



UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ A FACULTĂȚII DE INGINERIE MECANICĂ ȘI
MECATRONICĂ

Nr. Decizie Senat 43 din 21.12.2016

TEZĂ DE DOCTORAT

**Contribuții la studiul proceselor de expulzare prin medii
complexe**

**Contributions to the study of squeeze flow through
complex media**

Autor: ing.

Conducător de doctorat: Prof. dr. ing. Mircea D. PASCOVICI

COMISIA DE DOCTORAT

	Prof. dr. ing. Alexandru DOBROVICESCU	de la	Universitatea
de doctorat	Prof. dr. ing. Mircea D. PASCOVICI	de la	Universitatea
Referent		de la	Universitatea din Poitiers
Referent		de la	
Referent	Prof. dr. ing. Traian CICONE	de la	Universitatea

BUCUREȘTI

2016

CUPRINS

CUPRINS 3

2.3 MATERIALUL UTILIZAT.....	57
2.4 REZULTATE EXPERIMENTALE.....	60
2.5	62
2.6 -PERMEABILITATE	65
2.7 CONCLUZII	66

CAPITOLUL 3.

EVALUAREA COMPORTAMENTULUI LA COMPRESIUNE PENTRU

MATERIALE POROASE ÎMBIBATE PARȚIAL CU FLUID 67

3.1 MATERIALE UTILIZATE	67
3.2 STANDUL EXPERIMENTAL.....	69
3.3	72
3.4 REZULTATE EXPERIMENTALE.....	73
3.4.1 Configurația sferă-plan.....	73
3.4.2 Configurația disc-plan	80
3.5 EVALUAREA	82
3.6 DARCY.....	84
3.7 CONCLUZII	85

CAPITOLUL 4.

EXPULZAREA UNUI VOLUM DE FLUID NEWTONIAN ÎMBIBAT ÎN ZONA

CENTRALĂ A UNUI DISC DE MATERIAL POROS EXTREM DE

COMPRESIBIL..... 87

4.1.INTRODUCERE.....	87
4.1.1 Aspecte generale.....	87
4.1.2 Modelul Dawson.....	88
4.1.3 Modelul Vossen	89
4.1.4 Conexiuni cu modelul din UPB.....	90
4.2.	91
4.2.1 Expulzare cu viteză constantă	92
4.2.2 Expulzare cu forță constantă.....	94
4.2.3 Expulzare prin impact	95
4.3.ANALIZA	97
4.4.VALIDAREA MODELULUI TEORETIC PENTRU EXPULZAREA CU	99
4.5.COMPARAREA CU DAWSON	101

4.6.CONCLUZII	102
CAPITOLUL 5.	
EXPULZAREA UNUI VOLUM DAT DE FLUID PRINTR-O STRUCTURĂ INELARĂ DIN MATERIAL POROS EXTREM DE COMPRESIBIL	103
5.1.MODELUL PENTRU EXPULZAREA UNUI VOLUM CONSTANT DE FLUID PRINTR-	103
5.1.1 <i>Expulzare cu viteză constantă</i>	103
5.1.2 <i>Expulzare cu forță constantă</i>	107
5.1.3 <i>Expulzare prin impact</i>	108
5.2.CONCLUZII	110
CAPITOLUL 6.	
EXPULZAREA UNUI MEDIU BINGHAM PRINTR-O STRUCTURĂ INELARĂ DIN SPUMĂ RETICULATĂ COMPRIMATĂ.....	111
6.1. CURGEREA FLUIDELOR VÎSCOPLASTICE PRIN MEDII POROASE.....	111
6.2.	112
6.2.1 <i>Modelarea expulzării în rezervor</i>	112
6.2.2 <i>Modelarea expulzării prin materialul poros</i>	115
6.2.3 <i>Determinarea forței de expulzare</i>	117
6.3. MODELUL PENTRU EXPULZAREA UNUI VOLUM CONSTANT DE FLUID BINGHAM PRINTR-	118
6.4. REZULTATE EXPERIMENTALE	120
6.4.1 <i>Materiale și procedura experimentală</i>	120
6.4.2 <i>Rezultate experimentale</i>	123
6.5. VALIDAREA MODELULUI TEORETIC	127
6.6. CONCLUZII	130
CAPITOLUL 7	
CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE	132
7.1. CONCLUZII GENERALE ASUPRA STUDIULUI PROCESELOR DE CURGERE PRIN SPEC.....	132
7.2. C	132
7.3. PERSPECTIVE	134

BIBLIOGRAFIE	135
ANEXA 1. PROFILULUI DE VITEZE PENTRU O CURGERE POISEUILLE PRINTR-UN MEDIU BRINKMAN	140
ANEXA 2. DETERMINAREA TORTUOZITĂȚII PENTRU O STRUCTURĂ BIDIMENSIONALĂ A PORILOR TIP HEXAGON	142
ANEXA 3. MODELUL DE EXPULZARE REODINAMICĂ A UNUI FLUID BINGHAM PRINTR-O STRUCTURĂ MULTISTRAT	143
A3.1. MODELUL ANALITIC.....	143
A3.2. REZULTATE EXPERIMENTALE.....	145
A3.3. VALIDAREA MODELULUI TEORETIC.....	145
A3.4. CONCLUZII	146
DISEMINAREA REZULTATELOR.....	147

LISTA DE NOTATII

DIN ALFABETUL LATIN

a	m^2 ;	
A		m^2 ;
b -	a de colectare a fluidului, $[m]$;	
B	m ;	
Bn	$Bn = \tau_0 d / (\eta V)$, $[-]$;	
c		m^2 ;
C, C_1, C_2	- constante de integrare, $[-]$;	
C_f	coeficientul lui Forcheimmer, $[m]$;	
d	diametrul tubului/canalului/capilarului de curgere, $[m]$;	
d_f	diametrul fibrei/firului, $[m]$;	
d^*	- diametrul tubului de curgere modificat cu tortuozitatea, $d^* = d / T$, $[m]$;	
d_0^*	- diametrul tubului de curgere	$d^* = d / T$, $[m]$;
D	-Carman, $D = d^2 / 16k$, $[m^2]$;	
f -	N/m ;	
F	N ;	
F_{ext}		N ;
F_{int}	-un element de volum, $[N]$;	
F_s -		N ;
F_B -	-un mediu Brinkman ($\eta' = \eta$), $[N]$;	
F_B' -	-un mediu Brinkman ($\eta' = \eta(1 + 2,5 \cdot W_0 / W)$), $[N]$;	
F_1 -		N ;
F_1' -		$S_0 < 0.05$, $[N]$;
F_1''		$S_0 > 10$, $[N]$;
F_2 -		N ;
$\bar{F}$ -	$\bar{F} = Fh / (\tau_0 R_0^3)$, $[-]$;	
$\bar{F}_1'$		
	$S_0 < 0.05$, $\bar{F}_1' = \frac{F_1' h_0}{\tau_0 R_0^3}$, $[-]$;	
$\bar{F}_1''$		$S_0 > 10$,
	$\bar{F}_1'' = \frac{F_1'' h_0}{\tau_0 R_0^3}$, $[-]$;	

$\bar{F}_2$ -

$$\bar{F}_2 = \frac{F_2 h_0}{\tau_0 R_0^3}, [-];$$

$\bar{F}_B$ -

la curgerea printr-un mediu Brinkman ($\eta' = \eta$),

$$\bar{F}_2 = \frac{F_2 h^2}{\eta UL}, [N];$$

$\bar{F}_B'$ -

la curgerea printr-un mediu Brinkman (

$$\eta' = \eta(1 + 2,5 \cdot W_0 / W)), \bar{F}_2 = \frac{F_2 h^2}{\eta(1 + 2,5 W_s / W_0) UL h R_e}, [N];$$

h - grosime strat material poros, $[m]$;

h_c - grosime la care procesul de expulzare nu mai este ex-poro-hidrodynamic, $[m]$;

h_e - R_e , $[m]$;

h_l - $m]$;

h_m - grosime strat material poros la vârful indentorului sferic, $[m]$;

h_t - $m]$;

h_{t0} - a unei structuri multistrat, $[m]$;

H - $H = h / h_0$, $[-]$;

H_l , $H_l = h_e / h_0$, $[-]$;

I, I_1, I_2

k - constanta Kozeny-Carman, $[-]$;

k_E - $-]$;

k_{RG} - -Green, $[-]$;

K $K = \phi \rho g / \eta$, $[m \cdot s]$;

l - lungimea material poros, $[m]$;

L - lungime, $[m]$;

L_c - lungimea drumului parcurs de fluid printr- $m]$;

M - masa corpului care cade la comprimarea prin impact, $[kg]$;

$\bar{M}$ - pact, $\bar{M} = \frac{M V_0 h_0^2}{R_0^4 \eta}$, $[-]$;

n - de straturi, $[-]$;

p, p_1, p_2 - presiune, $[Pa]$;

$\bar{p}$ - $\bar{p} = p h^2 / \eta UL$, $[-]$;

P_0 - parametrul de porozitate, $P_0 = h^2 / D$, $[-]$;

$\bar{q}$ - debit unitar adimensional, $\bar{q} = Q / (V h^2)$, $[-]$;

$\bar{q}_P$ - debit unitar adimensional pentru curgere tip Poiseuille, $[-]$;

$\bar{q}_D$ - debit unitar adimensional pentru curgere tip Darcy, $[-]$;

$\bar{q}_B$ - debit unitar adimensional pentru curgere tip Brinkman, $[-]$;

$\bar{q}_V$ - debit unitar adimensional pentru curgere la expulzarea cu un disc, $[-]$;

$\bar{q}$ - debit dublu adimensional, $\bar{q} = \bar{q} / \frac{dp}{dx}$, [-];

Q debit volumic, [m^3/s];

r m];

r_h - m];

R m];

R

$$R = \rho du_m / \eta, [-];$$

Re

$$Re = -\rho v_m \sqrt{\phi} / \eta, [-];$$

R_e - m];

R_s m];

R_0 - raza rezervorului de fluid, [m];

$\bar{R}$ - $\bar{R} = R^2 / R_0^2$, [m];

$\Re$ - raport dublu adimensional, $\Re = \bar{q}_B / \bar{q}_D$, [-];

S_0 $S_0 = -\frac{R_0 V \eta}{h^2 \tau_0}$, [-];

S_s -

$$S_s = n \pi d / A, [1/m];$$

S_ϕ - $S_\phi = 2 \ln \phi - 4\phi + 3 + \phi^2$;

t, t_1, t_2 timp, [s];

T tortuozitate, [-];

T_0 -];

T_ϕ - $T_\phi = \ln \phi + [(1 - \phi^2) / (1 + \phi^2)]$;

u viteza de curgere a fluidului, [m/s];

u_m viteza medie de curgere a fluidului, [m/s];

$\bar{u}$ - $\bar{u} = u / U$, [-];

$\bar{u}_{\max}$ - $\bar{u}$ pentru $\bar{y} = 0,5$, [-];

$\bar{\bar{u}}$ - $\bar{\bar{u}} = \bar{u} / \bar{u}_{\max}$, [-];

U viteza $, [m/s]$;

V m/s];

x, y, z coordonate carteziane, [m];

$\bar{x}, \bar{y}$ - coordonate carteziane adimensionale, $\bar{x} = x / h$, $\bar{y} = y / h$, [-];

W volumul total, [m^3];

W_0 - volumul $, [m^3]$;

W_1 - volumul de fluid îmbibat în inelul de material poros, [m^3];

W_2 - volumul $, [m^3]$;

W_p volumul porilor, [m^3];

W_s - volumul fazei solide dintr-un material poros, [m^3];

α_t m^2];

α_{t0} m^2];

α^2 - , $\alpha^2 = h^2 / \phi$, [-];
 β_t
 β^2 - , $\beta^2 = h^2 / \phi$, [-];
 γ - N/m^3];
 δ grosimea discului solid, [m];
 ε porozitate, [-];
 ε_0 - -];
 $\varepsilon_{\min}$ - -];
 η $Pa \cdot s$];
 η' $Pa \cdot s$];
 θ rad];
 ξ - factor de orientare a fibrelor, [-];
 ρ densitate, $[kg/m^3]$];
 ρ_f densitatea fibrelor, $[kg/m^3]$];
 ρ_p kg/m^3];
 σ compactitatea, [-];
 σ_0 - compactitatea -];
 σ_c - -poro-hidrodynamic, [-];
 σ_l - -];
 τ Pa];
 τ_0 - tensiune de curgere, $[Pa]$];
 $\bar{\tau}$ - timp adimensional, [-];
 ϕ permeabilitate, $[m^2]$];
 $\phi_{\perp}$ -
 firelor, $[m^2]$];
 $\phi_{//}$ -
 $[m^2]$];
 ω - $\omega = \sqrt{1/(\phi(3,5 - 2,5\varepsilon))}$, $[1/m]$.

ACRONIME

SPEC strat poros extrem de compresibil;
XPHD ex-poro-hidrodynamic.

LISTA CU FIGURI

	1 i 2	3 stratul poros extreme de compresibil	
îmbibat [70]			21
		[68]	22
		[70]	22
Fig.1.4. Configu			23
Fig.1.5.		[68] stânga. Dispozitivul experimental	23
	- centru i dreapta.....		23
Fig.1.6. Geometria contactului disc/plan [71]			24
complet îmbibat cu fluid Newtonian [77]			24
		[39].....	25
Fig.1.9. Prezentare schematic a unui t			
material poros îmbibat cu aer [61]			25
		[62]	26
Fig.1.11. Reprezentarea schematic a aparatului de compresiune utilizat de echipa			
Weinbaum [101].....			26
Fig.1.12.			
		-un dispozitiv cu	
a.	$m=5,9 \text{ kg}$, $h_0=11,43 \text{ cm}$, $\Delta h_{\max}/h_0=0,22$, $P_{\max}=788$		
Pa, b.	$m=6,4 \text{ kg}$, $h_0=12,77 \text{ cm}$, $\Delta h_{\max}/h_0=0,35$, $P_{\max}=400 \text{ Pa}$ [101]		26
		[19].....	27
Radu [81] i parametrii de intrare.....			28
Fig			
fluid cu suspensie de particule [90]. A		curente - stînga,	
amprenta pentru varianta cu fluid ne-Newtonian (hydrogel) cu suspensie de particule -			
dreapta.....			28
			29
Fig.1.17. Investigare SEM a materialului vileda.....			30
Fig.1.18.			
[80]			30
Fig.1.19. Modelul liniar al canalelor capilare			32
Fig.1.20. Modelul canalelor capilare în serie			34
Fig.1.21		[99]	39
Fig.1.22. Dispozitiv			
constant.....			39
Fig.1.23			
variabil.....			40
Fig.1.24		[24]	41

Fig.1.25	[30]	41
Fig.1.26		
Lunstrom [52]		42
Fig.1.27. Permeamtru radial [78]		42
Fig.1.28	[45][82]	43
Fig.1.29		44
Fig.1.30. Profilul normat al curgerii de tip Poisseuile pentru un mediu Brinkman		46
Fig.1.31. Gradientul de viteze pentru profilul de viteze adimensionalizat		46
Fig.1.32. Raportul debitelor normate adimensionale		48
Fig.1.33		48
Fig.1.34. Reprezentarea profilului vitezei adimensionale a curgerii		50
Fig.1.35.		51
		54
		55
Fig.2.3. Placa de plexiglas		55
Fig.2.4. Permeametrul ansamblat		56
	<i>stânga</i> <i>dreapta</i>)	56
	<i>stânga</i> <i>dreapta</i>)	57
		57
		58
Fig.2.9. I		58
		59
		59
	materialul uscat	59
		60
		60
	$\varepsilon=0,72$	60
Fi		
	[94]	61
	[94]	61
	<i>Re</i> <i>pentru diferite</i>	62
		62
modelul lui Brinkamn		63
	$\varepsilon=0,67$ <i>stânga</i> , $\varepsilon=0,69$ <i>dreapta</i>	64
Darcy-Forchheimer		64
lui Darcy-Forchheimer pe baz		
determinate folosind modelele Kozeny-Carman ($k_{KC} = 1,54$), Emersleben ($k_{EM} = 19,4$		
-Green ($k_{RG} = 5,94$))		65
Fig. 3.1. Materialele poroase selectate		67
Fig. 3.2.	-un	68
		69
Fig. 3.4. Schema de compunere a standului CETR-UMT2		70
Fig. 3.5. Standul experimental CETR-UMT2		70
Fig. 3.6. Indentorul sferic (<i>stânga</i> <i>dreapta</i>)		70

	-20: vedere de ansamblu (<i>stânga</i>), montat pe stand	
(<i>dreapta</i>).....		71
Fig. 3.8. UMT CETR2	-plan	71
Fig. 3.9. UMT CETR2	- <i>stânga</i>	
	<i>dreapta</i>).....	72
Fig. 3.10. V		
pentru decompresie)		72
Fig. 3		74
		74
Fig. 3.13. V		
decompresie.....		75
Fig. 3.14. V		
minime.....		75
Fig. 3.15. V		
	regimurilor de comprimare, în zona grosimii	
minime.....		76
Fig. 3.16. V		
minime.....		76
Fig. 3.17		
pentru materialul uscat		78
Fig. 3.18		
		78
Fig. 3.19	i pentru materialul LJ3 aflat la diferite nivele de îmbibare i	
uscat.....		79
Fig. 3.20	i	
uscat.....		79
Fig. 3.21	sc	
pentru mai multe viteze		80
Fig. 3.22		
disc pentru mai multe viteze.....		80
Fig. 3.23		
disc pentru mai multe viteze.....		81
Fig. 3.24		
	<i>mm/s – stânga. Zoom pe intervalul 1÷2 mm -dreapta</i>	81
Fig. 3.25		
	<i>mm/s</i>	82
Fig. 3.26		
	<i>mm/s</i>	82
Fig. 3.27		
squeeze cu indenter sferic pe baza modelului XPHD pentru vitezele de comprimare de		
3 <i>mm/s</i> i 7 <i>mm/s</i>		83
Fig. 3.28		
expulzare cu indenter disc pe baza modelului XPHD pentru vitezele de comprimare de		
1 <i>mm/s</i> , 3 <i>mm/s</i> i 7 <i>mm/s</i>		83
Fig. 3.29.		
	baza modelului XPHD pentru viteza de	
comprimare de 3 <i>mm/s</i>		84
Fig. 3.30	α H pentru	
	$h_0 = 4,8mm$ i $\sigma_0 = 0,1mm$ a materialului	
LJ2		85

Fig.	[19]	88
Fig. 4.3. Matricea cu ce		
<i>a.</i> vedere de sus, <i>b.</i>		89
Fig. 4.4. Modelul lui Vossen [98]	<i>a.</i> vedere în	
<i>b.</i> vedere de sus		89
Fig. 4.5. Modelul lui Vossen [98]	<i>a.</i> <i>b.</i>	
patru celule, <i>c.</i>		90
Fig. 4.6. Modelul inelului de material poros cu celula de fluid		92
Fig. 4.7.	$\bar{F}$ H	94
Fig. 4.8. Reprezentarea în	τ a grosimii adimensionale	
H		95
Fig. 4.9. Modelul inelului de material poros cu celula de fluid comprimat prin impact		96
Fig. 4.10. Inelul de material poros F133 cu rezervor de fluid îmbibat înainte de comprimare	<i>a.</i> <i>b.</i>	97
		98
	îmbibat	98
	<i>mm/s</i>	98
	XPHD	99
Fig. 4.15. Compa	pentru expulzare cu	
$V=2mm/s$		100
	pentru expulzare cu	
$V=4mm/s$		100
	pentru expulzare cu	
$V=8mm/s$		100
Fig. 4.18. T	în	
	[22]	
	s^{-1} [22]	
experimentele pentru spuma F13	$95 s^{-1}$	102
Fig.5.1. Geometria modelului inelului de material poros cu celula de fluid		104
	$\bar{F}$ H ,	
		107
	H	
adimensional, τ	disc-plan cu SPEC	108
Fig.5.4. Geometria modelului la impuls constant		109
Fig.6.1. Geometria modelului inelului de material poros cu celula de fluid Bingham		114
	-un material poros [92]	116
		118
Fig.6.4.		119
		120
Fig.6.6. Standul CETR-UMT2 modificat		121
		121
Fig.6.8. Spumele FILTREN TM: F133 stânga, F280 – centru, F450 - dreapta		121
Fig.6.9. Inelul poros	<i>mm/s</i>	123
Fig.6.10. Inelul poros	<i>mm/s</i>	123
		124
	materialului poros pentru F280	124
		124
		125

CETR-UMT2.....	125
<i>mm/s</i>	126
comprimare de 4 <i>mm/s</i>	126
<i>mm/s</i>	126
XPHD	127
-expe	
$\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4 \text{ mm}$, $R_0 = 16,5 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $\tau_0 = 350 \text{ Pa}$, $\eta = 0.33 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)	128
-experimental pentru	
($\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4 \text{ mm}$, $R_0 = 16,5 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $\tau_0 = 350 \text{ Pa}$, $\eta = 0.33 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)	128
-experimental folosind modelul cu tortuozitate T	
<i>ipotezei 1</i> i <i>ipotezei 2</i> ($\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4 \text{ mm}$, $R_0 = 16,5 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $\tau_0 = 350 \text{ Pa}$, $\eta = 0.33 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) pentru expulzare cu 2 <i>mm/s</i>	129
Fig.6.23. C -experimental folosind modelul cu tortuozitate T	
<i>ipotezei 1</i> ($\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4 \text{ mm}$, $R_0 = 16.5 \text{ mm}$, $d=0,5 \text{ mm}$) pentru	
expulzare cu 4 <i>mm/s</i>	130
-experimental folosind modelul cu tortuozitate T	
<i>ipotezei 1</i> ($\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4 \text{ mm}$, $R_0 = 16.5 \text{ mm}$, $d=0,5 \text{ mm}$) pentru	
expulzare cu 8 <i>mm/s</i>	130
Fig.A2.1. Model bidimensional de curgere printr- poroase.....	143
Fig.A3.1. Geometria modelului structurii circulare multistrat cu rezervor de fluid	
Bingham	145
Fig. A3.2 Rezultate experimentale pentru structura multistrat	147

LISTA CU TABELE

Tabelul 1. 1 Modele teoretice pentru materiale poroase izotrope si anizotrope (adaptare [56])	37
-	65
Tabelul 3.1 Caracteristicile materialelor testate	68
LJ3, LJ4	68
Tabelul 3.3 Valoarea grosimii critice pentru materialele studiate.....	77
.....	100
Tabelul 6.1 Geometria conurilor vîscozimetrului	122
.....	122
.....	122
.....	123
.....	146

CUVÂNT ÎNAINTE

Teza de doctorat reprezintă sinteza activității de cercetare științifică desfășurată de către autor în perioada octombrie 2012 - octombrie 2016. Locul de desfășurare a fost Departamentul de Organe de mașini și Tribologie a Facultății de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea "Politehnica" din București și IUT Angouleme, Dpt. Genie Mecanique et Systemes Complexes, Universitatea din Poitiers, Institutul Pprime în perioada 01 aprilie - 30 iunie 2014.

Cea mai mare parte din rezultatele prezentate au avut la bază colaborarea cu domnul prof. dr. ing. Mircea D. Pascovici, conducătorul științific al acestei lucrări. Cu această ocazie aș vrea să îi adresez domnului profesor sincere mulțumiri pentru sprijinul de care am beneficiat permanent, pentru materialul bibliografic și pentru îndrumarea științifică. Toate acestea mi-au facilitat definirea unor direcții clare de cercetare și de rezolvare a problemelor teoretice și experimentale și au adus un aport semnificativ la dezvoltarea mea de specialitate.

De asemenea îi mulțumesc domnului prof. dr. ing. Traian Cicone pentru îndrumarea și susținerea acordată înainte și pe timpul studiilor de doctorat. Apreciez inițierea în activitatea experimentală și completările teoretice și experimentale aduse prezentei lucrări. Domnul profesor și-a lăsat amprenta asupra dezvoltării mele științifice pe parcursul ultimilor cinci ani.

Exprim sincere mulțumiri pentru domnul prof. dr. ing. Aurelian Fătu de la Universitatea din Poitiers, pentru sprijinul oferit și pentru îndrumarea științifică pe durata stagiului de pregătire în cadrul IUT Angouleme, Dpt. Genie Mecanique et Systemes Complexes, Universitatea din Poitiers, Institutul Pprime și pentru că a acceptat să fie membru al comisiei de doctorat.

Mulțumesc domnului prof. dr. ing. Ilie Muscă de la Universitatea din Suceava care m-a onorat acceptând participarea în cadrul comisiei de doctorat și pentru efortul depus în analiza tezei de doctorat.

Îi mulțumesc domnișoarei dr. ing. Mihaela Radu pentru sprijinul acordat în desfășurarea mai multor experimente la comprimare și pentru determinări de porozitate și permeabilitate.

Mulțumesc și domnilor prof. dr. ing. Adrian Predescu și conf. dr. ing. Victor Marian pentru suportul acordat. Îi mulțumesc domnului prof. dr. ing. Alexandru Rădulescu pentru sprijinul în caracterizarea reologică a fluidelor utilizate. Apreciez ajutorul dat de domnul Mihai Rozorea pentru fabricarea eșantioanelor și a altor componente pentru standul experimental și domnișoarei ing. Ioana-Janina Baiguș pentru colaborarea privind analiza experimentală la comprimare cu viteză constantă pentru diferite nivele de îmbibare a materialelor poroase.

Nu aș vrea să omit sprijinul și înțelegerea oferită de soția mea Oana, familia și colegii mei de la Agenția de Cercetare pentru Tehnică și Tehnologii Militare pe timpul studiilor și în perioada de pregătire a tezei.

PREAMBUL

, sau în proximitatea
,
sau chiar distrugerea mediu de separare de tipul unui film
fluid sau un alt material. Studiul regimului de funcționare a unei cuple de frecare în care
contactul solid este evitat prin utilizarea unui film fluid relativ subțire ($1-100\ \mu\text{m}$) este
denumit *Lubrificație*

a componentei mobile. Un caz particular al regimului hidrodinamic este cel al
fluid Studii referitoare la

corpul/obiectul protejat.

capacitatea straturilor , numite ex-poro-hidrodinamice, de a

-Newtoniene.

Scopul tezei este de a propune noi modele privind curgerea fluidelor prin medii
complexe, care -poro-
hidrodinamice la realizarea unor sisteme de amortizare.

e cercetare:

- Stadiul actual al ex-poro-hidrodinamice;
- Stadiul actual privind sistemele
- ialelor poroase în
- -poro-hidrodinamice;
- zare bazat pe un strat poros de
- -Newtonian;

Capitolul 1 este concentrat asupra
prin medii poroase -
poro-
de a amortiza. Au fost analizate modele pentru curgerea fluidelor prin structuri poroase. De
asemenea este prezentat un studiu teoretic bazat pe modelul lui Brinkman pentru curgerea
fluidelor prin structuri poroase.

În **Capitolul 2**

s- curgerii,
 folosind legea Darcy-Forchheimer. Utilizând u fost
 analizate ele modelului Kozeny-
 În majoritatea studiilor teoretice anterioare efectuate în Universitatea Politehnica din
 Bu

Capitolul 3, pentru
 ierea regimurilor de

Capitolul 4

fluid Newtonian îmbibate în
 acestei . Compararea rezultatelor experimentale cu rezultatele teoretice a permis
 validarea modelului analitic.

Capitolul 5 în care în rezervorul central este prezent doar fluidul

Acest caz nu a fost studiat experimental deoarece fluidul Newtonian utilizat nu poate fi
 înainte de comprimare

Fluidele ne-
 acest context, **Capitolul 6**

nt reologic
 fluid Bingham. A fost construit un model teoretic original pentru

- radiale e axial-simetric de-a
 asemenea pe un model original
 compus dintr- dispus în
 rezervorul central
 mentale a
 modelului teoretic.

Concluziile generale ale tezei sunt expuse în **Capitolul 7**. Tot în acest capitol sunt
 prezentate pe larg contrib le de cercetare viitoare.

Bibliografia 102 elemente din
 problematica tezei.

În **anexele** alte efectuate în cadrul
 doctoratului dar care nu au putut ,
 subiectului tezei.

CAPITOLUL 1. AMORTIZOARELE EX-PORO-HIDRODINAMICE – SOLUȚIE ACTUALĂ DE ATENUARE A ȘOCURILOR

1.1. -PORO-

material poros îmbibat cu fluid
(Fig.1.1) sau la expulzarea

poro-hidrodinamică (XPHD)

. În ultimii 15-20 ani au fost
Denumirea de *lubrificație ex-*
[68] în 2001 i este rezultatul asocierii
ex - termen asociat cu fenomenul de extragere sau expulzare, *poro -*
hidrodinamic

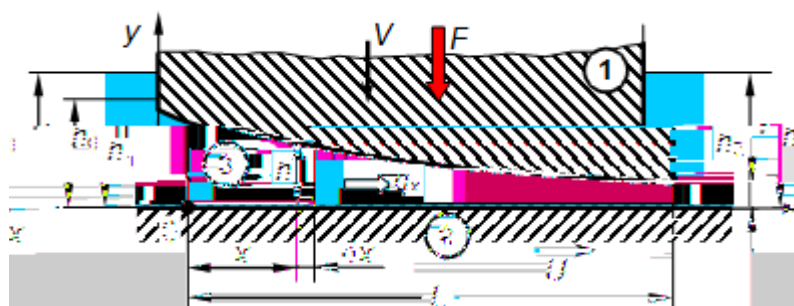


Fig.1.1. G

cu strat de material poros îmbibat
1 i 2
3 stratul poros extrem de compresibil îmbibat
[70]

Politehnica
identificat
capilar

Weinbaum la City College of New York. Weinbaum a observat
[29], [62] i a
lor albe sau ro ii prin interiorul
(glicocalix), sau în

Pascovici
vîscozitate [67] (Fig.1.2),
microcapilare [69] i
amortizare a materialelor poroase textile îmbibate cu fluid la impact.

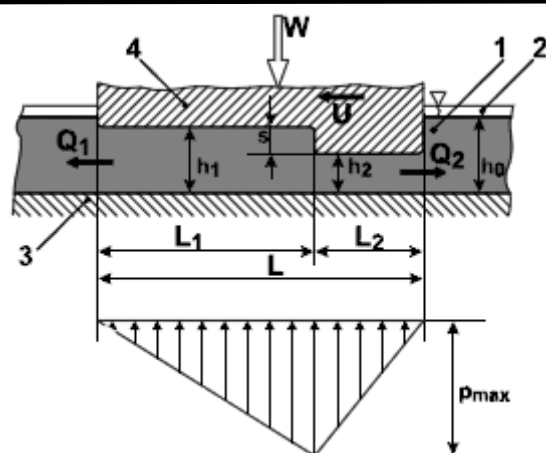


Fig.1.2.

Structurile poroase care sunt compatibile cu ii XPHD au fost denumite generic **straturi poroase exprem de compresibile** SPEC (in limba engleza: **highly compressible porous layers – HCPL**) [72]

Weimbaum [29] i Pascovici [68],
solid

generate la expulzarea fluidului
porozitatea i *compactitatea* care
 , i *permeabilitatea* care

pe care materialul o produce la curgerea fluidului.

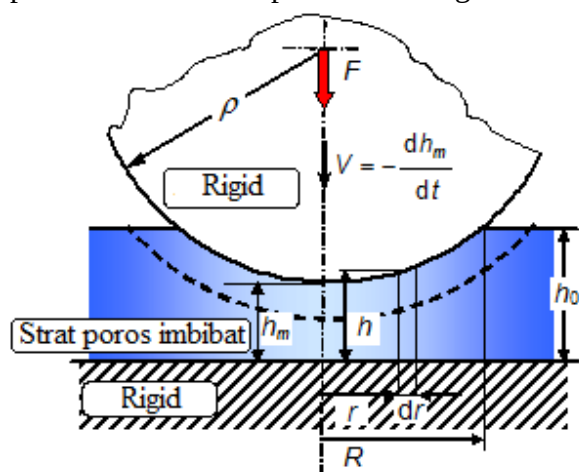


Fig.1.3.

—

ecanismul lubrificaiei XPHD este aplicabil, atât în

(Fig.1.3). Expulzarea fluidului prin comprimarea materialului poros îmbibat ca urmare a presiuni st sau variabil care este pus prin a la curgere. În cadrul Politehnica colectivul condus de Pascovici a studiat continuu în ultimii ani mecanismele XPHD din punctul de vedere al posibilelor (Fig.1.4).

înclinate sau conf
cazurile

-plan, sfera-plan, cilindru-

u fost studiate
u

s-au comparat rezultatele
s-
mai mare [70]. De asemenea, Weinbaum
[101].

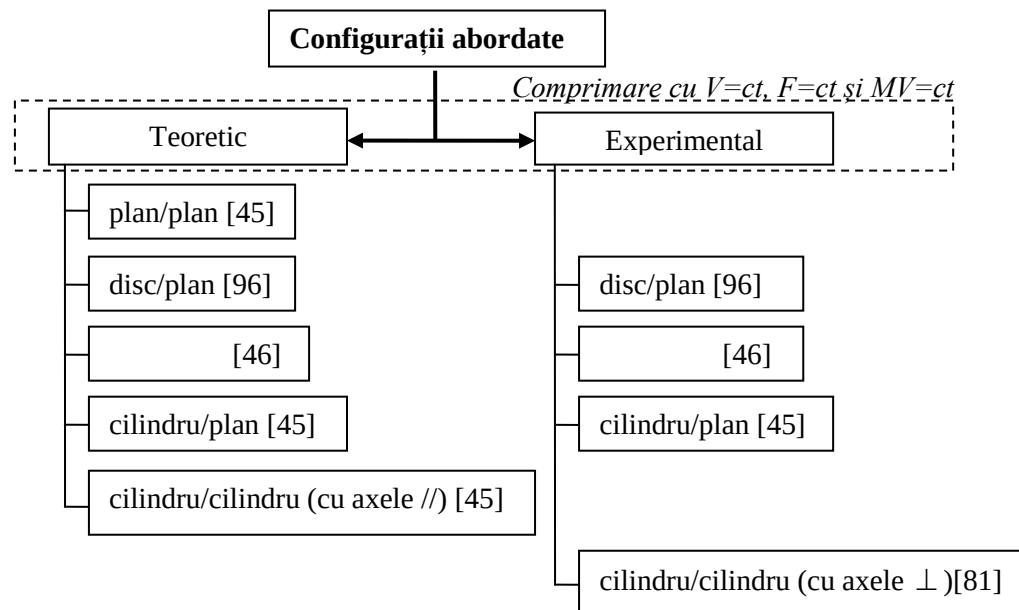


Fig.1.4. le

Pascovici în [68].

- - curgere a fluidului;
 -
 - Curgerea fluidului prin materialul poros se supune legii lui Darcy [17];
 - Curg
 -
 - ru orice grosime a materialului;
 - Carman [12].
- Studiul teoretic prezentat în [68]

film fluid în regim hidrodinamic.
ulei mineral

unui strat

Fig.1.5).
care nu permite formarea unui
e de material poros îmbibat cu



Fig.1.5. R

în [68] stânga.- Dispozitivul experimental pentru
- centru i dreapta.

