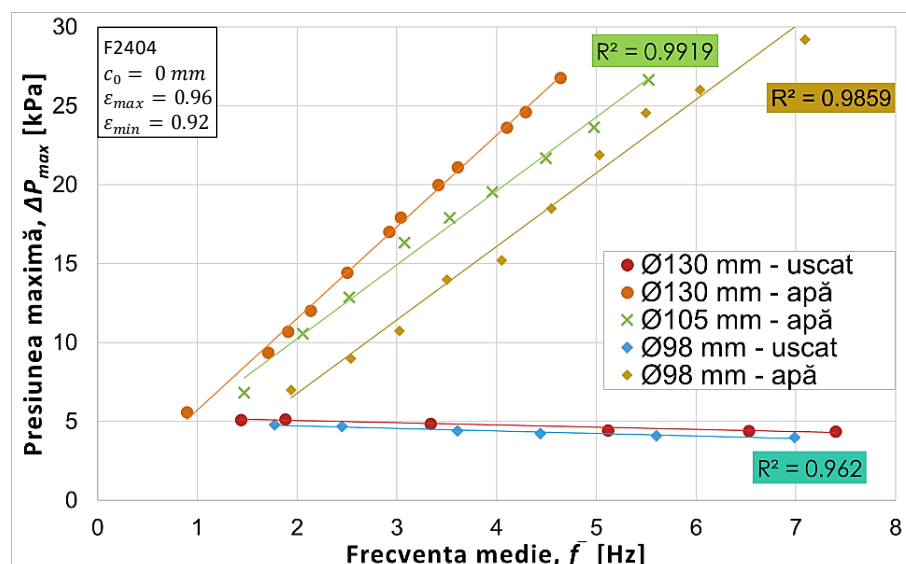


Figura 4.6 Variația presiunii maxime cu frecvența pentru discuri de material cu diferite diametre [16]

În configurația modificată s-a reușit atingerea unei frecvențe de comprimare superioare $\bar{f} \cong 5.5 \text{ Hz}$ doar pentru spuma cu diametrul de 98 mm . Figura 4.6 arată că atunci când sunt

îmbibate cu apă, toate eşantioanele prezintă aceeași tendință de evoluție liniară a presiunii cu frecvența. Pentru spuma cu cel mai mic diametru această evoluție se oprește la $\bar{f} \cong 7 \text{ Hz}$. Peste această valoare, presiunea maximă se comporta similar precum în cazul îmbibării cu ulei: intră pe un mic platou, iar peste $\bar{f} \cong 10 \text{ Hz}$ începe să scadă liniar (Figura 4.7).

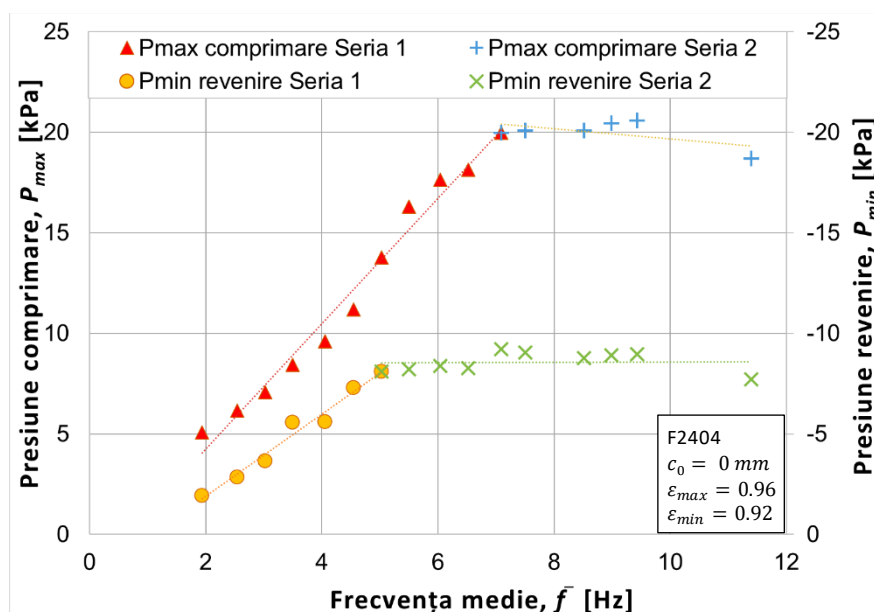


Figura 4.7 Comparatie între presiunea pozitivă și negativă de expulzare [16]

Figura 4.7 arată o analiză a celor doi termeni care se acumulează în ΔP_{max} , presiunea de comprimare (P_{max}) și cea de revenire (P_{min}). Parametrii sunt împărțiți în două serii în funcție de modul de variație. Până la $\bar{f} \cong 4.5 \text{ Hz}$, cele două presiuni au o evoluție liniară, dar pante diferite. În jurul $\bar{f} \cong 5 \text{ Hz}$ presiunea P_{min} stagnează în timp ce P_{max} continuă să crească liniar, până la $\bar{f} \cong 7 \text{ Hz}$, când se comportă similar P_{min} .

Capacitatea de reabsorbire a spumei după $\bar{f} \cong 5 \text{ Hz}$ este limitată de un volum de aer absorbit pe timpul cursei de revenire, care afectează P_{min} . Apariția aerului provine din formarea de stropi și unde, urmare a mișcării ciclice a plăcii de compresiune. Astfel, spumă nu mai este înconjurată permanent cu apă și se reîmbibă și cu aer.

4.5 CONCLUZII

Reîmbibarea materialului nu poate fi legată direct de porozitate, depinzând mai degrabă de forma și dimensiunea porilor. Frecvența de comprimare influențează capacitatea de reîmbibare a materialului, condițiile favorabile fiind la frecvențe mai joase. La frecvențe ridicate materialul nu reușește să absoarbă suficient fluid pe porțiunea de revenire.

Când se utilizează un fluid cu viscozitate foarte redusă, presiunea maximă crește liniar cu frecvența (similar regimului XPHD), pe o porțiune mai extinsă decât în cazul unui fluid mai viscos. După atingerea unei frecvențe limită, presiunile maxime stagnează arătând variații similare.

CAPITOLUL 5

SIMULAREA NUMERICĂ A PERMEABILITĂȚII UNUI MATERIAL TEXTIL TRIDIMENSIONAL SUPUS COMPRESIUNII

Materialul ales pentru realizarea studiului prezentat în acest capitol este un Spacer 3D.

Activitățile au fost desfășurate pe timpul stagiilor de cercetare din în perioadele martie-iulie 2021 și ianuarie-mai 2023, în cadrul institutului Pprime (Universitatea din Poitiers), sub coordonarea și cu sprijinul profesorilor Aurelian Fătu și Yann Henry și prin strânsă colaborare cu membrii echipei de Lubrificație din UPB. Rezultatele prezentate în acest capitol reprezintă un pas important în caracterizarea materialelor textile tip S3DU utilizate în activități experimentale desfășurate de-a lungul timpului de echipa de Lubrificație din UPB.

5.1 CARACTERIZAREA MORFOLOGICĂ

Materialul ales a fost utilizat anterior de echipei Pascovici în studii preponderent experimentale ([2], [81], [92], [60]). În continuare se utilizează abrevierea S3DU-H1. Proprietățile acestui material, redată în Tabelul 5.1, sunt preluate din fișa de produs.

Tabelul 5.1 Proprietățile materialului S3DU-H1 [3]

Caracteristică	Unitate de măsură	Valoare	Metoda de testare
Masa pe unitatea de suprafață	g/m^2	770 ± 30	BS EN 12127
Grosimea materialului	mm	6.25 ± 0.5	BS EN ISO 5084
Rânduri de ochiuri	$număr/inch$	16 ± 1	-
Șiruri de ochiuri	$număr/inch$	24 ± 2	-
Tensiune de compresiune la 40%	kPa	23.81	DIN EN ISO 3386-1

Interesul în caracterizarea materialelor tip S3DU se rezumă, frecvent, la analiza comportamentului mecanic pe timpul unor solicitări de comprimare sau studiul permeabilității cu aer.

Comportamentul S3DU la comprimare este influențat de: grosimea inițială a materialului, modul de tricotare al fețelor, diametrul și unghiul de înclinare al fibrelor de legătură [54]. Se observă că informațiile din fișa tehnică sunt utile, dar insuficiente pentru caracterizarea comportării materialului la comprimare.

5.1.1 Determinarea materialului

Pentru determinarea tipului de poliester utilizat la fabricarea S3DU-H1 au fost extrase fire din cele trei straturi ale materialului și au fost analizate cu ajutorul unui spectrometru în infraroșu. Interfața acestuia compară spectrul materialelor cu unele existente în biblioteca integrată, calculează un grad de asemănare (din 1000 de puncte) și afișează spectrul cel mai apropiat. Punctajele cele mai mari, pentru spectrele celor trei straturi, aparțin PET.

5.1.2 Modul de tricotare a straturilor exterioare

Densitatea ochiurilor tricotate în fețele materialelor reprezintă un indicator care determină dacă fața unui material S3D are o structură de tip deschis sau închis [54]. Modelele de tricotare

ale fețelor unui material S3DU influențează densitatea și distribuția ochiurilor firelor de legătură în structura acestora și stabilitatea structurală cu implicații asupra rezistenței la comprimare.

Tricotul feței superioare intră în categoria structurilor de tip deschis, în timp ce modelul feței inferioare este specific unei structuri de tip închis.

5.1.3 Determinarea diametrului și a modului de elasticitate la tracțiune al firelor de legătură

Configurația din Figura 5.1 a fost utilizată pentru a evalua diametrul și modulul de elasticitate la tracțiune al firelor de legătură, într-un proces compus din 2 etape interdependente:

1. fixarea firelor de legătură și determinarea diametrului;
2. introducerea diametrului în secvența testului la tracțiune și realizarea încercării.

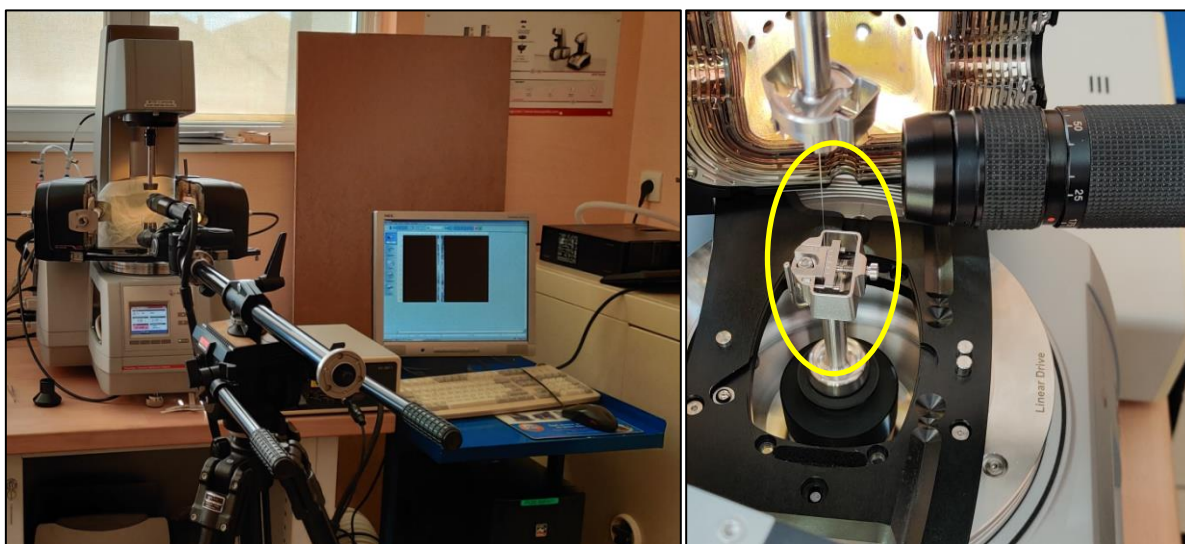


Figura 5.1 Determinarea diametrului și a proprietăților la tracțiune ale firelor de legătură ale S3DU-H1

5.1.3.1 Descrierea configurației și procedurii experimentale

Diametrul firelor de legătură a fost analizat cu un video-microscop (KEYENCE VH-5911) și două obiective ce permit mărirea în intervalul $25 \div 175X$ și $100 \div 800X$. Se realizează capturi de imagine ale firelor care sunt prelucrate ulterior în Videomet™.

Firele de legătură extrase din structura materialului sunt poziționate într-un modul de fixare utilizat în testele de tracțiune efectuate cu platforma MCR702 MultiDrive (Anton Paar). Aspectul torsionat al firelor, extrase din structura S3DU-H1, este compensat cu o forță de pretensionare ($0.1 \div 0.2N$) pentru a facilita determinarea diametrului.

Din încercările la tracțiune (limitate doar regiunea deformațiilor liniare) se determină curbele tensiune-deformație și modulul de elasticitate al firelor de legătură, după prelucrare.

5.1.3.2 Evaluarea diametrului mediu

Diametrul firelor de legătură a fost evaluat și anterior (prin SEM) rezultând o valoare medie de $157.02 \mu m$ și un diametru aparent² de $160 \mu m$ [2]. Acestea reprezintă valori de referință pentru evaluarea metodei. Rezultatele (cu ambele obiective) au fost obținute pentru 15

² conform standardului SR13152:1993

fire, pentru fiecare fiind realizate 10 măsurători de-a lungul secțiunii. Diferența între rezultatele cu cele două obiective este redusă (Tabelul 5.2).

Abaterea relativă a rezultatelor a fost calculată față de valoarea de referință. Determinând diametrul înainte de încercarea la tracțiune, aria secțiunii specifică firului este calculată precis.

Tabelul 5.2 Centralizator rezultate obținute pentru diametrul mediu al firelor de legătură

MĂRIRE 175X		MĂRIRE 800X	
Diametru mediu [μm]	Abatere relativă [%]	Diametru mediu [μm]	Abatere relativă [%]
149.08	-5.1	148.69	-5.3

5.1.3.3 Determinarea modulului de elasticitate

Parametrii planului ales pentru încercările la tracțiune sunt prezentați în Tabelul 5.3.

Tabelul 5.3 Parametrii secvenței de program pentru încercarea la tracțiune

Nr. plan	Pretensionare fir	Deplasare modul	Puncte înregistrate	Viteza de tracțiune
03/28.05.21	0.2 N	0.5 mm	1000	4 $\mu\text{m/s}$

La finalizarea unei încercări se obține o curbă de variație a forței cu deplasarea din care se determina curbele caracteristice ale firelor din PET sub forma tensiune-deformație relativă. Evaluarea modulului lui Young din aceste curbe a fost realizată doar pe porțiunea în care tensiunea variază liniar cu deformația, aproximată prin utilizarea unor curbe de regresie liniară.

Pentru ca aproximarea să fie acceptabilă: R^2 min. 99.95% pentru min. 400 de puncte utile. A doua condiție provine din evoluția pantei curbei caracteristice, diferită pe porțiunea de dinaintea variației liniare (materialul fiind în continuare ușor torsionat) în timp ce pe ultima porțiune panta curbei se schimbă din nou ca urmare a apropierei de limita de elasticitate [84].

Din 15 fire supuse tensionării, doar 10 au îndeplinit ambele condiții. Rezultatele pentru modulul de elasticitate la tracțiune și deviația standard se regăsesc în Tabelul 5.4.

Tabelul 5.4 Valorile approximate ale modulului de elasticitate la tracțiune și deviația rezultatelor

	Modulul lui Young [GPa]	R^2 [%]	Număr de puncte [din 1000]
Valoare medie	3.17	99.96	≈ 490
Deviația standard [GPa]	± 0.27	-	-

5.2 DETERMINAREA PROPRIETĂȚILOR MECANICE LA COMPRIMAREA CU VITEZĂ CONSTANTĂ

Studiul proprietăților mecanice ale structurii S3DU-H1 a fost realizat prin încercări de comprimare cu viteză redusă utilizând modulul de DMA al platformei MCR 702 MultiDrive.

Tabelul 5.5 Grosimea inițială a eșantioanelor de material supuse comprimării

Configurația de testare	I	II	III
Grosimea inițială a materialului [mm]	6.423	6.364	6.443
Abaterea relativă [%]	≈ -0.48	≈ -1.4	≈ -0.17

Comportamentul S3DU-H1 pe timpul comprimării a fost analizat în trei configurații de testare diferite. Distanța inițială dintre talerul modulului de DMA și eșantion a aleasă ținând de

grosimea inițială³ determinată anterior (6.454 mm [2]). Primul ciclu al fiecărei configurații a permis evaluarea grosimii inițiale a eșantioanelor testate (Tabelul 5.5).

În primele două configurații materialul este comprimat cu 2.5 mm (39% din grosimea inițială) până la o grosime finală de ~4 mm. În al treilea test materialul este comprimat cu 4.4 mm (67% din grosimea inițială) până la ~2.1 mm. Condiția de finalizare a comprimării a testului III este ca forța maximă să nu depășească limita senzorului (40 N).

După primul ciclu de comprimare, materialul nu mai revine la grosimea inițială. Comportamentul la cicluri succesive se datorează faptului că la deformații mai mari de 20% firele de legătură intră într-o zonă de tranziție elasto-plastică (spre etapa platoului) caracterizată de pierderi de energie prin histerezis, situație observată și în alte experimente [60].

Pierderile prin histerezis sunt evaluate determinând energia consumată pe timpul comprimării (E_c), energia produsă la decompresare (E_{dc}), diferența celor două valori (ΔE) și energia disipată între cicluri succesive (ΔE_{cs}), pentru fiecare configurație. Diferența este cunoscută și sub denumirea de energie disipată pe ciclu [60]. Calculul energiilor se rezumă la determinarea ariei de sub curba de variație a forței cu grosimea pe timpul celor două faze.

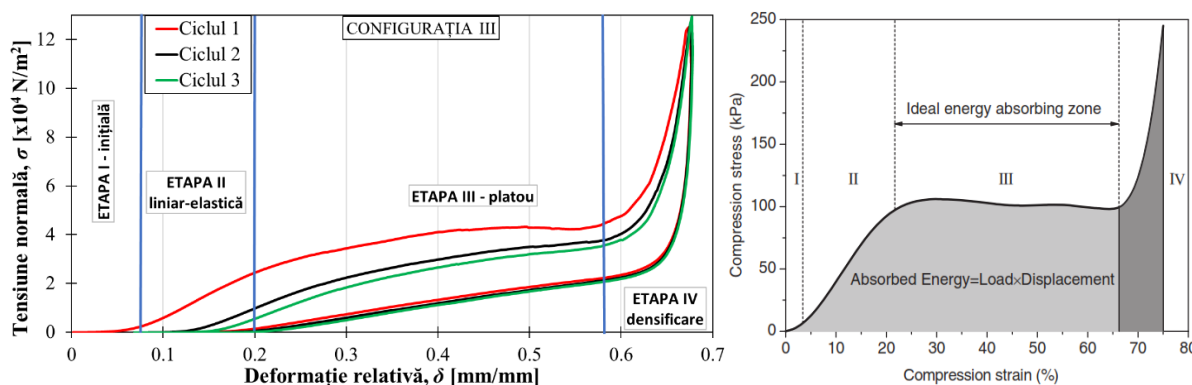


Figura 5.2 Curba tensiune-deformație S3DU-HI (stânga) și curba specifică materialelor tip S3D [54] (dreapta)

Figura 5.2 (stânga) arată rezultatele configurației III de testare. Viteza de comprimare este $10 \mu\text{m/s}$. O pauză de „recuperare” de 60 s este făcută între comprimare și revenire. Curba tensiune-deformație de comprimare specifică textilelor S3DU prezintă patru zone importante (Figura 5.2, dreapta) detaliate în capitolul 1. Se observă că spre finalul comprimării materialul se înscrie în zona de densificare. Figura 5.2 (stânga) arată că eșantionul își pierde rapid din elasticitate, aspect materializat și în pierderile de energie centralizate în Tabelul 5.6.

Tabelul 5.6 Pierderile de energie prin histerezis ale S3DU-HI pentru configurația III

	Ciclul	1	2	3
$E_{c III}$ [10^{-2}Nm]		4.53	3.34	2.99
$E_{dc III}$ [10^{-2}Nm]		1.62	1.49	1.43
ΔE_{III} [%]		64.3	55.5	52.2
$\Delta E_{cs III}$ [%]		-	-13.6	-6

Diagramelor de energie arată evoluția energiei absorbite pe unitatea de volum (W_{abs}) cu tensiunea normală (σ) și este calculată cu ajutorul relației [63], [54]:

$$W_{abs} = \int_0^{\delta} \sigma(\delta) d\delta \quad (5.1)$$

³ după metoda descrisă în SR EN ISO 5084:2011

Eficiența de absorbție a energiei unui material de protecție (Eff) arată raportul dintre energia absorbită de un material real, comprimat până la o anumită deformare, și energia absorbită de un material ideal, ce transmite o tensiune constantă, egală ca valoare [54]:

$$Eff = \frac{A \cdot h \cdot \int_0^{\delta} \sigma(\delta) d\delta}{A \cdot h \cdot \sigma} = \frac{\int_0^{\delta} \sigma(\delta) d\delta}{\sigma} \quad (5.2)$$

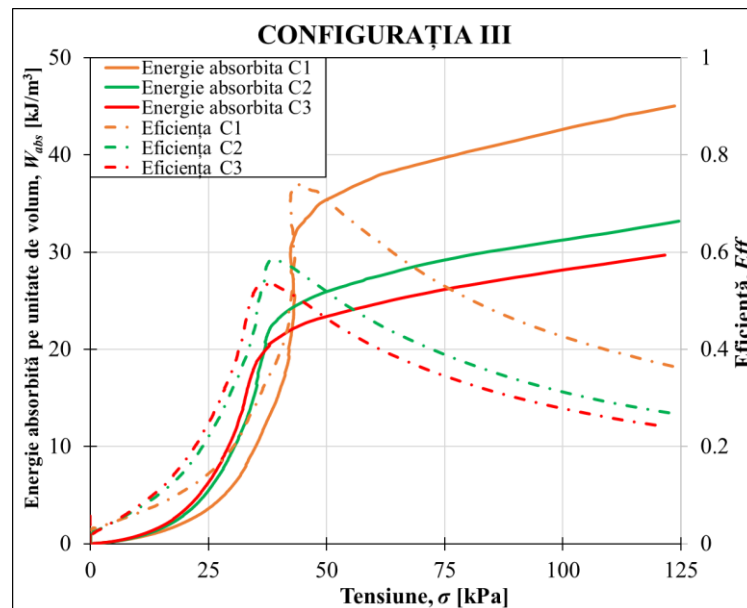


Figura 5.3 Curbele tensiune-energie absorbită și tensiune-eficiență pentru S3DU-H1 (configurația III)

Cele trei curbe de variație $\sigma - W_{abs}$ (pentru cele trei cicluri de comprimare notate C1, C2 și C3) din Figura 5.3 relevă faptul că energia absorbită evoluează rapid, iar când tensiunea ajunge în zona platoului energia crește brusc, deși tensiunea rămâne relativ constantă. Etapa este urmată de o creștere rapidă a tensiunii în condițiile unei creșteri relativ lente a energiei. Diagrama este utilă pentru optimizarea performanțelor sau selectarea materialului optim pentru o aplicație, în care tensiunea admisă și necesarul de energie absorbită sunt definite [54].

Curbele $\sigma - Eff$ arată o tendință similară până la începutul densificării, eficiența de absorbție a energiei fiind maximă la sfârșitul platoului, apoi scade treptat. Maximul curbei ce descrie eficiența de absorbție reprezintă un punct critic (la limita dintre etapele III și IV), util pentru definirea tensiunii din zona de platou, prin împărțirea la aria materialului [54].

5.3 MODELAREA 3D A UNEI CELULE REPREZENTATIVE

5.3.1 Scanarea pe computer tomograf și prelucrarea fișierului scanat

Utilizând un computer tomograf (Nikon XT-H225) s-a obținut micro-tomografia materialului. Rezoluția fișierului scanat a permis studiul intern al morfologiei materialului.

5.3.2 Definirea și modelarea 3D a unei celule reprezentative

Fișierul obținut în urma tomografierii este de tip VISREP⁴ și nu conține informații specifice fișierelor CAD (de tip BREP⁵) iar operațiunile care pot fi realizate pe acesta sunt

⁴ visual representation – reprezentarea geometriei prin elemente poligonale

⁵ boundary representation – reprezentarea formelor utilizând frontiera acestora

limitate. Programul Autodesk Fusion 360 permite comutarea facilă între cele două și a fost utilizat pentru gruparea firelor de legătură.

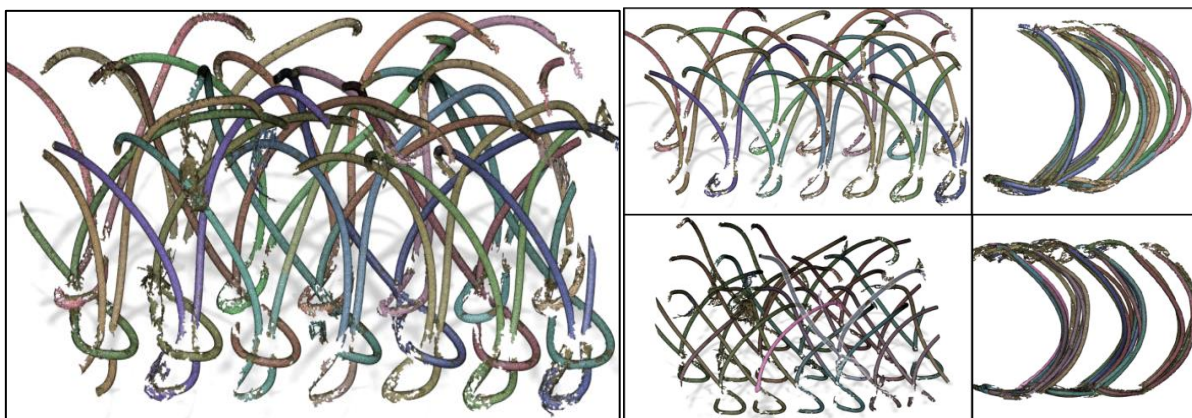


Figura 5.4 Tipuri de fire din structura materialului (vedere din față și vedere laterală în Fusion 360)

Figura 5.4 arată modul de așezare a firelor de legătură în structura materialului. Se remarcă două tipuri de rânduri de fire ce se repetă și se întrepătrund alternativ.