În [70], Pascovici publică un studiu prin care propune un nou model pentru în
 Analiza modelelor XPHD s- i
 oldului bazat pe un cartilaj poros scufundat în lichidul sinovial.
 Primele studii teoretice au fost publicate în [71] (Fig.1.3) (Fig.1.6).
 paralele.
 studierea contactelor conforme în [73] și contacte neconforme de tipul
 [71], [72] sau (picior uman) Fig.1.7)
 [77].

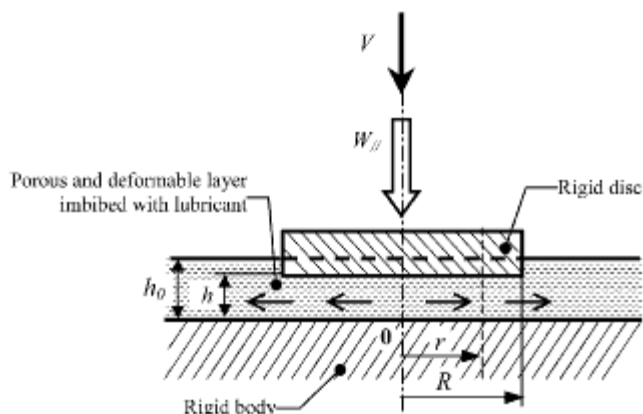


Fig.1.6. Geometria contactului disc/plan [71]

experimentale au fost realizate pe standul experimental CETR-UMT2. Standul permite
 rea

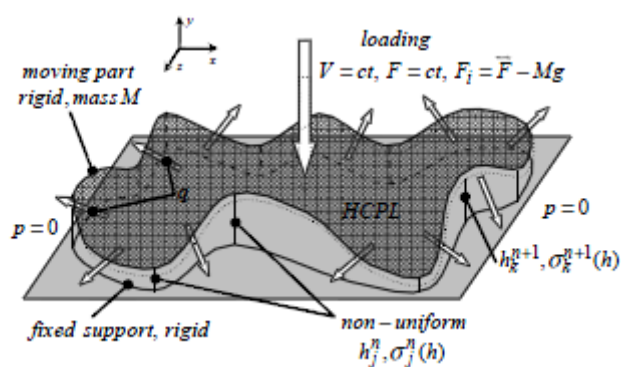


Fig.1.7. Configura expulzare a unui SPEC complet
 îmbibat cu fluid Newtonian [77]

Pe plan i care au vizat analiza
 în straturi poroase îmbibate
 ocurilor a materialelor poroase îmbibate [29], [39], [61], [101]. Colectivul de cercetare la
 City University din New York condus de Weimbaum a dezvoltat modele asociate
 problematicii XPHD, al biolubri ei
 aceste modele au fost construite tot [39].
 Wein

Capac
flexibile/deformabile
molecular.

n în (Fig.1.8).
rocielor foarte

Fig.1.9
îmbibate cu aer [101]. În [101] se

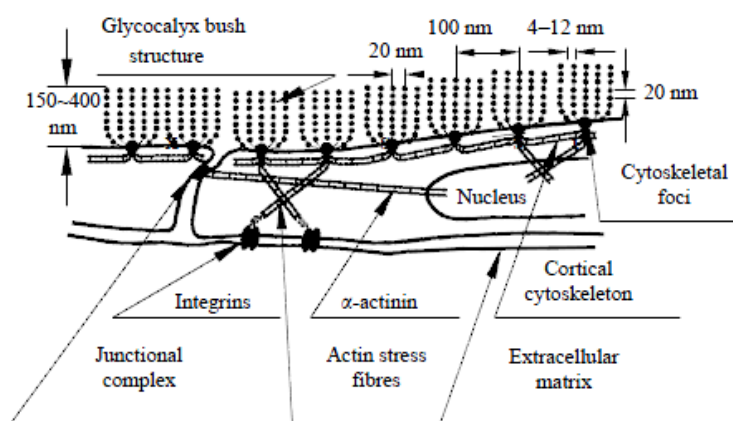


Fig.1.8. Stratul de cili [39]

Mecanismul de generare a presiunii portante descris de Weinbaum este bazat pe
deplasarea (Fig.1.10).

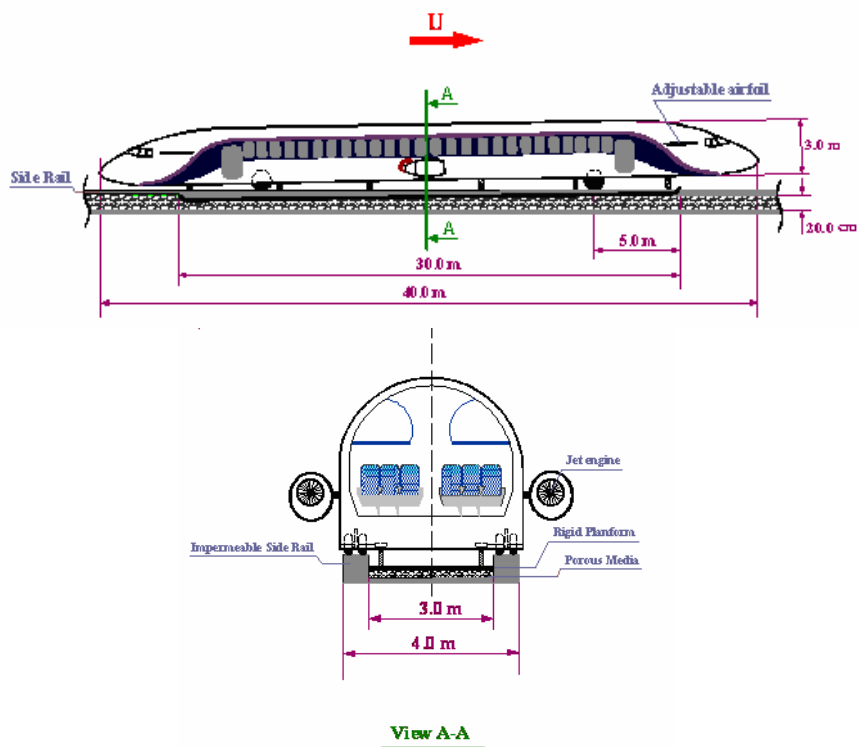


Fig.1.9. poros îmbibat cu aer [61]

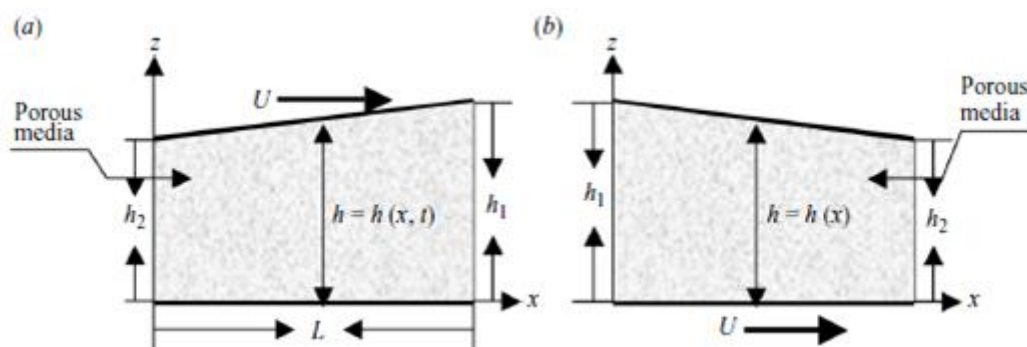


Fig.1.10. Reprezentarea schematică

[62]

Cu scopul de a determina experimental capacitatea de amortizare a materialelor poroase, în [101] Weinbaum descrie un dispozitiv experimental (Fig.1.11) care permite măsurării presiunii generate în mediul poros la compresie, urmare a efectului de expulzare.

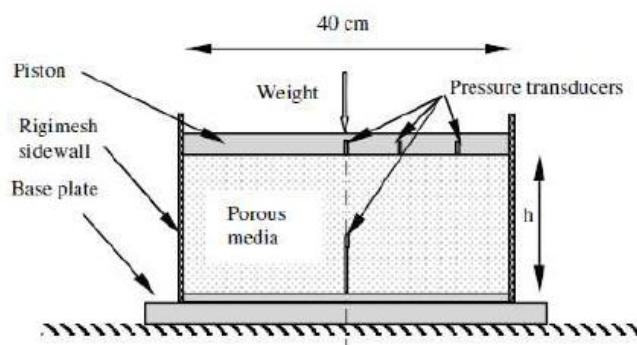


Fig.1.11. Reprezentarea schematică a aparatului de compresie utilizat de echipa Weinbaum [101]

expulzarea aerului din
puful
sunt prezentate în Fig.1.12. Analiza

nate este mic

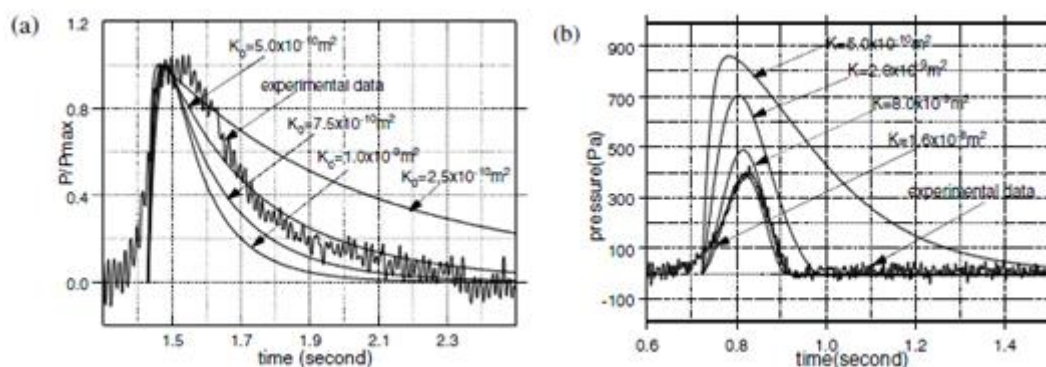


Fig.1.12.

1

a. $m=5,9 \text{ kg}$, $h_0=11,43 \text{ cm}$, $\Delta h_{\max}/h_0=0.22$, $P_{\max}=788 \text{ Pa}$, b. pentru puf de $m=6,4 \text{ kg}$, $h_0=12,77 \text{ cm}$, $\Delta h_{\max}/h_0=0.35$, $P_{\max}=400 \text{ Pa}$ [101]

-a bazat în principal pe utilizarea de

mecanismului specific de deformare. Materialele poroase cel mai des

). Spumele pot fi definite ca structuri solide care -o

de grinzi .

poate fi deasemenea

Au fost studiate atât spumele cu pori
pot fi utilizate cu fluide, iar

Recent, un colectiv de cercetare condus de Gibson de la Massachusset Institute of
experimentale [20] - [22] privind
capacitatea de amortizare a spumelor poroase îmbibate cu fluid. Dawson [19], membru al

de fluid care se constituie într-

Fig.1.13.

prin utilizarea unui pendul. Primele studii în cadrul colectivului condus de Pascovici au fost [76], în tub cu joc mare m . Sfera a lovit un recipient umplut cu amprentelor s-a putut evalua amortizarea care a fost de aproximativ 50%. experimentale [81], [82]. Standul utilizat este -un gate de un suport rigid prin intermediul / [81] cu axe sunt de 2- [81]. La impactul cu o materialului poros uscat [82].

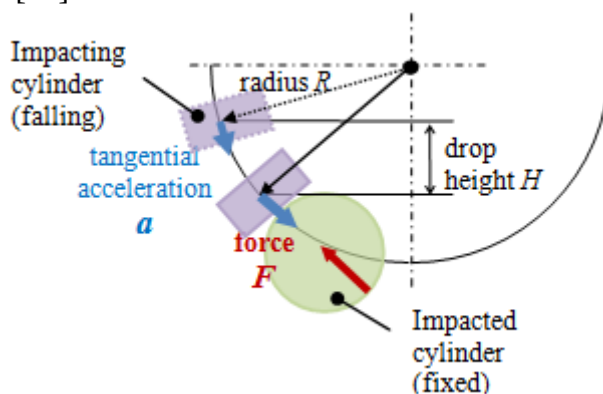


Fig.1.14. G

[81] i parametrii de intrare

La Fukuoka Institute of Technology a fost abordat ne-Newtoniene cu suspensie de particule pentru reducerea efectului de [90]. În Fig.1.15 se poate vedea amplasarea unui strat de fluid cu suspensie de par poate avea i un strat de material poros îmbibat cu fluide [90].

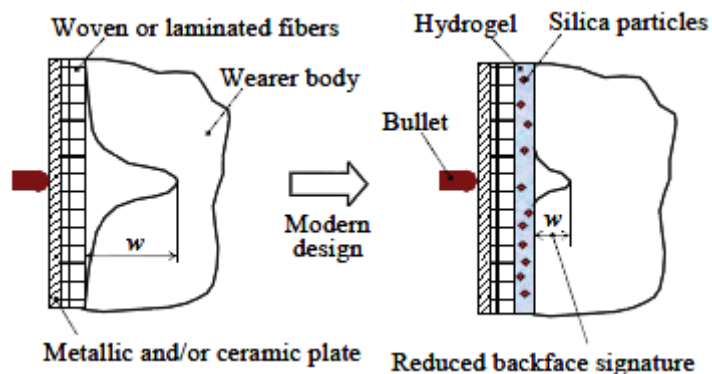


Fig.1.15.

e care î suspensie de particule [90]. *stînga* amprenta pentru *dreapta* amprenta pentru varianta cu fluid ne-Newtonian (hydrogel) cu suspensie de particule

1.3.1. Clasificarea materialelor poroase

un mediu poros este constituit dintr-o material poros în numeroase domenii: a solurilor, filtre pentru tratarea apei, esut biologic, procese de uscare, fabricarea de materiale compozite, etc. molecule. Marea

e [6]:

- Este un volum ocupat de un material lichid sau gazeos. Spațiul liber ocupat de acestea este reprezentat de pori. Faza solidă este denumită matrice;
- Faza solidă trebuie să fie distribuită în tot volumul materialului astfel încât să fie prezent în orice volum elementar reprezentativ;
- Cel puțin o parte din pori trebuie să fie interconectați. În structura materialelor poroase pot apărea pori blocați sau izolați care nu comunică cu alți pori (Fig.1.16) și care, astfel, nu permit o deplasare a fluidului.

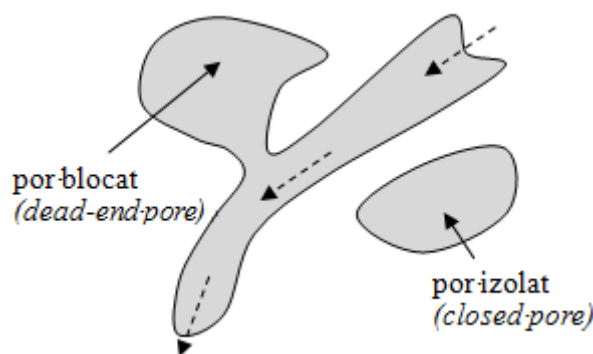


Fig.1.16.

În concordanță cu descrierea de mai sus se pot exemplifica o mare varietate de materiale poroase: roci, straturi de sol sau pietriș, materiale textile, hârtia de filtrare, pielea și esuturi biologice, etc. Datorită multitudinii lor s-au făcut mai multe clasificări. Din punct de vedere al provenienței, ele se pot găsi în stare naturală sau pot fi fabricate de om (sintetice).

Deoarece substanțele din care sunt constituite sunt diverse, un criteriu obiectiv în clasificarea materialelor poroase este forma și tipul porilor. Trei clase de materiale poroase au fost definite de Manegold [86] prin împărțirea tipului porilor în categorii: *goluri de material*, *canale capilare*, etc. Golurile sunt caracterizate prin faptul că pereții care definesc semnificativ fenomenele hidrodinamice care au loc în interiorul lor. Pentru canalele capilare, pereții au un efect semnificativ asupra fenomenelor hidrodinamice din interior.

materiale poroase:

Materiale poroase din fire.

materiale poroase țesute și materiale poroase netesute

prin combinarea materialelor din ambele categorii. Aceste materiale sunt mai utilizate în
 amentul lor nu poate fi prezis.

Materiale țesute.

-0

-un singur tip de fir, monofilar sau

multifilar, sau

constituent. Materialele poroase țesute pot fi

Materiale nețesute.

se din fibre/ iri

(Fig.1.17). Rezultatul este un

material bazat pe

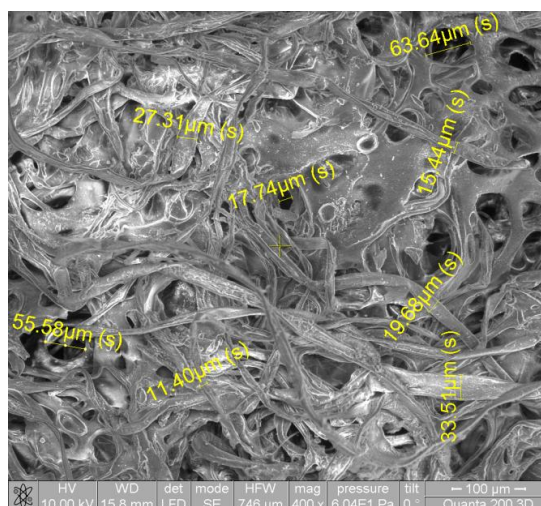


Fig.1.17. Investigare SEM a materialului vileda

Materiale poroase cu cavități. Materialele care fac parte din aceasta categorie pot

cel sau spumele din materiale plastice hârtia, lavetele din

În pot fi incluse i spumele metalice. Din cauza solide, acestea nu sunt

compatibile cu ip

, prin îmbibare, se pot utiliza i structuri poroase metalice.



Fig.1.18.

[80]

u stat la baza teoriei dezvoltate pentru modelarea curgerii prin medii poroase sau pentru a determina permeabilitatea în

particule pentru amortiz , la nivele mari de comprimare, devin un mediu poros îmbibat cu fluid.

În particular, pentru a exemplifica materialele care au fost studiate de colectivul condus de Pascovici, în Fig.1.18 sunt prezentate fotografii ale materialelor utilizate de Radu pentru [80]. , au fost utilizate o

1.3.2. Porozitatea

Conceptul de porozitate a fost int mann [9], [100], unul dintre pionierii studierii materialelor poroase. Mai târziu Delesse [9], [23] a adus o cu cea a volumului de material.

Porozitatea, ε , at de material. În f

M it zute, iar textilele sunt materiale foarte poroase.

Este important de precizat c porii care

, a i porii

(Fig.1.16) sau alte goluri dispersate în interiorul materialului. La transportul

i porii care sunt co -un singur sens *dead-end, blind pores* .

caracterizate astfel [7]:

- *Macro-porozitate*: pori cu diametru mediu mai mare de 50 nm

canalele capilare;

- *Mezo-porozitate*: pori cu diametru mediu între 2 si 50 nm;

- *Micro-porozitate*: pori cu diametru sub 2 nm.

liber din interiorul

în i pot

particulele unui amestec de elemente eterogene sau golurile între fibrele unei structuri regulate

specifice solurilor, straturilor

nunchiuri de fire.

compactitatea σ , iar $\sigma=1-\varepsilon$,

Pentru determinarea porozit ii, mai jos sunt enumerate o serie de metode experimentale utilizate:

a) *metode directe* Aceaste metode surarea volumului componentei i a volumului total al materialului poros;

b) *metode optice* M sur torile se fac cu ajutorul instrumentelor optice specializate folosind o fa lustruit a unei mostre din materialul poros, impregnat cu cear sau plastic;

c) *metode bazate pe îmbibare* Dup imersarea mostrei de material poros într-un lichid care ader la material pentru o perioad de timp care s asigure umplerea tuturor porilor, se volumul de lichid dezlucuit. Acesta reprezint volumul componentei

solide și care, raportat la volumul total al mostrei, permite determinarea compactității σ . Mai departe se poate determina porozitatea $\varepsilon = 1 - \sigma$. În locul determinării volumului de lichid dezlucuit, care se realizează cu o anumită precizie, se poate determina volumul porilor printr-o *metodă gravimetrică* care presupune măsurarea de fluid din porii materialului îmbibat. Materialul uscat este cântărit și apoi se imersează în fluid. De obicei, pentru eliminarea aerului blocat în pori, imersarea este însoțită de comprimarea materialului. După comprimare se repetă cântărirea. Diferența de masă reprezintă cantitatea de apă absorbită de pori. Porozitatea se determină prin raportarea volumului apei la volumul total al materialului îmbibat. Trebuie menționat că porozitatea determinată astfel ține cont doar de porii comunicați prin care fluidul poate curge.

1.3.3. Permeabilitatea

Primele încercări de elucidare a fenomenului curgerii unui fluid printr-un material poros au fost efectuate datorită aplicațiilor în geologie. Au fost construite modele teoretice atât pentru curgerea apei prin straturile de roci cât și pentru petrolul aflat în depozite subterane. S-a considerat că permeabilitatea mediului se află într-o relaționalitate cu porozitatea. Constanta de proporționalitate era un parametru care se ajusta în funcție de mediul caracterizat.

Eficiența redusă a modelelor incipiente a dus la concluzia că nu se poate face o legătură între porozitate și permeabilitate. În mod evident, trebuie să se țină cont și de alte proprietăți de material.

La momentul actual, din literatura de specialitate, se pot defini mai multe modele teoretice. *Modelul canalelor capilare* [86] acceptă că materialul poros este constituit dintr-o mulțime de canale capilare paralele cu direcția de curgere. Modelele construite sunt cele mai simple și încearcă corelarea permeabilității cu diametrul mediu al porilor. Din dorința de apropiere de comportamentul real al materialului, au fost construite modele mai complicate, de exemplu *modelul lui Kozeny*. Acest model este pe baza caracteristicilor geometrice ale materialului.

Pentru materiale poroase cu porozitatea mare, despre care s-a considerat că au o structură de fibre sau formată din particule considerate izolate, s-au dovedit eficiente modelele empirice care au la bază *modelul rezistenței la înaintare* [86].

O permeabilitate poate fi definită prin fenomene fizice fundamentale. În general, o mare parte din

1.3.3.1 Modelul canalelor capilare [86]

a. Modelul liniar al canalelor capilare

Este cel mai simplu model teoretic utilizat. Materialul poros este reprezentat ca un pachet de canale capilare drepte și paralele, cu același diametru d (Fig.1.19).

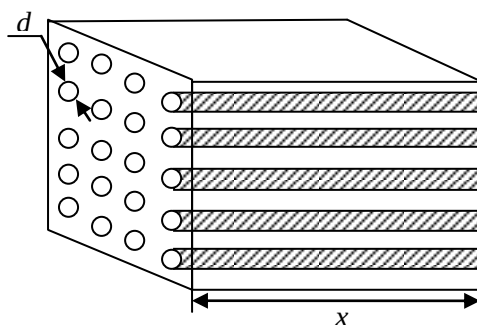


Fig.1.19. Modelul liniar al canalelor capilare

Debitul volumic Q pentru un fluid care curge de-a lungul a n canale printr-
 A se poate determina cu ajutorul legii lui Poiseuille:

$$Q = -\frac{\pi n d^4}{128 \eta} \frac{dp}{dx} \quad (1.1)$$

porilor este egal cu $W_p = \frac{1}{4} n \pi x d^2$ pentru o lungime a materialului x . Considerând A
 ul total al materialului este $W = xA$

$$\varepsilon = \frac{1}{4} n \pi d^2 / A \quad (1.2)$$

$$Q = -\frac{A \varepsilon d^2}{32 \eta} \frac{dp}{dx} \quad (1.3)$$

(1.3) i legea lui Darcy [17]. În baza

$$\phi = \varepsilon d^2 / 32 \quad (1.4)$$

capi

$$\phi = \varepsilon d^2 / 96 \quad (1.5)$$

Pentru acest caz, Scheidegger [86] introduce următoarele proprietăți care completează
 seria de parametri care descriu proprietățile fizice ale materialului poros:

- *Tortuozitatea* - T : proprietate geometrică adimensională care
 drumul parcurs de fluid ce printr-un canal sinuos
 raportat la lungimea materialului [37]. În expresia de mai sus este utilizat pentru înlocuirea
 termenului 32 cu .

- *Suprafața specifică udată* - S_s : este utilizat pentru înlocuirea termenului d^2 .
 Determinarea se face prin raportarea ariei udă $n \pi dx$ a canalelor la volumul modelului $x A$.
 Expresia de definire pentru unitatea de arie este.

$$S_s = \frac{n \pi d}{A} \quad (1.6)$$

În final expresia permeabilității devine:

$$\phi = \varepsilon^3 / (T S_s^2) \quad (1.7)$$

b. Modelul canalelor capilare în serie

Pentru modelele prezentate anterior, depărtarea de comportamentul real al fluidului la
 trecerea printr-un mediu poros, este reprezentată de faptul că acesta presupune că fluidul trece
 prin materialul poros în linie dreaptă, dintr-o parte în alta. Modelul canalelor capilarelor în
 serie complică puțin problema și presupune că mai multe canale capilare de diferite
 dimensiuni sunt puse cap la cap pentru a forma o structură oarecum asemănătoare (Fig.1.20).

x , cu n

curgere A și diametrul mediu d

$p_2 - p_1$, viteza medie de curgere a fluidului u_m

$$\frac{p_2 - p_1}{x} = -32 \frac{\eta u_m}{d^2} \frac{L_c}{x} \quad (1.8)$$

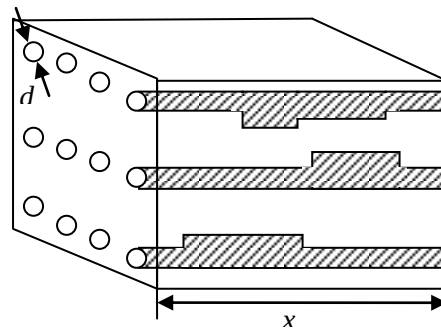


Fig.1.20. Modelul canalelor capilare în serie

Atunci debitul pe A cu n canale capilare pe unitatea de suprafa A , devine:

$$Q = n \frac{\pi}{4} d^2 u_m = -\frac{n\pi}{128} \frac{x}{L_c} \frac{d^4}{\eta} \frac{p_2 - p_1}{x} \quad (1.9)$$

Porozitatea se determină prin raportarea volumului total al porilor $W_p = \frac{1}{4} n \pi x d^2 \frac{L_c}{x}$, calculat luând în considerare lungimea L_c a canalelor capilare mai mare decât lungimea x modelului, la volumul total $W = xA$. De asemenea se ia în calcul și faptul că materialul are trei direcții de aranjare a canalelor capilare.

$$\varepsilon = \frac{3}{4} n \pi d^2 \frac{L_c}{x} \cdot \frac{1}{A} \quad (1.10)$$

După înlocuirea expresiei porozității în (1.10) se obține:

$$Q = -\frac{1}{96} \left(\frac{x}{L_c} \right)^2 \frac{d^2}{\eta} \varepsilon A \frac{p_2 - p_1}{x} \quad (1.11)$$

Din nou, se poate scrie expresia permeabilității în funcție de porozitate ε și lungimea x :

$$\phi = \frac{1}{96} \varepsilon d^2 \left(\frac{x}{L_c} \right)^2 \quad (1.12)$$

Dacă se introduce tortuozitatea $T = (L_c / x)^2$, se poate scrie permeabilitatea astfel:

$$\phi = \frac{1}{96} \frac{\varepsilon d^2}{T} \quad (1.13)$$

1.3.3.2 Modelul lui Kozeny

În mod natural, pentru a crește capacitatea de stocare, au fost dezvoltate modele mai elaborate, comparativ cu cele bazate pe o serie de canale. Pentru medii de tipul materialelor

diametrul mediu al fibrei. Teoriile care vor fi prezentate se bazează pe observația că parametrul permeabilității are dimensiunea unei arii sau a unei lungimi ridicate la puterea 3. Aceasta lungime a fost denumită generic *raza hidraulică*. Ipotezele în care funcționează aceste teorii sunt următoarele.

- Nu există pori izolați;
- Distribuția porilor este aleatoare;
- Dimensiunea porilor este uniformă;
- Porozitatea se află departe de limita superioară;

- Fenomenele de difuzie sunt absente;
- Mi carea fluidului se ca printr-un de fibre capilare.

Modelul lui Kozeny, care are la baz definirea func ie de propriet i geometrice ale materialului este utilizat la scar larg . Mediul poros este reprezentat ca un ansamblu de canale de diferite sec iuni transversale dar de lungime definit . Ecuatiile Navier-Stokes sunt rezolvate pentru toate canalele care o perpendicular pe de curgere [86]. În cele din urm , permeabilitatea este definit func ie de suprafa a specific a mediului poros care poate fi definit prin intermediul razei hidraulice $r_h = 1/S_s$. Rela ia lui Kozeny are urm toarea form :

$$\phi = \varepsilon^3 r_h^2 / k \quad (1.14)$$

Constanta Kozeny k în de forma canalului. Pentru cerc ia valoarea $k = 0,50$, pentru p trat $k = 0,5619$, etc. [86].

Ulterior, au fost aduse mai multe modific ri ecua iei lui Kozeny de c tre Terzaghi [9], Zunken [102] sau Bakhmeteff i Feodoroff [5]. Modificarea care a generat una dintre cele mai utilizate forme a fost f cut de Carman [12].

[34]

$$\phi = \frac{D \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (1.15)$$

Cu D

d_f :

$$D = \frac{d_f^2}{16k}, \quad k = 5 \div 10 \quad (1.16)$$

Constanta k se empiric astfel încât ecua ia (1.16) s satisfac dependen a dintre permeabilitate i porozitate. Ec cel mai des torului condus de Pascovici. Deasemenea, permite tratarea prin comprimare sau destindere a unui strat poros extrem de compresibil.

1.3.3.3 Modelul rezisten iei la înaintare [86]

a. Modelul obstacolelor sub form de fibre

Obstacolele în calea curgerii fluidului sunt fibre, a ezate de obicei pe trei direc ii dintre care cel pu in una se afl pe direc ia curgerii. Una din ipotezele valabile pentru model este c lungimea fibrelor i distan a dintre ele sunt mult mai mari comparativ cu grosimea firelor. Acest model descrie materialele cu porozitate mare. de iner ie sunt neglijate, curgerea are loc pentru numere mici Reynolds.

For a de rezisten pe unitatea de lungime f pentru o fibr înconjurat de fibre indentice, orientate pe direc ia curgerii, a fost definit de Emersleben [27].

$$f = 4\pi \eta u \quad (1.17)$$

u reprezint viteza fluidului care curge dintre fibre.

Se presupune c sunt n fibre pe unitatea de volum i fiecare treime este aranjat pe o singur direc ie într-un sistem de trei direc ii ortogonale. For a total de rezisten pentru unitatea de volum datorat a $n/3$ fibre poate fi egalat cu c derea de presiune pe unitatea de lungime:

$$\Delta p / L_c = (4 \pi n / 3) \eta u \quad (1.18)$$

Căderea de presiune datorată fibrelor aflate perpendicular pe direcția de curgere este:

$$\frac{\Delta p}{L_c} = \frac{4 \pi n}{3[2 - \ln(R)]} \eta u \quad (1.19)$$

Adunarea simplă a forțelor de rezistență la curgerea în lungul și perpendicular pe fibre duce la determinarea gradientului de presiune total:

$$\frac{\Delta p}{L_c} = \frac{4 \pi n}{3} \frac{[4 - \ln(R)]}{[2 - \ln(R)]} \eta u \quad (1.20)$$

Cum densitatea aparentă a unui volum fibros, este egală cu volumul fibrelor sau cu porozitatea înmulțită cu densitatea fibrelor,

$$\rho_p = \frac{1}{4} \pi d^2 n \rho_f = \varepsilon \rho_f, \quad (1.21)$$

se poate elimina n din ecuația (20):

$$\frac{\Delta p}{L_c} = \frac{16 \eta u}{3} \frac{\rho_p}{\rho_f d^2} \frac{[4 - \ln(R)]}{[2 - \ln(R)]} \quad (1.22)$$

Profilul vitezei fluidului printre fibre este aproximat până când viteza devine constantă. Ca urmare, viteza este legată de debitul volumic Q și aria secțiunii mediului poros A prin relația Dupuit-Forchheimer [86]:

$$u = Q / (\varepsilon A) = Q / \varepsilon \quad (1.23)$$

În final gradientul presiunii devine:

$$\frac{\Delta p}{L_c} = Q \frac{16 \eta}{3} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon d^2} \frac{[4 - \ln(R / \varepsilon)]}{[2 - \ln(R / \varepsilon)]} \quad (1.24)$$

Prin comparație cu legea lui Darcy, permeabilitatea ϕ este:

$$\phi = \frac{3}{16} \frac{\varepsilon d^2}{(1 - \varepsilon)} \frac{[4 - \ln(R / \varepsilon)]}{[2 - \ln(R / \varepsilon)]} \quad (1.25)$$

b.

Prin utilizarea obstacolelor sub formă de sferă se obține un alt model. Brinkman este printre primii utilizatori ai unui astfel de model pentru caracterizarea mediilor poroase. Modelul presupune că particulele sferice au raza R și sunt menținute în poziție de către forțe exterioare. Acestea sunt așezate pe straturi, fiecare dintre ele fiind susținută de celelalte prin contact.

Dacă se însumează forțele care acționează normal și tangențial asupra unui element de volum folosind ecuațiile Navier-Stokes, se poate scrie:

$$F_{ext} = -\Delta p + \eta \nabla u, \quad (1.26)$$

unde u este vectorul curgerii. Termenii inerțiali au fost neglijăți și fluidul a fost considerat incompresibil.

Brinkman [11] mai definește o viteză medie u_m care este determinată pentru un volum W_0 .

$$u_m = \frac{1}{W_0} \int_{W_0} u dW, \quad (1.27)$$

Particulele aflate în fa a curgerii exercit rezisten în func ie de viteza de curgere a fluidului. Se poate presupune c această for este propor ional cu viteza de curgere a fluidului:

$$F_{int} = -(\eta/\phi)u_m, \quad (1.28)$$

unde permeabilitatea ϕ este definit ca o constant care depinde de densitatea particulelor i raza lor.