După separarea stratului de legătură de cele două fețe s-a obținut o celulă reprezentativă a S3DU-H1 în programul CAD Solidworks. Simplificările făcute pentru modelarea acesteia și lipsa unor informații specifice procesului de tricotare au limitat posibilitățile de parametrizare.

Celula reprezentativă este compusă din patru fire. Acestea au fost secționate cu ajutorul unor plane paralele cu fețele, distribuite în punctele de curbură maximă (a fiecărui fir) și în apropierea fețelor, unde se observă o schimbare a curburii (Figura 5.5). Prin această dispunere a planelor se obțin 5 puncte pentru fiecare fir, care se unesc pentru a obține fibra medie.

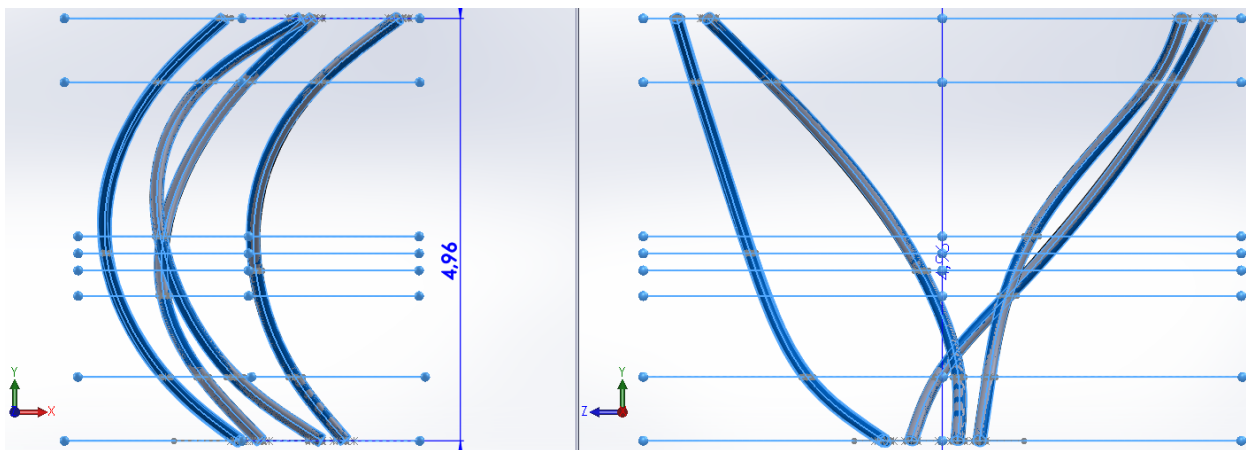


Figura 5.5 Elementele de bază ale modelului 3D al firelor celulei reprezentative

Modelul 3D final este obținut prin copierea celulei în direcțiile OX și OZ, cu un pas de 2 mm, respectiv 1.575 mm. Valorile reprezintă media coordonatelor (x, z) ale centrului ariei secțiunii a zece fire din fișierul scanat, în planul inferior (la $y = 0$).

5.3.3 Transferul modelului solid în programul Abaqus pentru analiza structurală neliniară

Obținerea modelului 3D CAD al celulei reprezentative a S3DU-H1 permite trecerea la studiul comportamentului la comprimare a materialului (realizat în SIMULIA Abaqus™). Firele se reconstruiesc în Abaqus folosind coordonatele determinate anterior. Etapa este utilă și

pentru obținerea unei comenzi macro cu ajutorul căreia se pot genera rapid noi geometrii ale firelor sau pattern-uri ale celulei reprezentative, prin simpla modificare a unor parametri.

Geometria modelelor cu elemente finite Abaqus conține celula reprezentativă, multiplicată de n ori, în OX și OZ, și două plăci subțiri, rigide (suprafețele interioare ale fețelor). Se presupune că deformația fețelor este neglijabilă în raport cu cea a stratului de mijloc.

Firele de legătură sunt discretizate cu elemente de tip beam B32. Distribuția acestora de-a lungul firelor este particularizată, în funcție de lungime și curbura. Interacțiunile dintre suprafețele componentelor sunt modelate prin două proprietăți de tip contact mecanic, în direcțiile normală (contact rigid) și tangențială la suprafețe. În direcția tangențială se folosește o formulare cu penalizare.

5.4 SIMULAREA COMPORTĂRII LA COMPRIMARE

Rezultatele analizei structurale neliniare cu elemente finite sunt comparate cu ciclul 1 de comprimare al configurației III (Figura 5.2).

5.4.1 Fire de legătură cu înălțime egală

Au existat mai multe abordări folosite pentru caracterizarea mecanismului de deformare al firelor de legătură. Cele mai bune rezultate au fost obținute cu un model de deformație a elasto-plastic biliniar (primul model a fost notat T0).

Modelul are nevoie de definirea modului lui Young ($E = 3170 \text{ MPa}$), a coeficientul lui Poisson ($\nu = 0.39$)⁶ și a modului de elasticitate transversal ($G = 1140.29 \text{ MPa}$), pentru porțiunea elastică. Pentru cea plastică sunt necesare limita de curgere ($\sigma_c = 60 \text{ MPa}$), limita de rupere (σ_r) cu deformațiile aferente (δ_c și δ_r) și modulul de plasticitate ($E_p = 0.02E \div 0.04E$).

Pornind de la modelul T0, a fost realizat un studiu privind influența unor parametri asupra etapelor II și III de comprimare, utile pentru evoluția ulterioară a modelului cu elemente finite. Cele mai importante observații ale studiului parametric sunt [57]:

- influența coeficientului de frecare dintre fire (μ) este redusă;
- gradele de libertate ale nodurilor situate pe cele două plăci trebuie constrânse;
- diametrul firelor și modulul lui Young au cea mai mare influență asupra celor 2 etape.

În Figura 5.6, valoarea $\delta = 0.493$ marchează atât sfârșitul calculului numeric (realizat prin metoda implicită Abaqus) pentru modelul analizat (T0), cât și comprimarea maximă obținută (50% din h_0) cu acesta. Convergența modelului se oprește la joncțiunea dintre platou și zona de densificare, din cauza deformațiilor mari ale firelor.

Diagramele von Mises arată că nivelul maxim de solicitare al firelor de legătură este distribuit în zonele de contact cu placa precum și în punctul de curbura maximă. Rezultatul în zona de contact cu placa este însă influențat de condițiile la limită folosite. Se observă tendința firelor de a se aglomera în partea superioară.

⁶ Informații extrase din baza de date CES EduPack™ (v.11.0)

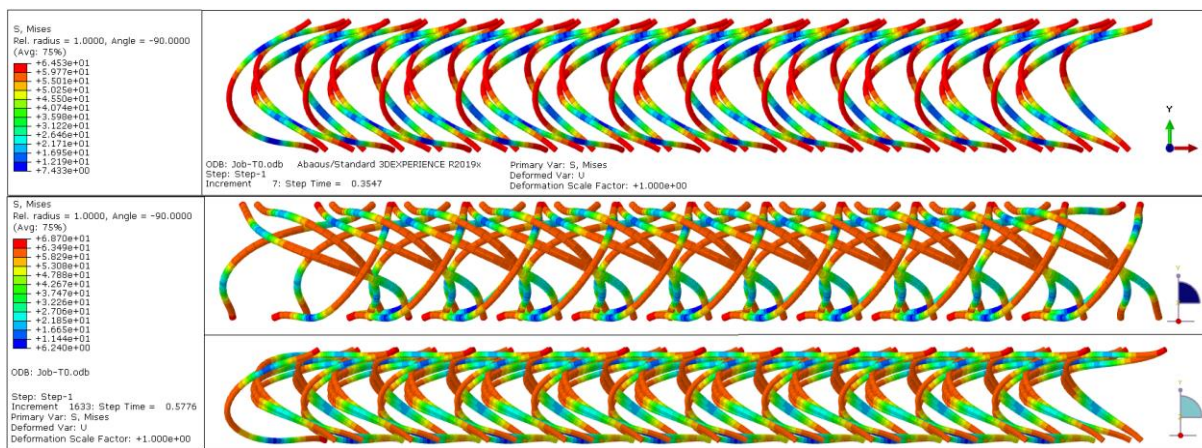


Figura 5.6 Diagrama de tensiuni von Mises (T_0) la deformația: $\delta = 0.338$ (sus) și $\delta = 0.493$ (jos) [57]

Pentru a extinde curbele tensiune-deformație obținute prin metoda implicită Abaqus (limitate la etapa platoului) s-a utilizat metoda de analiză explicită. Condițiile de testare ale modelelor nou realizate (indicate cu litera E) sunt prezentate în Tabelul 5.7.

Tabelul 5.7 Parametri reprezentativi ai modelelor numerice analizate prin metoda explicită

Nr. model	Diametru, (d) [mm]	Limita de curgere, σ_c (MPa)	Modul de plasticitate, E_p (MPa)	Distanța pe OZ, (dz) [mm]	Raport de deviere, (h/L)	Înălțime fire, (Y_{max}) [mm]
T0E1	0.15	60	$0.02 \cdot E$	1.575	0.1	4.959
T0E2	0.15	60	$0.02 \cdot E$	1.575	0.01	4.959
T0E3	0.15	60	$0.02 \cdot E$	1.300	0.01	4.959
T0E4	0.15	60	$0.02 \cdot E$	1.575	0.1	aleatorie
T0E5	0.15	80	$0.04 \cdot E$	1.575	0.1	aleatorie
T2E1	0.16	60	$0.02 \cdot E$	1.575	0.01	4.959

Figura 5.7 prezintă rezultatele obținute pentru modelele cu fire de legătură cu înălțimi egale. Se observă apariția etapei de densificare pentru toate modelele.

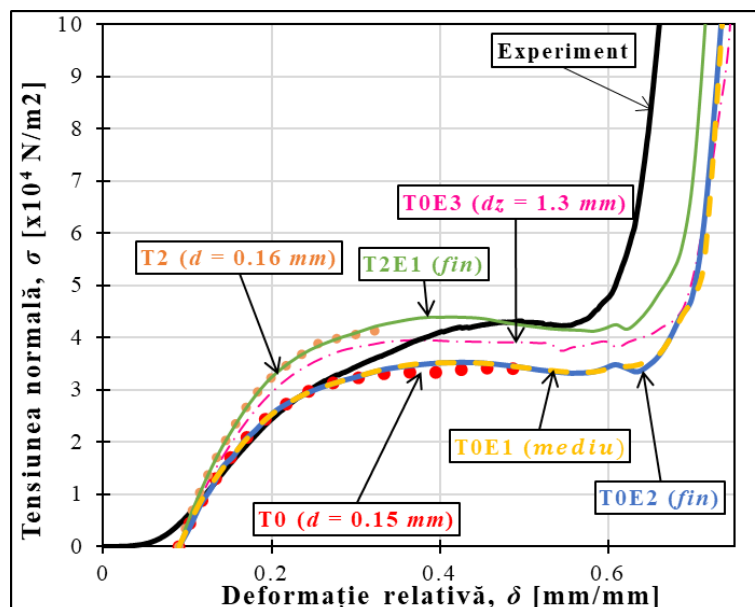


Figura 5.7 Comparație între curba experimentală și cele numerice ale modelelor cu fire cu înălțimi egale

Curbele obținute numeric (Figura 5.7) au fost deplasate la începutul etapei linear-elastice ($\delta = 0.09$) pentru a le corela cu rezultatele experimentale. Înălțimea firelor de legătură în cele două fețe și modul de constrângere al multifilamente duc la „angajarea” succesivă a firelor în comprimare și apariția etapei inițiale de comprimare a materialului ([54], [40]).

5.4.2 Fire de legătură cu înălțimi diferite

Modelele T0E4 și T0E5 (Tabelul 5.7) folosesc o funcție de randomizare în macro-comanda Abaqus pentru a varia coordonata Y_{max} a firelor. Funcția este de tip distribuție normală cu valoarea medie egală cu valoarea inițială a Y_{max} (4.959 mm) și valoarea deviației standard egală cu diametrul firelor. Obiectivul este caracterizarea etapei I de comprimare. Prin introducerea unor mici variații ale lungimii firelor se simulează caracterul aleatoriu al poziției firelor în structura fețelor de material, rezultat în urma procesului de fabricație. Modelul T0E5 conține și o modificare a modulului de plasticitate.

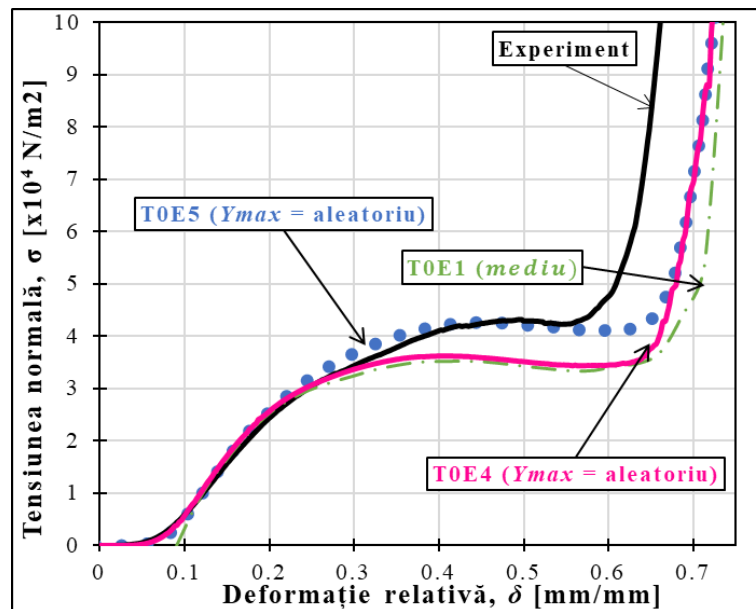


Figura 5.8 Comparație între experiment și modelele numerice având lungimi diferite ale firelor

Graficul din Figura 5.8 arată că această abordare permite caracterizarea întregului proces de deformație al materialului. Etapa inițială a modelelor numerice se suprapune peste rezultatul experimental. Modelul T0E5 reproduce fidel primele 3 etape ale curbei obținută experimental. Etapa de densificare este apropiată de cel mai bun rezultat obținut (cu modelul T2E1).

5.5 SIMULAREA CURGERII UNUI LICHID NEWTONIAN PRIN CELULA REPREZENTATIVĂ

Obiectivul principal este determinarea variației permeabilității cu nivelul de comprimare al materialului. Permeabilitatea se determină cu modelul teoretic Darcy, la viteze de curgere reduse, prin aplicarea unei diferențe de presiune între suprafețele limită pe direcția de curgere. Un alt obiectiv este acela de a testa limita de aplicabilitate a modelului de curgere laminar și compararea rezultatelor cu modele teoretice mai complexe, derivate din legea Darcy.

5.5.1 Transferul modelului cu elemente finite în Ansys Fluent

Se exportă forma deformată a firelor din Abaqus, la niveluri de comprimare succesivă (fișiere cu extensia *.rpt*). Printr-o rutină *Fortran*, fișierele Abaqus se transformă în fișiere cu extensia *.dat*. Acestea sunt importate cu o macro-comandă în *Catia* și sunt prelucrate pentru a obține, printr-o operațiune booleană, „negativul” firelor deformate (porii materialului).

Dimensiunile în plan sunt cele ale unei celule reprezentative ($2\text{ mm} \times 1.575\text{ mm}$) iar înălțimea depinde de nivelul de deformație al modelului din fișierul exportat din Abaqus.

5.5.2 Descrierea modelelor realizate în Fluent

Simulare unui model Fluent necesită parcurgerea unor pași specifici. Fișierele STEP sunt importate în modulul Design Modeler unde sunt selectate și denumite suprafețele limită ale volumului porilor. Denumirea suprafețelor este dată de axele principale normale la acestea și indicii min și max care indică apropierea suprafeței de originea sistemului de coordonate. Geometria se discretizează cu un model nestructurat cu elemente tetraedrice, iar în etapa de definire a analizei, acestea sunt convertite în elemente poliedrice/poligonale.

Se folosește modelul de curgere laminară. Influența vîscozității asupra curgerii a fost analizate cu două fluide: apa și glicerina. Condițiile pentru suprafețe sunt: Z_{min} și Z_{max} sunt interfețe cu „periodic boundary condition” iar Y_{min} și Y_{max} sunt pereți impermeabili cu condiție „no-slip”. Pentru direcția curgerii sunt analizate două modele. În primul (notat PB) se utilizează pentru X_{min} și X_{max} condiția folosită pentru Z_{min} și Z_{max} . Abordarea permite impunerea unui gradient de presiune în direcția curgerii, direct din condițiile de operare (în Pa/m).

În al doilea model (notat PO) se impun condiții tip „pressure outlet” pentru X_{min} și X_{max} și se creează o diferență de presiuni statice (pe una din suprafețe $P \neq 0$ iar pe cealaltă $P = 0$). Modulul de calcul va inversa automat sensul curgerii, de la presiunea mare către cea mică.

Se folosește un algoritm de calcul în care presiunea este cuplată cu viteza de curgere iar curgerea fluidului este considerată pseudo-tranzitorie. În etapa post-analiză CFD se determină viteza medie pe aria suprafețelor de curgere și integrala vitezei medii pentru a obține debitul.

5.5.3 Evaluarea numerică a permeabilității materialului S3DU-H1

Studiul calității modelelor realizate relevă un nivel minim al reziduurilor de 10^{-6} și o discretizare medie a modelului, pentru un echilibru între timpul de calcul și precizia rezultatelor.

5.5.3.1 Compararea modelelor realizate cu diferite fluide și condiții la limită

Au fost efectuate mai multe verificări preliminare ale modelelor. Influența condițiilor la limită asupra rezultatelor este cea mai importantă, în special pe direcția principală de curgere. Cele două modele numerice cu condiții la limită diferite au fost verificate la o gamă extinsă a gradientilor de presiune. Rezultatele obținute au fost diferențiate în funcție de variația vitezei medii cu gradientul de presiune, liniară sau neliniară.

Pentru acest studiu s-a folosit celula cu fire nedeformate. Pentru cazul variației liniare a vitezei medii cu gradientul de presiune, legea lui Darcy este scrisă sub forma echivalentă:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\eta}{\phi} u_{medie} \Leftrightarrow \frac{\Delta P}{L} = T_{Da} \cdot u_{med} \quad (5.3)$$

În relația (5.3) parametrul T_{Da} ține cont de efectele vîscozității și are semnificația geometrică a pantei drepte de variație dintre ∇P și u_{med} . Permeabilitatea rezultă din:

$$T_{Da} = \frac{\eta}{\phi} \rightarrow \phi_{Darcy} = \frac{\eta}{T_{Da}} \quad (5.4)$$

Variația u_{med} cu gradientul de presiune impus este analizată cu funcția LINEST (Excel). Funcția liniară de regresie aproximează datele numerice foarte bine (Figura 5.9).

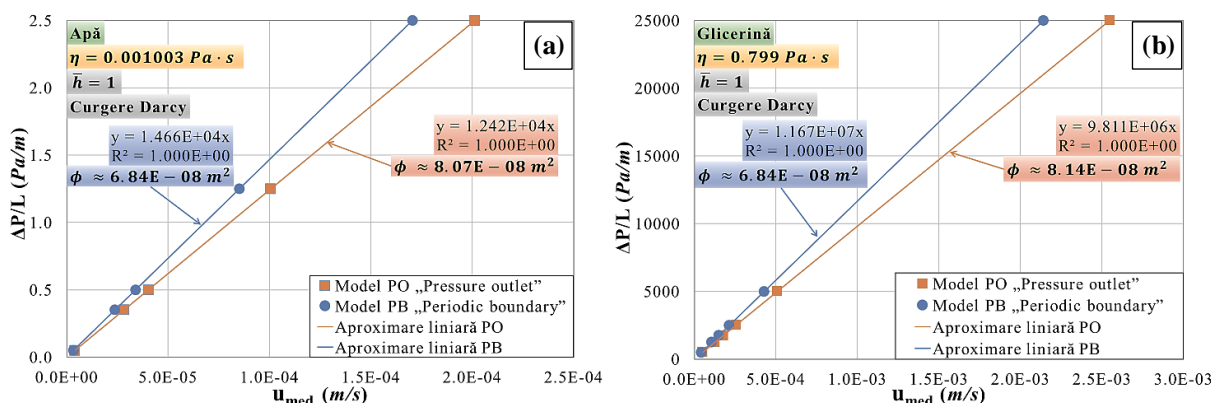


Figura 5.9 Influența condițiilor la limita – cazul variației liniare u_{med} cu ∇P pentru: (a) apă (b) glicerină

Figura 5.9 arată că permeabilitatea materialului depinde de condițiile la limită utilizate, diferența dintre cele două modele fiind de aproximativ 16%. Rezultatele sunt independente de fluidul analizat iar diferența de permeabilitate în aceleași condiții la limită este neglijabilă. Viscositatea fluidului influențează ordinul de mărime al vitezelor de curgere.

Crescând diferența de presiune aplicată celor două modele, se observă că viteza fluidului iese din zona de evoluție liniară. În Figura 5.10 sunt prezentate vitezele de curgere obținute pentru cele două fluide la valori crescute ale gradientilor de presiune.

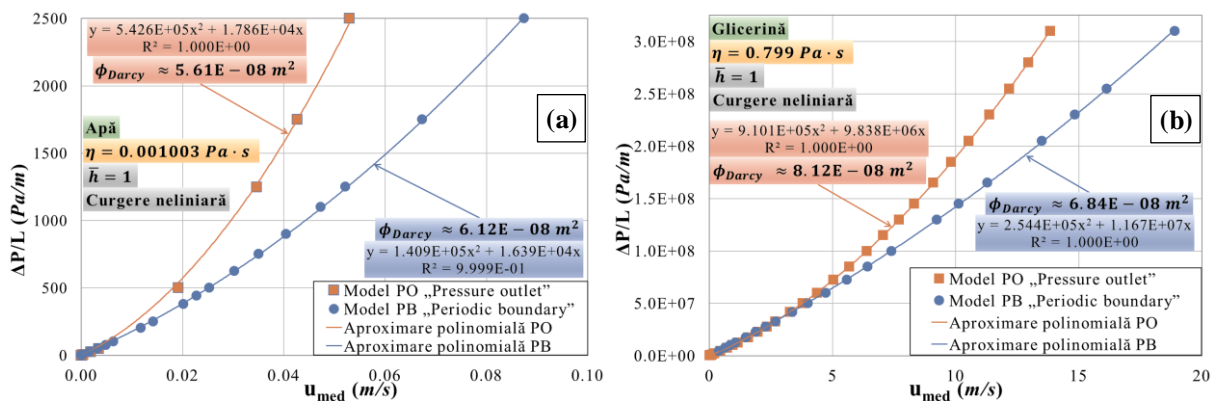


Figura 5.10 Influența condițiilor la limita – cazul variației neliniare u_{med} cu ∇P pentru: (a) apă (b) glicerină

Noile curbe ∇P și u_{med} au fost approximate prin linii de tendință polinomială de gradul doi. Curbele prezintă evoluții diferite pentru cele două fluide, mai vizibile pentru apă (ϕ_{Darcy} se reduce cu 45%). Influența viscozității începe să scadă cu creșterea vitezei de curgere, conducând la o evoluția neliniară cu gradientul de presiune impus. Diferențele importante dintre rezultatele celor două modele au fost investigate suplimentar.

5.5.3.2 Verificarea condițiilor la limită pentru cazul curgerii printr-o conductă

Verificarea a fost realizată pe un model simplu al unei conducte cu lungimea mai mare decât diametrul. Evaluarea rezultatelor numerice s-a realizat cu soluția analitică pentru debit a ecuației Hagen-Poiseuille. Rezultatele obținute pentru cele două modele au fost verificate la trei valori ale ΔP . Rezultatele cu modelul PB conduc la soluții numerice foarte apropiate de cele analitice. Modelul PO reduce valorile debitului și ale vitezelor de curgere pe măsură ce diferența impusă între presiunea de intrare și cea de ieșire crește.

5.5.3.3 Influența numărului de celule reprezentative

Modelul PO a fost verificat pe două geometrii cu lungimi diferite ale domeniului de curgere în direcția OX . Cele două geometrii analizate conțin cinci (PO 5X), respectiv zece celule reprezentative (PO 10X) de-a lungul domeniului de curgere. Analiza noilor modele PO a fost realizată la trei ordine diferite de mărime ale gradientului de presiune iar rezultatele au fost comparate cu cele obținute la același gradient de presiune cu modelul PB (valoare de referință).

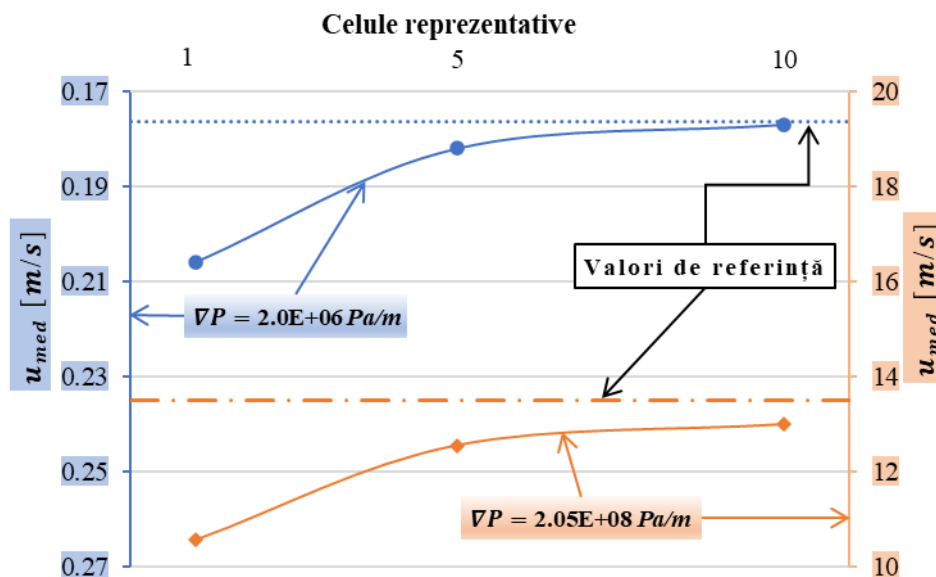


Figura 5.11 Variația vitezei medii cu numărul de celule reprezentative

Figura 5.11 arată că soluția modelelor numerice PO modificate se apropie de soluția aleasă drept referință (modelul PB) pe măsură ce numărul celulelor reprezentative crește. Îmbunătățirea înseamnă o creștere substanțială a timpului de calcul.