Daca se iau în considerare doar for ele vîscoase, for ele F_{ext} si F_{int} sunt singurele care ac ioneaz asupra elementului de volum. Pentru un caz sta ionar:

$$F_{ext} + F_{int} = 0 \quad (1.29)$$

se înlocuiesc în ecua ia (1.29) expresiile for elor definite anterior, pentru densit i sc zute de particule se ob ine:

$$-\Delta p + \eta \nabla u - \frac{\eta}{\phi} u_m = 0 \quad (1.30)$$

În condi iile unui lichid incompresibil ($\text{div } u_m = 0$) i cu condi iile la limit : la peretele particulei componentele tangen iale i normale ale vitezei sunt nule, se poate determina profilul curgerii. Determinarea for ei F_s care ac ioneaz asupra sferei se face cu ajutorul ecua iei:

$$F_s = 6\pi \eta u_m R_s \left(1 + \frac{R_s}{\sqrt{\phi}} + \frac{R_s^2}{3\phi} \right), \quad (1.31)$$

unde u_m reprezint viteza medie de curgere între sfere de raza R_s .

calcularea for ei totale nF_s pentru n sfere i având în vedere definirea conform rela iei (1.28), se scrie permeabilitatea astfel:

$$\phi = \frac{R_s^2}{18} \left(3 + \frac{4}{1-\varepsilon} - 3\sqrt{\frac{8}{1-\varepsilon} - 3} \right) \quad (1.32)$$

1.3.3.4 Alte modelări teoretice pentru permeabilitate

Tabelul 1.1 Modele teoretice pentru materiale poroase izotrope si anizotrope (adaptare [56])

Modelul	Permeabilitatea	Nr. ecuației	Tip material
Mao i Russell [54],[56]	$\phi(\theta) = \frac{1}{32} \frac{d^2}{\varepsilon} \left(\frac{S_\phi T_\phi}{T_\phi \sin^2 \theta + S_\phi \cos^2 \theta} \right)$	(1.33)	anizotrop
Gebart [33]	$\phi_{//} = \frac{8}{57} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} d^2$	(1.34)	anizotrop
	$\phi_{\perp} = \frac{16}{9\pi\sqrt{2}} \left(\sqrt{\frac{1-\varepsilon_{\min}}{1-\varepsilon}} - 1 \right)^{2,5} \cdot d^2$	(1.35)	
Berdichevsky i Cai [8]	$\phi_{//} = \frac{d^2}{8(1-\varepsilon)} \left(\ln \frac{1}{(1-\varepsilon)^2} - \varepsilon \cdot (2 + \varepsilon) \right)$	(1.36)	anizotrop
	$\phi_{//} = \frac{d^2}{8(1-\varepsilon)} \left(\ln \frac{1}{(1-\varepsilon)} - \frac{\varepsilon^2}{(2-\varepsilon)^2} \right)$	(1.37)	

Emersleben [27]	$\phi = \frac{1}{c} \frac{d^2}{1-\varepsilon}$	$c=16$	(1.38)	anizotrop
Happel [40]		$c_{//} = -\frac{32}{S_{\phi}};$ $c_{\perp} = -\frac{32}{T_{\phi}}$	(1.39)	anizotrop
Mao i Russell [54][56]		$c = -16 \left(\frac{S_{\phi} + T_{\phi}}{S_{\phi} T_{\phi}} \right)$	(1.40)	izotrop
Iberall [44]		$c = -\frac{16}{3} \left(\frac{4 - \ln R}{2 - \ln R} \right) \frac{1}{\varepsilon}$	(1.41)	izotrop
Modificari ale ec. Kozeny-Carman				
Rush i Green [85]	$\phi = \frac{1}{c} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} d^2$	$c = 16(1-\varepsilon)\phi_0$	(1.42)	izotrop
Sullivan [91]		$c = 32 / \xi$	(1.43)	anizotrop
Shen [87]		$c=128$	(1.44)	izotrop
Davies [18]	$\phi = \frac{1}{64(1-\varepsilon)^{3/2} (1-56(1-\varepsilon)^3)} d^2$		(1.45)	

Unde $S_{\phi} = [2 \ln \phi - 4\phi + \phi^2]$ [14, 25], $T_{\phi} = \ln \phi + 4 \left\{ (1 - \phi^2) / (1 + \phi^2) \right\}$ [54], [56].

În Tabelul 1.1 sunt prezentate suplimentar sub formă pentru materialele izotropice sau anizotrope cu structură fire. În tabel a - propuse de-a lungul timpului.

1.3.4. Determinarea experimentală a permeabilității

Permeabilitatea materialelor poroase este o proprietate macroscopic dependent de structura mezoscopic i microscopic a materialului poros. În structura poroasă este, în general, invizibil ochiului uman. Ca urmare este nevoie de metode specifice pentru care s permit studierea ei.

În diagrama din Fig.1.21 sunt prezentate structurat o serie de metode pentru dezvoltate până în prezent.

Obiectul acestui capitol îl fac metodele experimentale. Metodele de teren sunt specifice studierii pentru materiale textile.

În debitului fluidului care curge prin materialul poros studiat. Rezultatele experimentale furnizat

în

poros.

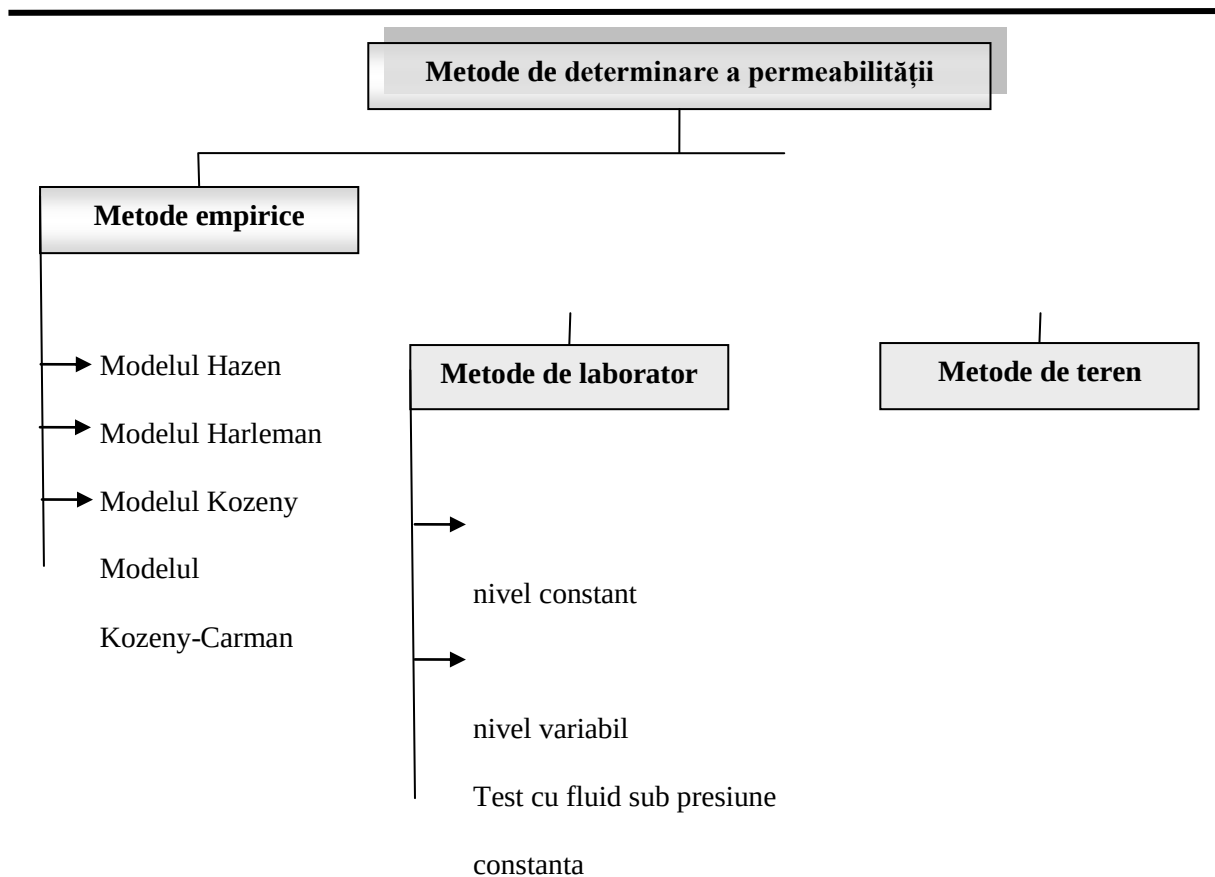


Fig.1.21.

[99]

1.3.4.1 Testul cu coloana de lichid de nivel constant

În Fig.1.22 este prezentat schema de principiu pentru standul experimental de măsurare a permeabilității pentru un material poros [1]. Cum se poate observa, recipientul în care se află materialul este alimentat cu lichid dintr-un bazin al cărui nivel este menținut constant. Volumul de lichid care curge prin materialul poros într-un timp t cunoscut se măsoară cu ajutorul unui cilindru gradat colector.

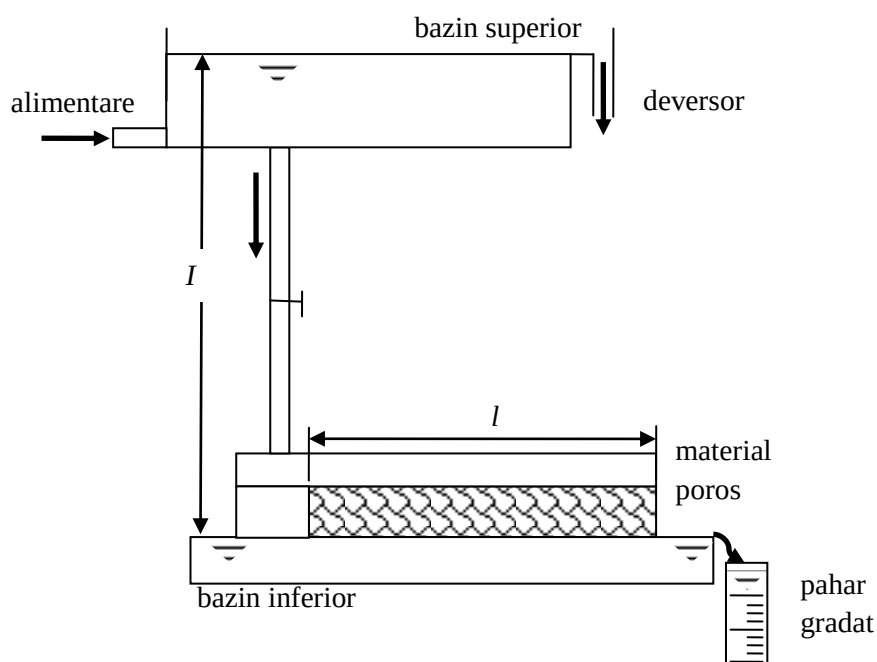


Fig.1.22.

W volumul de lichid care a curs prin materialul poros în intervalul de timp t , se poate determina debitul $Q=W/t$.

I a nivelului fluidului, gradientul de presiune ia valoarea $l\gamma/l$ folosim legea lui Darcy [17]

$$\phi = \frac{\eta}{A} \cdot \frac{l}{\Delta p} \cdot \frac{W}{t} = \frac{\eta}{A} \cdot \frac{l}{I\gamma} \cdot Q \quad (1.46)$$

unde A

l

1.3.4.2 Testul cu coloana de lichid de nivel variabil

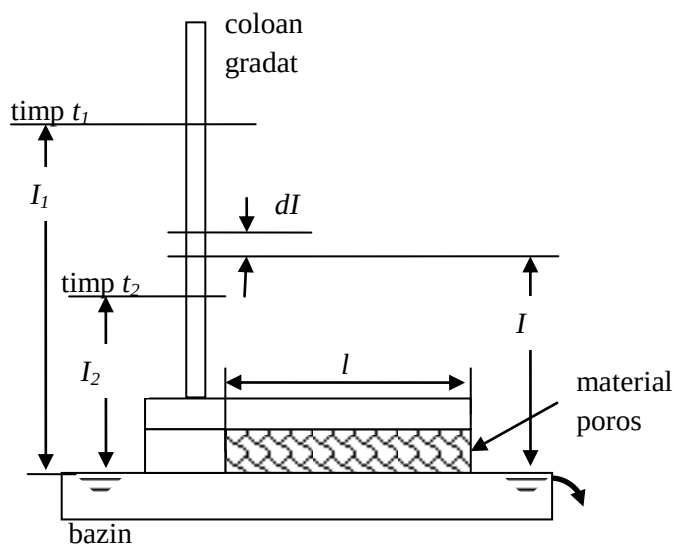


Fig.1.23.

[1]
Fig.1.23

$$\phi \frac{I}{l} A = -a \frac{dI}{dt}, \quad (1.47)$$

unde a

[1]:
(1.48)

$$\phi = \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$$

I_1 si I_2

t_1 si t_2 .

1.3.4.3 Testul cu fluid sub presiune constantă

radient de presiune generat cu

faptul

rialul poros pentru presiuni ridicate la intrare.

Aplica ii specifice sunt: studierea permeabilit ii materialelor poroase utilizate în fabricarea prin injec ie a pieselor din plastic. În Fig.1.24 i Fig.1.25 sunt reprezentate dispozitive experimentale care permit men inerea fluidului la presiune constant :

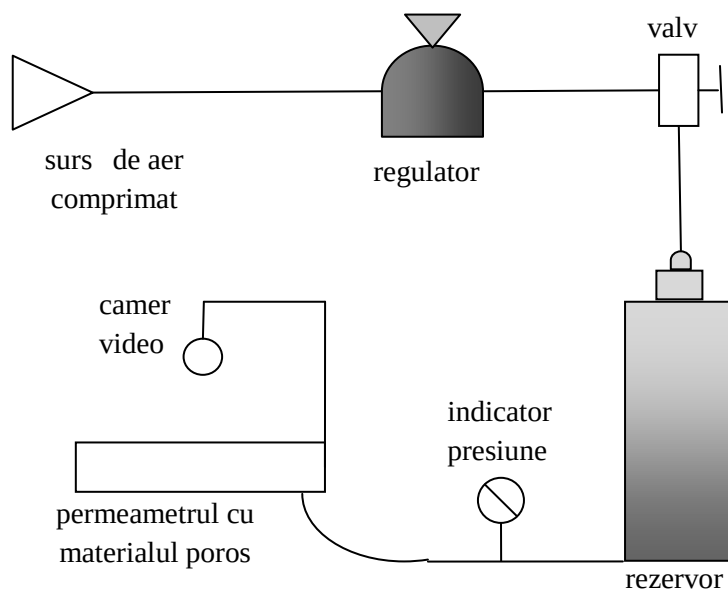


Fig.1.24.

[24]

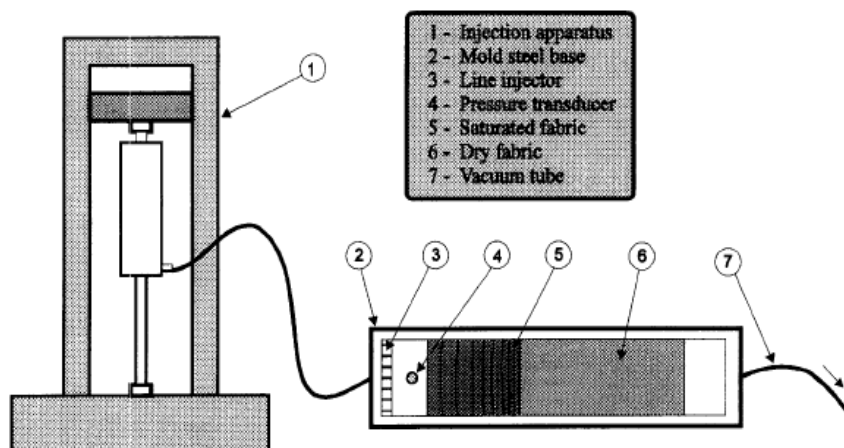


Fig.1.25. Dispozitiv experimental pentru determinarea permeabilit ii pentru materiale esute utilizate în injec ia maselor plastice [30]

Trebuie me
construit de Lundstrom [52] prezentat în Fig.1.26
compus din dou
care permite curgerea fluidului la exterior printr-
analizat. Alimentarea se face prin orificiul

al cavit . Deoarece se

,1
MPa. Fluidul folosit este ulei, iar materialele studiate sunt materiale poroase cu fire mari,
esu

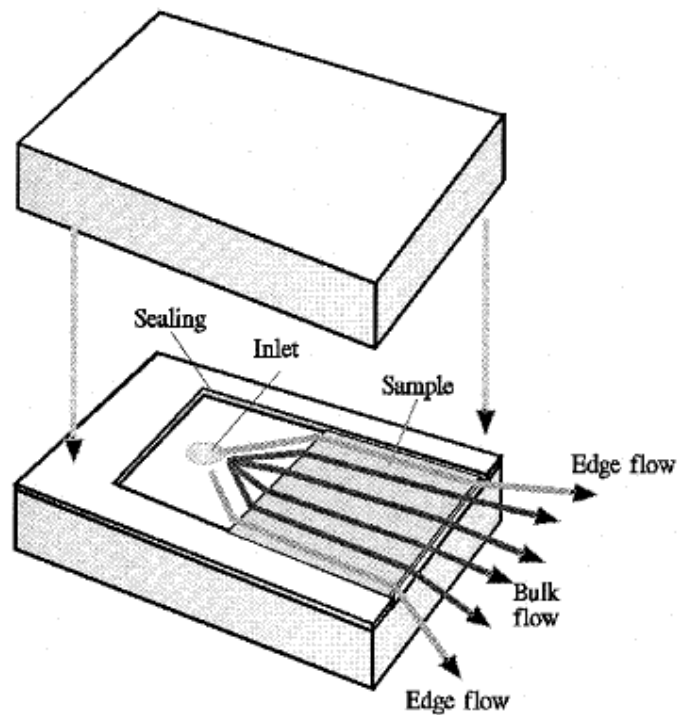


Fig.1.26. Dipozitivul experimental pentru m

[52]

Analizele experimentale

determinarea

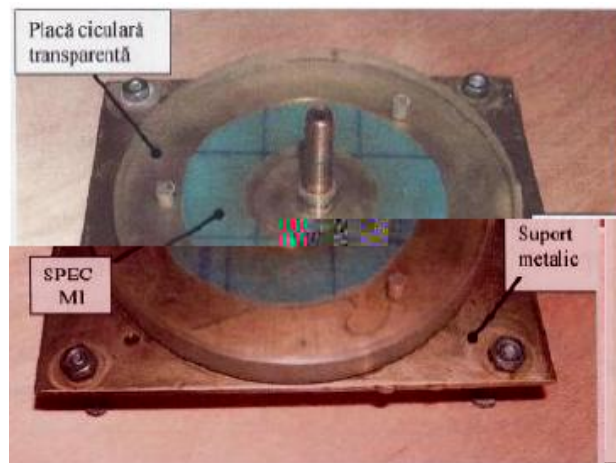


Fig.1.27. Permeametrul radial [78]

Cu acest scop au fost construite
Tribologie

in-house

Fig.1.27)

Fig.1.28). Ambele dispozitive experimentale

Dispozitivul experimental cu fluxul de
poros . Dispozitivul permite comprimarea stratului de material poros pentru a atinge
fazei solide.

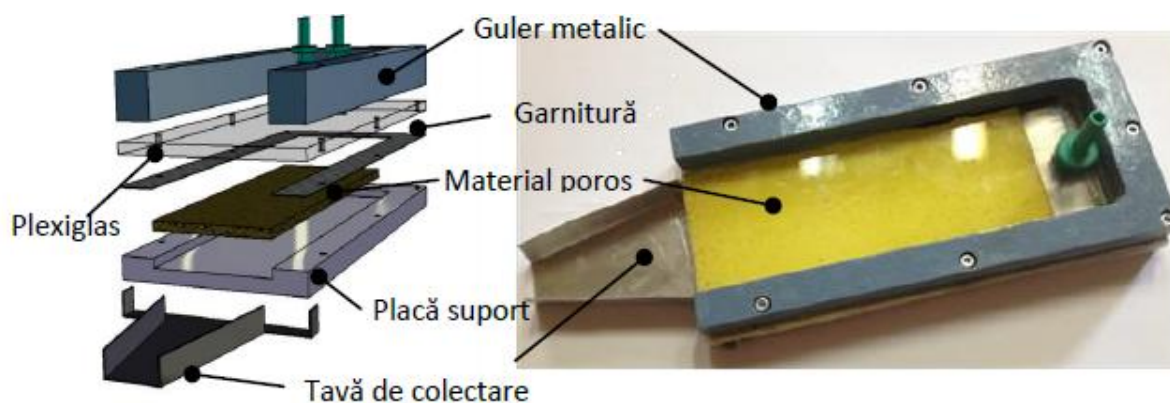


Fig.1.28.

[45], [82]

Permeometrul prezentat în Fig.1.28

comprimarea materialului poros. Cale sau lere s

la marginea materialului
care se

fluidului s-

1.4. MODELAREA PROCESELOR DE CURGERE PRIN MEDII POROASE

1.4.1 Modelele lui Darcy, Brinkman și Darcy-Forchheimer

, are o

poroase reticulate. *materiale*
spumele care au to i porii comunican i. awson [20] - [22] pentru a clasifica

un singur

studiilor existente provin din studierea curgerii
domenii precum geologie, în , au generat primele

dintr-o aglomerare de particule, reprezentate în Fig.1.29 cu gri, iar porii
liber, alb, îl

Prima încercare de a construi o teorie pentru medii poroase îmbibate cu fluide este
[9] [100]
volumul total al materialului poros, Woltman a introdus conceptul de porozitate (*volume fraction*). Ulterior Delesse [9][23]

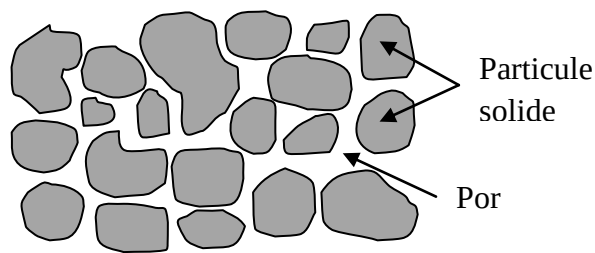


Fig.1.29.

Darcy [17] a realizat teste pe straturi de nisip natural i-
un fluid. Testele sale pe straturi de nisip natural i-
de curgere i inversul lungimii de curgere prin stratul de nisip. În [17]
este prezentat dispozitivul experimental utilizat.

fluid ΔI :

$$Q = KA \frac{\Delta I}{l} \quad (1.49)$$

K care depinde de permeabilitatea
a fluidului. Pe baza debitului $u = Q / A$.
Pentru un gradient de presiune aplicat pentru o lungime de curgere l

$$u = \frac{\phi}{\eta} \frac{\Delta p}{l} \quad (1.50)$$

este
frecvent în studiile dezvoltate ulterior.

asupra mediilor cu porozitate ridicat ($\varepsilon > 0,7$)
Brinkman [11]

a încercat
precizia modelului lui Darcy p Acesta are
r

Navier-

ier-
eoarece

Pentru un fluid incompresibil, $\hat{\eta}$ nui gradient de presiune,
-Stokes se scrie astfel:

$$\nabla p = \eta \nabla^2 u \quad (1.51)$$

inând
(1.51):

$$\nabla p = -\frac{\eta}{\phi} u + \eta' \nabla^2 u, \quad (1.52)$$

η'

a

η'

η

ϕ , ultimul

termen $\eta' \nabla^2 u$

$$\text{termen } \frac{\eta}{\phi} u \text{ din} \quad (1.52)$$

Pentru viteze mici de curgere,
medii poroase [42] e viteza de curgere

[7][13][41]. Prin analogie cu Navier-Stokes [31]. Legea Darcy-Forchheimer

$$\nabla p = -\frac{\eta}{\phi} u - \frac{C_f \rho}{\sqrt{\phi}} u^2 \quad (1.53)$$

Termenul $C_f / \sqrt{\phi}$
coeficient non-Darcy.

Recent s- -Forchheimer la care s-a [50]. Astfel a -
Brinkman-Forchheimer, sau pe scurt Brinkman-Forchheimer. Expresia legii este:

$$\nabla p = -\frac{\eta}{\phi} u + \eta \nabla^2 u - \frac{C_f \rho}{\sqrt{\phi}} u^2 \quad (1.54)$$

â
vîscoase.

1.4.2 Profilul de viteze pentru o curgere Poiseuille printr-un mediu Brinkman

Referitor la aplicabilitatea legii modificate de Brinkman, în [11]

$\eta = \eta'$) [38] i cazul în care
intermediul formulei lui Einstein [25][26]:

$$\eta' = \eta \left(1 + 2,5 \cdot \frac{W_s}{W_0} \right) \quad (1.55)$$

cazuri. Conform lui Brinkman, primul
caz este aplicabil unui mediu poros format din particule în contact. Acest mediu poate fi
mari de tipul lichidelor cu suspensii de particule.

1.4.2.1 Cazul $\eta = \eta'$

[29] pentru acest caz
care poate fi aplicat pentru medii poroase extrem de compresibile. Curgerea fluidului are loc
le

Pe baza modelului, în Anexa 1 este prezentat calculul realizat utilizând
Pentru a determina profilul vitezelor

$$\bar{u} = -\frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \left[\frac{\left(e^{\alpha \bar{y}} - 1 \right) \left(e^{\alpha} - e^{(\alpha \bar{y})} \right)}{\alpha^2 e^{(\alpha \bar{y})} (e^{\alpha} + 1)} \right] \quad (1.56)$$

Pentru $\bar{y} = 0,5$ $\bar{u}$ atinge un maxim $\bar{u} = \bar{u}_{\max}$.

$$\bar{u}_{\max} = -\frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \left[\frac{\left(e^{0,5\alpha} - 1 \right)^2}{\alpha^2 (e^{\alpha} + 1)} \right] \quad (1.57)$$

Pentru reprezentarea
 $\bar{\bar{u}} = \bar{u} / \bar{u}_{\max}$.

$$\bar{\bar{u}} = \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\max}} = \frac{\left(e^{(\alpha \bar{y})} - 1 \right) \left(e^{\alpha} - e^{(\alpha \bar{y})} \right)}{e^{(\alpha \bar{y})} (e^{0,5\alpha} + 1)} \quad (1.58)$$

În Fig.1.30

α

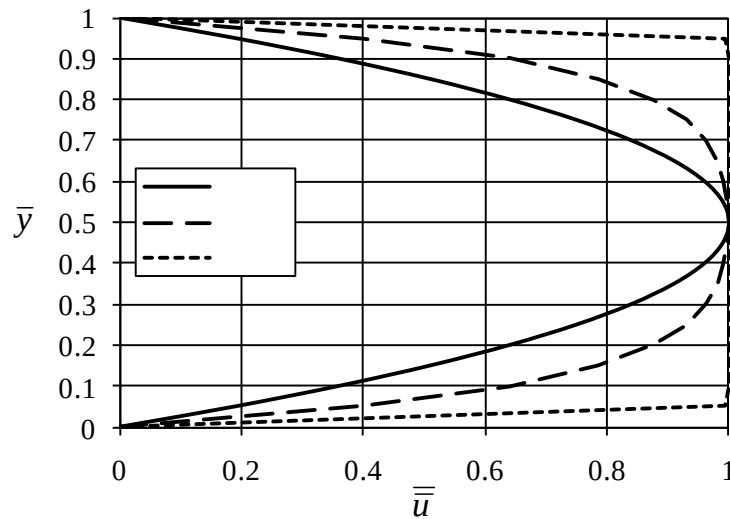


Fig.1.30. Profilul normat al curgerii de tip Poisseuile pentru un mediu Brinkman

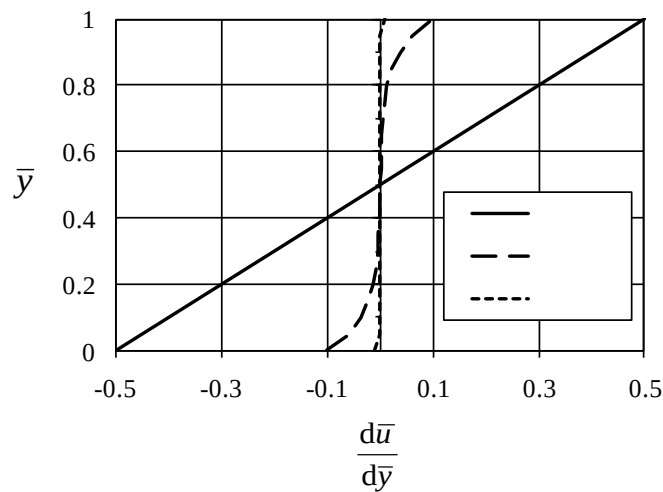


Fig.1.31. Gradientul de viteze pentru profilul de viteze adimensionalizat

(1.56):

$$\frac{d\bar{u}}{d\bar{y}} = \frac{1}{\alpha} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \left(\text{sh}(\alpha \bar{y}) - \frac{\text{ch} \alpha - 1}{\text{sh} \alpha} \text{ch}(\alpha \bar{y}) \right) \quad (1.59)$$

în

$$\alpha \text{ i } \bar{y}, \quad \frac{d\bar{u}}{d\bar{y}} = f(\alpha, \bar{y}) \quad \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = -1$$

curgerii modelat anterior (Fig.1.31).

1.4.2.2 Determinarea debitului

Cunoscând profilul curgerii printr-un mediu Brinkman vitezei de curgere (1.56) se poate determina debitul unitar. Prin integrare pe grosimea stratului unitar adimensional:

$$\bar{q}_B = \int_0^1 \bar{u} d\bar{y} = \frac{1}{\alpha^2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \int_0^1 \left(\text{ch}(\alpha \bar{y}) - \frac{\text{ch} \alpha - 1}{\text{sh} \alpha} \text{sh}(\alpha \bar{y}) - 1 \right) d\bar{y} \quad (1.60)$$

$$\bar{q}_B = -\frac{1}{\alpha^2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \left(1 - \frac{2(\text{ch} \alpha - 1)}{\alpha \text{sh} \alpha} \right) \quad (1.61)$$

mari, $(\alpha \rightarrow 0)$, se poate utiliza area aproximare:

$$\frac{1}{\alpha^2} \left(1 - \frac{2(\text{ch} \alpha - 1)}{\alpha \text{sh} \alpha} \right) \cong \frac{1}{12} \quad (1.62)$$

$\alpha \rightarrow 0$

foarte mare. Mediul poros

este Poise Prin urmare debitul

$$\bar{q}_P = -\frac{1}{12} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \quad (1.63)$$

Pentru de limita începând de unde elastice de mari pentru a fi luate în considerare, legea care a demonstrat cel mai bine efectul de expulzare în medii dense, este legea lui Darcy. Pentru o debitul unitar

adimensional este scris astfel:

$$\bar{q}_D = -\frac{1}{\alpha^2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \quad (1.64)$$

Introducând debitul dublu adimensional, pentru un strat de material poros îmbibat cu :

$$\bar{\bar{q}}_P = -\frac{1}{12} \quad (1.65)$$

$$\bar{\bar{q}}_B = -\frac{1}{\alpha^2} \left(1 - \frac{2(e^\alpha - 1)}{\alpha(e^\alpha + 1)} \right) \quad (1.66)$$

$$\bar{\bar{q}}_D = -\frac{1}{\alpha^2} \quad (1.67)$$

debitelor: 1.66 1.67), definite mai sus se poate determina raportul

$$\mathfrak{R} = \frac{\bar{q}_B}{\bar{q}_D} \quad (1.68)$$

Pe baza expresiei (1.68) se poate reprezenta $\mathfrak{R}$ în de modelare a curgerii.

Un domeniu pentru $\alpha < 10$ folosind modelul lui Brinkman (Fig.1.32) i care corespunde mediilor cu permeabilitate mare. un domeniu pentru $\alpha > 100$ care corespunde mediilor cu

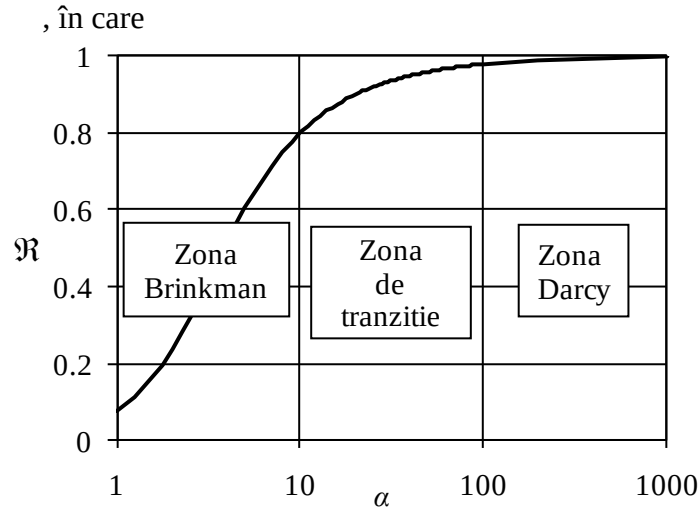


Fig.1.32. Raportul debitelor normale adimensionale

1.4.2.3 Determinarea presiunilor la expulzarea între două discuri

Sa consider

iunea la Fig.1.33), iar deplasarea acesteia se

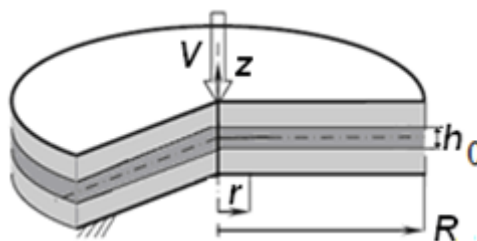


Fig.1.33. aflate în contact

Pentru descrierea câmpului de presiuni generat de mediul Brinkman se de la debitul unitar adimensional (1.61) care va fi scris pentru

$$\bar{r} = r / R:$$

$$\bar{q}_B = -2\pi\bar{r} \frac{1}{\alpha^2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{r}} \left(1 - \frac{2(\operatorname{ch} \alpha - 1)}{\alpha \operatorname{sh} \alpha} \right) \quad (1.69)$$

Curgerea flu prin materialul poros îmbibat de raza R la exteriorul discului

debitului unitar adimensional:

$$\bar{q}_V = \pi \bar{r}^2 \quad (1.70)$$

$$\pi \bar{r}^2 = -2\pi \bar{r} \frac{1}{\alpha^2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{r}} \left(1 - \frac{2(\operatorname{ch} \alpha - 1)}{\alpha \operatorname{sh} \alpha} \right) \quad (1.71)$$

Prin

$\bar{r} = 1$ presiunea $\bar{p} = 0$

$$\bar{p} = \frac{\alpha^2}{4} \frac{1}{\left(1 - \frac{2(\operatorname{ch} \alpha - 1)}{\alpha \operatorname{sh} \alpha} \right)} (1 - \bar{r}^2) \quad (1.72)$$

prin integrarea

de presiuni pe

:

$$\bar{F}_B = -\frac{\pi \alpha^2}{8} \frac{1}{\left(1 - \frac{2(\operatorname{ch} \alpha - 1)}{\alpha \operatorname{sh} \alpha} \right)} \quad (1.73)$$

1.4.2.4 Cazul $\eta \neq \eta'$

P

x ,

u a vitezei de

2) pentru grosimea filmului de lichid se poate scrie astfel:

$$\eta(1 + 2,5 \cdot \sigma_0) \frac{d^2 u}{dy^2} - \eta \frac{u}{\phi} - \frac{dp}{dx} = 0 \quad (1.74)$$

74) devine:

$$\frac{d^2 \bar{u}}{d\bar{y}^2} - \frac{h^2}{\phi} \frac{1}{(1 + 2,5 \cdot W_s / W_0)} \bar{u} - \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = 0 \quad (1.75)$$

unde $\bar{u} = u / U$, $\bar{y} = y / h$, $\bar{x} = x / h$ i $\bar{p} = ph^2 / \eta(1 + 2,5 \cdot W_s / W_0)UL$.