5.5.4 Analiza permeabilității utilizând extensia Dupuit-Forchheimer a legii Darcy

Pentru a analiza permeabilitatea din setul de date obținut din intersecția valorilor gradientului de presiune impus și a vitezei calculate numeric s-au utilizat mai multe abordări. Într-o prima abordare permeabilitatea s-a determinat din legea Darcy pentru fiecare punct, analizându-se evoluția cu regimul de curgere (Re_ϕ) Permeabilitatea, cu ambele fluide, se reduce cu mărirea regimului de curgere cu aproximativ 50%.

Următoarele abordări au presupus determinarea permeabilității utilizând regresii polinomiale (de gradul doi) pentru a verifica modelului teoretic de curgere descris prin relația (1.3). Metoda de lucru propusă în [4] implică scrierea relației (1.3) în forma:

$$\frac{\Delta P}{L} = T_{Da} \cdot u_{med} + T_{Fo} \cdot u_{med}^2 \quad (5.5)$$

$$T_{Fo} = \rho \frac{C_f}{\sqrt{\phi}} = \rho \cdot C \quad (5.6)$$

Termenul T_{Fo} reprezintă componenta Forchheimer. Punând ecuația (1.3) în forma echivalentă, T_{Da} și T_{Fo} se determină prin metoda celor mai mici pătrate (MCMMP⁷) ([4], [10]).

⁷ Metoda celor mai mici pătrate

Pentru a evalua abaterea dintre curbele de aproximare și punctele obținute numeric se utilizează abaterea medie a diferenței de presiune ($\overline{\Delta P}$) și abaterea medie relativă a datelor (\overline{Err}).

Pentru obținerea curbelor de regresie polinomială se folosesc mai multe abordări. În prima abordare (notată $\phi = const$), permeabilitatea se determină din zona de variație liniară. Aproximarea datelor se face pe punctele care nu mai respectă modelul Darcy. Abordarea conduce la rezultate similare cu cel din Figura 5.12 ($\overline{Err} = 1.1\%$).

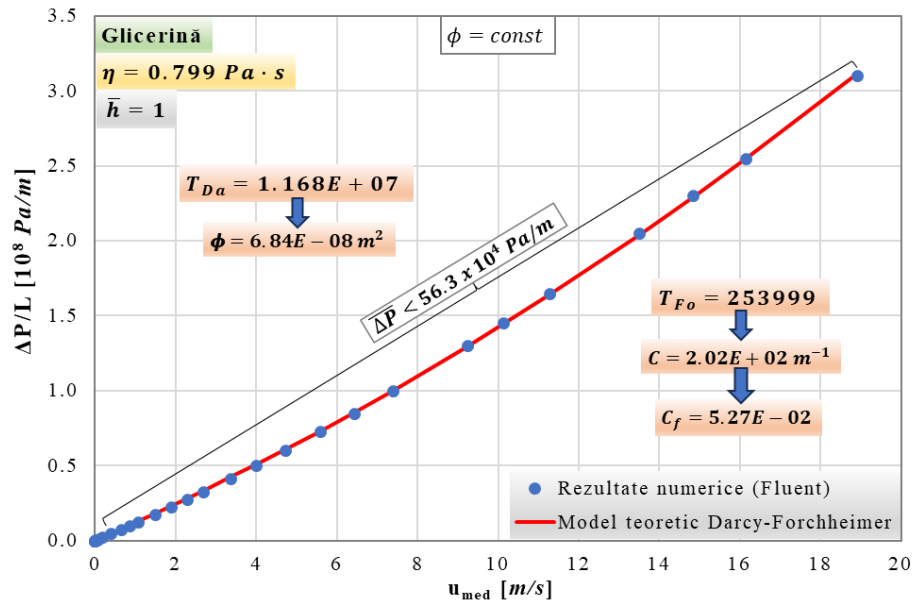


Figura 5.12 Variația vitezei de curgere cu gradientul de presiune (glicerină) –Darcy-Forchheimer ($\phi = const$)

A doua abordare implică aproximarea datelor numerice prin curbe de regresie polinomială pentru un interval al vitezelor de curgere ($D - F_{interval}$) sau pentru tot setul de date ($D - F_{tot}$). Cea mai bună aproximare a datelor se obține prin metoda $D - F_{interval}$, care implică determinarea T_{Da} și T_{Fo} prin MCMMP pentru toate valorile determinate până la o anumită valoare a vitezei de curgere. Obținerea acestora permite calculul permeabilității și a coeficientului de rezistență (C) sau a coeficientului Forchheimer (C_f) aferente curbei delimitate de valoarea vitezei de curgere verificate. Această metodă a fost utilizată cu succes și în [4] și permite analiza variației permeabilității și a coeficientului de formă sau a C_f cu regimul de curgere.

Prin această abordare, abaterile rezultatelor obținute pentru apă sunt $\overline{\Delta P} = 1.95 Pa/m$ și $\overline{Err} = 0.17\%$ și, pentru glicerină, $\overline{\Delta P} = 1.4E + 05 Pa/m$ și respectiv $\overline{Err} = 0.08\%$. Față de metoda $\phi = const$ aceste rezultatele reprezintă o îmbunătățire de aproximativ 90% a $\overline{\Delta P}$ și \overline{Err} . Spre deosebire de utilizarea modelului teoretic Darcy pentru aproximarea datelor, cu modelul Darcy-Forchheimer permeabilitatea se reduce cu doar 11% (față de 50%).

Figura 5.13 arată aceeași variație a ϕ și a factorului C obținute cu cele două fluide și că valorile acestora nu sunt constante. Componentele modelului Darcy-Forchheimer se modifică cu pante diferite, funcție de caracteristica dominantă a regimului de curgere. În zona liniară, permeabilitatea este relativ constantă iar factorul C prezintă mici oscilații ale valorilor (pentru că se interpolează un set de date liniar cu un polinom de gradul doi [4]). În zona de tranziție între regimul dominat de viscozitate (liniar) și cel dominat de factorul de formă (efecte inerțiale), ϕ și factorul C cresc ușor atingând maximum în jurul $Re_\phi \approx 3.1$. După atingerea

punctului maxim, permeabilitatea tinde să se reducă cu creșterea regimului de curgere, iar factorul C tinde să se stabilizeze în intervalul $125 \div 150 \text{ m}^{-1}$.

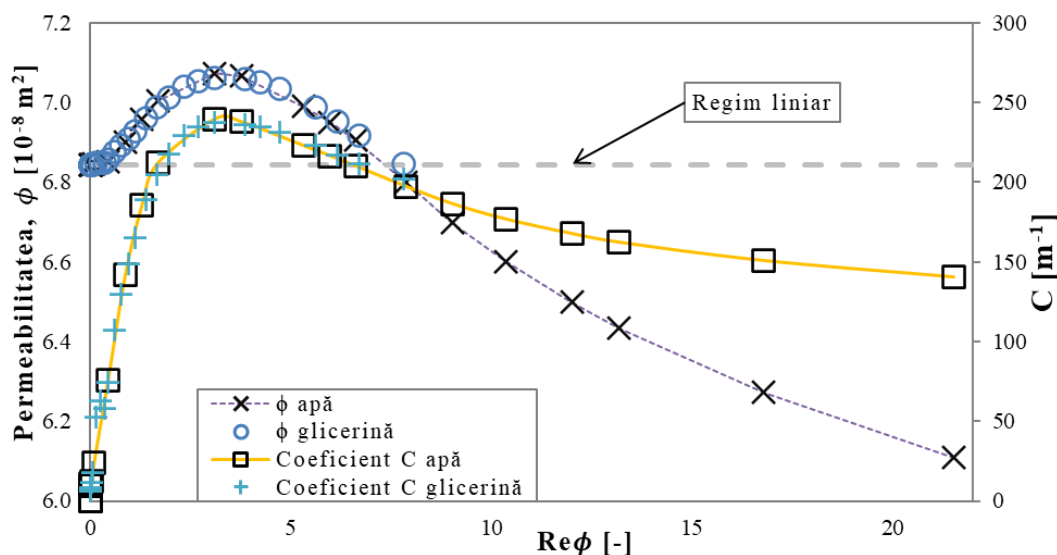


Figura 5.13 Variația permeabilității și a coeficientului de rezistență a formei cu regimul de curgere – modelul Darcy-Forchheimer, metoda MCMMP aplicată pe intervale

Urmărind variația permeabilității, din datele obținute pentru apă s-a identificat limita modelului Darcy, în funcție de regimul de curgere. Zona $Re_{\phi} = 0.1 \div 3.5$ este considerată zona de tranziție între zona curgerii Darcy și cea în care curgerea prin materialul poros poate fi descrisă complet de modelul Darcy-Forchheimer. Limita superioară a regimului de tranziție este apropiată de cea identificată în studiul [30] în care a fost realizat un studiu numeric similar.

5.6 COMPARAREA PERMEABILITĂȚII CALCULATE CU REZULTATE EXPERIMENTALE

Modelul PB (gradient de presiune impus) este utilizat pentru analiza variației permeabilității cu deformația. Rezultatele numerice au fost comparate cu măsurători experimentale cu glicerină realizate pe același material de C. Enescu [27].

Permeabilitatea din datele numerice a fost determinată utilizând legea Darcy și gradienti de presiune cu valoare redusă. Din modelul Abaqus T0E1 au fost extrase formele firelor la diferite niveluri de compresiune pentru a realiza analiza CFD pe o celulă reprezentativă. Deși modelul T0E5 a fost cel care a prezentat evoluția cea mai apropiată de curba tensiune-deformație experimentală, variația înălțimii firelor nu permite utilizarea unei singure celule.

Porozitatea inițială ($\varepsilon_0 = 0.9694$) a fost determinată din modelul geometric iar variația acesteia cu nivelul de comprimare s-a realizat utilizând ecuația de conservare a fracției solide. Porozitatea celulei reprezentative reprezintă porozitatea ideală a stratului de mijloc. Fețele materialului reduc valorile determinate experimental ($0.91 \div 0.95$), însă o evaluarea experimentală a porozității stratului de mijloc al materialului nu este posibilă.

Permeabilitatea a fost evaluată în direcțiile de curgere plană (OX și OZ) motiv pentru care s-a determinat și permeabilitate rezultantă ϕ_R , astfel:

$$\phi_R = \frac{1}{3}\phi_{OX} + \frac{2}{3}\phi_{OZ} \quad (5.7)$$

Tabelul 5.8 Permeabilitatea formelor deformate a firelor de legătură

Înălțime model numeric, Y_{max} [mm]	Valoare deformație [mm]	Grosime echivalentă* S3DU-H1, h [mm]	Porozitatea ε [-]	ϕ_{OX} [m^2]	ϕ_{OZ} [m^2]	Diferență permeabilități [%]	ϕ_R [m^2]
4.959	0	6.454	0.9694	6.84E-08	6.59E-08	3.76	6.67E-08
3.957	1.002	5.452	0.9617	4.71E-08	4.76E-08	-1.03	4.74E-08
2.955	2.004	4.450	0.9487	3.51E-08	3.45E-08	1.64	3.47E-08
2.454	2.505	3.949	0.9382	2.87E-08	2.72E-08	5.48	2.77E-08
1.953	3.006	3.448	0.9223	2.13E-08	1.86E-08	12.49	1.95E-08
1.452	3.507	2.947	0.8955	1.16E-08	9.45E-09	18.24	1.02E-08
1.202	3.758	2.697	0.8737	8.52E-09	5.70E-09	33.12	6.64E-09
1.035	3.925	2.530	0.8534	6.49E-09	3.69E-09	43.22	4.62E-09
0.951	4.008	2.446	0.8405	5.75E-09	3.20E-09	44.28	4.05E-09
0.751	4.208	2.246	0.7979	3.54E-09	2.01E-09	43.18	2.52E-09

* în calculul grosimii echivalente se ține cont și de fețele materialului care au însumat o grosime de 1.495 mm

Tabelul 5.8 prezintă valorile calculate ale permeabilității la diferite niveluri de deformație. Folosind aceste date, în Figura 5.14 se prezintă variația permeabilității cu porozitatea pe timpul comprimării.