Raportul volumului fazei solide W_s

W_0

$$\sigma_0 = W_s / W_0 \quad (1.76)$$

Din nou, respectând modelul

[29] i utilizând (1.76), mai

$$\beta^2 = \frac{h^2}{\phi} \frac{1}{(1 + 2,5 \cdot \sigma_0)} = \frac{\alpha^2}{(1 + 2,5 \cdot \sigma_0)} \quad (1.77)$$

înlocuire

$$\frac{d^2 \bar{u}}{d\bar{y}^2} - \beta^2 \bar{u} - \frac{d\bar{p}'}{d\bar{x}} = 0 \quad (1.78)$$

de forma:

$$\bar{u} = \frac{1}{\beta^2} \frac{d\bar{p}'}{d\bar{x}} \left[\operatorname{ch}(\beta \bar{y}) + \frac{\operatorname{ch} \beta - 1}{\operatorname{sh} \beta} \operatorname{sh}(\beta \bar{y}) - 1 \right] \quad (1.79)$$

$$\bar{u} = -\frac{d\bar{p}'}{d\bar{x}} \left[\frac{(e^{(\beta \bar{y})} - 1)(e^{\beta} - e^{(\beta \bar{y})})}{\beta^2 e^{(\beta \bar{y})}(e^{\beta} + 1)} \right] \quad (1.80)$$

$$\bar{u} = \bar{u}_{\max} \quad \bar{y} = 0,5.$$

$$\bar{u}_{\max} = -\frac{d\bar{p}'}{d\bar{x}} \left[\frac{(e^{0,5\beta} - 1)^2}{\beta^2 (e^{\beta} + 1)} \right] \quad (1.81)$$

$$\bar{u} = \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\max}} = \frac{(e^{(\beta \bar{y})} - 1)(e^{\beta} - e^{(\beta \bar{y})})}{\beta^2 e^{(\beta \bar{y})}(e^{\beta} + 1)} \quad (1.82)$$

Profilul vitezelor prezentat în Fig.1.34 a fost reprezentat comparativ cu cazul anterior.

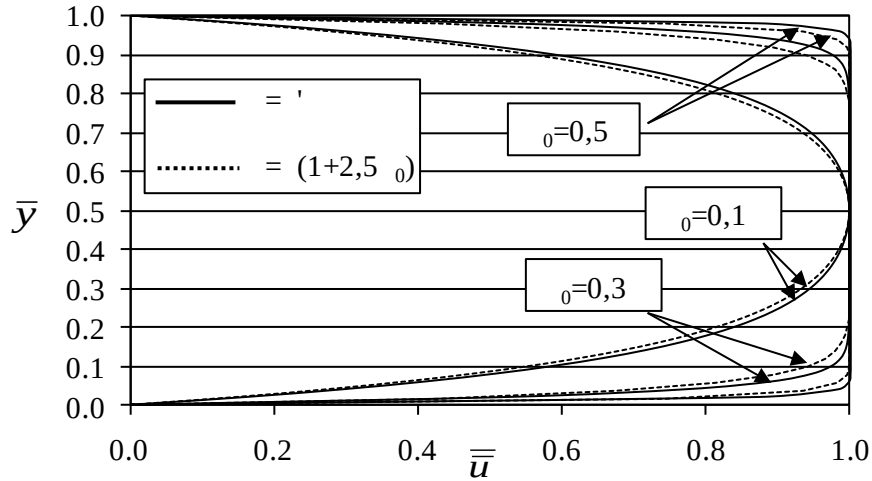


Fig.1.34. Reprezentarea profilului vitezei adimensionale a curgerii

1.4.2.5 Determinarea debitului

profilul curgerii caracterizat cu ajutorul
64) se poate determina debitul de curgere unitar adimensional

Prin integrarea expresiei vitezei anterior determinate (1.64

$$\bar{q} = \int_0^1 \bar{u} d\bar{y} = \frac{1}{\beta^2} \frac{d\bar{p}'}{d\bar{x}} \int_0^1 \left(\text{ch}(\beta \bar{y}) - \frac{\text{ch} \beta - 1}{\text{sh} \beta} \text{sh}(\beta \bar{y}) - 1 \right) d\bar{y} \quad (1.83)$$

$$\bar{q} = -\frac{1}{\beta^2} \frac{d\bar{p}'}{d\bar{x}} \left(1 - \frac{2(e^{\beta} - 1)}{\alpha(e^{\beta} + 1)} \right) \quad (1.84)$$

în α , se pot defini
expresiile unitare adimensionale ale debitelor Poiseuille, Brinkman respectiv Darcy :

$$\bar{q}_P = -\frac{1}{12} \frac{d\bar{p}'}{d\bar{x}} \quad (1.85)$$

$$\bar{q}_B = -\frac{1}{\beta^2} \frac{d\bar{p}'}{d\bar{x}} \left(1 - \frac{2(e^\beta - 1)}{\alpha(e^\beta + 1)} \right) \quad (1.86)$$

$$\bar{q}_D = -\frac{1}{\beta^2} \frac{d\bar{p}'}{d\bar{x}} \quad (1.87)$$

curgerii comparativ cu cazul anterior.

$$\bar{\bar{q}}_P = -\frac{1}{12} \quad (1.88)$$

$$\bar{\bar{q}}_B = -\frac{1}{\beta^2} \left(1 - \frac{2(e^\beta - 1)}{\beta(e^\beta + 1)} \right) \quad (1.89)$$

$$\bar{\bar{q}}_D = -\frac{1}{\beta^2} \quad (1.90)$$

În Fig.1.35 de mai jos este reprezentat $\Re$ a debitelor unitare adimensionale, mai sus, comparativ cu cea determinat în cazul anterior. analiza graficului din Fig.1.36 nbaum [29] poate fi aplicat

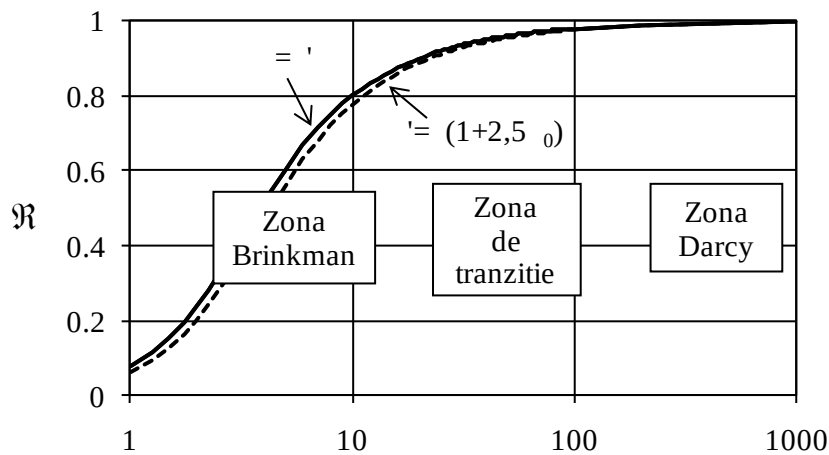


Fig.1.35. raportul debitelor normate adimensionale

1.4.2.6 Determinarea presiunilor la expulzarea între două discuri

Caracterizarea fenomenului de expulzare a fluidului dintr-un mediu se va face în la paragraful 1.4.2.3. înscozitatea folosind formula lui Einstein. Respectând acei

portant

$$\bar{p}' = \frac{\beta^2}{4} \frac{1}{\left(1 - \frac{2(\text{ch}\beta - 1)}{\beta \text{sh}\beta} \right)} (1 - \bar{r}^2) \quad (1.91)$$

$$\bar{F}'_B = -\frac{\pi\beta^2}{8} \frac{1}{\left(1 - \frac{2(\text{ch}\beta - 1)}{\beta \text{sh}\beta} \right)} \quad (1.92)$$

1.5. CONCLUZII

XPHD

La nivel un interes real privind utilizarea de materiale poroase îmbibate cu capacitatea de amortizare a materialelor poroase îmbibate sau a fluidelor cu suspensie de particule în Modelarea structurii a jucat un rol important în dezvoltarea de modele teoretice pentru curgerea fluidelor prin medii poroase. Pentru modelare

aglomerare de particule sau din fibre a fost înlocuit cu diametrul mediu al fibrei/particulei. Parametri precum porozitate, tortuo contribuit la caracterizarea

De-a lungul timpului au fost dezvoltate metode experimentale de determinare a surarea debitului de fluid care curge printr-un material poros pentru o presiune . frecvent pentru diferite materiale poroase la determinarea debitului fluidului în presiune aplicat.

în domeniul s-a bazat pe diferite materiale poroase din categoria spumelor cu porozitate

de a utiliza alte modele, respectiv

a ului B

Folosind rezultate experimentale la are o precizie mai nivele de comprimare atinse.

CAPITOLUL 2. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A PERMEABILITĂȚII UNIDIRECȚIONALE¹

Curgerea unui fluid Newtonian printr-

[69], ceea ce presupune

. Ca urmare, de-a lungul timpului, s-

Mecanismul XPHD stud

[68] [70] se

i permeabilitatea. Astfel

mater

planul longitudinal al

În acest capitol este preze

Lubrificației XPHD. Dispozitivul folosit a fost proiectat în colaborare cu profesorii Mircea

de Organe de m

ia de concepere a unui nou dispozitiv.

comprimare a materialului poros, pentru un interval relativ mare de presiuni.

2.1.

ilitatea este

în lungul firelor i perpendicular pe fire. Ca urmare, fiecare

-

¹ P r i ale acestui studiu, redactate în limba englez , au f cut obiectul unei lucr ri cu titlul *Experimental and theoretical analysis of (water) permeability variation of unwoven textiles subjected to compression* publicat [94]

out-off plane permeability [53]) și
(*in-plane permeability* [52]). Permeabilitatea

O mare parte din studiile experimentale sunt realizate pe dispozitive cu curgere
n
ea
materialului poros care apar la majoritatea dispozitivelor cu curgere unidirecțională. De
unei surse centrale, iar colectarea fluidului se face pe tot conturul.

Recent, în mod constant, metodele experimentale de d

u critic
- RTM).

materialelor izotrope, în caracterizarea materialelor se folosesc

defin

[30]. Gebart [33]

permeabilitate paralelă $\phi_{//}$

permeabilitate perpendiculară $\phi_{\perp}$ pe fibre.

2.2. STANDUL EXPERIMENTAL

experimentale prezentate anterior, s-a dorit conceperea unui perme
poate fi utilizat în determinarea permeabilit

a la presiuni mari. Pentru

cu ajutorul unui senzor.

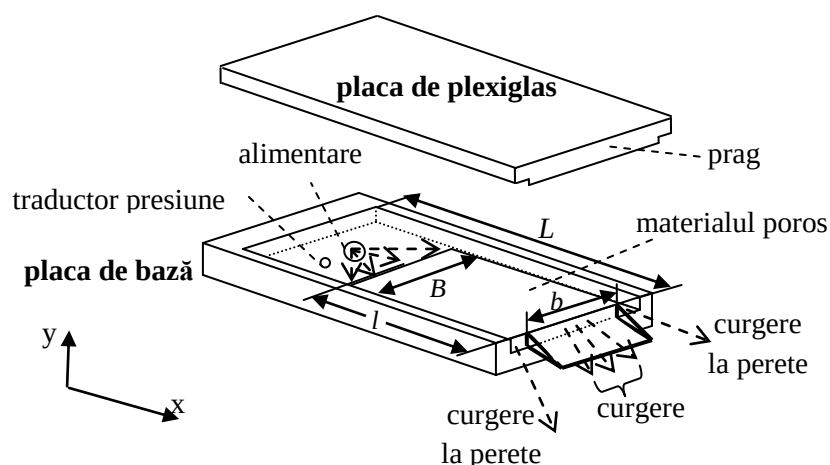


Fig.2.1.

de plexiglas. În Fig.2.1

placă de bază și placă

$L \times B = 300 \times 100 \text{ mm}^2$

Fig.2.2)

În centru este prev

i prinderea de masa de lucru. Pe
nur. Alimentarea se face prin
în cuv printr-un

Tot în

realizat



Fig.2.2.

profilul curgerii, închiderea în partea de sus a pl
plexiglas transparent. Placa de plexiglas (Fig.2.3) este componenta care permite atingerea a
diferite nivele de comprimare ale materialu

materialul trebuie

mm grosime. P
, abaterea de la paralelism pentru ele
,02 mm. gului



Fig.2.3. Placa de plexiglas

În Fig.2.4

[52]
materialului

erea unor nivele mari de comprimare s-au

asemenea comprimarea materialului se poate
 urub pe tot conturul cuvei. Pe timpul
 de metoda de colectare a apei care iese din dispozitiv.

Fig.2.4. Permeametrul ansamblat

-
 cu precizie de 0,1 *bar*. Regulatorul a permis reducerea presiunii la intrare de la aproximativ 3
bari (presiunea de alimentare de la ,1 *bari*.
 o problem major
mm

fost apoi înlocuit cu un altul cu diametrul mai mare, diametrul 3 *mm* (Fig.2.5 *stânga*
 cu o Fig.2.5 *dreapta*). Suplimentar o brida
 -a lungul
 Fig.2.4).

Fig.2.5. *stânga* *auciuc (dreapta)*

Experimentele

Începutul curgerii prin materialul uscat s-a putut vizualiza forma frontului de curgere. Acesta

-

au fost luate

permeametrlui (Fig.2.6 *stânga*).

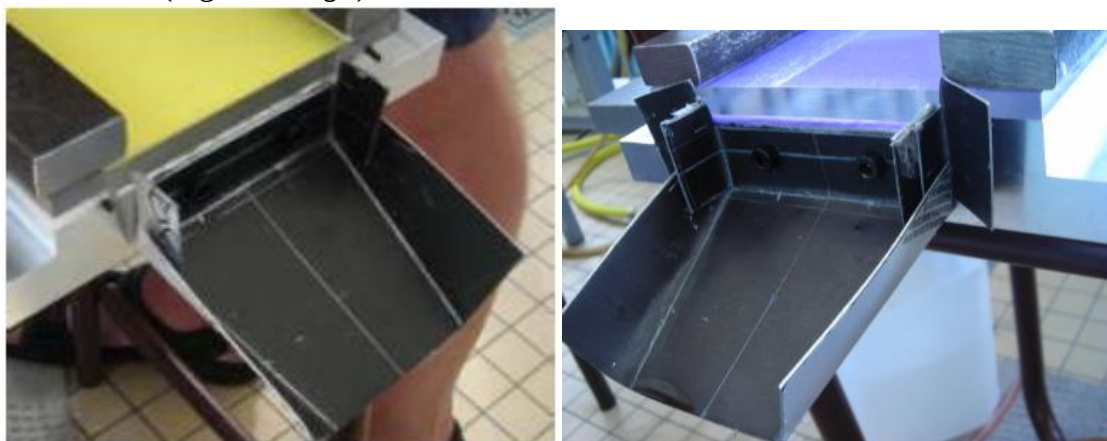


Fig.2.6.

stânga

dreapta)

imea de colectare a fost $b=83 \text{ mm}$. La presiuni ridicate apa care curgea pe lateralul materialului atingea

a

Fig.2.6 *dreapta*).

Presiunile mari de lucru, pentru nivele de comprimare mici au dus în unele cazuri la

Fig.2.7).

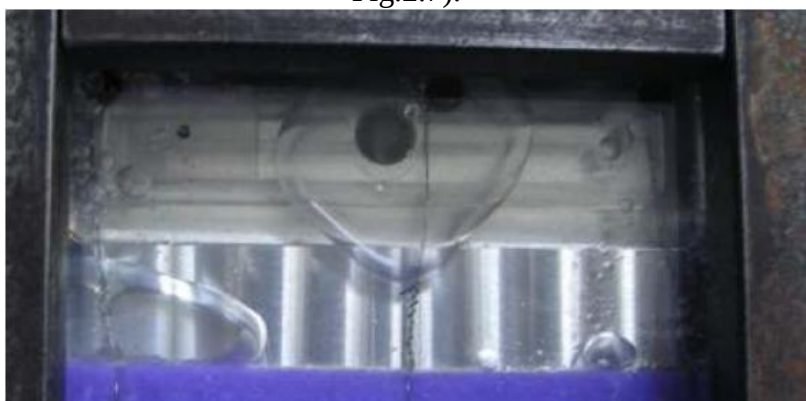


Fig.2.7.

înregistrarea

2.3. MATERIALUL UTILIZAT

unui singur material: *pâslă*

-

, de diametru aproape constant. Dispunerea firelor

materialului

ice

e de curgere.

$l \times B = 245 \times 100 \text{ mm}$.

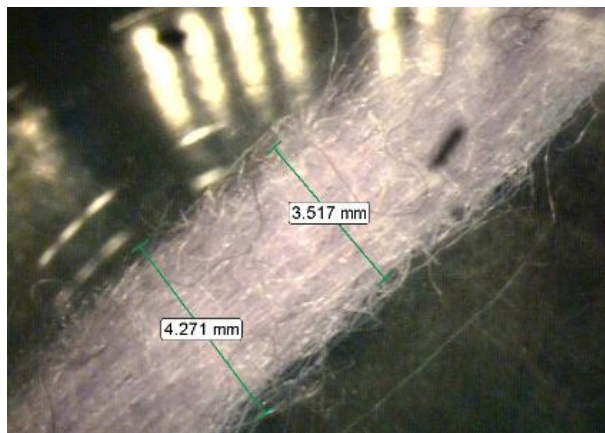
$h_0 = 7 \text{ mm}$

narea materialului s-

mm. În

Fig.2.8 se po

mar

**Fig.2.8.**

Firele sunt foarte lungi, iar densitatea lor este foarte mare. Materialul nu este hidrofil, torile asupra -

densitatea firelor scade. Experimentele au ar tat

-au considerat neglijabile. Cu ajutorul microsopului

Fig.2.9), ob inându-se valori între $28 \mu\text{m}$ i $42 \mu\text{m}$. Valoarea medie a diametrului firului s-a stabilit ca fiind de $36 \mu\text{m}$.

**Fig.2.9.**

spectrometru Shimadzu Miracle 10. Acest aparat foloseste un interferometru Michelson cu

probabilitate de 0,948,

Fig.2.10).

-a dovedit, cu o

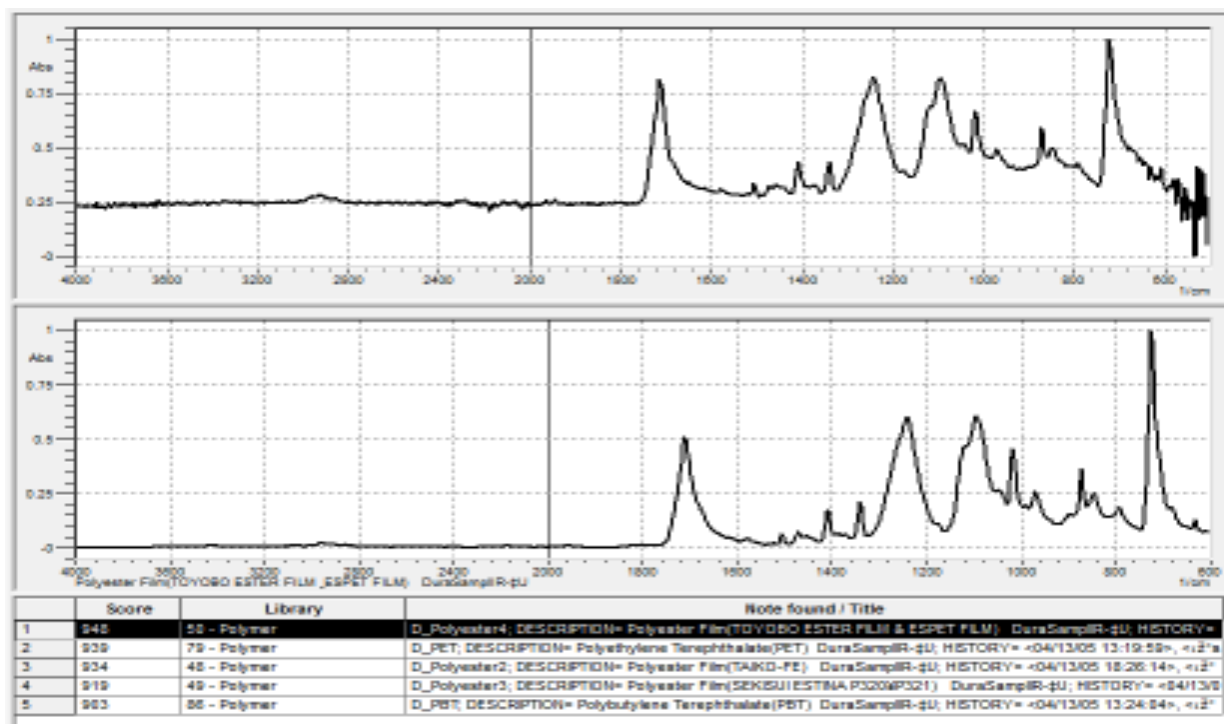


Fig.2.10.

elimina aerul blocat în pori. Suplimentar, pen

ui

-a calculat prin raportarea

$$\varepsilon = 0,8.$$

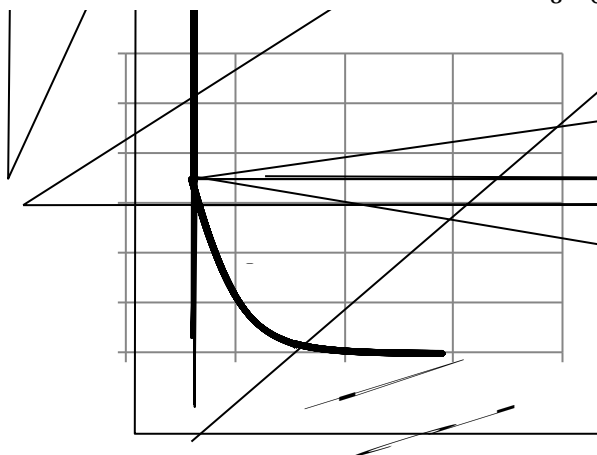


Fig.2.11.

uscat la compresie

materialului

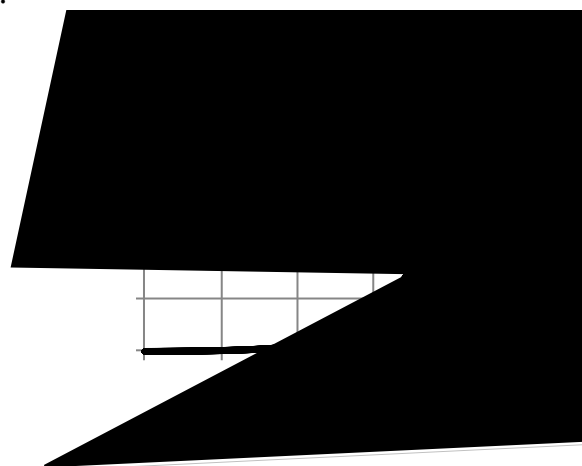


Fig.2.12.

-un
de deformarea

compresiune a materialului a

kN

ile de 45 mm au putut fi

$V=0,5 \text{ mm/s}$.

Comprimarea materialului s-

mm.

Fig.2.12, tensiunea nu variaza liniar cu

saturare. Comprimarea s-

mm

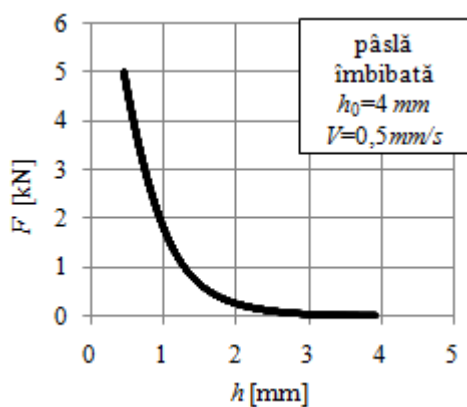


Fig.2.13.

îmbibat la compresie

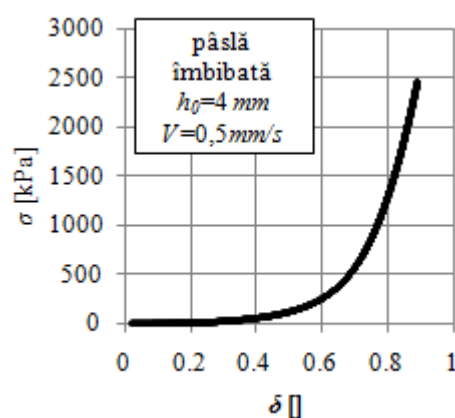


Fig.2.14.

2.4. REZULTATE EXPERIMENTALE

presiuni de

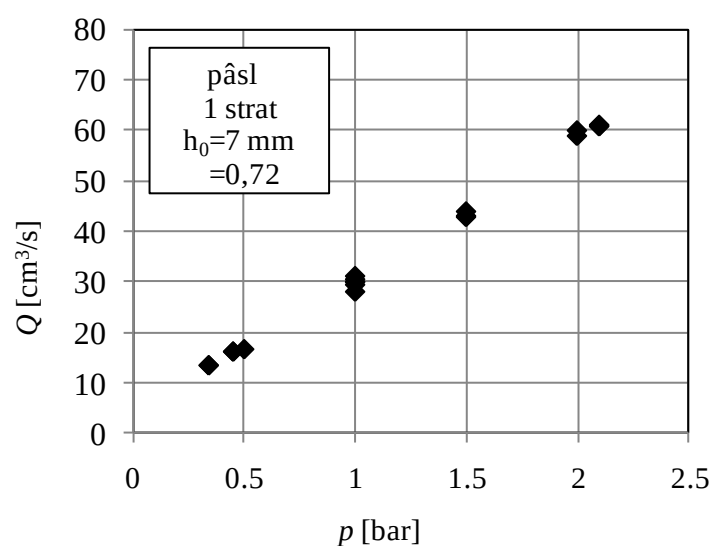


Fig.2.15.

$\varepsilon=0,72$

- a.
- b. Temperatura în camera unde au avut loc experimentele a variat sub 2°C .
- c.

d.

lxb

e. Pentru corelarea porozit

$$h_0(1 - \varepsilon_0) = h(1 - \varepsilon) \quad (2.1)$$

în

Fig.2.15

 ε

m se poate vedea,

ceste cazuri au

Fig.2.16 i Fig.2.17. În

Fig.2.16 se poate observa o e

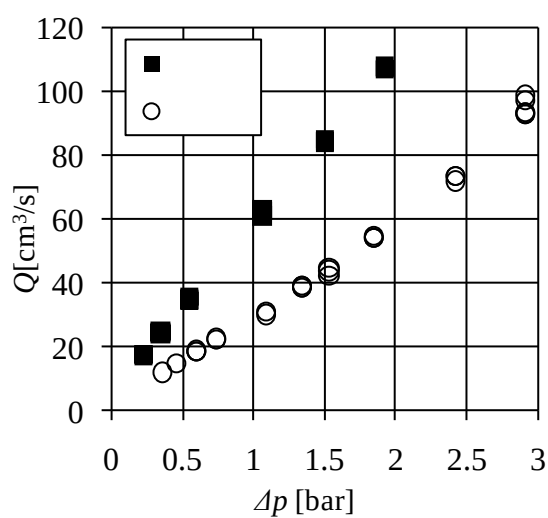


Fig.2.16.

[94]

bar. De exemplu pe graficul din Fig.2.16 se

unii.

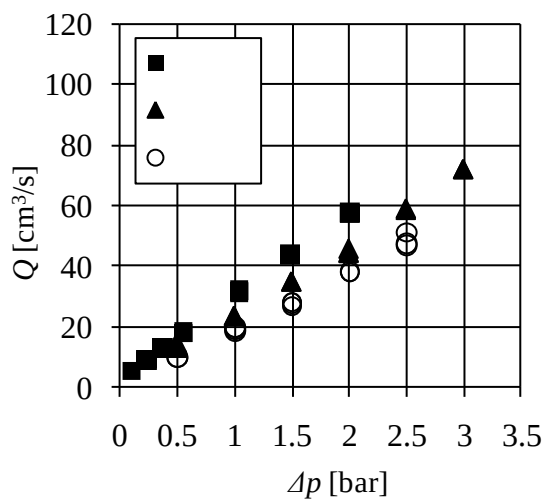


Fig.2.17.

în

i [94]

2.5.

a rezultatelor experimentale s-
un gradient
model de curgere. -a mai afirmat anterior, legea lui Darcy este cel mai utilizat
model pentru curgerea prin medii poroase. Debitul de curgere printr-
e prin materialul poros
((1.50)).

aterea de la

poroase:

$$Re = - \frac{\rho \sqrt{\phi}}{\eta} u \quad (2.2)$$

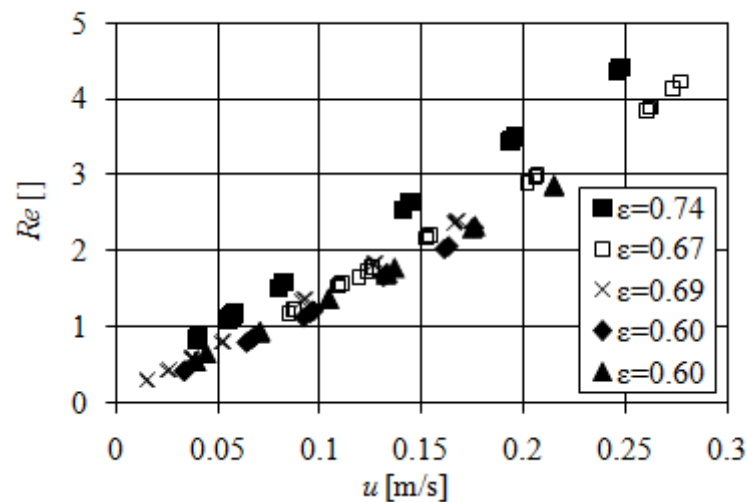


Fig.2.18.

în

Pentru $Re < 1$ curgerea fluidului este considerată laminară. În literatura de specialitate,
[6], [13],[41],
[88]]
÷5 [4], [41].

toate experimentele este de la 0,3 la 5. În Fig.2.18

în

10.

-

încercare

Fig.2.15 i Fig.2.16. Panta unei drepte trasate
prin rezultatele experimentale folosind meto
permeabilitatea Darcy. $V\hat{t}$
 $\eta = 0,001 Pa \cdot s$. Este

nsitatea apei $\rho = 1000 kg/m^3$. Valorile
în intervalul $10^{-10} \div 5 \cdot 10^{-10} m^2$.

S-

curge

interiorul materialului plecând de la va

a în considerare

com
modelului. În acest context,

$$\hat{\eta}' = \eta(1 + 2,5(1 - \varepsilon_0))$$

[25], [26], prin

$$u = C_1 \sinh(\omega y) + C_2 \cosh(\omega y) - \frac{\phi}{\eta} \frac{dp}{dx}, \quad (2.3)$$

unde $\omega = \sqrt{1/(\phi(3,5 - 2,5\varepsilon))}$. Constantele de integrare C_1 i C_2 au fost determinate în
 $y = 0$ $y = h$ viteza de

$u = 0$. În final expresia vitezei devine:

$$u = \frac{\phi}{\eta} \frac{dp}{dx} \left[\frac{1 - \cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \sinh(\omega y) + \cosh(\omega y) - 1 \right] \quad (2.4)$$

$$Q = b \int_0^h u dz = -b \frac{\phi}{\eta} \frac{dp}{dx} \left[h - 2 \frac{1 - \cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \right] \quad (2.5)$$

de presiune ridicat.

este permeabilitatea Brinkman. Rezultatele din Fig.2.19

studierea în continuare a modelului Brinkman.

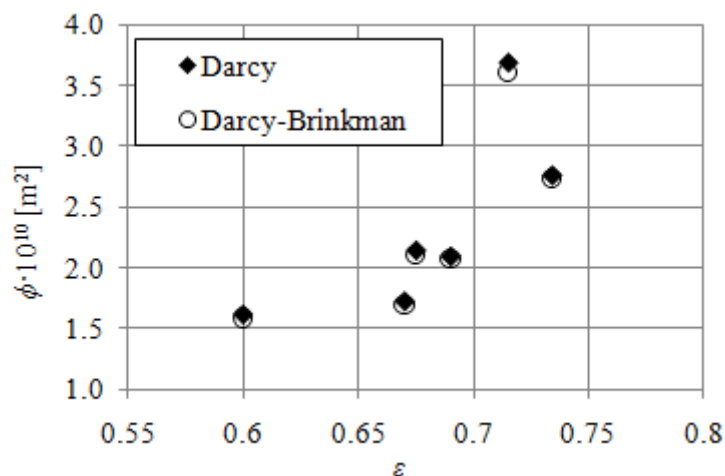


Fig.2.19.

lui Brinkam

legii lui Darcy scade. În aceste
 includerea în legea lui Darcy a termenului Dupuit-Forchheimer [31]. Legea lui Darcy devine
 legea Darcy-Forchheimer [13], [88], (1.53),

coeficientul Forchheimer C_f

aproximarea cu regresie

$-0,039 \pm 0,12$.

În Fig.2.20

$$A=l \cdot b$$

bitului de curgere Q prin

Pentru un gradient de presiune cunoscut, $dp/dx = \Delta p/l$

presiuni mari de alimentare. Acest lucru este valid doar pentru valori pozitive ale C_f . Pentru unele rezultate experimentale, coeficientul determinat C_f este negativ iar legea Darcy-

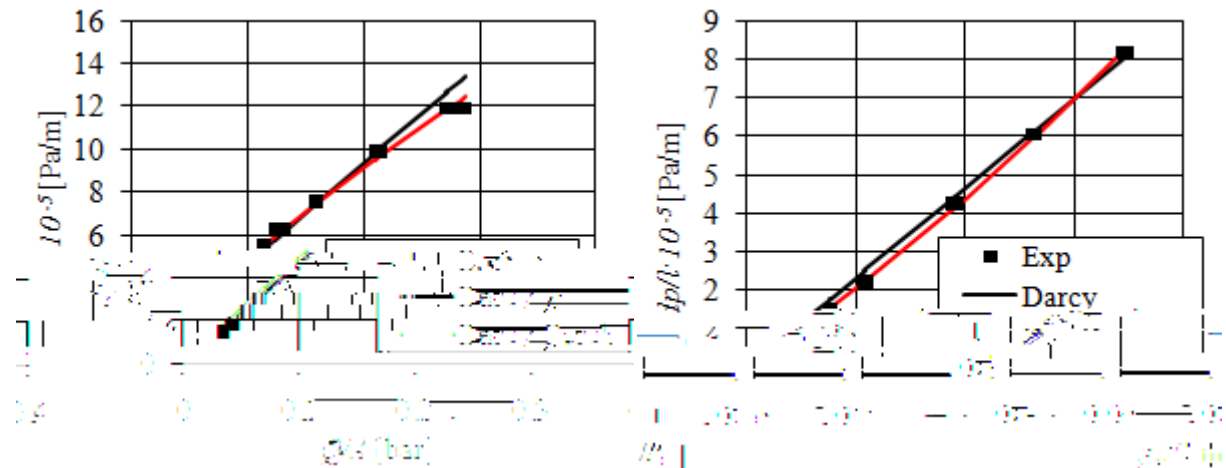


Fig.2.20.

stânga

- dreapta

În Fig.2.21 este realizat

i Darcy-

mai mari de curgere.

Cân

C_f

i valorile determinate cu ambele legi devin apropiate.

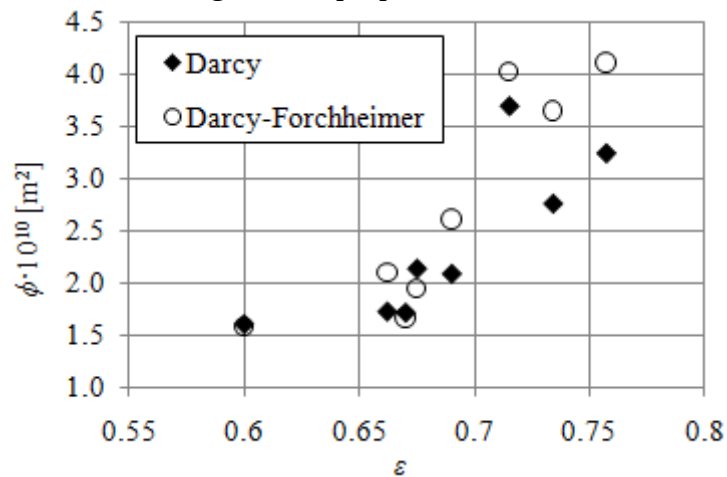


Fig.2.21.

Forchheimer

experimentale au fost ajustate

Fig.2.22

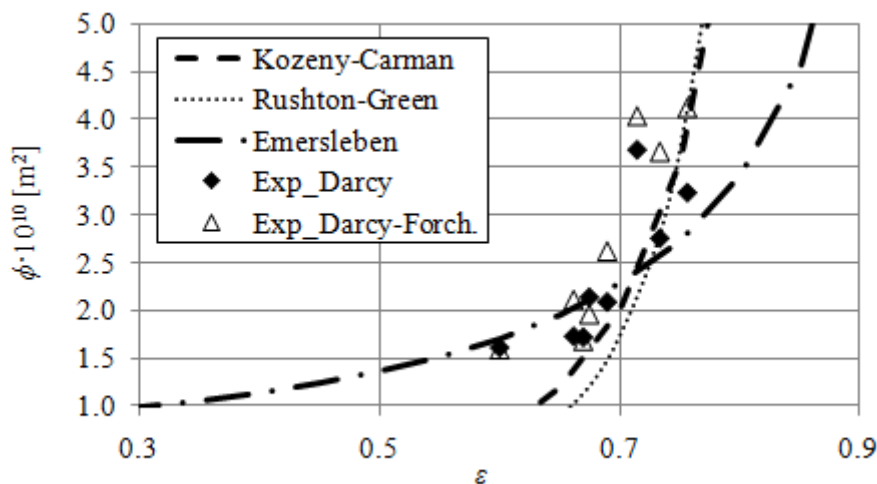


Fig.2.22.

Kozeny-Carman ($k = 1,54$), Emersleben ($k_{EM} = 19,4$

folosind modelele
-Green ($k_{RG} = 5,94$)

rezultatele experimentale

a au fost
[27] i modelul Rushton-

Green [85]:

- modelul lui Emersleben(EM) [27]:

$$\phi_{EM} = d_f^2 / [k_{EM} (1 - \varepsilon)^2], \quad (2.6)$$

$$k_{EM} = 16.$$

- modelul Rushton-Green model (RG) [27]:

$$\phi_{RG} = \frac{d_f^2 \varepsilon^3}{16 \cdot k_{RG} \cdot (1 - \varepsilon)^3} \quad (2.7)$$

Tabelul 2.1

-Green

Modelul	Legea Darcy	Legea Darcy-Forchheimer
Kozeny-Carman	$k=1,54$	$k=1,27$
Emersleben	$k_E=19,40$	$k_E=20,50$
Rushton-Green	$k_{RG}=5,94$	$k_{RG}=4,86$

Ambele modele au fost construite pentru structuri formate din fire lungi monofilare. Modelul lui Emersleben (vezi Tabelul 1.1) a fost construit pentru curgerea unui fluid

Reynolds mic. Modelul Rushton-Green (vezi Tabelul 1.1) a fost construit în urma unor experimente de determinare a permeabilității bazate pe expulzarea unui fluid cu gaz. Prin urmare Modelul Rushton-Green este aplicabil în cazul curgerii în medii poroase. Constanta Rushton-Green este

$$k_{RG} = (1 - \varepsilon)k \quad (2.8)$$

Prin ajustarea rezultatelor experimentale folosind metoda celor

cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate, s-a realizat o corelare între rezultatele experimentale și cele teoretice. Pe grafic a fost prezentată corelarea dintre rezultatele experimentale și cele teoretice. Ajustarea rezultatelor experimentale la modelul Rushton-Green a fost realizată folosind metoda celor mai mici pătrate. Corelarea dintre rezultatele experimentale și cele teoretice este prezentată în figura 2.7.

2.7. CONCLUZII

În acest capitol a fost abordat experimental și teoretic studiul proceselor de curgere

compresibile și incompresibile. De asemenea

Presiunile de lucru au atins valoarea de 3 bari simultan cu atingerea unor nivele ridicate de comprimare.

liniar cu gradientul de presiune în acord cu legea lui Darcy. Variația presiunii nu influențează rezistența

termenul Dupuit-Forchheimer. De asemenea

Kozeny-Carmen. Confruntarea rezultatelor experimentale cu cele teoretice s-a realizat folosind legea lui Darcy. Rezultatele teoretice au fost comparate cu cele experimentale.

CAPITOLUL 3. EVALUAREA COMPORTAMENTULUI LA COMPRESIUNE PENTRU MATERIALE POROASE ÎMBIBATE PARȚIAL CU FLUID

În general, procesul de expulzare XPHD
În studiile experimentale prezentate în acest capitol s-a
procesului de deformare
comportamentului la expulzare a
[66],
[70][72]
 σ aflate în intervalul 0,2÷0,8 [34] -a observat
apar zone de material unde fluidul este expulzat în
esc valorile admise ale compactit
analizat cu ocazia studiilor experimentale efectuate folosind standul CETR-UMT2 cu senzorul
N.

sferă/plan
nd, rezultatele au
fost completate i pe *disc/plan*.

3.1. MATERIALE UTILIZATE

Pentru experimentele prezentate în acest capitol s-au utilizat trei materiale (Fig. 3.1) cu
LJ2 material compozit, *LJ3*
LJ4 e multifilare.

Fig. 3.1. ~~10-102~~

În Tabelul 3.1 sunt prezentate caracteristicile structurii materialelor enumerate mai sus

Tabelul 3.1 Caracteristicile materialelor testate

Denumire	Tipul	Compoziția	Grosime inițială h_0 uscat	Grosime inițială h_0 umed
LJ2		Fibre sintetice	4,5 mm	4,8 mm
LJ3			5 mm	4 mm
LJ4		80% poliester	4 mm	3,5 mm

Utilizarea acestor materiale în cadrul proceselor de expulzare a necesitat determinarea

gal cu volumul W_s . În Fig. 3.2 ca în apa din

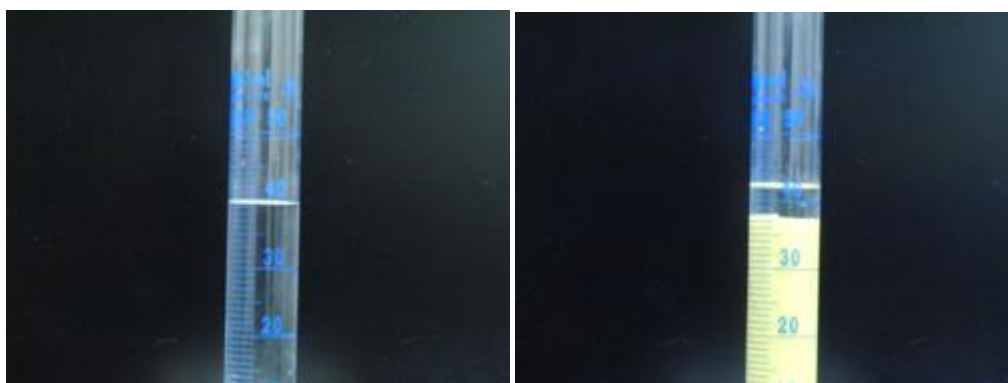


Fig. 3.2. -un material poros

Volumul W_s astfel determinat este raportat la volumul total W determinat prin

$$\varepsilon = 1 - \frac{W_s}{W} \quad (3.1)$$

determinate pentru cele trei materiale utilizate:

Tabelul 3.2

MATERIALUL	POROZITATE (ε)	COMPACTITATE (σ)
LJ2	0,90	0,10
LJ3	0,94	0,06
LJ4	0,93	0,07

- precizia cu care s-au îmbibat

- scufundarea materialului în fluid în interiorul porilor. -
vacuarea
comprimarea materialului pentru eliminarea aerului. Rezultatele acestei metode au fost

;

-
tr

-

re cantitate

Fig. 3.3

îmbibat.

Pentru toate materialele utilizate s-a observat o modificare a dimensiunilor
-
-au
redus volumul prin îmbibare -a redus grosimea cu peste
-a observat o
vizibile a struct
a tensiunilor superficiale.

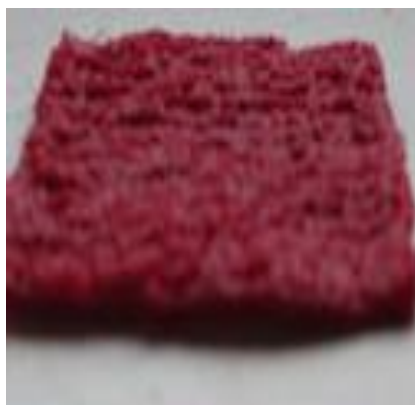


Fig. 3.3. Stânga LJ4 de diferite culori uscat, Dreapta

3.2. STANDUL EXPERIMENTAL

Toate studiile experimentale pentru expulzarea XPHD care vor fi prezentate
ni si
Tribologie utilizând standul CETR-UMT2 prezentat în Fig. 3.4. Acesta este un stand

În conformitate cu schema din Fig. 3.4

Fig. 3.5,

- *Unitatea de control*: Aceasta are ca misiune controlul standului propriu-

Instruments NI-

kHz.

- Unitatea de testare: Pentru unitatea de testare se pot defini trei componente: corpul

Fig. 3.4.

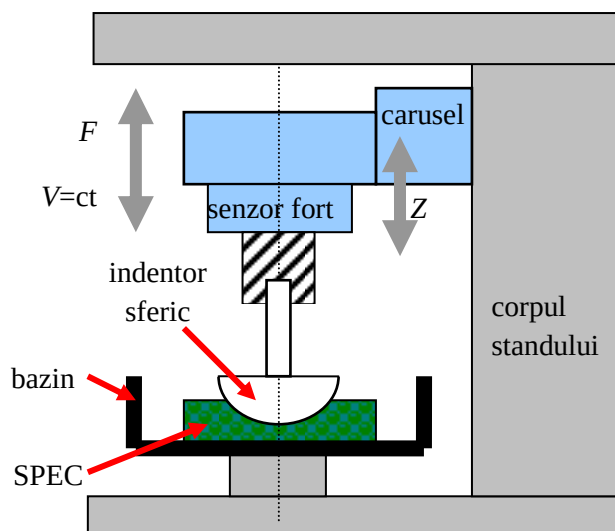


Fig. 3.4. Schema de compunere a standului CETR UMT2

μm în ambele

-10

mm/s.

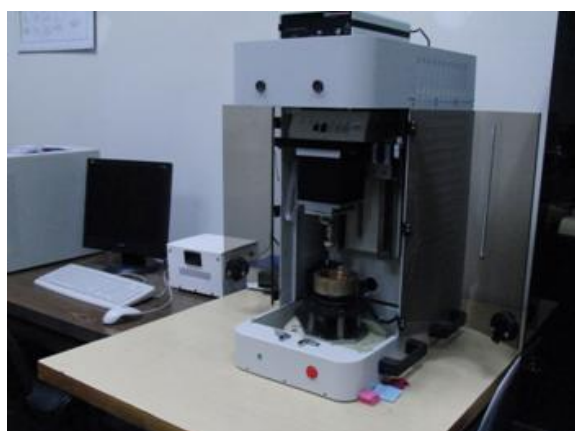


Fig. 3.5. Standul experimental CETR-UMT2

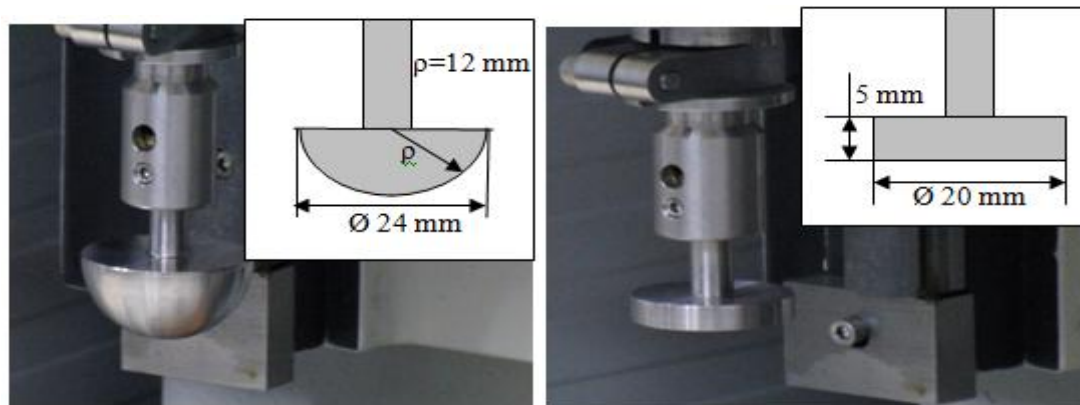


Fig. 3.6. Indentorul sferic (stânga)

(dreapta)

contact disc/plan prin utilizarea unui indector sferic, respectiv a unui indector disc. Indectorul sferic are un diametru de 24 mm (Fig. 3.6 stânga) și un indector cilindric care are un diametru de 20 mm (Fig. 3.6 dreapta).

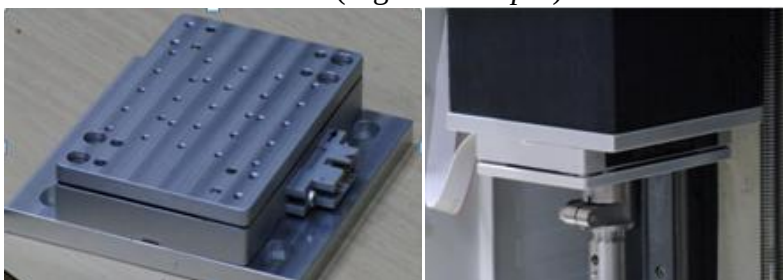


Fig. 3.7. -20: vedere de ansamblu (stânga), montat pe stand (dreapta)

Fig. 3.7 stânga cum se poate vedea în Fig. 3.7 dreapta

disponibili sunt de 10 N, 50 N
îmbibat este DFH-

N. Senzorul utilizat pentru stratul de material poros N.

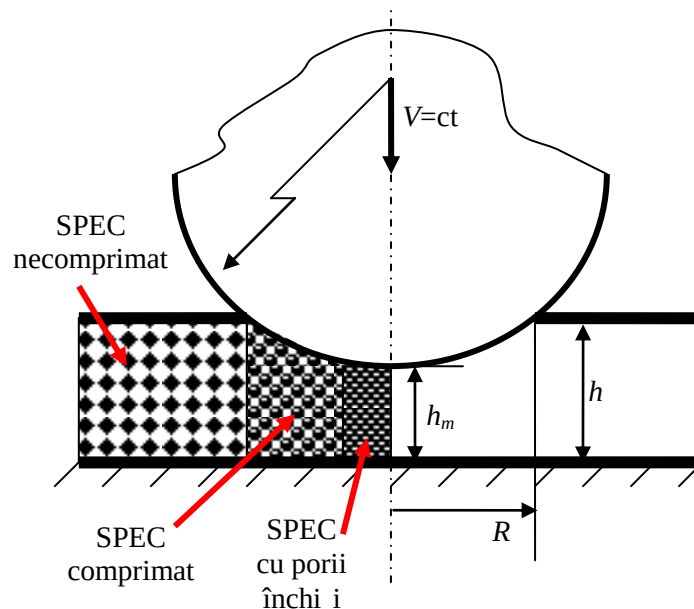


Fig. 3.8. CETR-UMT2 -plan

- *sferă-plan* (Fig. 3.6 stânga)
Indectorul sferic permite atingerea unor grosimi mai mici ale stratului de material poros. La un moment dat este înlocuit treptat de deform *disc-plan* (Fig. 3.6 dreapta)
Utilizarea indectorului este înlocuit treptat de deform *disc-plan* (Fig. 3.6 dreapta) avantaj în studierea comportamentului materialelor poroase extrem de compresibile supuse la compresiune.

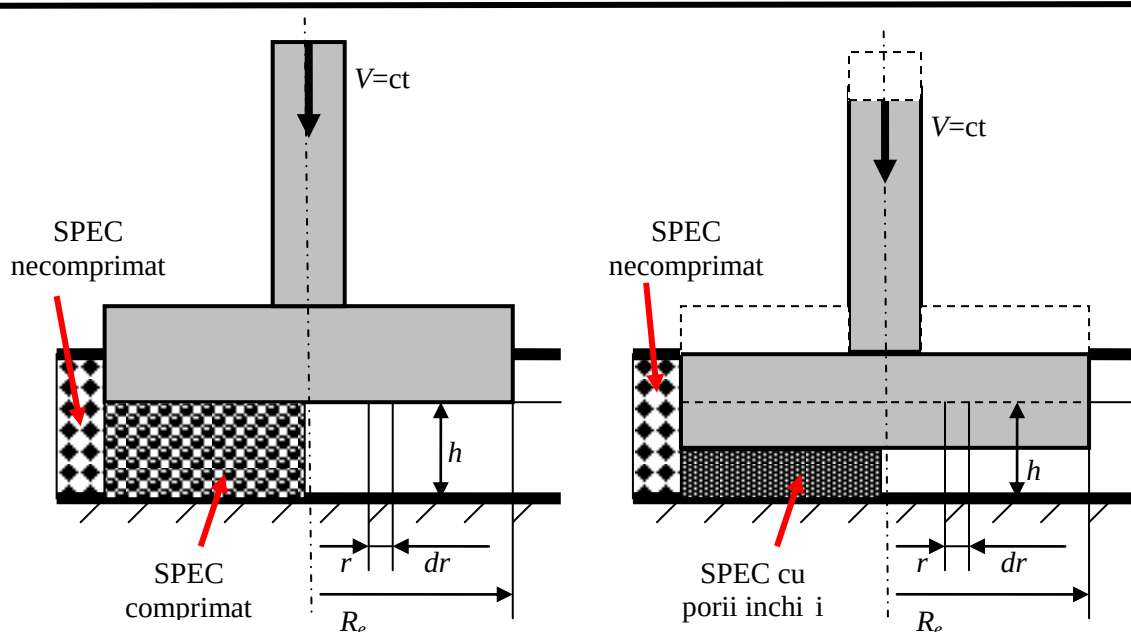


Fig. 3.9. CETR-UMT2

(dreapta
stânga

de sprijin. De asemenea, f

caracteristice unui comportament mixt.

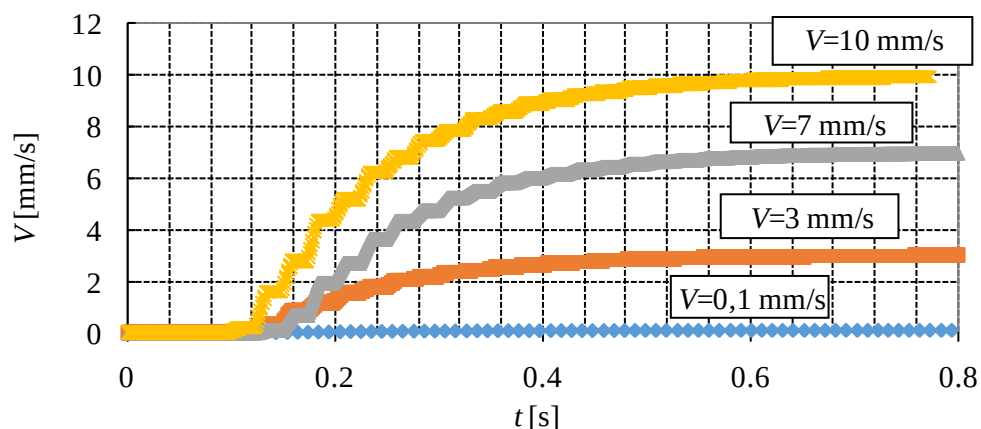


Fig. 3.10.

decomprimare)

e comprimare, caruselul a fost a ezat deasupra limitei superioare a materialului necomprimat pentru a asigura suficient lucru nu mai poate fi asigurat. În Fig. 3.10 se poate observa durata de accelerare a indenterului în

3.3.

Materialele uscate

mm. Înainte de îmbibare, la comprimarea materialului uscat.

În experimentele anterioare efectuate de Ilie [45] [76] au fost utilizate superficiale mai mici a apei, materialele alese au fost îmbibate prin scufundarea lor într-un

materialului cu vitezele de 0,1, 3, 7 mm/s pentru con -
 mm/s -
 mm
 . Pe baza graficul din Fig. 3.10 mm/s. 0,6 s s-a
 30%
 -
 de nivel 60% a fost realizat prin

Comprimarea pe standul CETR-UMT2 s-
 mari. Aducerea materialului la nivelul de îmbibare de 30% s-a realizat prin o a doua stoarcere
 a materialului folosit anterior. Experimentele de comprimare s-
 descrise anterior.

mm/s dar
 a standului.
 grosimii sale foarte mici a fost utilizat
 -
 materiale studiate.

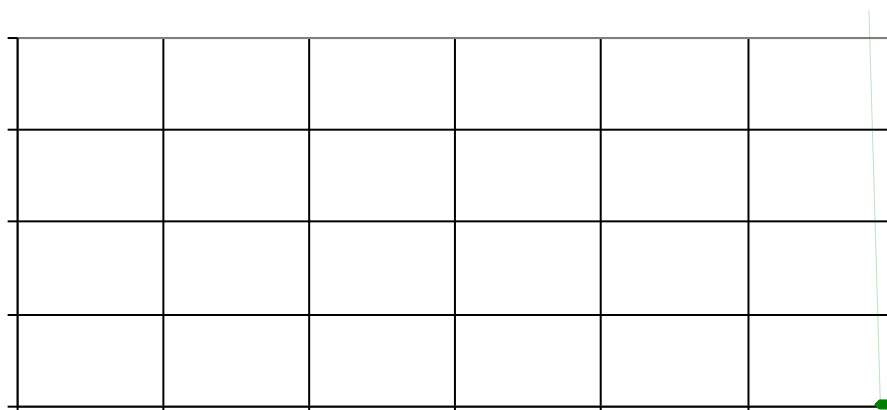
3.4. REZULTATE EXPERIMENTALE

3.4.1 Configurația sferă-plan

-plan au fost generate rezultate experimentale pentru toate
 V= 0,1 mm/s.
 În Fig. 3.11
 sferic s- în materialului h_m . Grosimea stratului de material h_m este
 - N au permis atingerea de grosimi mici de
 material.
 indenterului de aproximativ 0,2 mm.

,
 pentru fiecare
 are un comportament specific. În Fig. 3.11

mm/s.



are:100%

Fig. 3.11.

În Fig. 3.12

-a observat c

-a

a

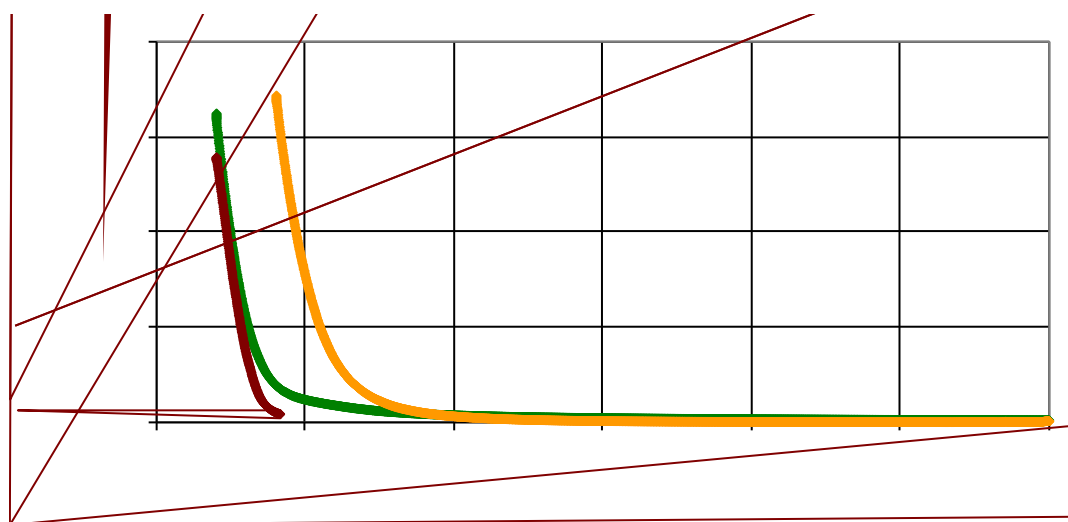


Fig. 3.12.

În Fig. 3.13

comprimarea

decomprimarea

poros are utilizare

r

-a

În Fig. 3.13 se poate

0,4 mm

Standul CETR-UMT2 nu permite analizarea fenomenului
acesteia se

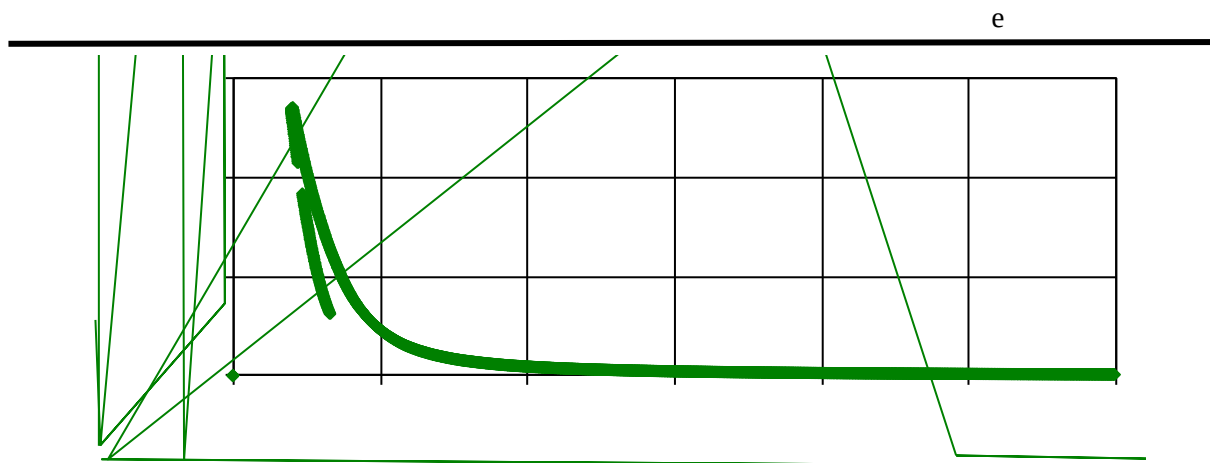


Fig. 3.13.

Pentru amplificarea efectului XPHD s-au efectuat experimente suplimentare pentru viteze mai mari de expulzare, respectiv: 3, 7, 10 mm/s.

timp. Pe graficele care vor fi prezentate se poate
(Fig. 3.14, Fig. 3.15, Fig. 3.16

urmăre, rezultatele la mm/s. Ca de 10 mm/s nu au mai fost prezentate.

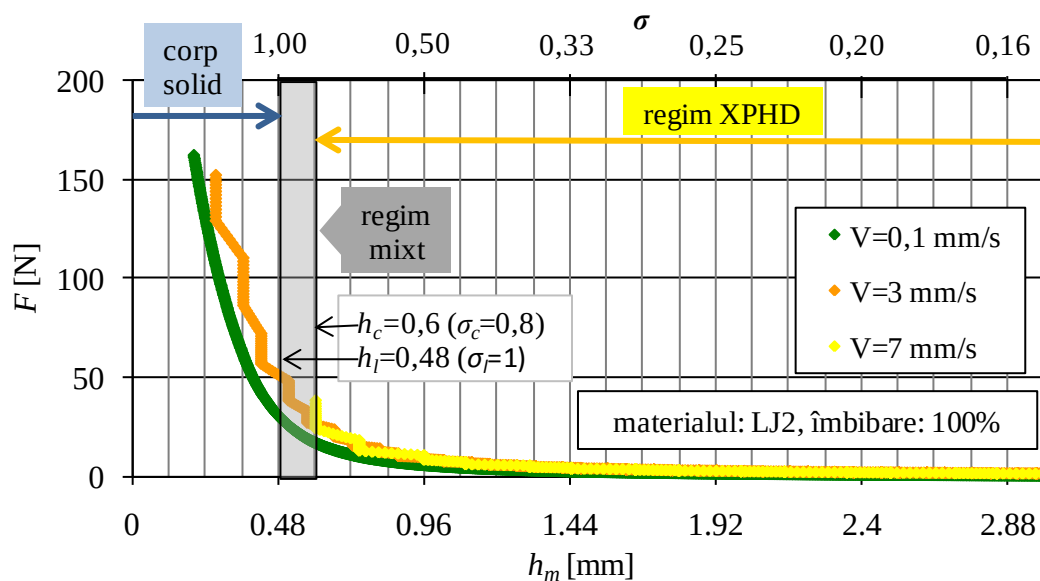


Fig. 3.14.

comprimare, în zona grosimii minime

În graficul din Fig. 3.14 este prezentat
materialului poros LJ2 îmbib
mm/s.

i de 0,1 mm/s. Se pot observa
e al sistemului UMT pentru viteze mai mari de 5

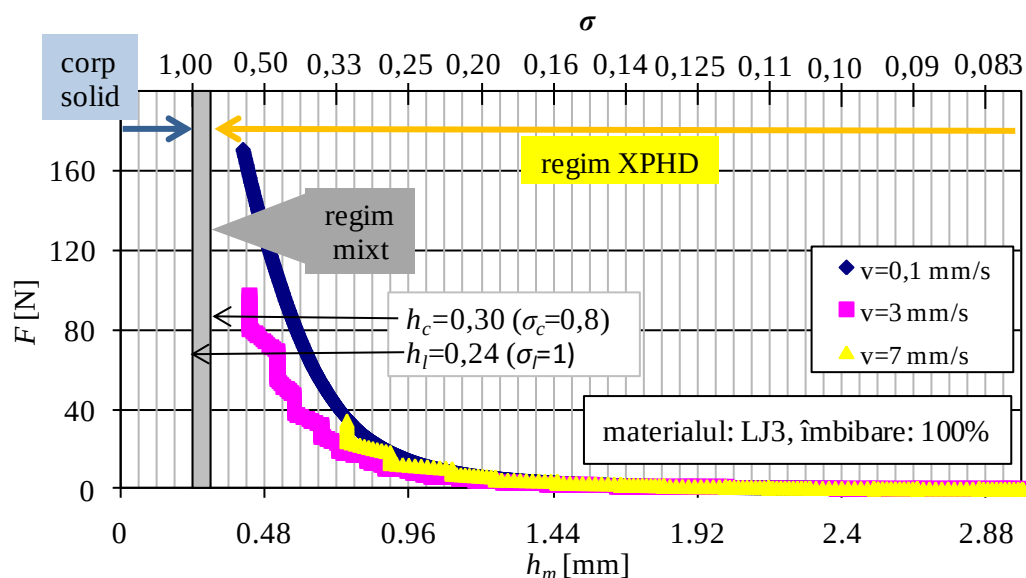


Fig. 3.15.

comprimare, în zona grosimii minime

În graficul din Fig. 3.15
LJ3 pentru trei viteze diferite de expulzare.
viteza de 0,1 mm/s

mm/s i 7 mm/s, în dezacord cu teoria XPHD

atingerea unor grosimi mai mici de

mate
mm/s

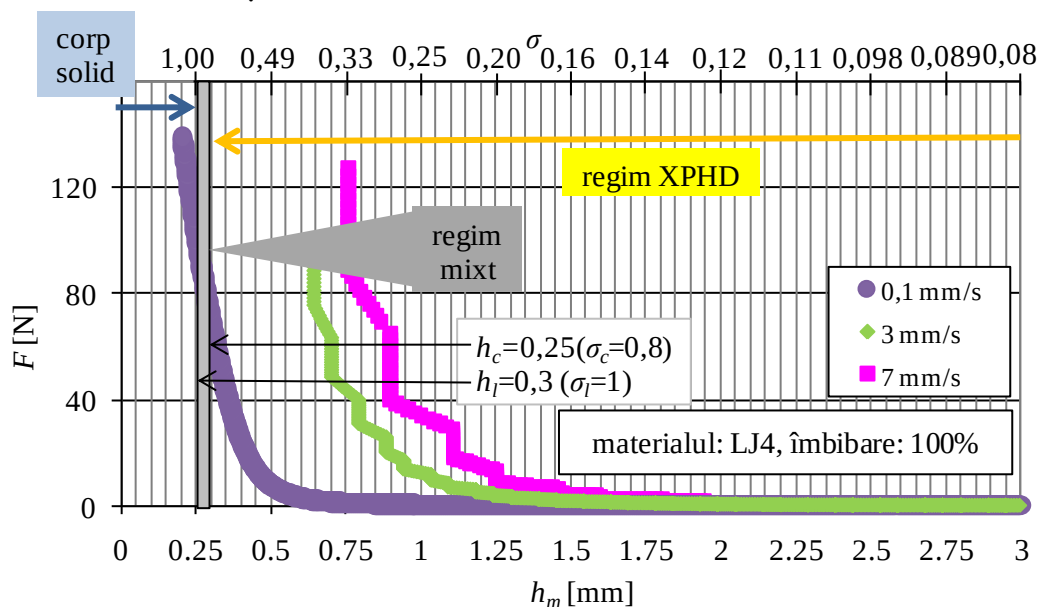


Fig. 3.16.

comprimare, în zona grosimii minime

Fig.

3.16 se poate observa comportamentul la expulzarea materialului îmbibat.

pentru acest material

cel mai bine

XPHD de viteza cu care

are loc expulzarea.
cu viteza de expulzare.

materialului iese din zona XPHD fenomen care în centru comportamentul la deplasarea indentorului.

deformare [72], p în timpul procesului de h_c începând de la care XPHD. În tabelul de mai jos sunt determinate valorile grosimii critice h_c determinat pentru fiecare material pe

$$\sigma_0 \cdot h_0 = \sigma_c \cdot h_c \quad (3.2)$$

critice $\sigma_c = 0,8$, procesul de expulzare în regim XPHD deoarece pentru valori mai mici . Conform Ghaddar [29], [34] r Kozeny-Carman se poate aplica doar pentru intervalul $\sigma = 0,2 \div 0,8$.

$\sigma_l = 1$ întreaga cantitate de -au închis, se poate determina pentru toate materialele $\sigma \cdot h = ct.$

h_l
În Tabelul 3.3 se po în devine mixt.

Tabelul 3.3 Valoarea grosimii critice pentru materialele studiate

Denumire	Compactitate inițială σ_0	Grosime inițială umed h_0	Grosime critică h_c	Grosime limită h_l
LJ2	0,10	4,8 mm	0,6 mm	0,48 mm
LJ3	0,06	4 mm	0,3 mm	0,24 mm
LJ4	0,07	3,5 mm	0,3 mm	0,25 mm

au fost marcate pe graficele care în a marc limita de la XPHD. În Fig. 3.14, e la care procesul de expulzare nu mai are loc doar XPHD.

considerând valorile determinate ale

expulzare în *regim mixt*.