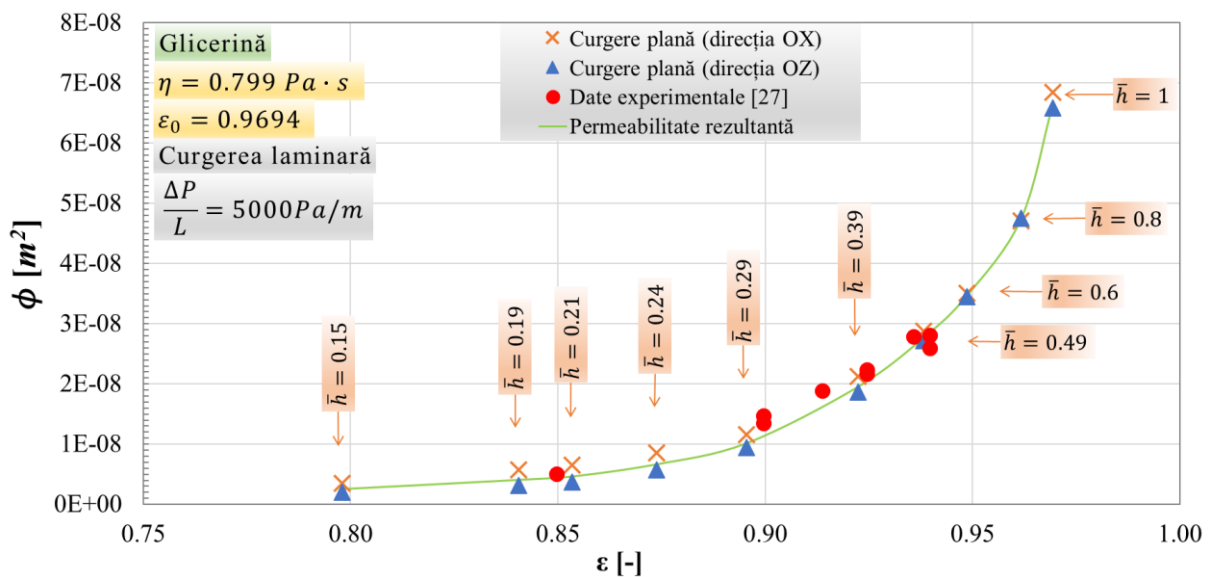


Figura 5.14 Variația permeabilității modelului numeric cu porozitatea

Figura 5.14 prezintă comparația rezultatelor obținute numeric cu cele determinate pe cale experimentală de C. Enescu [27]. Graficul arată că rezultatele experimentale sunt foarte apropiate de cele obținute prin analiză CFD. Se observă că și valorile experimentale ale permeabilității materialului (cu tot cu cele două fețe) este dominată de permeabilitatea stratului de legătură. Ipoteza este valabilă atât timp cât straturile exterioare nu intră în contact.

Pentru valori mai mari ale porozității, nu există rezultate experimentale întrucât debitele de curgere sunt foarte mari iar construcția permeametrului nu permite colectarea fluidului. Ținând cont de toate simplificările, rezultatele obținute din analiza CFD prezintă un nivel foarte bun de corelare al datelor experimentale.

5.7 CONCLUZII

Variația permeabilității cu porozitatea, la diferite niveluri de comprimare și pentru gradienti de presiune cu valori reduse, obținută numeric într-un mediu CFD prezintă un nivel de corelare foarte bun cu datele obținute din măsurători experimentale, în aceleași condiții. Rezultatele arată utilitatea metodei de analiză pentru evaluarea permeabilității cu compresiunea.

S-a reușit determinarea unei limite a curgerii liniare prin celula reprezentativă nedeformată. Rezultatele numerice obținute pentru două fluide utilizate, arată în primul rând că permeabilitatea materialului nu depinde de fluidul utilizat.

Pentru domeniul de curgere analizat ($Re_\phi < 23$), modelul Darcy-Forchheimer oferă un grad bun de aproximare a datelor. Prelucrarea datelor arată o variație a permeabilității cu regimul de curgere, în concordanță cu observațiile întâlnite în literatură pentru modelele de curgere care folosesc teoria rezistenței la curgere.

CAPITOLUL 6

CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

6.1 CONCLUZII GENERALE

- Principalele probleme apărute în studiile dedicate mecanismului de expulzare a fluidelor prin medii poroase foarte compresibile, au relevat o serie de discrepante ce apar în special la viteze mari specifice aplicațiilor la impact, la care modelele teoretice bazate pe curgerea de tip Darcy devin mai puțin precise. Alte posibile surse identificate, precum închiderea porilor comunicanți până la atingerea porozității nule sau valorile permeabilității determinate experimental, dificil de corelat cu altele obținute în condiții similare, au condus la reconsiderarea unora din ipotezele simplificatoare care au stat la baza mecanismului XPHD.

Totodată, rezultatele promițătoare obținute la atenuarea impactului, evidențiate teoretic și experimental au dus la un interes deosebit pentru extinderea utilizării mecanismului XPHD pentru cazul mișcărilor repetative (oscilatorii) prin impact succesiv. În schimb, în cazul mișcărilor ciclice specifice unor aplicații cu utilizare îndelungată sau multiplă, mecanismul XPHD încă nu a fost explorat.

Motivele enumerate au fundamentat principalele direcții abordate în această lucrare.

- Atunci când numărul Reynolds, calculat pentru curgerea prin medii poroase, depășește o valoare specifică materialului și modelului de curgere Darcy, efectele inerțiale trebuie luate în calcul. Pentru a testa mecanismul de lubrificație XPHD dincolo de limita modelului Darcy, problema curgerii pe timpul expulzării a fost descrisă folosind modelul teoretic Darcy-Forchheimer.

Întrucât pentru modelul studiat nu există o soluție analitică posibilă, problema este rezolvată numeric prin metoda diferențelor finite. Modelul numeric a fost utilizat pentru evaluarea influenței diversilor parametri ai modelului extins cu termenul Forchheimer. Rezultatele obținute arată că efectele inerțiale au un aport important asupra forței și câmpului

de presiuni generate pe timpul comprimării unui material poros. Observația este valabilă în special pentru materiale cu porozitate ridicată îmbibate cu fluide cu viscozitate scăzută.

Rezultatele numerice obținute cu modelul de curgere propus arată o creștere a valorilor presiunii prin efecte inerțiale, la același nivel de comprimare a structurii poroase. Prin urmare portanța este mărită de efectele inerțiale, concluzie susținută de rezultatele experimentale obținute de grupul de Lubrificație care au relevat comprimări ale materialului poros îmbibat mai reduse decât cele prezise teoretic pentru impact (cu modelul Darcy).

- Cu ajutorul unui dispozitiv experimental bazat pe o idee originală s-a reușit punerea în evidență a corelației dintre nivelul de comprimare, forța de comprimare și volumul fluidului prezent în straturile poroase. Analiza experimentală prezentată este centrată pe variația porozității pe timpul comprimării cu viteză constantă pentru spume reticulate ușor deformabile.

Volumul de fluid remanent, prezent chiar și la deformații foarte mari, arată limita modelului XPHD, întrucât curgerea fluidului din material se oprește înainte de atingerea porozității nule, una din ipotezele de bază ale modelărilor teoretice. La atingerea porozității critice, valoarea volumului de pori ocupați rămâne constantă și independentă de deformație. Porozitatea critică apare aproape de limita superioară a zonei de densificare.

- Studiul experimental al influenței frecvenței de comprimare ciclice asupra comportamentului unor materiale poroase de interes arată că reîmbibarea reprezintă o condiție importantă atunci când se discută despre acest tip de mișcare. Rezultatele experimentale au fost obținute pe un dispozitiv original dezvoltat în cadrul Institut Pprime (Univ. din Poitiers).

Cursa de revenire duce la apariția unei presiuni negative, strâns corelată cu frecvența de comprimare. Apariția acesteia a fost pusă pe seama fenomenului de reîmbibare a materialului, ca urmare a dezvoltării unei forțe de sucțiune între placa de comprimare și material, care recuperează fluidul expulzat pe timpul cursei de comprimare.

Din punct de vedere al influenței materialului, se apreciază că porozitatea, mărimea și forma porilor influențează frecvența până la care materialul se poate reîmbiba continuu. Comportarea materialului este legată și de fluidul utilizat, fiind necesară alegerea unei perechi material-fluid potrivite pentru punerea în evidență a efectelor benefice ale comprimării ciclice.

Presiunea maximă crește liniar cu frecvența de comprimare până la valori de 2 Hz, pentru materialele îmbibate cu ulei, respectiv 5 Hz pentru cele îmbibate cu apă. La atingerea frecvenței limită, capacitatea de reîmbibare a materialului se diminuează, iar comportarea devine similară.

Procesul de comprimare ciclică este influențat de absorbția, pe timpul reîmbibării, a unei cantități de aer tot mai importante, ce conduce inițial către stagnarea presiunii negative și ulterior a celei pozitive. Acest rezultat evidențiază atenția deosebită ce trebuie acordată condițiilor de reîmbibare, astfel încât spuma să fie îmbibată în permanență.

- Testele de comprimare cu viteză redusă pe eșantioane de material S3DU permit evaluarea pierderilor de energie prin histerezis și evidențierea apariției unei componente plastice în mecanismul de deformație al materialelor textile tridimensionale. Analiza caracteristicilor morfologice și mecanice ale materialului devine astfel o activitate importantă pentru a simula numeric comportamentul materialului la comprimare.

Reducerea structurii de distanțare la o celulă reprezentativă periodică, utilizând scanarea materialului obținută pe un computer tomograf, a permis obținerea unor modele 3D simplificate

ale materialului în programe CAD. Pornind de la acestea, s-a realizat într-un mediu CAE un studiu avansat al comportării la comprimare a materialului ce a permis extragerea formelor firelor de legătură la diferite niveluri de comprimare.

Formele deformate au fost utilizate pentru a analiza într-un mediu CFD curgerea unui fluid printre firele de legătură. Rezultatele simulărilor numerice au fost comparate cu date experimentale obținute pentru același material, arătând un nivel de corelare foarte bun. Rezultatul comparației demonstrează utilitatea metodelor de analiză numerică în evaluarea permeabilității cu compresiunea.

Un al doilea studiu numeric a fost realizat pentru a testa limita de aplicabilitate a modelului de curgere Darcy (pe o celulă nedeformată) și compararea rezultatelor cu modelul teoretic extins cu corecția Darcy-Forchheimer. Rezultatele numerice obținute, pentru două fluide utilizate în analiza CFD, arată că permeabilitatea materialului nu depinde de fluid (atât timp cât temperatura rămâne constantă). Acesta este un avantaj major al utilizării metodelor numerice pentru determinarea permeabilității unui material poros, spre deosebire de rezultatele experimentale în care se observă frecvent o influență a fluidului asupra valorilor măsurate ale permeabilității, cauzate de reacții la nivel microscopic sau macroscopic între fluid și material.

De asemenea, se observă că pentru domeniul de curgere analizat ($Re_{\phi} < 23$), modelul Darcy-Forchheimer oferă un grad de aproximare suficient de bun. Prelucrarea datelor arată o ușoară variație a permeabilității cu regimul de curgere, în concordanță cu observațiile întâlnite în literatură. Se pune totuși problema dacă nu cumva metoda de interpretare a datelor experimentale sau numerice, în funcție de regimul de curgere, nu conduce de fapt la interpretări greșite ale rezultatelor, în special când nici este identificată o abordare unitară în literatură asupra modului de determinare a numărului Reynolds specific materialelor poroase.

Ținând cont de toate simplificările realizate pentru obținerea modului de comportare la deformația firelor de legătură și a permeabilității stratului de legătură, prin simulări numerice efectuate în medii CAE și CFD, rezultatele obținute sunt excelente. Desigur, întregul proces poate fi ameliorat, optimizat sau reanalizat în anumite puncte, pornind de la scanarea pe computer tomograf și terminând cu modelele numerice.

Rezultatele reprezintă un punct bun de plecare pentru abordări viitoare în acest domeniu iar modelele realizate pot fi utilizate pentru proiectarea unor materiale adaptate nevoilor de amortizarea ale unei aplicații.

6.2 CONTRIBUȚII PERSONALE

Studiile desfășurate în cadrul programului doctoral aduc contribuții în domeniul analizei curgerii lichidelor prin medii poroase foarte deformabile supuse compresiunii. Au fost vizate două categorii de medii poroase relativ noi ca utilizare: materialele fibroase din categoria textilelor tridimensionale (Spacer 3D), respectiv spumele reticulate cu pori comunicanți.

- Model matematic și codul numeric aferent, dezvoltat în limbaj FORTRAN, pentru simularea curgerii plane, axial-simetrice, a unui lichid newtonian printr-o structură poroasă, deformabilă, supusa comprimării.
- Evidențierea influenței vitezei de curgere prin porii materialului (efectul termenului inerțial Forchheimer) asupra câmpului de presiuni generat prin expulzare radială plană a unui lichid newtonian.