Pentru materialul LJ2 se poate indentorului sferic nu a permis atingerea grosimii critice h_c . Determinarea grosimii critice s-a

-a dovedit asemenea nivelul de îmbibare pori.

Pentru materialul LJ4 prin comprimare au fost atinse ambele limite h_c h_l .

Fig. 3.16

pentru grosimea de aproximativ $0,75\text{mm}$

de comprimare. Efectele XPHD sunt puternice pentru viteze de expulzare mai mari de 1 mm/s .

Pentru straturile poroase extrem de compresibile îmbibate cu fluid, s-a încercat

material poros

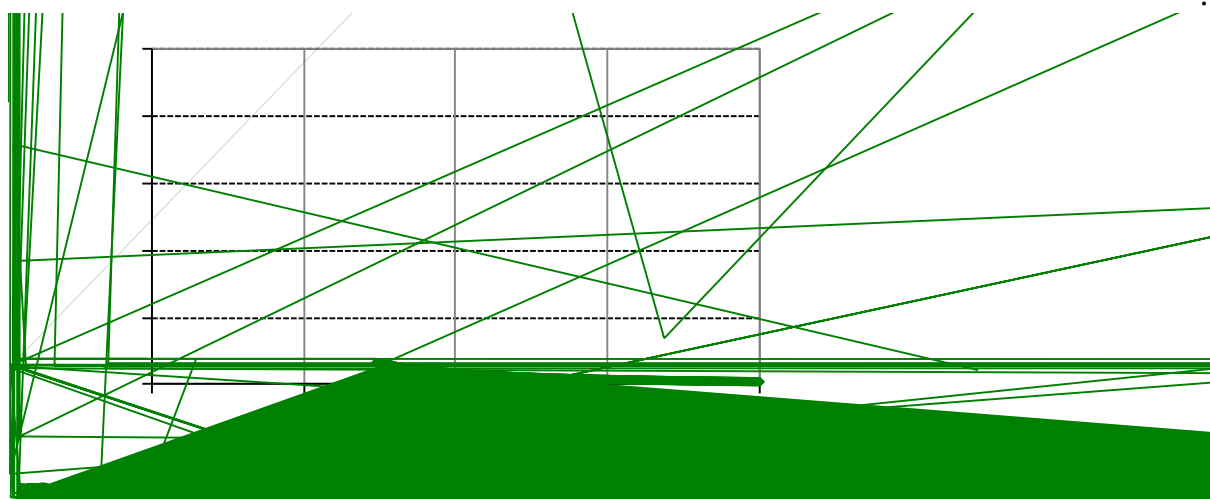


Fig. 3.17.

uscat

i pentru materialul

În Fig. 3.17
expulzare în

lui XPHD

XPHD, care sunt indepedente de cantitatea de f

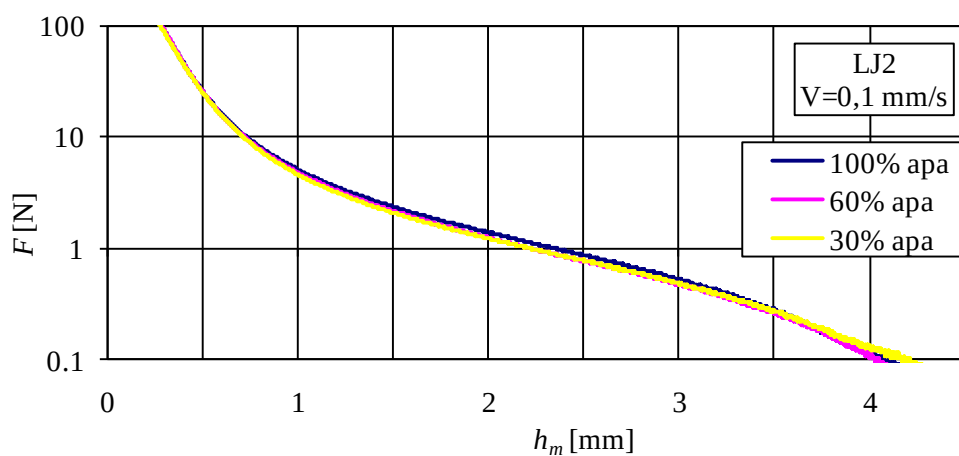


Fig. 3.18.

ei

pentru materialul LJ2 aflat la diferite nivele de

Graficul din Fig. 3.17
semnificativ mai mare decât

lui LJ2 prin uscare. S-

pierde din elasticitate.

i zone

în

Fig. 3.18 se poate

N

prin stoa

XPHD

tele XPHD nu mai
sunt dominante, iar comportamentul materialelor devine independent de nivelul de îmbibare.

Pentru materialul LJ3, din analiza rezultatelor generate pentru viteza de comprimare
de 3 mm/s (Fig. 3.19) s-

XPHD

1,3 mm pe grafic se poate identifica un punct de in

îmbibat. În

XPHD

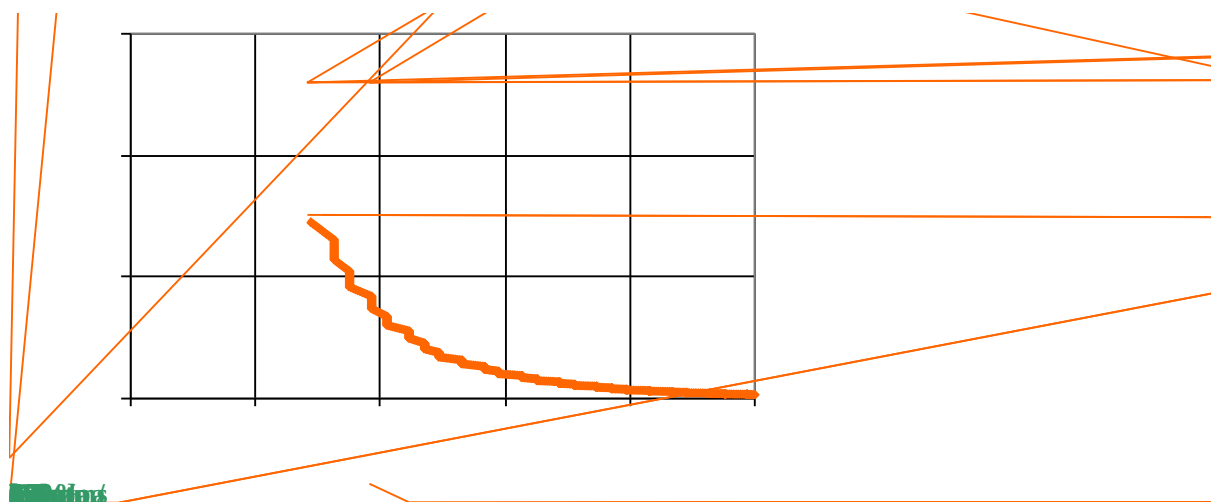


Fig. 3.19.

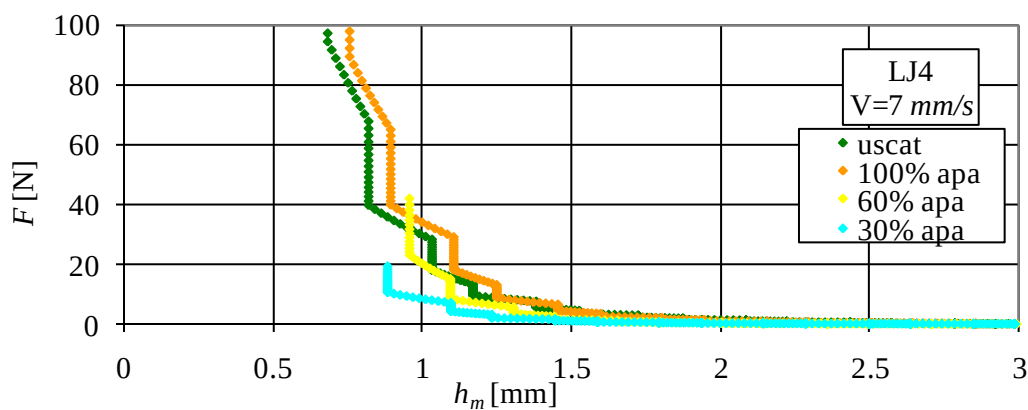


Fig. 3.20.

i uscat

(Fig. 3.20)

Rezultatele din Fig. 3.20

mare
 $h=1,3 \text{ mm}$. Acest lucru este pus pe

mental.

vitezei de

3.4.2 Configurația disc-plan

o configurație plan-disc.

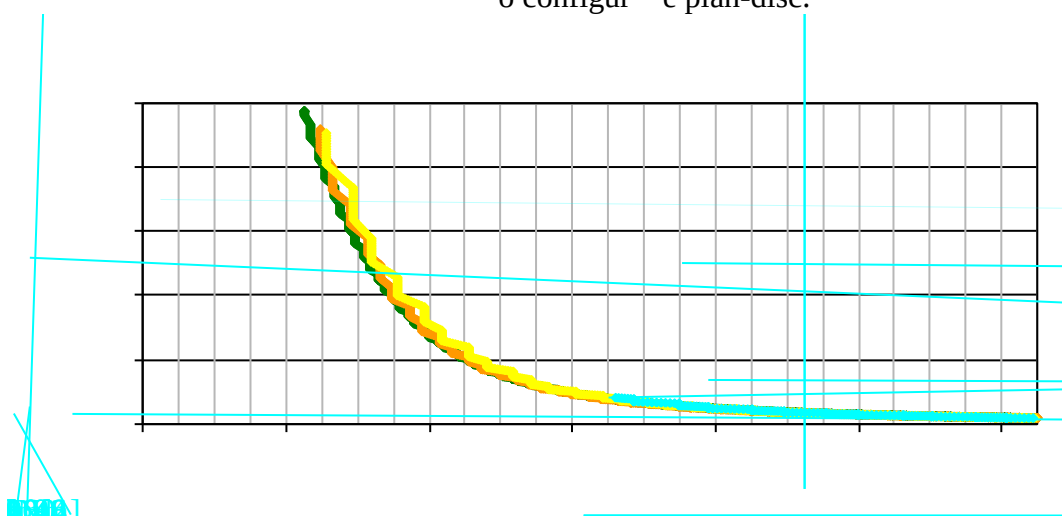


Fig. 3.21.

erialului îmbibat cu indector disc pentru mai
 multe viteze

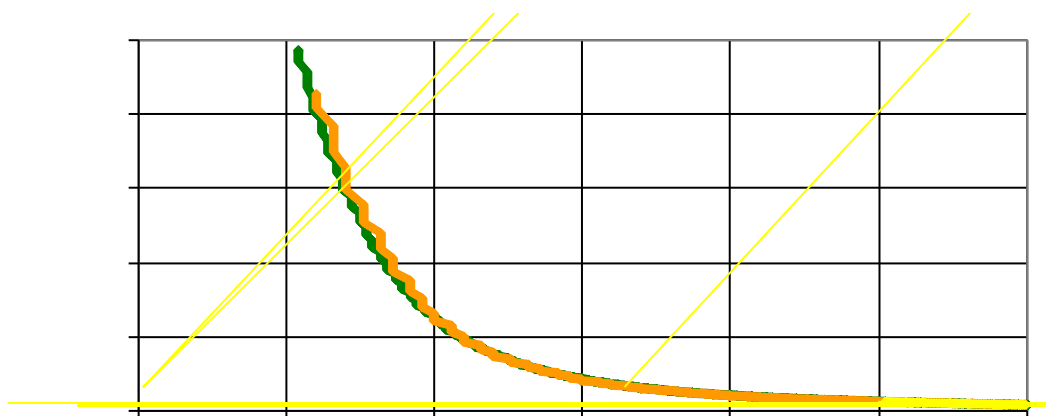


Fig. 3.22.

erialului îmbibat 60% cu indector disc pentru
 mai multe viteze

Fig. 3.21 este

unde expulzarea nu mai are loc în c

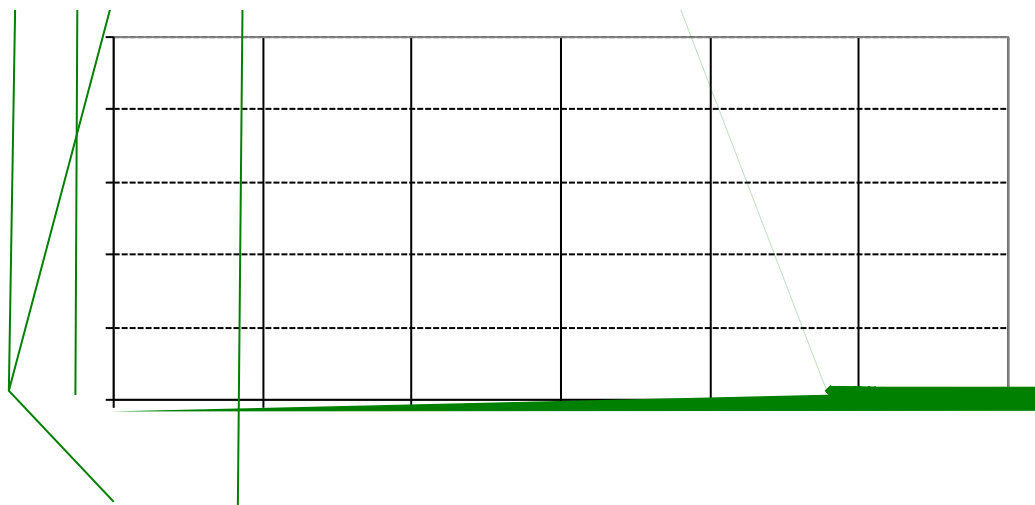


Fig. 3.23.

erialului îmbibat 30% cu indector disc pentru
mai multe viteze

le

mm/s. Rezultatele

expulzare.

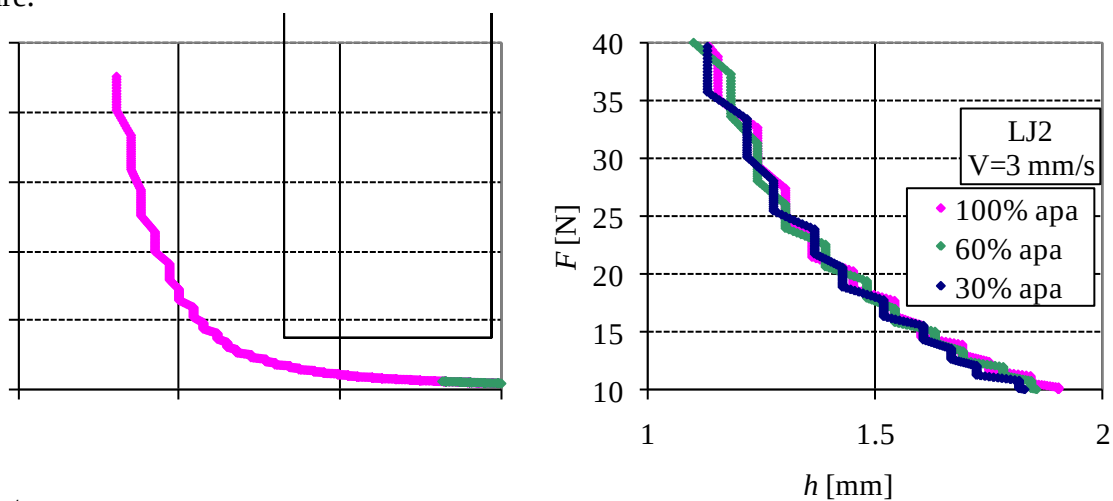


Fig. 3.24.

mm/s stânga. Zoom pe intervalul 1-2 mm - dreapta

Fig. 3.24 stânga

pentru viteze de expulzare de 4 mm/s (Fig. 3.25) mm/s (Fig. 3.26). Pe aces

Ca urmare, este dificil de observat un comportament similar cu cel prezentat în Fig. 3.23.

Fig. 3.24 dreapta

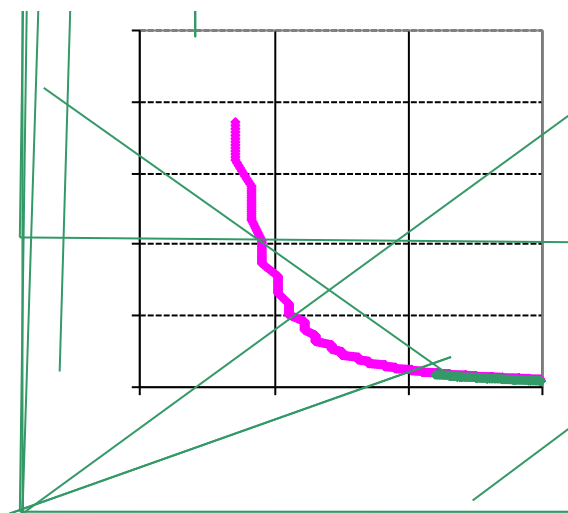


Fig. 3.25.
matrialului îmbibat la diferite nivele cu indector
mm/s

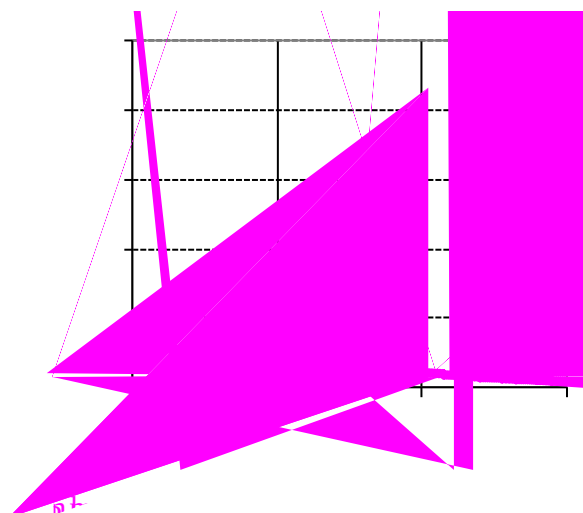


Fig. 3.26.
matrialului îmbibat la diferite nivele cu indector

3.5. EVALUAREA PERMEABI

mediilor poroase - . Permeabilitatea acestor structuri poroase

curgere a fluidului.

-

Pascovici în [71]

$$\phi = \frac{\pi \eta \rho^2 (h_0 - h)^2 V}{2 F h} \quad (3.3)$$

unde h_0

Fig. 3.27).

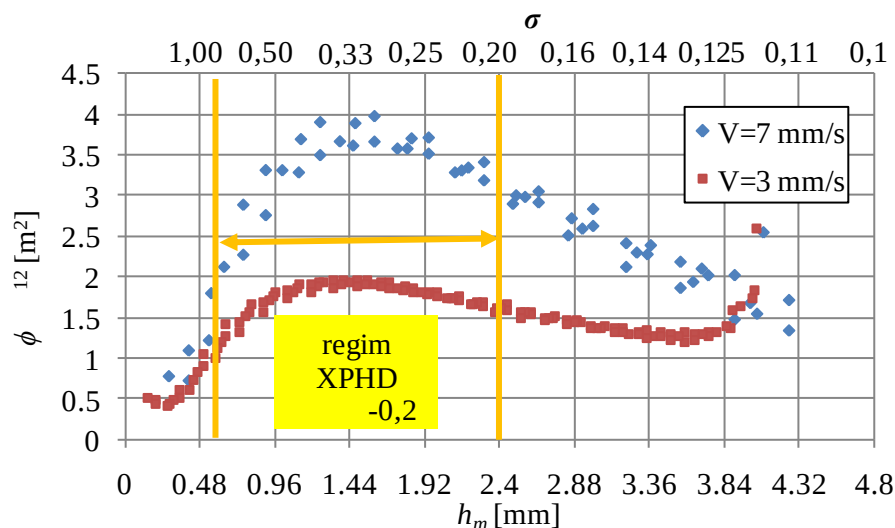


Fig. 3.27. pentru expulzarea cu indenter sferic pe baza modelului XPHD pentru vitezele de comprimare de 3 mm/s i 7 mm/s

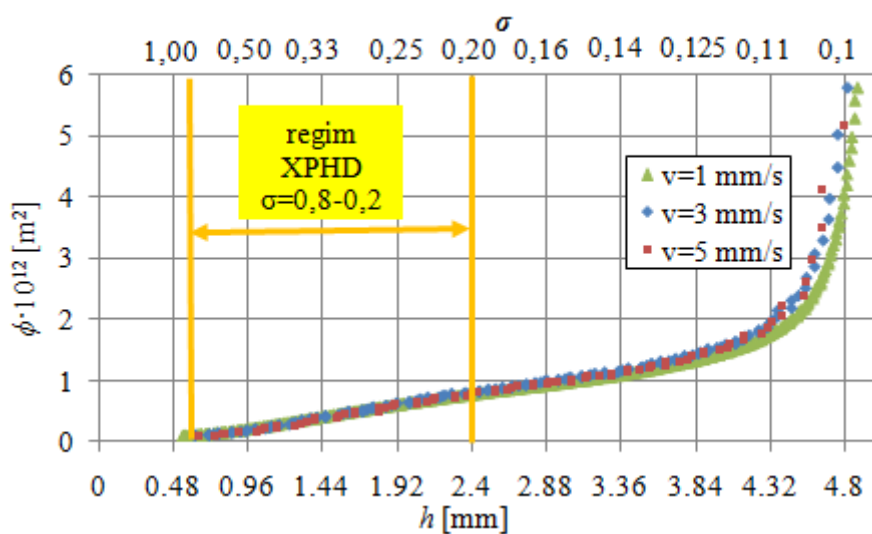


Fig. 3.28. pentru expulzarea cu indenter disc pe baza modelului XPHD pentru vitezele de comprimare de 1 mm/s, 3 mm/s i 5 mm/s

contact disc-plan prezentat de Pascovici în [71] utilizând:

$$\phi = \frac{\pi \eta R_e^4 V}{8 F h} \quad (3.4)$$

unde R_e reprezinta raza discului. În Fig. 3.28

viteza de curgere a fluidului.

Deoarece acela
expulzare

ric
entale. În Fig. 3.29 sunt prezentate valorile
mm/s.

l

i

grosimea inițială a materialului $h_0 = 4,8mm$
3.30 α

$\sigma_0 = 0,1mm$. În Fig.
 H .

vedea pe grafic, $\alpha \in [5,6 \cdot 10^3, 70,5 \cdot 10^3]$

lui α din Fig.1.35

lul poros LJ2 utilizat pe timpul

este un mediu

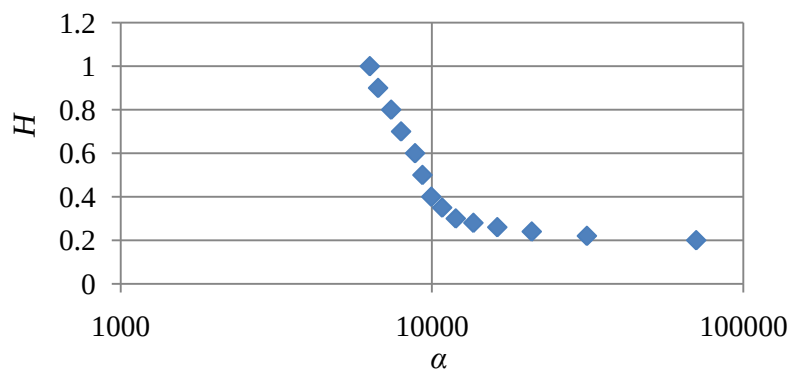


Fig. 3.30.

$h_0 = 4,8mm$

$\sigma_0 = 0,1mm$ a materialului LJ2

3.7. CONCLUZII

În acest capitol au fost prezentate o serie de rezultate experimentale privind evaluarea

standul CETR-UMT2 care a permis comprimarea

cuprinse între $0,1 mm/s$ și $10 mm/s$.

în care compactitatea materialelor utilizate

când procesul XPHD a fost în
structurii solide. A
se cu

utilizate.

i plastice ale

Comprimarea
mai mare decât

n stare în

pentru materialele utilizate

i

i LJ3

în

a putut fi identificat.

e poate ant

mbibare duce la

XPHD, au fost efectuate teste la comprimare pentru

care a putut

fi prezis, altele au avut un comportament care nu a putut fi anticipat. Caracteristicile de

duc abateri de la comportamentul preconizat

teoretice anterioare. Pentru materialele LJ2 și LJ3 s-a

de fluid aflate în materialul

în

comprimare pentru LJ4, nu s-a

mbibare.

plan indiferent de nivelul de înălțime al porozității și al proceselor de expulzare XPHD la atingerea unor valori critice de înălțime a fluidului. În cazul în care nivelul de înălțime al straturilor exterioare ale materialelor, de precizia cu care s-au putut realiza măsurătorile, materialului îmbibat sau de nivelul de aer din material care nu a putut fi înlocuit în procesul de îmbibare.

validitatea legii lui Darcy în modelarea curgerii prin mediile poroase de tipul celor utilizate în studiul Darcy.

Studiul experimental prezentat în acest capitol a fost realizat la începutul studiilor de cercetare riguroase, permit sesizare

CAPITOLUL 4. EXPULZAREA UNUI VOLUM DE FLUID NEWTONIAN ÎMBIBAT ÎN ZONA CENTRALĂ A UNUI DISC DE MATERIAL POROS EXTREM DE COMPRESIBIL²

4.1. INTRODUCERE

4.1.1 Aspecte generale

Modelul teoretic care va fi prezentat în
analiza
sisteme de protecție la șocuri care au ca scop reducerea efectelor distructive ca
urmare a ciocnirii c *sisteme de protecție balistică*

amortizarea energiei cinetice a [36]. Un singur tip de
sisteme
a fost definit bazat pe mai
[63]

conceptul de *advanced layered personnel armor*

[83] i Gama [32].

Materialele poroase
Utilizarea lor permite

[74], Robbins

fost

[32][47].

studiat capacitatea de amortizare a spumelor îmbibate este Hilyard [43]. Acesta a studiat
capacitatea de amortizare
de Dawson [19][21] pentru spume reticulate îmbibate pentru a evalua capacitatea acestora de
protec

² p
highly compressible porous annular discs

articolului *Finite volume squeeze flow in*
[96].

Specific model
într-un disc din

, fluidul nu este liber, el este îmbibat
publicate

îmbibate cu fluid [19][90]

-a

Dowson [19]

[98]

polimerice a lui Pampolini [64][65]

mm.

4.1.2 Modelul Dawson [19]

cerebrale
În Fig. 4.1 de

ine

[3], în anul
cerebrale în 67% din cazuri [2].

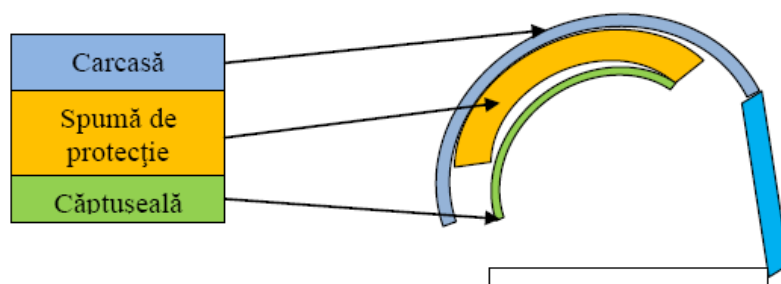


Fig. 4.1.

suplimentar,
dar cu porozitate mai mare. În Fig. 4.2

[19] propune introducerea unui strat

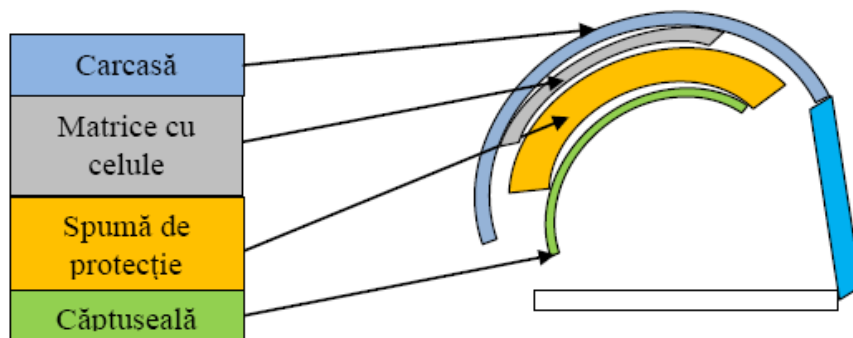


Fig. 4.2.

[19]

În Fig. 4.3

el

-

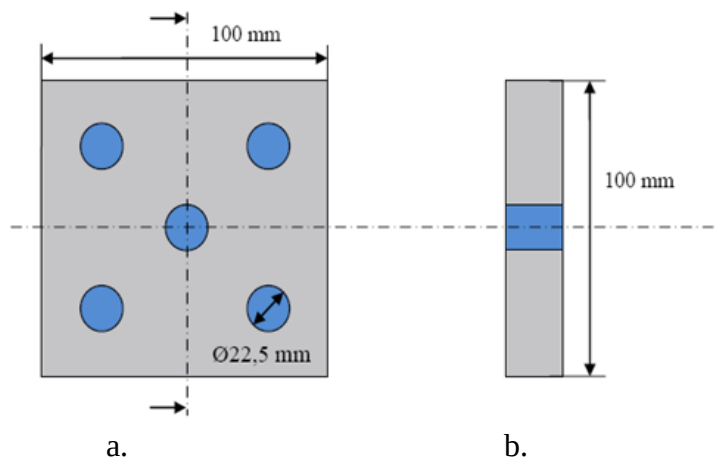


Fig. 4.3.

vedere de sus, b.

În lucrarea sa, Dawson [19]

Fig. 4.3

în

put
confortul în detrimentul siguranței
celulelor

a materialului poros, permite reîmbibarea

4.1.3 Modelul Vossen [98]

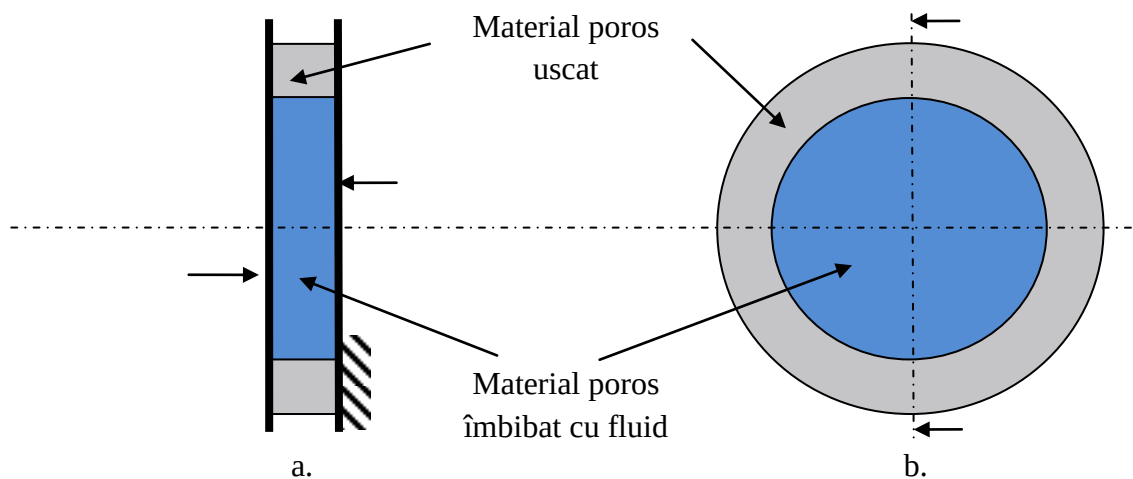


Fig. 4.4. Modelul lui Vossen [98]

de sus

Modelul lui Vossen [98]

Fig. 4.4

modelul lui Dawson [19] [98], sunt multiple. Pentru ambele,

curgerea fluidul [17]. de

poroase. Dawson, având în vedere aplicabilitatea acestui sistem inovativ de amortizare a
capacitatea de amortizare la impact pentru a identifica

în timpul comp

unui model pentru un sistem eficient de amortizare bazat pe curgerea unui volum constant de
fluid printr- de dimensiuni finite. Capacitatea de amortizare se

anterior studiate, a fost denumit generic *modelul inelului cu celulă de fluid îmbibat*. F
comprimare ale materialului poros sunt considerate
hidrodinamice generate de fluidul care este expulzat prin pori. Cazurile analizate sunt:
comprimarea

4.2. MODELUL ANALITIC

Modelul pentru expulzarea unui volum constant de lichid îmbibat printr-
a

Pascovici [66][72][73] cu strat de material poros total îmbibat cu fluid. n cazul
-un
rezervor, îmbibat în material poros sau liber pentru fluidele mai vâscoase, eventual ne-
altele decât cele care produc daune.

R_e a unui

$V=ct$.

Modelul axial simetric este prezentat în Fig. 4.6.

R_0

nelul de grosime h_0 R_0

R_e . În timpul procesului de comprimare fluidul curge din rezervorul central prin materialul
 R

grosime h -poro-hidrodinamice.