- Dispozitiv pentru determinarea porozității critice (limita practică a permeabilității) și corelarea acesteia cu curba caracteristică de comprimare a structurii poroase.
- Proiectarea conceptuală a mecanismului de transformare a mișcării de rotație în translație alternativă, pentru bancul de comprimare ciclică.
- Evidențierea frecvenței limită până la care materialele poroase îmbibate, solicitate la comprimare ciclică, au capacitate de amortizare și corelarea acesteia cu capacitatea de îmbibare.
- Generarea unui model solid (celulă reprezentativă) al structurii unui material textil de tip Spacer 3D pornind de la scanarea micro-tomografică.
- Simularea numerică a comportamentului structural neliniar la comprimare al materialului Spacer 3D și corelarea cu datele experimentale.
- Simularea numerică complexă în ANSYS-Fluent a curgerii unui fluid newtonian prin structura 3D comprimată în scopul determinării permeabilității la curgere plană bidirecțională.
- Evidențierea limitei de utilizare a modelului Darcy pentru calculul permeabilității.
- Determinarea corelației permeabilitate - porozitate, la diferite nivele de comprimare și comparația cu rezultatele experimentale obținute anterior.

6.3 DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Rezultatele obținute conduc către definirea următoarelor direcții de evoluție:

- Verificarea experimentală a datelor obținute din rezolvarea modelului numeric, pentru simularea curgerii plane, axial-simetrice, a unui lichid newtonian printr-o structură poroasă, deformabilă, supusă comprimării.
- Extinderea modelului matematic și a codului numeric prin utilizarea componentei axiale a vitezei de curgere a fluidului expulzat.
- Extinderea modelului matematic și a programului de calcul prin utilizarea unor modele teoretice de curgere mai complexe și sau cu alte tipuri de solicitări, precum forță constantă sau impact cu impuls dat, și validarea acestora cu date experimentale.
- Realizarea unei variante îmbunătățite a dispozitivului de determinare a porozității critice pentru testarea unui număr mai variat de materiale.
- Modificarea celulei experimentale a standului de comprimare ciclică pentru îmbunătățirea condițiilor de reîmbibare la frecvențe mai mari, prin extinderea capacității rezervorului sau prin utilizarea unei celule experimentale închise.
- Caracterizarea mai multor perechi material poros-fluid supuse comprimării ciclice pentru identificarea unei variante optime pentru mecanismul XPHD.
- Modelarea numerică a comportamentului materialelor poroase îmbibate supuse solicitărilor ciclice.
- Studiul numeric al permeabilității prin mijloace CFD ținând cont de influența porozității straturilor unui material textil tridimensional și determinarea permeabilității atât la curgere plană, cât și la cea transversală.
- Studiul numeric al permeabilității prin mijloace CFD și analiza statistică a tortuozității liniilor de curgere printre firele de legătură.

Utilizarea altor modele de curgere pentru evaluarea numerică a permeabilității și compararea cu rezultatele obținute cu modelul de curgere laminar.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] ***, <https://www.dimer.com/en/materialien/pur-weichschaum/pur-schaum.php>
- [2] ***, *PROTHEIS - Sisteme de protecție împotriva impacturilor de energie mare și a exploziilor folosind materiale poroase îmbibate cu lichide*, PN-II-Nr.287/2014, grant 2014-2017, Universitatea Politehnica din București
- [3] ***, <https://www.heathcoat.co.uk/>
- [4] Antohe B. V., Lage J. L., Price D. C., Weber R. M., 1997, *Experimental determination of permeability and inertia coefficients of mechanically compressed aluminum porous matrices*, Journal of Fluids Engineering, vol. 119, nr. 2, p. 404–412
- [5] Bardenhagen S. G., Brydon A. D., Guilkey J. E., 2005, *Insight into the physics of foam densification via numerical simulation*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 53, nr. 3, p. 597–617
- [6] Bear J., 1972, *Dynamics of fluids in porous media*, Ed. Elsevier, New York
- [7] Bear J., 2018, *Modeling phenomena of flow and transport in porous media*, ed. 1, Ed. Springer International Publishing, Cham
- [8] Bear J., Zaslavsky D., Irmay S., 1968, *Physical principles of water percolation and seepage*, UNESCO, Paris
- [9] Beavers G. S., Sparrow E. M., Rodenz D. E., 1973, *Influence of Bed Size on the Flow Characteristics and Porosity of Randomly Packed Beds of Spheres*, Journal of Applied Mechanics, vol. 40, nr. 3, p. 655–660
- [10] Boomsma K., Poulikakos D., 2002, *The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams*, Journal of Fluids Engineering, vol. 124, nr. 1, p. 263–272
- [11] Bowden F., Tabor D., 1950, *The friction and lubrication of solids*, Ed. Clarendon Press, Oxford, pp. 259-284
- [12] Brinkman H. C., 1949, *A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles*, Flow, Turbulence and Combustion, vol. 1, nr. 1, p. 27–34
- [13] Carman P. C., 1937, *Fluid flow through granular beds*, Transactions of the Institution of Chemical Engineers (London), vol. 15, p. 150–166
- [14] Chapman R. E., 1981, *Geology and Water*, Ed. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers bv, The Hague
- [15] Cicone T., Pascovici M. D., Melciu C., Turtoi P., 2019, *Optimal porosity for impact squeeze of soft layers imbibed with liquids*, Tribology International, vol. 138, p. 140–149
- [16] Couderc B., Lupu G. C., Henry Y., Fatu A., Bouyer J., 2023, *Characterization of soaked soft porous materials under cyclic compression (Caractérisation de matériaux poreux imbibés sous compression cyclique)* in 22nd Pprime Workshop: How can hydrodynamic bearings be used in low-speed applications?, Poitiers
- [17] Darcy H. P. G., 1856, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Ed. Victor Dalmont, Paris
- [18] Dawson M. A., 2008, *Modeling the dynamic response of low-density, reticulated, elastomeric foam impregnated with Newtonian and non-Newtonian fluids*, Teză de doctorat, MIT
- [19] Dawson M. A., 2009, *Composite plates with a layer of fluid-filled, reticulated foam for blast protection of infrastructure*, International Journal of Impact Engineering, vol. 36, nr. 10–11, p. 1288–1295
- [20] Dawson M. A., Germaine J. T., Gibson L. J., 2007, *Permeability of open-cell foams under compressive strain*, International Journal of Solids and Structures, vol. 44, nr. 16, p. 5133–5145
- [21] Dawson M. A., McKinley G. H., Gibson L. J., 2008, *The dynamic compressive response of open-cell foam impregnated with a newtonian fluid*, Journal of Applied Mechanics, vol. 75, nr. 4, p. 041015
- [22] Dawson M. A., McKinley G. H., Gibson L. J., 2009, *The dynamic compressive response of an open-cell foam impregnated with a non-newtonian fluid*, Journal of Applied Mechanics, vol. 76, nr. 6, p. 061011

- [23] Dupuit A. J. É., 1863, *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*, ed. 2, Ed. Librairie des corps impérial des ponts et chaussées et des mines, Paris
- [24] Dybbs A., Edwards R. V., 1984, *A new look at porous media fluid mechanics — Darcy to turbulent* in *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, Ed. Springer Netherlands, Dordrecht, p. 199–256
- [25] Emersleben O., 1925, *Das Darcysche filtergesetz*, *Physikalische Zeitschrift*, vol. 26, p. 601–610
- [26] Enescu C., Turtoi P., Cicone T., Istrate C. V., 2020, *Experimental assessment of permeability variation with the compression of soft reticulated foams*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 997, nr. 1, p. 012009
- [27] Enescu C., Turtoi P., Stanciu M., Cicone T., 2021, *Preliminary experimental assessment of radial flow permeability variation with the compression level of 3D fabrics*, *The 9th International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering (COMEC 2021)*, Brasov, ROMANIA
- [28] Feng J., Weinbaum S., 2000, *Lubrication theory in highly compressible porous media: the mechanics of skiing, from red cells to humans*, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 422, p. 281–317
- [29] Forchheimer P., 1901, *Wasserbewegung durch Boden*, *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, vol. 45, p. 1782–1788
- [30] Fourar M., Radilla G., Lenormand R., Moyne C., 2004, *On the non-linear behavior of a laminar single-phase flow through two and three-dimensional porous media*, *Advances in Water Resources*, vol. 27, nr. 6, p. 669–677
- [31] Gartling D. K., Hickox C. E., Givler R. C., 1996, *Simulation of Coupled Viscous and Porous Flow Problems*, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, vol. 7, nr. 1–2, p. 23–48
- [32] Gebart B. R., 1992, *Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM*, *Journal of Composite Materials*, vol. 26, nr. 8, p. 1100–1133
- [33] Gent A. N., Rusch K. C., 1966, *Permeability of open-cell foamed materials*, *Journal of Cellular Plastics*, vol. 2, nr. 1, p. 46–51
- [34] Ghaddar C. K., 1995, *On the permeability of unidirectional fibrous media: A parallel computational approach*, *Physics of Fluids*, vol. 7, nr. 11, p. 2563–2586
- [35] Gibson L. J., Ashby M. F., 1999, *Cellular solids. Structure and properties*, Ed. Cambridge University Press,
- [36] Gioia G., Wang Y., Cuitiño A. M., 2001, *The energetics of heterogeneous deformation in open-cell solid foams*, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 457, nr. 2009, p. 1079–1096
- [37] Gutowski T. G., Cai Z., Bauer S., Boucher D., Kingery J., Wineman S., 1987, *Consolidation experiments for laminate composites*, *Journal of Composite Materials*, vol. 21, nr. 7, p. 650–669
- [38] Gutowski T. G., Morigaki T., Zhong Cai, 1987, *The consolidation of laminate composites*, *Journal of Composite Materials*, vol. 21, nr. 2, p. 172–188
- [39] Happel J., Brenner H., 1981, *Low Reynolds number hydrodynamics: with special applications to particulate media*, Ed. Martinus Nijhoff Publishers, The Hague
- [40] Hou X., Hu H., Liu Y., Silberschmidt V., 2011, *Nonlinear compression behavior of warp-knitted spacer fabric: effect of sandwich structure*, *Computers, Materials and Continua*, vol. 23, nr. 2, p. 119–134
- [41] Ilie M.-B., 2011, *Capacitatea de amortizare a straturilor poroase, foarte compresibile, îmbibate cu lichide, pentru configurații cilindrice*, Teză de doctorat, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București
- [42] Ilie M.-B., Cicone T., Pascovici M., 2012, *Accuracy of analytical models for squeeze of rigid spheres on highly compressible porous layers imbibed with liquids*, *Journal of the Balkan Tribological Association*, vol. 18, p. 124–132
- [43] Ilie M.-B., Pascovici M., Cicone T., Predescu A., 2011, *Compliant porous layers imbibed with liquids squeezed at constant velocity by a rigid sphere*, *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, vol. 73, p. 111–124
- [44] Ilie M.-B., Pascovici M. D., Marian V. G., 2011, *Squeeze processes in a narrow circular damper with highly compressible porous layer imbibed with liquids*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 225, nr. 6, p. 539–549

- [45] Jackson G. W., James D. F., 1986, *The permeability of fibrous porous media*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 64, nr. 3, p. 364–374
- [46] Joseph D. D., Nield D. A., Papanicolaou G., 1982, *Nonlinear equation governing flow in a saturated porous medium*, Water Resources Research, vol. 18, nr. 4, p. 1049–1052
- [47] Joseph D. D., Nield D. A., Papanicolaou G., 1983, *Correction to 'Nonlinear equation governing flow in a saturated porous medium' by D. D. Joseph et al.*, Water Resources Research, vol. 19, nr. 2, p. 591–591
- [48] Kozeny J., 1927, *Über kapillare Leitung des Wassers im Boden* in Sitzungsber Royal Academy of Science, Proceedings Class I, Viena, p. 271–306
- [49] Kunik S., 2018, *Étude numérique et expérimentale du mécanisme de lubrification Ex-Poro-HydroDynamique (XPHD)*, Teză de doctorat, Université de Poitiers
- [50] Lage J. L., Antohe B. V., 2000, *Darcy's experiments and the deviation to nonlinear flow regime*, Journal of Fluids Engineering, vol. 122, nr. 3, p. 619–625
- [51] Lage J. L., Antohe B. V., Nield D. A., 1997, *Two types of nonlinear pressure-drop versus flow-rate relation observed for saturated porous media*, Journal of Fluids Engineering, vol. 119, nr. 3, p. 700–706
- [52] Lage J. L., De Lemos M. J. S., Nield D. A., 2002, *Modeling turbulence in porous media* in Transport phenomena in porous media II, Ed. Elsevier, , p. 198–230
- [53] Li Q. M., Mines R. A. W., Birch R. S., 2000, *The crush behaviour of Rohacell-51WF structural foam*, International Journal of Solids and Structures, vol. 37, nr. 43, p. 6321–6341
- [54] Liu Y., Hu H., Zhao L., Long H., 2012, *Compression behavior of warp-knitted spacer fabrics for cushioning applications*, Textile Research Journal, vol. 82, nr. 1, p. 11–20
- [55] Lundström T. S., Stenberg R., Bergström R., Partanen H., Birkeland P. A., 2000, *In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 31, nr. 1, p. 29–43
- [56] **Lupu G. C.**, Fatu A., Henry Y., Nechita I. R., Cicone T., 2023, *Experimental investigation of imbibed open-cell foams under repetitive compression*, Acceptat Pentru Publicare În UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering
- [57] **Lupu G. C.**, Fătu A., Henry Y., Turtoi P., Cicone T., 2022, *Mechanical and structural characterisation of a 3D warp-knitted spacer fabric subjected to compression*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1262, nr. 1, p. 012024
- [58] **Lupu G.**, Turtoi P., Cicone T., 2020, *Evaluation of inertia effects in planar squeeze flow inside soft, porous layers*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 724, nr. 1, p. 012042
- [59] May D., Aktas A., Advani S. G., Berg D. C., Endruweit A., Fauster E., et al., 2019, *In-plane permeability characterization of engineering textiles based on radial flow experiments: A benchmark exercise*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 121, p. 100–114
- [60] Melciu I. C., 2020, *Procese de expulzare repetative în medii complexe*, Teză de doctorat, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București
- [61] Melciu I. C., Cicone T., Pascovici M. D., 2017, *Saturated porous layers squeezed between parallel disks in enclosed cells*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 174, p. 012031
- [62] Melciu I. C., Pascovici M. D., 2018, *The squeeze of an imbibed soft porous media in contact with a plastic body at impact loading. A heuristic model*, U.P.B. Scientific Bulletin, Series D, vol. 80, nr. 4, p. 205–222
- [63] Miltz J., Gruenbaum G., 1981, *Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements*, Polymer Engineering and Science, vol. 21, nr. 15, p. 1010–1014
- [64] Mirbod P., Andreopoulos Y., Weinbaum S., 2009, *On the generation of lift forces in random soft porous media*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 619, p. 147–166
- [65] Nabhani M., El Khelifi M., Bou-Saïd B., 2009, *Etude de l'écrasement d'un film sur un milieu poreux modélisé par l'équation de Darcy-Forchheimer* in 9ème Congrès International de Mécanique, Marrakech, p. 10–12
- [66] Nabhani M., El Khelifi M., Bou-saïd B., 2010, *A numerical simulation of viscous shear effects on porous squeeze-film using the Darcy-Brinkman model*, Mécanique & Industries, vol. 11, nr. 5, p. 327–337