-

-

curgere ale fluidului [29];

supune legii lui Darcy [29][45];

$$\sigma h = \sigma_0 h_0 = ct;$$

- Permeabilitatea este
Carman [12].

h va fi considerat constant:

ε , respectiv σ , pe baza legii lui Kozeny-

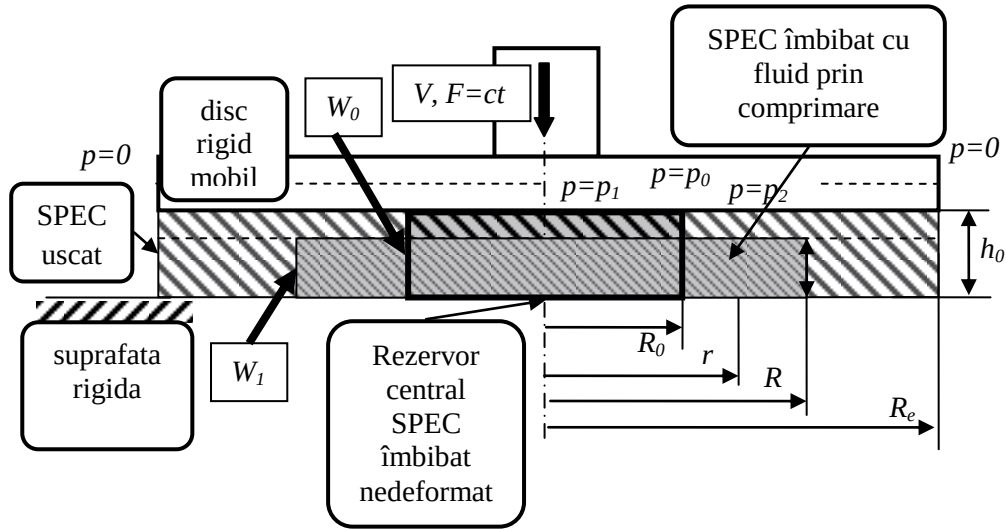


Fig. 4.6. Modelul inelului de material poros cu celula de fluid

4.2.1 Expulzare cu viteză constantă

4.2.1.1 Determinarea corelației dintre raza și înălțimea volumului supus expulzării

rezervorul central. Conservarea volumului de lichid îmbibat are forma:

$$W_0 = W_1 \quad (4.1)$$

$W_0 = \pi R_0^2 h_0 \varepsilon_0$ este volumul de fluid la un moment ulterior:

$$\pi R_0^2 h_0 \varepsilon_0 = \pi R^2 h \varepsilon. \quad (4.2)$$

$$\pi R_0^2 h_0$$

$$\varepsilon_0 = \frac{R^2}{R_0^2} \frac{h}{h_0} \varepsilon \quad (4.3)$$

$$\frac{R^2}{R_0^2} = \frac{1 - \sigma_0}{1 - \sigma} \frac{h_0}{h} \quad (4.4)$$

Din ipotezele enumerate mai înainte se poate scrie compactitatea σ în
 H .

$$\sigma = \frac{\sigma_0 h_0}{h} = \frac{\sigma_0}{H} \quad (4.5)$$

Mai departe se va adimensionaliza raza R a materialului poros îmbibat cu fluid în
 R_0 h_0

$$\bar{R}$$

adimensionale este:

$$\bar{R}^2 = \frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0} \quad (4.6)$$

4.2.1.2 Ecuația de conservare a debitului de lichid

$r \in (0, R)$

conservare a debitului este:

$$\pi r^2 V = - \frac{2\pi r \phi h}{\eta} \frac{dp}{dr} \quad (4.7)$$

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{\eta V}{2\phi h} r \quad (4.8)$$

$$p = - \frac{\eta V}{4\phi h} r^2 + C \quad (4.9)$$

$$r=R \text{ i } p=0,$$

C:

$$C = - \frac{\eta V}{4\phi h} R^2 \quad (4.10)$$

Expresia presiunii devine:

$$p = \frac{\eta V}{4\phi h} (R^2 - r^2) \quad (4.11)$$

de material poros uscat cu rezervor de fluid.

$$F = 2\pi \int_0^R r p(r) dr = 2\pi \int_0^R \frac{\eta V}{4\phi h} (R^2 r - r^3) dr = \frac{\pi \eta V}{8\phi h} R^4 \quad (4.12)$$

4.2.1.3 Explicitarea și adimensionalizarea expresiei forței

$\bar{R}$ H este:

$$F = \frac{\pi \eta V R_0^4}{8\phi h} \cdot \frac{\bar{R}^4}{H} \quad (4.13)$$

Pentru permeabilitatea ϕ

-Carman (1.14

H :

$$\phi = \frac{D(H - \sigma_0)^3}{H \sigma_0^2} \quad (4.14)$$

$$\bar{F} = \frac{F h_0 D}{\eta V R_0^4} \quad H$$

$$\bar{F} = \frac{\pi \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{8(H - \sigma_0)^5} \quad (4.15)$$

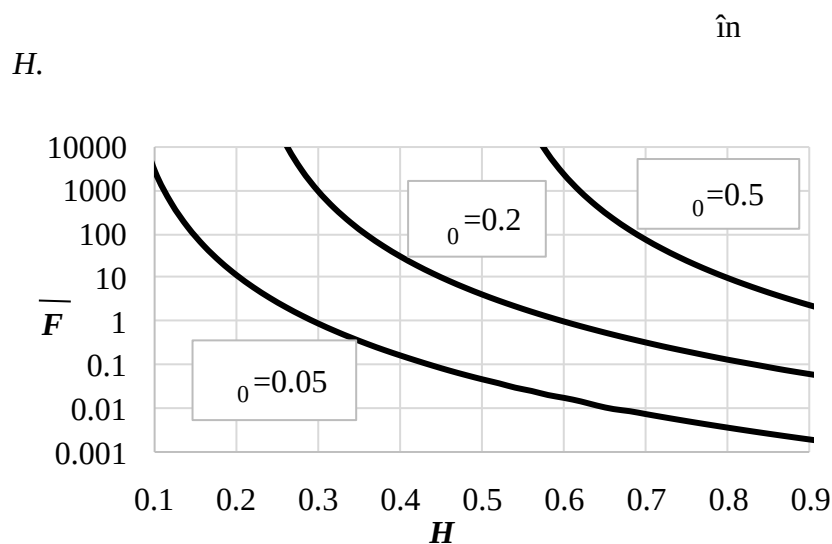


Fig. 4.7. $\bar{F}$ H

4.2.2. Expulzare cu forță constantă

diul acestui caz

expresia vitezei este $V = -h_0 dH / dt$.

scris dimensional,

separarea variabilelor avem:

$$-dt \frac{FD}{R_0^4 \eta} = \frac{\pi \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{8(H - \sigma_0)^5} dH \quad (4.16)$$

Utilizand timpul adimensional $\bar{\tau}$ care are expresia $\bar{\tau} = \frac{tFD}{\eta R_0^4}$

(4.16) devine:

$$\bar{\tau} + C = \frac{\pi \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{32(H - \sigma_0)^4} dH \quad (4.17)$$

$\bar{\tau} = 0$ grosimea $H = 1$, atunci constanta de integrare C este:

$$C = -\frac{\pi \sigma_0^2}{32(1 - \sigma_0)^2} \quad (4.18)$$

H cu timpul $\bar{\tau}$ este:

$$\bar{\tau} = \frac{\pi \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{32} \left[\frac{1}{(H - \sigma_0)^4} - \frac{1}{(1 - \sigma_0)^4} \right] \quad (4.19)$$

În Fig. 4.8
adimensional $\bar{\tau}$.

H

mai compact.

Atunci când materialul ajunge la grosimea h_e
inelului de material, $\bar{R} = R_e / R_0$

$$H_1 = h_e / h_0.$$

H_1 poate fi

$$H_1 = \sigma_0 + \frac{1 - \sigma_0}{R_e / R_0} \quad (4.20)$$

Pe graficul din Fig. 4.8

$\bar{R} = 2$. Mai departe comprimarea modelului duce la

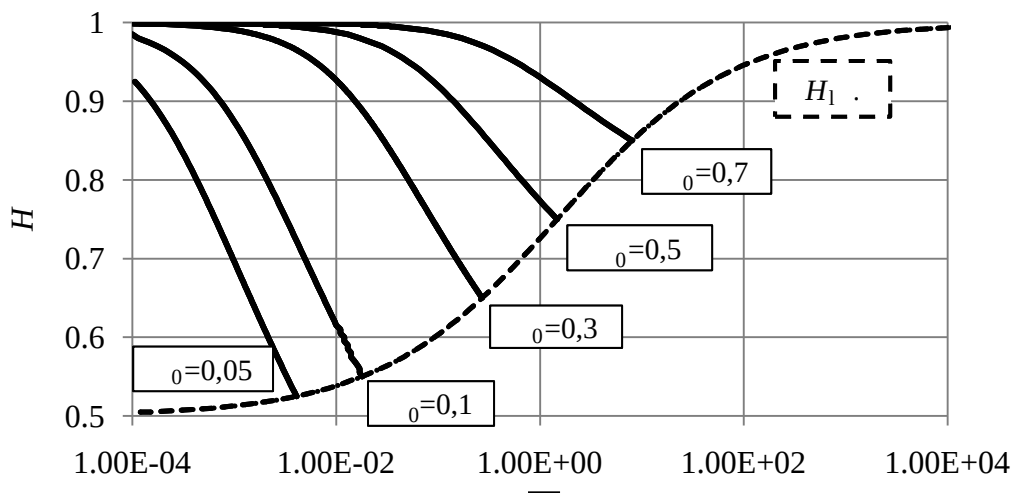


Fig. 4.8.

$\bar{\tau}$ a grosimii adimensionale H

4.2.3 Expulzare prin impact

fluidului la impact cu impuls constant. Modelul impulsului constant permite verificarea

M

V_0

Fig.

4.9.

$$M dV = -F \cdot dt \quad (4.21)$$

constante de comprimare $V = ct$

[10]

$$F = \frac{\pi \eta R_0^4 \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{8 D h_0 (H - \sigma_0)^5} \frac{dh}{dt} \quad (4.22)$$

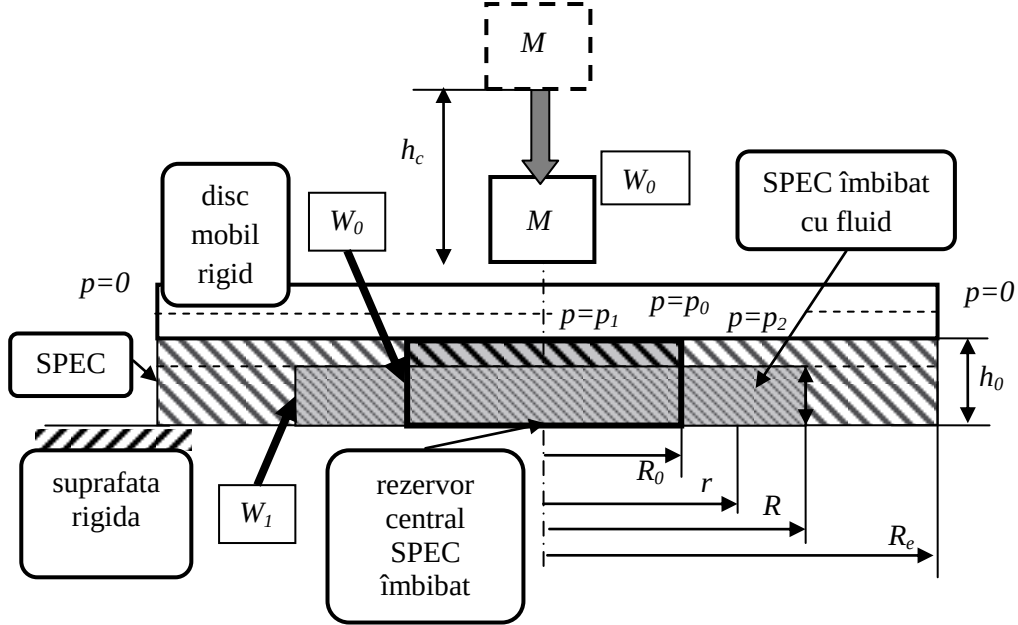


Fig. 4.9. Modelul inelului de material poros cu celula de fluid comprimat prin impact

, se

$$dV = -\frac{\pi \eta R_0^4 \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{8 D M} \frac{1}{(H - \sigma_0)^5} dH \quad (4.23)$$

$$V = C + \frac{\pi \eta R_0^4 \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{32 D M} \frac{1}{(H - \sigma_0)^4} \quad (4.24)$$

În momentul $t=0$, pentru $H = H_0$ $V=V_0$ constanta de integrare C devine:

$$C = V_0 - \frac{\pi \eta R_0^4 \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{32 D M} \frac{1}{(1 - \sigma_0)^4} \quad (4.25)$$

În final din (4.25) $V = V_0 - \frac{\pi \eta R_0^4 \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{32 D M} \left[\frac{1}{(H - \sigma_0)^4} - \frac{1}{(1 - \sigma_0)^4} \right]$ H :

$$V = V_0 - \frac{\pi \eta R_0^4 \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{32 D M} \left[\frac{1}{(H - \sigma_0)^4} - \frac{1}{(1 - \sigma_0)^4} \right] \quad (4.26)$$

i (4.21) înlocuim expresia (4.26)

$$F = \frac{\pi \eta R_0^4 \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{8 D h_0 (H - \sigma_0)^5} \left\{ V_0 - \frac{\pi \eta R_0^4 \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{32 D M} \left[\frac{1}{(H - \sigma_0)^4} - \frac{1}{(1 - \sigma_0)^4} \right] \right\} \quad (4.27)$$

$$\bar{F} = F D h_0 / (R_0^4 \eta)$$

$$\bar{M} = M D V_0 / (R_0^4 \eta)$$

$$\bar{F} = \frac{\pi \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{8(H - \sigma_0)^5} \left\{ V_0 - \frac{\pi \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^2}{32\bar{M}} \left[\frac{1}{(H - \sigma_0)^4} - \frac{1}{(1 - \sigma_0)^4} \right] \right\}. \quad (4.28)$$

4.3. ANALIZA

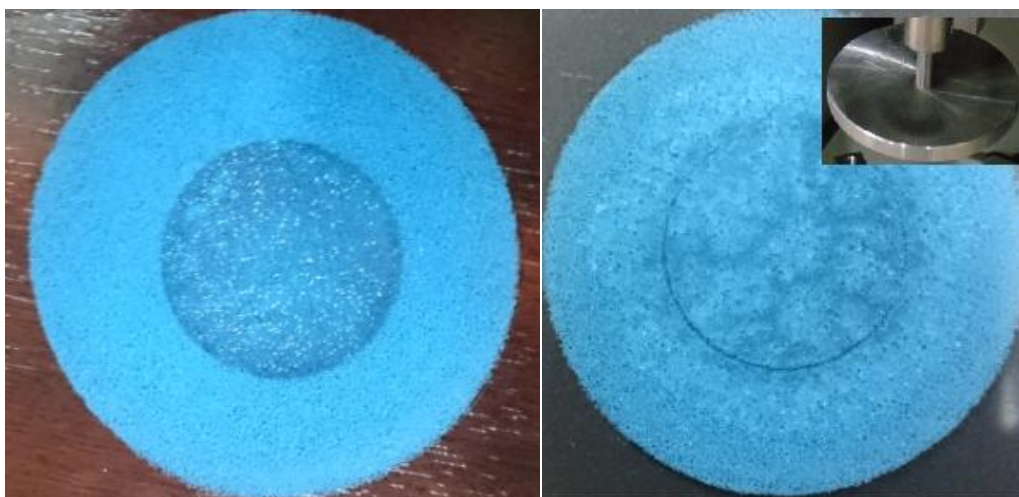
În cadrul acestui capitol au fost realizate o serie de experimente de comprimare cu un material poros cu diametrul de 66 mm cu rezervorul central cu diametrul de 33 mm constituit

$$\eta = 0,6 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad \eta = 11 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

cauza caracteru

sale ridicate, cu ajutorul rezultatelor experimentale s-a putut valida

cu



a.

b.

Fig. 4.10. Inelul de material poros F133 cu rezervor de fluid îmbibat înainte de comprimare a. i b.

Materialul utilizat face parte din familia FILTREN®

$$\varepsilon_0 = 0,95.$$

Grosimea materialului nedeformat h_0 este de $4,5 \text{ mm}$

Fig. 4.10.a., pentru

îmbibarea materialului poros din rezervor a fost decupat un disc care a fost îmbibat cu fluidul

Standul CETR-UMT2

Fig. 4.10.b.

$h = 1 \text{ mm}$. Se

poate observa cum glicerina a îmbibat inelul de material poros.

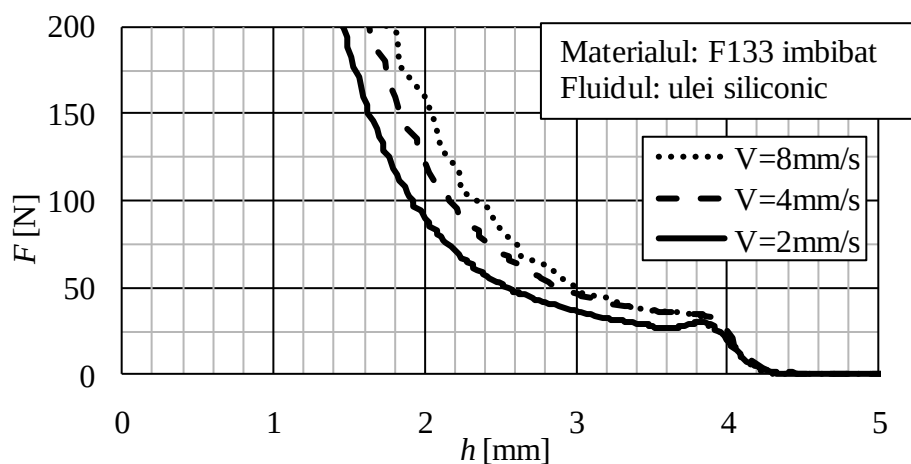


Fig. 4.11.

În Fig. 4.11 Fig. 4.12 sunt prezentate rezultatele înregistrate pentru comprimarea cu viteza $V=8\text{mm/s}$ a inelului de material cu rezervorul imbibat de ulei siliconic, respectiv $V=2\text{mm/s}$. În cazul ambelor fluide, pentru deformarea materialului pe intervalul $4,5 \div 3,5\text{ mm}$ en poate fi pus pe seama Mai departe
se , în special pe intervalul $h = 1 \div 2\text{ mm}$,
se

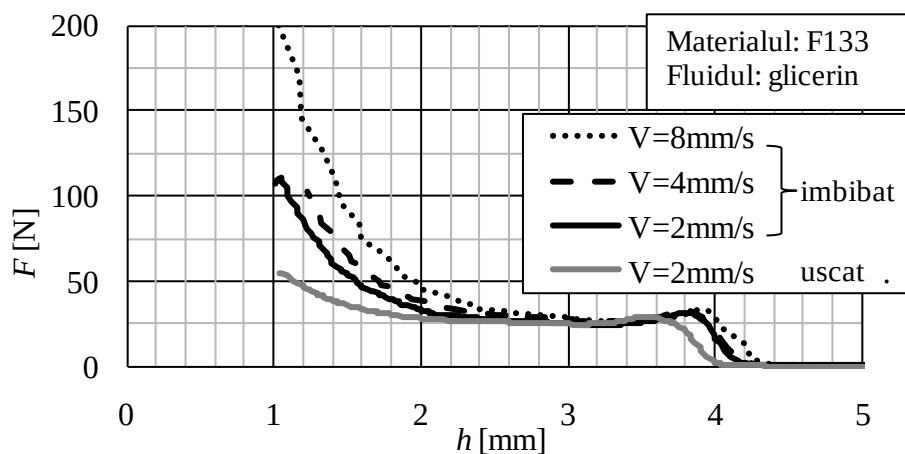


Fig. 4.12.

Acest lucru este firesc deoarece c $V=8\text{mm/s}$ la 4 mm/s $V=8\text{mm/s}$ $V=2\text{mm/s}$.

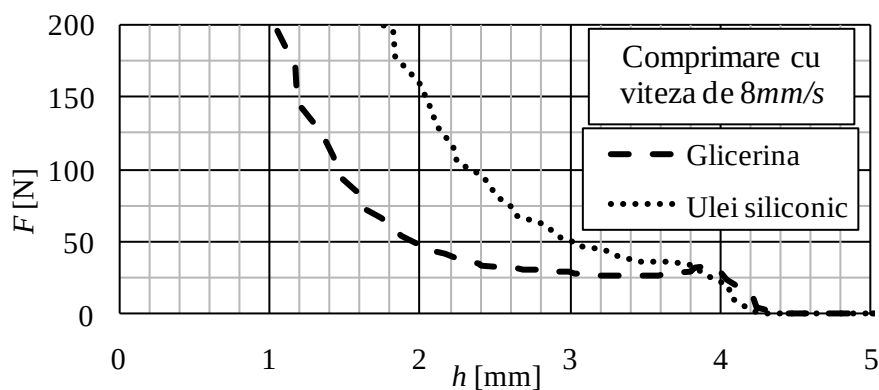


Fig. 4.13.

ntu comprimare materialului F133 cu $V=8\text{ mm/s}$

Tabelul 4.1

9)

Parametrul	Valoarea
D	$10^{-10} m^2$
σ_0	0,05
h_0	4,5 mm
R_0	16,5 mm
η	0,6 Pa·s

În Fig. 4.15, Fig. 4.16 Fig. 4.17 mai jos sunt reprezentate comparativ rezultatele nute pe standul CETR-

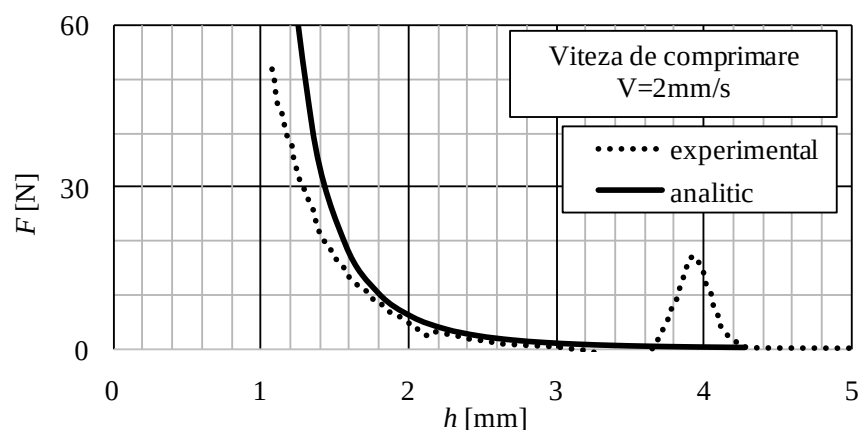


Fig. 4.15.

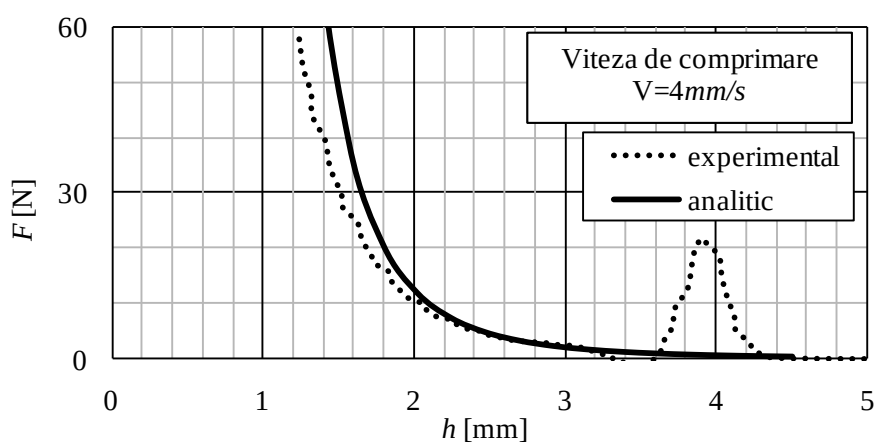
pentru expulzare cu $V=2\text{mm/s}$ 

Fig. 4.16.

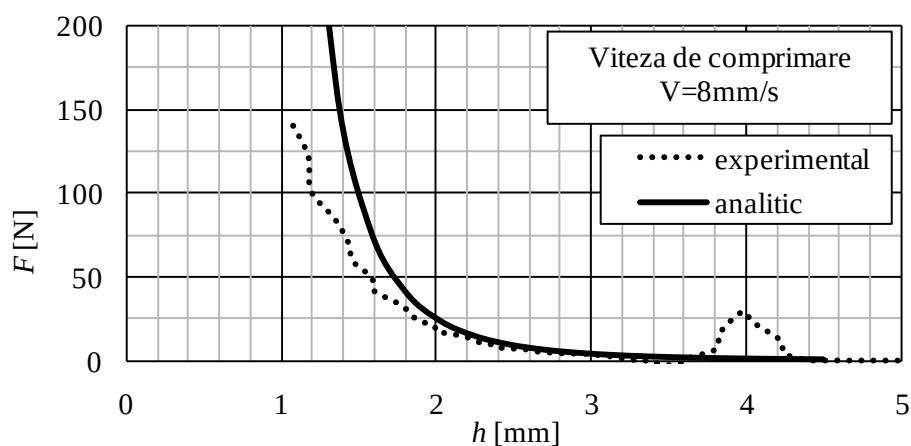
pentru expulzare cu $V=4\text{mm/s}$ 

Fig. 4.17.

pentru expulzare cu $V=8\text{mm/s}$

Rezultatele analitice determinate se suprapun cu precizie relativ
modelul analitic este valid.
Compararea rezultatelor s- mm/s .

D

-Carman.
particule solide. În structura

analitic.

Spre deosebire de modelul teoretic, între rezervorul central de fluid îmbibat în material
modelul teoretic nu le ia în considerare.

4.5. COMPARAREA CU DAWSON

În [22]

este de $175\ \mu m$, $210\ \mu m$ respectiv $235\ \mu m$ $\epsilon=0.97$.

prezentat anterior

son a înregistrat pe stand
deformare (Fig.4.18). Din rezultatele experimentale prezentate de
Dawson au fost selectate cele determinate pentru spuma 70 ppi în primul rând deoarece au
ma

a

mm

asemenea spuma F133 are

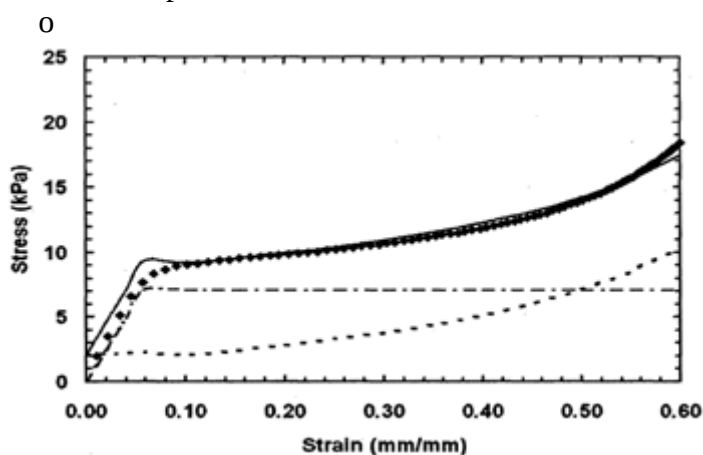


Fig. 4.18. Tensiunea
[22]

în defor

-1

ppi

cul lui Dawson (Fig. 4.18) se poate observa un prag care poate fi pus pe
seama fenomenului de instabilitate (de flambare), specific spumelor poroase. Ambele grafice
aracterizat de fenomenul de flambare, un

un sal

Tensiun
indentorului disc $A = 0,003m^2$.

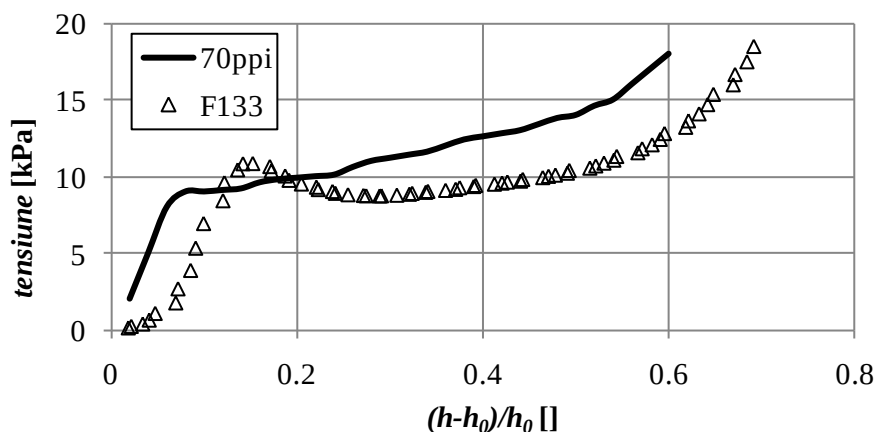


Fig. 4.19.

viteza de deformare de $1 s^{-1}$ [22]

ele
,95 s^{-1}

4.6. CONCLUZII

S-a elaborat un model original pentru expulzarea unui volum dat de lichid Newtonian, înbibat într-

a unui disc de material poros, prin zona

dat [96].

Analiza experimentel a fost efectuat pe standul CETR-UMT2 prin expulzarea la mm/s . Stratul de material poros extrem de compresibil utilizat a

evante deoarece modelul a fost construit pentru fluide

au condus la validarea modelului analitic elaborat.
ulei siliconi

procedura experime

-a umplut rezervorul de fluid.

Compararea rezultatelor experimentale s-

alte

studiilor experimentale. S-

Dawson pentru o

CAPITOLUL 5. EXPULZAREA UNUI VOLUM DAT DE FLUID PRINTR-O STRUCTURĂ INELARĂ DIN MATERIAL POROS EXTREM DE COMPRESIBIL

-un

material poros. În acest context, este de interes de studiat cazul
interiorul rezervorului
modelul inelului cu celulă de fluid

ntat, fluidul este Newtonian. Din punctul de vedere al

presiuni sau f

fluid prin utilizarea de fluide Newtoniene foarte vâscoase sau prin utilizarea de bariere sau
capsule.

5.1 MODELUL PENTRU EXPULZAREA UNUI VOLUM CONSTANT DE FLUID PRINTR-

R a unui

simetric este reprezentat în Fig.5.1

R_0

h_0

R_0

R pentru grosimea h_0
structurii inelare. În *zona 2*
de expulzare ex-poro-
 R i o grosime h .

Zona 1 este
olumul de material poros inelar îmbibat

Ipotezele folosite pentru modelul analitic sunt identice cu cele care au fost prezentate
în Capitolul 4.

pentru o

V

(F $MV_0 = \text{ct}$).

5.1.1 Expulzare cu viteză constantă

$$V=ct,$$

$$R_e$$

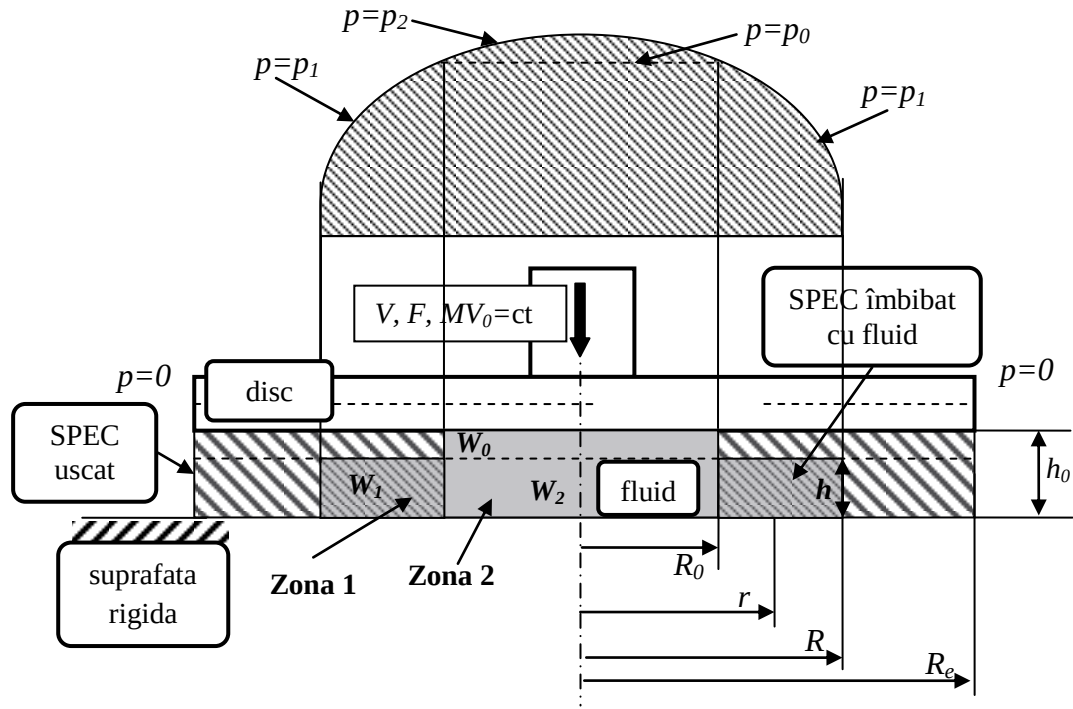


Fig.5.1. Geometria modelului inelului de material poros cu celula de fluid

r care este cuprins în intervalul $r \in (R_0, R)$.

$$\pi R_0^2 V + \pi(r^2 - R_0^2)V = -\frac{2\pi\phi h}{\eta} \frac{dp_1}{dr} \quad (5.1)$$

$$\frac{dp_1}{dr} = -\frac{\eta V}{2 \cdot \phi \cdot h} r \quad (5.2)$$

Prin integrare se ajunge la:

$$p_1 = -\frac{\eta V}{4\phi h} r^2 + C \quad (5.3)$$

$r=R$, presiunea $p=0$, se poate determina constanta C .

$$p_1 = \frac{\eta V}{4\phi h} (R^2 - r^2) \quad (5.4)$$

$r = R_0$ se poate determina expresia presiunii p_0 .

$$p_0 = \frac{\eta V}{4\phi h} (R^2 - R_0^2) \quad (5.5)$$

zona 1.

$$F_1 = 2\pi \int_{R_0}^R r p_1(r) \cdot dr = 2\pi \int_{R_0}^R \frac{\eta V}{4h\phi} (R^2 r - r^3) dr \quad (5.6)$$

$$F_1 = \frac{\pi \eta V}{2\phi h} (R^2 - R_0^2)^2 \quad (5.7)$$

R_0 , ca urmare, raza $r \in (0; R_0)$. Expulzarea fluidului la

$$-\frac{2\pi h^3}{12\eta} \frac{dp_2}{dr} = \pi r^2 V \quad (5.8)$$

$r = R_0$, presiunea $p = p_0$

$$p_2 = p_0 + \frac{3\eta V}{h^3} (R_0^2 - r^2) = \frac{\eta V}{4h\phi} (R^2 - R_0^2) + \frac{3\eta V}{h^3} (R_0^2 - r^2) \quad (5.9)$$

zona 2:

$$F_2 = 2\pi \int_0^{R_0} r p_2(r) dr = \pi p_0 R_0^2 + \frac{6\pi \eta V R_0^4}{4h^3} \quad (5.10)$$

p_0

F_2 .

$$F_2 = \frac{\pi \eta V}{4h\phi} R_0^2 (R^2 - R_0^2) + \frac{6\pi \eta V R_0^4}{4h^3} \quad (5.11)$$

$$F = F_1 + F_2 = \frac{\pi \eta V}{8\phi h} \left[(R^2 - R_0^2)^2 + 2R_0^2 (R^2 - R_0^2) + \frac{12\phi}{h^2} R_0^4 \right] \quad (5.12)$$

$$H = \frac{h}{h_0} \leq 1$$

$$\sigma = \sigma_0 / H.$$

$$\bar{R} = R / R_0.$$

$\bar{R}$

material poros $\bar{H}$.

$$W_0 = W_1 + W_2 \quad (5.13)$$

$$W_0 = \pi R_0^2 h_0$$

$$W_2 = \pi R_0^2 h$$

fluid zona 2 la un moment ulterior pentru grosimea h . $W_1 = (1 - \sigma)\pi(R^2 - R_0^2)h$

R

h .

$$\pi R_0^2 h_0 = \pi R_0^2 \cdot h + (1 - \sigma)\pi(R^2 - R_0^2)h \quad (5.14)$$

$$\pi R_0^2 h_0$$

$$1 = \frac{h}{h_0} + (1 - \sigma) \left(\frac{R^2}{R_0^2} - 1 \right) \frac{h}{h_0} \quad (5.15)$$

$$H \text{ i } \bar{R}$$

$$1 = H + (H - \sigma_0) (\bar{R}^2 - 1) \quad (5.16)$$

$$(5.17)$$

$$\bar{R}^2 = \frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0},$$

$$F$$

-

$$\phi = \frac{D(H - \sigma_0)^3}{H \cdot \sigma_0^2} \quad (5.18)$$

$$\frac{12\phi}{h^2} R_0^4 \text{ poate fi neglijat}$$

mici a raportului $\phi / h^2 \approx 10^{-4}$

Fig.5.1

$$p = p_2 - p_0$$

În aceste

$$F = \frac{\pi \eta V \sigma_0^2 R_0^4 (1 - H)(1 + H - 2\sigma_0)}{8h_0 D (H - \sigma_0)^5} \quad (5.19)$$

$$\bar{F}$$

$$\bar{F} = \frac{F h_0 D}{R_0^4 \eta V} = \frac{\pi \sigma_0^2 (1 - H)(1 + H - 2\sigma_0)}{8(H - \sigma_0)^5} \quad (5.20)$$

$$P_0 = h_0^2 / D \text{ care face parte din datele}$$

$$\bar{F} = \frac{F h_0^3}{R_0^4 \eta V} = \frac{\pi \sigma_0^2 P_0 (1 - H)(1 + H - 2\sigma_0)}{8(H - \sigma_0)^5} \quad (5.21)$$

În Fig.5.2

(ec. (5.21)) în

H . Reprezentarea s-

in σ_0

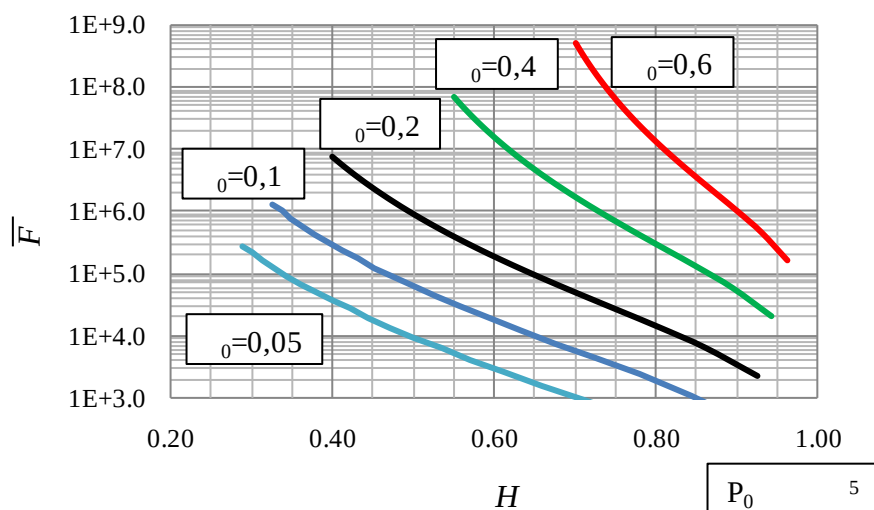


Fig.5.2.