- [67] Nabhani M., El Khelifi M., Bou-Saïd B., 2010, *A general model for porous medium flow in squeezing film situations*, Lubrication Science, vol. 22, nr. 2, p. 37–52
- [68] Nield D. A., Bejan A., 2006, *Convection in porous media*, ed. 3, Ed. Springer, New York
- [69] Orlik J., Pietsch K., Fassbender A., Sivak O., Steiner K., 2018, *Simulation and experimental validation of spacer fabrics based on their structure and yarn's properties*, Applied Composite Materials, vol. 25, nr. 4, p. 709–724
- [70] Panfilov M., Fourar M., 2006, *Physical splitting of nonlinear effects in high-velocity stable flow through porous media*, Advances in Water Resources, vol. 29, nr. 1, p. 30–41
- [71] Papathanasiou T. D., Markicevic B., Dendy E. D., 2001, *A computational evaluation of the Ergun and Forchheimer equations for fibrous porous media*, Physics of Fluids, vol. 13, nr. 10, p. 2795–2804
- [72] Pascovici M. D., 1994, *Procedure and device for pumping by fluid dislocation*, patent nr. 109469,
- [73] Pascovici M. D., 2001, *Lubrication by dislocation: a new mechanism for load carrying capacity in Proceedings of 2nd World Tribology Congress*, vol. 41, Vienna
- [74] Pascovici M. D., 2007, *Lubrication processes in highly compressible porous layers in Lubrification et tribologie des revêtements minces*, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Poitiers, p. 3–12
- [75] Pascovici M. D., 2007, *Lubrication of red blood cells in narrow capillaries. A heuristic approach in 2nd Vienna International Conference on Micro and Nanotechnology*, p. 95-100
- [76] Pascovici M. D., Cicone T., 2003, *Squeeze-film of unconformal, compliant and layered contacts*, Tribology International, vol. 36, nr. 11, p. 791–799
- [77] Pascovici M. D., Popescu C. S., Marian V. G., 2010, *Impact of a rigid sphere on a highly compressible porous layer imbibed with a Newtonian liquid*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, vol. 224, nr. 8, p. 789–795
- [78] Pascovici M., Russu C., Cicone T., 2004, *Squeeze film of conformal, layered, compliant and porous contacts*, The 9th International Conference of Mechanisms and Mechanical Transmissions, Acta Tehnica Napocensis, Applied Mathematics and Mechanics, vol. 47, nr. I
- [79] Popescu C. S., 2010, *Procese de curgere în straturi poroase, foarte compresibile, supuse la sarcini de impact*, Teză de doctorat, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București
- [80] Popescu C. S., 2011, *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*, UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, vol. 73, nr. 2, p. 279–290
- [81] Radu M., 2015, *Modelarea și simularea procesului de expulzare al fluidelor prin straturi poroase extrem de compresibile prin impact*, Teză de doctorat, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București
- [82] Radu M., Cicone T., 2016, *Experimental determination of the damping capacity of highly compressible porous materials imbibed with water*, Journal of the Balkan Tribological Association, vol. 22, nr. 1, p. 390–400
- [83] Raeini A. Q., Blunt M. J., Bijeljic B., 2014, *Direct simulations of two-phase flow on micro-CT images of porous media and upscaling of pore-scale forces*, Advances in Water Resources, vol. 74, p. 116–126
- [84] Rodrigues A., Figueiredo L., Diogo H., Bordado J., 2018, *Mechanical behavior of PET fibers and textiles for Stent-Grafts using video extensometry and image analysis*, Science and Technology of Materials, vol. 30, p. 23–33
- [85] Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C. W., Everett D. H., Haynes J. M., Pernicone N., Ramsay J. D. F., Sing K. S. W., Unger K. K., 1994, *Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)*, Pure and Applied Chemistry, vol. 66, nr. 8, p. 1739–1758
- [86] Roye A., Stuve J., Gries T., 2005, *Definition for the differentiation of 2D- and 3D- textiles – part I: Production in one-step-processes*, Narrow Fabric and Braiding Industry, vol. 124, nr. 2, p. 46–49
- [87] Russu C., 2008, *Contribuții la reologia și poro-hidrodinamica lubrificației*, Teză de doctorat, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București
- [88] Scheidegger A. E., 1974, *The physics of flow through porous media*, Ed. University of Toronto Press, Toronto
- [89] Stock S. R., 2008, *Recent advances in X-ray microtomography applied to materials*, International Materials Reviews, vol. 53, nr. 3, p. 129–181

- [90] Tek M., 1957, *Development of a generalized Darcy equation*, Journal of Petroleum Technology, vol. 9, nr. 06, p. 45–47
- [91] Truskey G. A., Yuan F., Katz D. F., 2004, *Transport phenomena in biological systems*, ed. 2, Ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River (New Jersey)
- [92] Turtoi P., 2016, *Contribuții la studiul proceselor de expulzare prin medii complexe*, Teză de doctorat, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București
- [93] Turtoi P., Cicone T., Fatu A., 2017, *Experimental and theoretical analysis of (water) permeability variation of nonwoven textiles subjected to compression*, Mechanics & Industry, vol. 18, nr. 3, p. 307
- [94] Turtoi P., **Lupu G.**, Cicone T., Apostol D., 2020, *Experimental investigation of the limits of fluid squeeze out from an imbibed porous material*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 997, nr. 1, p. 012019
- [95] Turtoi P., Pascovici M. D., 2016, *Finite volume squeeze flow in highly compressible porous annular discs*, U.P.B. Scientific Bulletin, Series D, vol. 78, nr. 2, p. 43–56
- [96] Turtoi P., Pascovici M. D., Cicone T., Rotariu A. N., Puică C. C., Istrate M., 2018, *Experimental proof of squeeze damping capacity of imbibed soft porous layers subjected to impact*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 444, p. 022010
- [97] Turtoi, Pascovici, Cicone, 2019, *Squeeze Flow of Bingham Fluids through Reticulated, Compressed Foams*, Lubricants, vol. 7, nr. 10, p. 86
- [98] Vossen B., 2010, *Modelling the application of fluid filled foam in motorcycle helmets*, Raport de cercetare, Eindhoven University of Technology și MIT, Eindhoven
- [99] de Vries J., 1979, *Prediction of non-Darcy flow in porous media*, Journal of the Irrigation and Drainage Division, vol. 105, nr. 2, p. 147–162
- [100] Wang L., Li Y., Zhao G., Chen N., Xu Y., 2019, *Experimental investigation of flow characteristics in porous media at low Reynolds numbers ($Re \rightarrow 0$) under different constant hydraulic heads*, Water, vol. 11, nr. 11, p. 2317
- [101] Wang X. H., Kainuma M., Bao L. M., Nakazawa M., 2006, *A novel approach for evaluating the air permeability of airbag fabrics*, Textile Research Journal, vol. 76, nr. 1, p. 66–70
- [102] Ward J. C., 1964, *Turbulent flow in porous media*, Journal of the Hydraulics Division, vol. 90, nr. 5, p. 1–12
- [103] Wu Q., Andreopoulos Y., Weinbaum S., 2004, *From Red Cells to Snowboarding: A New Concept for a Train Track*, Physical Review Letters, vol. 93, nr. 19, p. 194501
- [104] Wu Q., Andreopoulos Y., Xanthos S., Weinbaum S., 2005, *Dynamic compression of highly compressible porous media with application to snow compaction*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 542, p. 281–304
- [105] Ye X., Fangueiro R., Hu H., Araújo M. de, 2007, *Application of warp-knitted spacer fabrics in car seats*, Journal of the Textile Institute, vol. 98, nr. 4, p. 337–344
- [106] Ye X., Hu H., Feng X., 2008, *Development of the warp knitted spacer fabrics for cushion applications*, Journal of Industrial Textiles, vol. 37, nr. 3, p. 213–223

DISEMINAREA REZULTATELOR

RAPOARTE DE CERCETARE ȘTIINȚIFICĂ

Lupu, G.C., iulie 2019, *Procese de expulzare în medii poroase foarte compresibile. Modele matematice*, Raport de cercetare științifică nr. 1, Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București

Lupu, G.C., iulie 2020, *Analiza limitelor de aplicabilitate ale modelului lubrificației XPHD în cazul spumelor reticulate*, Raport de cercetare științifică nr. 2, Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București

Lupu, G.C., mai 2022, *Caracterizarea morfologică și mecanică a materialelor textile tridimensionale*, Raport de cercetare științifică nr. 3, Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București

Lupu, G.C., mai 2022, *Studiul experimental al comportării la comprimare periodică a materialelor poroase îmbibate*, Raport de cercetare științifică nr. 4, Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică din București

LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE SAU ÎN CURS DE PUBLICARE

- (1) **Lupu G.**, Turtoi P., Cicone T., 2020, - *Evaluation of inertia effects in planar squeeze flow inside soft, porous layers*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 724 (1), p. 012042, doi: 10.1088/1757-899X/724/1/012042 (**WOS000619349400042**)
- (2) Turtoi P., **Lupu G.**, Cicone T., Apostol D., 2020, *Experimental investigation of the limits of fluid squeeze out from an imbibed porous material*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 997 (1), p. 012019, doi:10.1088/1757-899X/997/1/012019 (**SCOPUS**)
- (3) **Lupu G.C.**, Fătu A., Henry Y., Turtoi P., Cicone T., 2022, *Mechanical and structural characterisation of a 3D warp-knitted spacer fabric subjected to compression*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1262 (1), p. 012024, 10.1088/1757-899X/1262/1/012024, (IOP Publishing - **BDI**)
- (4) **Lupu G.C.**, Fătu A., Henry Y., Nechita R.I., Cicone T., 2023, *Experimental investigation of imbibed open-cell foams under repetitive compression* acceptat pentru publicare (15.09.2023) în U.P.B. Scientific Bulletin. Series D: Mechanical Engineering (**SCOPUS**)
- (5) Couderc B., **Lupu G. C.**, Henry Y., Fătu A., Bouyer J., 2023, *Characterization of soaked soft, porous materials under cyclic compression* – va fi trimisă spre publicare în revista *Mécanique & Industries*

PREZENTĂRI LA MANIFESTĂRI ȘTIINȚIFICE INTERNAȚIONALE

- (1) **Lupu G.**, Turtoi P., Cicone T., 2020, *Evaluation of inertia effects in planar squeeze flow inside soft, porous layers* Proceedings of The 14th International Conference on Tribology, ROTRIB'19, 19-21 Septembrie 2019, Cluj-Napoca, România
- (2) Turtoi P., **Lupu G.**, Cicone T., Apostol D., 2020, *Experimental investigation of the limits of fluid squeeze out from an imbibed porous material*, Proceedings of The 9th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering (ACME 2020), 4-5 iunie 2020, Iași, România
- (3) **Lupu G.C.**, Fătu A., Henry Y., Turtoi P., Cicone T., 2022, *Mechanical and structural characterisation of a 3D warp-knitted spacer fabric subjected to compression*, Proceedings of The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering (ACME 2022), 9-10 iunie 2022, Iași, România
- (4) Couderc B., **Lupu G. C.**, Henry Y., Fătu A., Bouyer J., 2023, *Characterization of soaked soft, porous materials under cyclic compression* - 22nd Tribo-Prime workshop "How can hydrodynamic bearings be used in low-speed applications?", 12-13 Octombrie 2023, Poitiers, Franța