 $\bar{F}$ H , pentru modelul

5.1.2 Expulzare cu forță constantă

Pentru studiul acestui caz expresia vitezei este $V = -\frac{dh}{dt}$. Mai departe vom folosi forma $V = -\frac{h_0 dH}{dt}$.

$$-dt \frac{Fh_0^2}{R_0^4 \eta} = \frac{\pi \sigma_0^2 P_0 \left[(1-H)^2 + 2(1-H)(H-\sigma_0) \right]}{8(H-\sigma_0)^5} dH \quad (5.22)$$

$$-dt \frac{Fh_0^2}{R_0^4 \eta} = \frac{\pi \sigma_0^2 P_0}{8} \left[\frac{(1-H)^2}{(H-\sigma_0)^5} - \frac{2(1-H)}{(H-\sigma_0)^4} \right] dH \quad (5.23)$$

$$\bar{\tau} = \frac{tFh_0^2}{R_0^4 \eta}$$

$$\bar{\tau} = C + \frac{\pi \sigma_0^2 P_0}{8} \left(\frac{6H^2 + (-4\sigma_0 - 8)H + \sigma_0^2 + 2\sigma_0 + 3}{12(H-\sigma_0)^4} + \frac{\sigma_0 + 2 - 3H}{6(H-\sigma_0)^3} \right) \quad (5.24)$$

$$t = 0 \text{ avem } h = h_0 \quad H = 1$$

$$C = \frac{\pi \sigma_0^2 P_0}{8} \left(\frac{1}{12(1-\sigma_0)^2} \right) \quad (5.25)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\pi \sigma_0^2 P_0}{8} \left(\frac{-4H + 4H\sigma_0 - \sigma_0^2 - 2\sigma_0 + 3}{12(H-\sigma_0)^4} + \frac{1}{12(1-\sigma_0)^2} \right) \quad (5.26)$$

În Fig.5.3

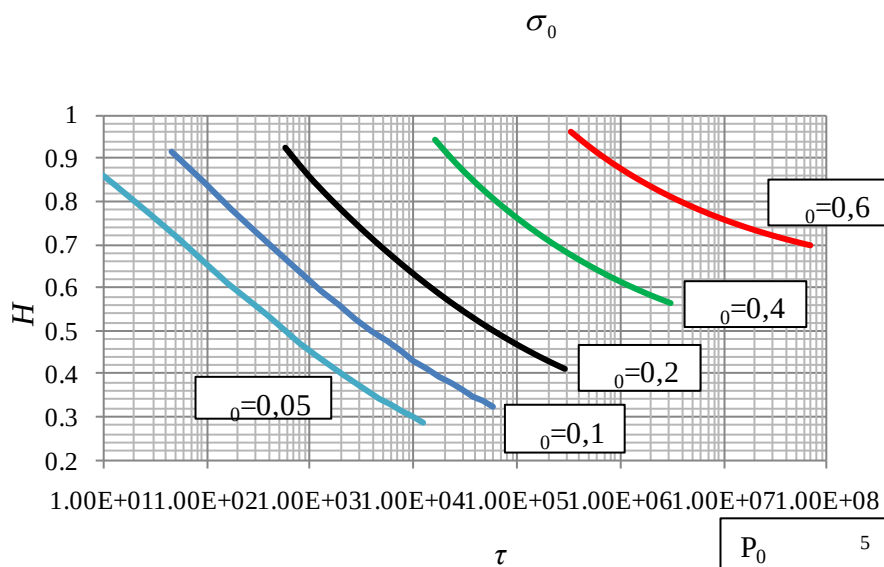


Fig.5.3.

H

$\bar{\tau}$, pentru

disc-plan cu SPEC

5.1.3 Expulzare prin impact

M

viteza V_0
în Fig.5.4.

[10]

sului este:

$$MdV = -F \cdot dt \quad (5.27)$$

vitezei constante $V = ct$.

poate se folosi

9).

Viteza V

H :

$$V = -h_0 \frac{dH}{dt} \quad (5.28)$$

$$dV = \frac{\pi \eta \sigma_0^2 R_0^4}{8MD} \left[\frac{(1-H)^2}{(H-\sigma_0)^5} - \frac{2(1-H)}{(H-\sigma_0)^4} \right] dH \quad (5.29)$$

$$V = \frac{\pi \eta \sigma_0^2 R_0^4}{8MD} \left[\frac{6H^2 + (-4\sigma_0 - 8)H + \sigma_0^2 + 2\sigma_0 + 3}{12(H-\sigma_0)^4} + \frac{\sigma_0 + 2 - 3H}{6(H-\sigma_0)^3} \right] + C \quad (5.30)$$

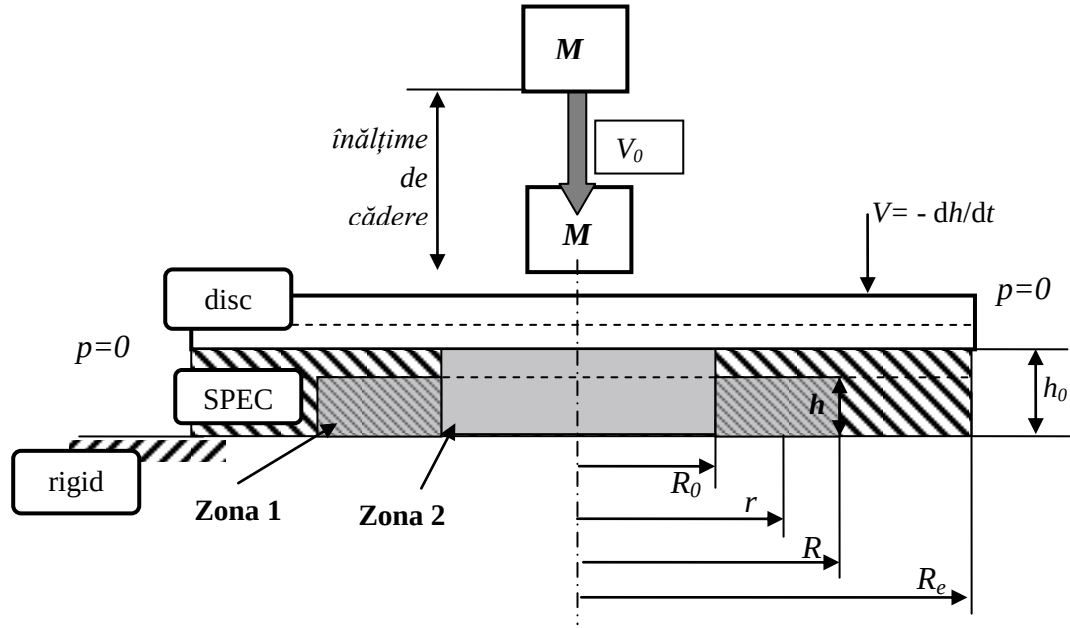


Fig.5.4. Geometria modelului la impuls constant

$t=0, H=1.$

$$C = V_0 - \frac{\pi\eta\sigma_0^2 R_0^4}{8MD} \frac{1}{12(H - \sigma_0)^2} \quad (5.31)$$

În final:

$$V = V_0 - \frac{\pi\eta\sigma_0^2 R_0^4}{8MD} \left[\frac{-4H + 4H\sigma_0 - \sigma_0^2 - 2\sigma_0 + 3}{12(H - \sigma_0)^4} + \frac{1}{12(1 - \sigma_0)^2} \right] \quad (5.32)$$

19) i înlocuim viteza V

în $\bar{H}$:

$$F = \frac{\pi\eta\sigma_0^2 R_0^4}{8h_0 D (H - \sigma_0)^5} (1 - H)(1 + H - 2\sigma_0) \cdot \quad (5.33)$$

$$\left\{ V_0 - \frac{\pi\eta\sigma_0^2 R_0^4}{8MD} \left[\frac{-4H + 4H\sigma_0 - \sigma_0^2 - 2\sigma_0 + 3}{12(H - \sigma_0)^4} + \frac{1}{12(1 - \sigma_0)^2} \right] \right\}$$

$$\bar{F} = \frac{F h_0^3}{R_0^4 \eta V_0} \quad \text{i}$$

$$\bar{M} = \frac{M V_0 h_0^2}{R_0^4 \eta}$$

$$\bar{F} = \frac{\pi\sigma_0^2 P_0}{8(H - \sigma_0)^5} (1 - H)(1 + H - 2\sigma_0) \cdot \quad (5.34)$$

$$\left\{ 1_0 - \frac{\pi\sigma_0^2 P_0}{8\bar{M}} \left[\frac{-4H + 4H\sigma_0 - \sigma_0^2 - 2\sigma_0 + 3}{12(H - \sigma_0)^4} + \frac{1}{12(1 - \sigma_0)^2} \right] \right\}$$

5.2 CONCLUZII

În acest capitol a fost prezentat un model original pentru analiza comportamentului materialelor poroase în structuri inelare cu de fluid. Modelul analitic a fost construit

tip XPHD
timpului de comprimare sau a vitezei de comprimare s- ui fluid
Newtonian.

în

în mpact s- -a .

Pentru modelarea curgerii prin materialul poros a fost utilizat modelul lui Darcy -Carman.

Pentru constru

XPHD.

CAPITOLUL 6. EXPULZAREA UNUI MEDIU BINGHAM PRINTR-O STRUCTURĂ INELARĂ DIN SPUMĂ RETICULATĂ COMPRIMATĂ

de la simplu la complicat -
fluide Newtoniene. Din categoria fluidelor ne-
îscoplastice.

6.1. CURGEREA FLUIDELOR VÎSCOPLASTICE PRIN MEDII POROASE

Curgerea fluidelor vî
fluidelor pentru forarea rocilor, injectarea amestecurilor betoane în sol pentru consolidare,
poroase. Capacitatea de amortizare a fluidelor viscoplastice a

[14]

-
vî -greutate mai bun. Fluidele
î

Bingham, Herschel-Bulkley sau Casson.

Pentru fluidele care pot fi utilizate

sau sisteme de
[51] [84]. Alegerea fluidelor Bingham se

balisti

În contextul modelelor teoretice care vor fi prezentate în acest capitol trebuie
-am efectuat anterior pentru curgerea
oroase [95].

Covey [16]

plasticitate adimensional S_0 care ia

f

În

i al tensiunilor de curgere.

Kuang [49] -
 curgere. Mendes [57] gerea unui fluid Bingham
 printr-un mediu poros idealizat de tip particule sferice aliniate. Studiul este bidimensional.
 Modelul teoretic este validat prin intermediul unor experimente efectuate folosind o unsoare

Referitor la curgerea altor fluidelor ne-Newtoniene prin materiale poroase, Chevalier
 [14]

tuburi de curgere it în aproximarea curgerii fluidului
 Bingham în structura materialelor poroase supuse la comprimare.

Recent, un colectiv de cercetare la Fukuoka Institute of Technology, condus de Suciu
 .a. [90] -

Alte studii au fost realizate de colectivul condus de L.J.Gibson [19], [20] de la M.I.T.

generate de unda
 perimental al comportamentul spumelor la comprimare, Dowson
 [19][20]

[59]. În teza sa acesta

stitutului MORATEX

[75]

beneficieze de capacitatea de amortiz

[89].

[89].

Majoritatea sistemel

-au dovedit eficiente în
 suplimentare

uman [90].

Dawson [20] propune un model de p
 bazat pe spume îmbibate cu fluide Newtoniene sau ne-Newtoniene care au capacitatea de a

fluid Bingham dintr-un rezervor printr-

ul Bingham umple în totalitate

6.2.

Fig.6.1 Fluidul Bingham umple
 V, mediul

întreg rezervorul central. Printr-

Procesul de curgere în *zona 1* este vîsco

[16] pentru expulzarea unui mediu Bingham
 Fig.6.1.

Procesul de curgere din *zona 2* este tot vî

-statice

$$Bn = \tau_0 d / (\eta V) > 100),$$

[15] i

Deasemenea, cuplarea proceselor din

6.2.1 Modelarea expulzării în rezervor

[16]

raza $r \leq R_0$

S_0 .

$$S_0 = \frac{R_0 V \eta}{h^2 \tau_0} \quad (6.1)$$

În conformitate cu [16] $S_0 < 0,05$
astfel:

$$p = -\frac{2\tau_0 r}{h} - \frac{4}{3h^2} \sqrt{2\tau_0 \eta V r^3} + C \quad (6.2)$$

$r = R_0$, presiunea este $p = p_0$. Atunci expresia presiunii devine:

$$p = p_0 - \frac{2\tau_0}{h} (R_0 - r) + \frac{4}{3h^2} \left(\sqrt{2\tau_0 \eta V R_0^3} - \sqrt{2\tau_0 \eta V r^3} \right) \quad (6.3)$$

Integrând presiunea pe intervalul $r \in (0, R_0)$

(6.4)

$$\bar{F}_1' = \frac{F_1' h_0}{\tau_0 R_0^3} \quad \bar{H}$$

este:

$$\bar{F}_1' = \frac{\pi p_0 h_0}{\tau_0 R_0} + \frac{2\pi}{3\bar{H}} + \frac{4\pi}{7\bar{H}^2} \sqrt{2S_0} \quad (6.5)$$

Pentru $S_0 > 10$, în [16] expresia presiunii este:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{3\tau_0}{h} - \frac{6\eta V r}{h^3} \quad (6.6)$$

$$p = -\frac{3\tau_0 r}{h} - \frac{3\eta V r^2}{h^3} + C \quad (6.7)$$

$r = R_0$, $p = p_0$) expresia presiunii este:

$$p = p_0 + \frac{3\tau_0}{h} (R_0 - r) + \frac{3\eta V}{h^3} (R_0^2 - r^2) \quad (6.8)$$

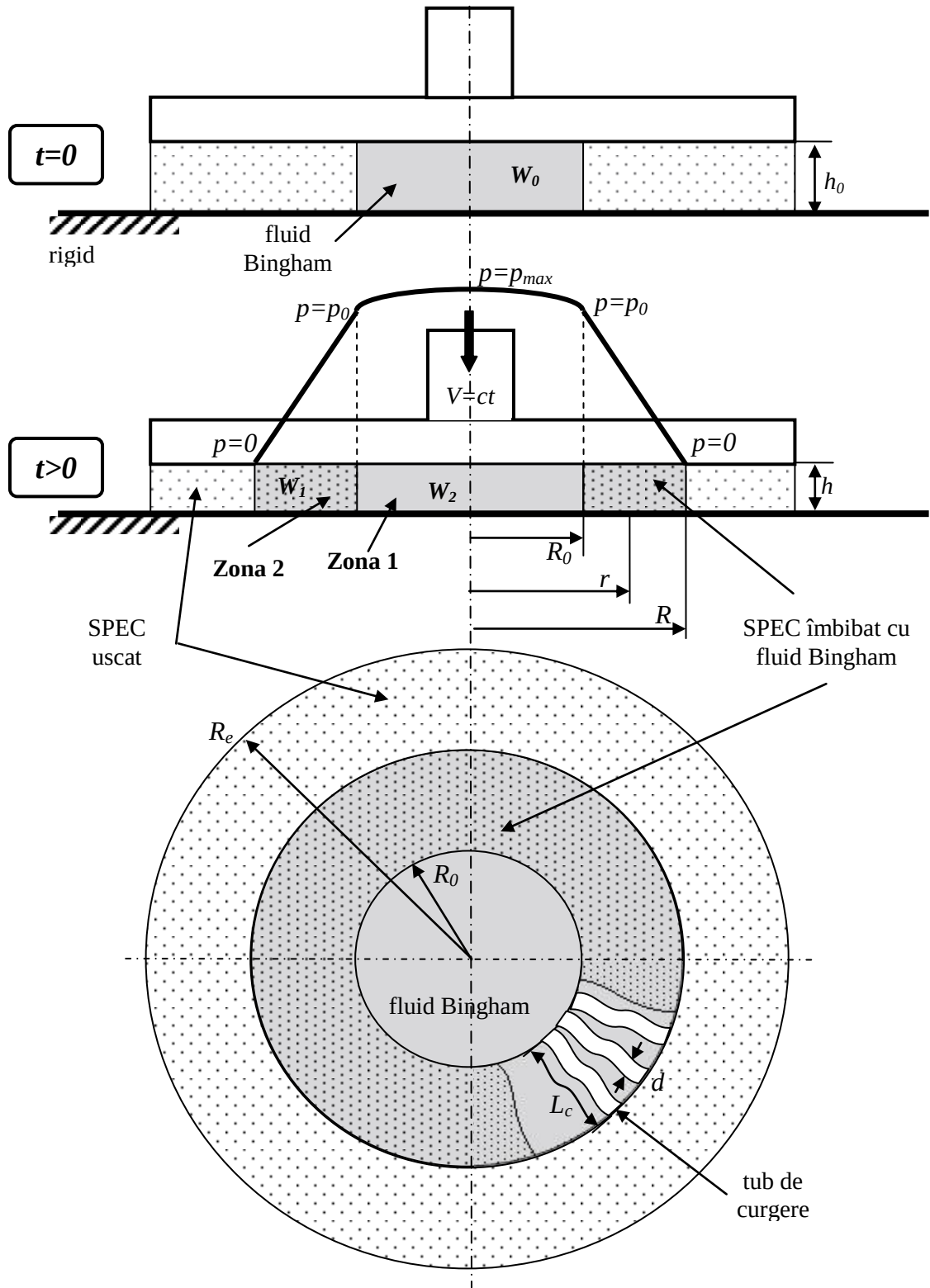


Fig.6.1. Geometria modelului inelului de material poros cu celula de fluid Bingham

$$F_1'' = \pi R_0^2 p_0 + \frac{\pi \tau_0 R_0^3}{h} + \frac{3}{2} \frac{\pi \eta V}{h^3} R_0^4 \quad (6.9)$$

$$\bar{F}_1'' = \frac{F_1'' h_0}{\tau_0 R_0^3}$$

H , este:

$$\bar{F}_1'' = \frac{\pi p_0 h_0}{\tau_0 R_0} + \frac{\pi}{H} + \frac{3\pi}{2H^3} S_0 \quad (6.10)$$

6.2.2 Modelarea expulzării prin materialul poros

Pentru modelarea curgerii unui fluid vîscoplastic printr-
[14] *tuburi de curgere/curent*

-

Pentru curgerea printr-un tub cu raza r
curgere cu forfecare [28][93]:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{2\tau_0}{r} \quad (6.11)$$

d

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{4\tau_0}{d} \quad (6.12)$$

[34]

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\tau_0}{r_h}, \quad (6.13)$$

unde r_h

[34]

-

α_t i perimetrul acestuia - β_t , deci:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\beta_t \tau_0}{\alpha_t} \quad (6.14)$$

$\varepsilon_0 > 0,95$

stratului este încovoierea. Sunt

tfel în

[19], [98], fenomene de

β_t , poate fi considerat constant în timpul procesului de expulzare.

$$\beta_t = 2\pi d \quad (6.15)$$

$$h_0 / R_e < 0.1$$

straturi poroase extrem de compresibile [66], [69], [71], [73], se poate admite ipoteza anterior
grosimea stratului: $\sigma h = ct$, deci $\sigma h = \sigma_0 h_0$.

proocesiului de expulzare, porozitatea spumei - ε

caracteristice a porilor - α_t , în acord cu Delesse [23], deci:

$$\alpha_t / \varepsilon \cong \alpha_{t0} / \varepsilon_0 \quad (6.16)$$

$\sigma = 1 - \varepsilon$) se poate exprima

$$\alpha_t = \frac{\pi d^2 (H - \sigma_0)}{4H(1 - \sigma_0)} \quad \alpha_{t0} = \pi d^2 / 4. \quad (6.17)$$

material poros H spumei reticulate
 (d, σ_0) h_0 i cea din timpul procesului de expulzare h
 de curgere

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{4\tau_0 H(1 - \sigma_0)}{d(H - \sigma_0)} \quad (6.18)$$

"lucrului mecanic minim

drumului minim [58]

înlocuirea lui d cu $d^* = d / T$ - diametrul caracteristic al porilor corectat prin tortuozitatea T a tubului de curgere:

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{4\tau_0 H(1 - \sigma_0)}{d^* (H - \sigma_0)}, \quad [37] \quad (6.19)$$

este $R - R_0$

canalului L_c .

$$T = [L_c / (R - R_0)]^2, \quad (6.20)$$

În Fig.6.2

lungimii drumului duce

În continuare, folosind diametrul canalului d i tortuozitatea T

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{4\tau_0 TH(1 - \sigma_0)}{d(H - \sigma_0)} \quad (6.21)$$

$r = R$ presiunea $p = 0$,

$$p = \frac{4\tau_0 (1 - \sigma_0) H}{d^* (H - \sigma_0)} (R - r) \quad (6.22)$$

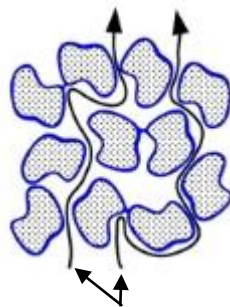


Fig.6.2.

-un material poros [92]

zona 1

i zona 2

p_0 este:

$$p_0 = \frac{4\tau_0(1-\sigma_0)H}{d^*(H-\sigma_0)}(R-R_0) \quad (6.23)$$

Integrând presiunea pe *zona 2*

$$F_2 = \frac{4\pi\tau_0(1-\sigma_0)H}{3d^*(H-\sigma_0)}(R-R_0)^2(R+2R_0) \quad (6.24)$$

$$\bar{F}_2 = \frac{F_2 h_0}{\tau_0 R_0^3} \quad \text{în}$$

$\bar{H}$ i $\bar{R}$ este:

$$\bar{F}_2 = \frac{4\pi(1-\sigma_0)H}{3(H-\sigma_0)} \frac{h_0}{d^*} (\bar{R}-1)^2 (\bar{R}+2) \quad (6.25)$$

zona 1 i *zona 2*. Asamblate separat în S_0

H i $\bar{R}$.

Între variabile H i $\bar{R}$

zona 1

$$\pi h_0 R_0^2 = \pi h R_0^2 + \pi h (R^2 - R_0^2) \varepsilon \quad (6.26)$$

adimensionale $\bar{R}$

H :

$$\bar{R}^2 = \frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0} \quad (6.27)$$

6.2.3 Determinarea forței de expulzare

zona 1 i *zona 2*, $F = F_1 + F_2$, respectiv $\bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$

p_0 de la

$$p_0 = \frac{4\tau_0(1-\sigma_0)H}{(H-\sigma_0)} \frac{R_0}{d^*} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0}} - 1 \right) \quad (6.28)$$

Astfel

$\bar{F}_1'$ pentru *zona 1* în cazul $S_0 < 0,05$

adimensional în

H este:

$$\bar{F}_1' = \frac{4\pi(1-\sigma_0)H}{(H-\sigma_0)} \frac{h_0}{d^*} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0}} - 1 \right) + \frac{2\pi}{3H} + \frac{4\pi}{7H^2} \sqrt{2S_0} \quad (6.29)$$

Însumând $\bar{F}_1'$ pentru *zona 1* cu expresia $\bar{F}_2$ pentru *zona 2* a adimensional total generat prin expulzare este:

$$\bar{F} = \frac{4\pi(1-\sigma_0)H}{(H-\sigma_0)} \frac{h_0}{d^*} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0}} - 1 \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0}} - 1 \right) \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0}} + 2 \right) \right] + \frac{2\pi}{3H} + \frac{4\pi}{7H^2} \sqrt{2S_0} \quad (6.30)$$

În cazul $S_0 > 10$
 H este:

$\bar{F}_1''$ în

$$\bar{F}_1'' = \frac{4\pi(1-\sigma_0)H}{(H-\sigma_0)} \frac{h_0}{d^*} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0}} - 1 \right) + \frac{\pi}{H} + \frac{3\pi}{2H^3} S_0 \quad (6.31)$$

Însumă

:

$$\bar{F} = \frac{4\pi(1-\sigma_0)H}{(H-\sigma_0)} \frac{h_0}{d^*} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0}} - 1 \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0}} - 1 \right) \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{H-\sigma_0}} + 2 \right) \right] + \frac{\pi}{H} + \frac{3\pi}{2H^3} S_0 \quad (6.32)$$

6.3. MODELUL PENTRU EXPULZAREA UNUI VOLUM CONSTANT DE FLUID BINGHAM PRINTR-

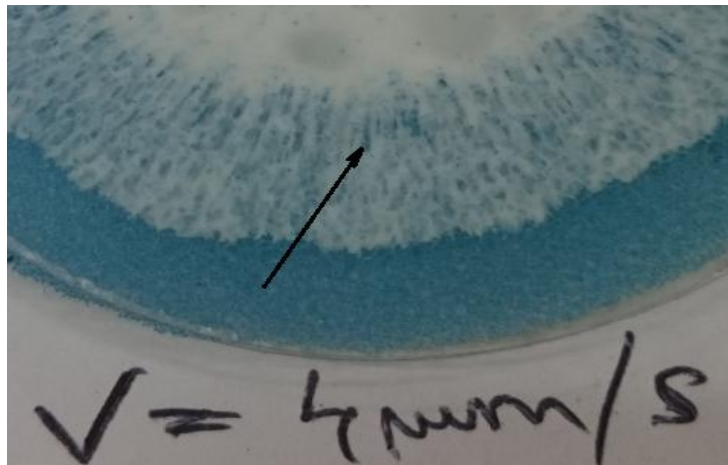


Fig.6.3.

1

st model a fost studiat experimental doar pentru cazul $S_0 < 0,05$.
 analitic
 la vitezele de expulzare folosite. În acest context s-a

Fig.6.3).

Fig.6.4

unte pe

se pot observa în Fig.6.3
nivelul de comprimarea al spumei poroase.

în

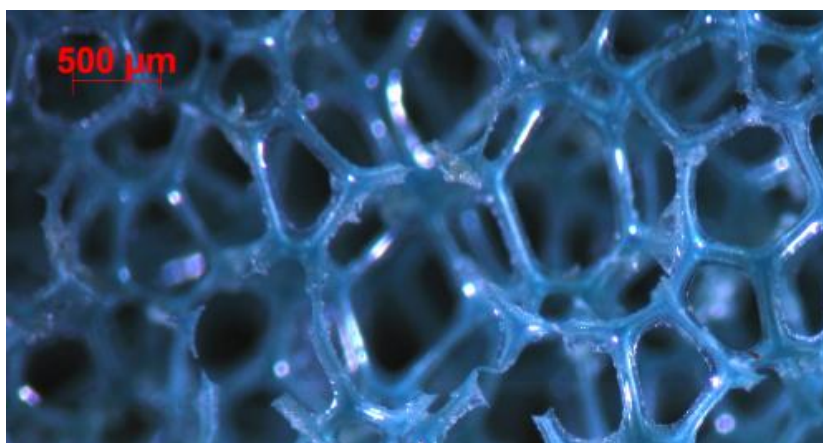


Fig.6.4.

modelului teoretic pot fi euristic arte mic $S_0 < 0,05$
fenomenologice:

Ipoteza 1:

$$T \cdot \varepsilon = T_0 \cdot \varepsilon_0 \quad (6.33)$$

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{4\tau_0 T_0 H^2 (1 - \sigma_0)^2}{d(H - \sigma_0)^2} \quad (6.34)$$

$r = R$ presiunea $p = 0$

$$p = - \frac{4\tau_0 T_0 H^2 (1 - \sigma_0)^2}{d(H - \sigma_0)^2} (R - r) \quad (6.35)$$

Prin integrare pe intervalul $r \in (R_0, R)$

pentru zona 1:

$$\bar{F}'_1 = \frac{2\pi(1 - \sigma_0)^2 H^2}{(H - \sigma_0)^2} \frac{h_0}{d_0^*} \left(\sqrt{\frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0}} - 1 \right) + \frac{2\pi}{3H} + \frac{4\pi}{7H^2} \sqrt{2S_0}, \quad (6.36)$$

unde $d_0^* = d / T_0$.

$$\bar{F} = \frac{4\pi(1 - \sigma_0)^2 H^2}{(H - \sigma_0)^2} \frac{h_0}{d_0^*} \left(\sqrt{\frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0}} - 1 \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0}} - 1 \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0}} + 2 \right) \right] + \frac{2\pi}{3H} + \frac{4\pi}{7H^2} \sqrt{2S_0} \quad (6.37)$$

Ipoteza 2:

în

$$T \cdot h = T_0 \cdot h_0 \quad (6.38)$$

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{4\tau_0 T_0 (1 - \sigma_0)}{d(H - \sigma_0)} \quad (6.39)$$

$r = R$ presiunea $p = 0$

$$p = -\frac{4\tau_0 T_0 (1 - \sigma_0)}{d(H - \sigma_0)} (R - r) \quad (6.40)$$

Prin integrare pe intervalul $r \in (R_0, R)$
pentru zona 1:

$$\bar{F}'_1 = \frac{4\pi(1 - \sigma_0)}{(H - \sigma_0)} \frac{h_0}{d_0^*} \left(\sqrt{\frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0}} - 1 \right) + \frac{2\pi}{3H} + \frac{4\pi}{7H^2} \sqrt{2S_0} \quad (6.41)$$

$$\bar{F} = \frac{4\pi(1 - \sigma_0)}{(H - \sigma_0)} \frac{h_0}{d_0^*} \left(\sqrt{\frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0}} - 1 \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0}} - 1 \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{1 - \sigma_0}{H - \sigma_0}} + 2 \right) \right] + \frac{2\pi}{3H} + \frac{4\pi}{7H^2} \sqrt{2S_0} \quad (6.42)$$

6.4. REZULTATE EXPERIMENTALE

6.4.1 Materiale și procedura experimentală

CETR-UMT2 pentru studierea procesului XPHD
dintr-
poros.

ticule al unor inele de material



Fig.6.5.

Modelele experimentale pe care s-
exterior de 66 mm i diametrul rezervorului interior (celula) de 33 mm
stratului de material nedeformat a fost de aproximativ 4 mm.

Umplerea celulei cu fluidul de lucru s-

ametrul

elimina

-a

-a

limentar s-

pentru nivelare. În final s-

ml

-

(Fig.6.15). Pentru umplerea
ml.



Fig.6.6. Standul CETR-UMT2 modificat



Fig.6.7. Inelul de

executarea de teste la comprimare folosind inele de material poros cu diametrul de 66 mm. În Fig.6.6

a cum se poate vedea în Fig.6.7.

comprimare de 2 mm/s i 4 mm/s.

mm/s. Pentru viteze de comprimare mai mari de 5 mm/s, s-

înregi



Fig.6.8. Spumele FILTREN TM: F133 stânga, F280 centru, F450 - dreapta

$\rho_0=0.982$, FILTREN® TM 25280 (codificat: F280) $\rho_0=0.976$, FILTREN® TM 25450 (codificat: F450) $\rho_0=0.997$. În Fig.6.8 sunt prezentate imagini cu materialele utilizate.

Pentru toate rezultatele experimentale care vor fi prezentate în acest capitol a fost

Pentru determinarea modelului reologic al pastei a fost utilizat un test de tipul -se patru geometrii de lucru - conuri, cu dimensiunile prezentate in Tabelul 6.1.

Tabelul 6.1 Geometria conurilor vîscozimetrului

Numărul conului	Raza conului [mm]	Unghiul la vîrf al conului [grade]	Gradientii de viteză [s⁻¹]
3	9.53	0.45	
5	9.53	1.8	
6	7.02	1.8	
8	15.11	3	

Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 6.2.

Tabelul 6.2

Nr.	Vîscozitate (Pa·s)	Viteză (RPM)	Tensiunea de forfecare (N/m²)	Gradient de viteză (1/sec)	Temperatură (°C)
1	0.8349	500	834.9	1000	20
2	0.8025	500	802.5	1000	22.3
3	0.7549	500	754.9	1000	24.6
4	0.75	500	750	1000	26.8
5	0.7374	500	737.4	1000	29
6	0.725	500	725	1000	31.3
7	0.7325	500	732.5	1000	33.4
8	0.7424	500	742.4	1000	35.8
9	0.77	500	770	1000	37.9
10	0.7549	500	754.9	1000	40.1

Tabelul 6.3

Nr.	Vîscozitate (Pa·s)	Viteză (RPM)	Tensiunea de forfecare (N/m²)	Gradient de viteză (1/sec)	Temperatură (°C)
1	0.715	500	715	1000	19.9
2	0.685	500	685	1000	22.3
3	0.6825	500	682.5	1000	24.5
4	0.6825	500	682.5	1000	26.8
5	0.6825	500	682.5	1000	28.9
6	0.6975	500	697.5	1000	31.2
7	0.725	500	725	1000	33.4
8	0.7625	500	762.5	1000	35.8
9	0.785	500	785	1000	37.9
10	0.87	500	870	1000	40.2

Nr. test	Model Bingham			Model Casson			Model Herschel-Bulkley			
	τ_0 [Pa]	η [Pa.s]	Coef. corel.	τ_0 [Pa]	η [Pa.s]	Coef. corel.	τ_0 [Pa]	m [Pa.s ⁻ⁿ]	n	Coef. corel.
1	364	0,322	93,3%	254	0,113	93,9%	343	0,682	0,903	93,7%
2	370	0,328	93,8%	252	0,119	95,2%	313	1,82	0,781	96,2%
3	343	0,337	93,4%	220	0,136	95,3%	233	5,34	0,649	97,7%

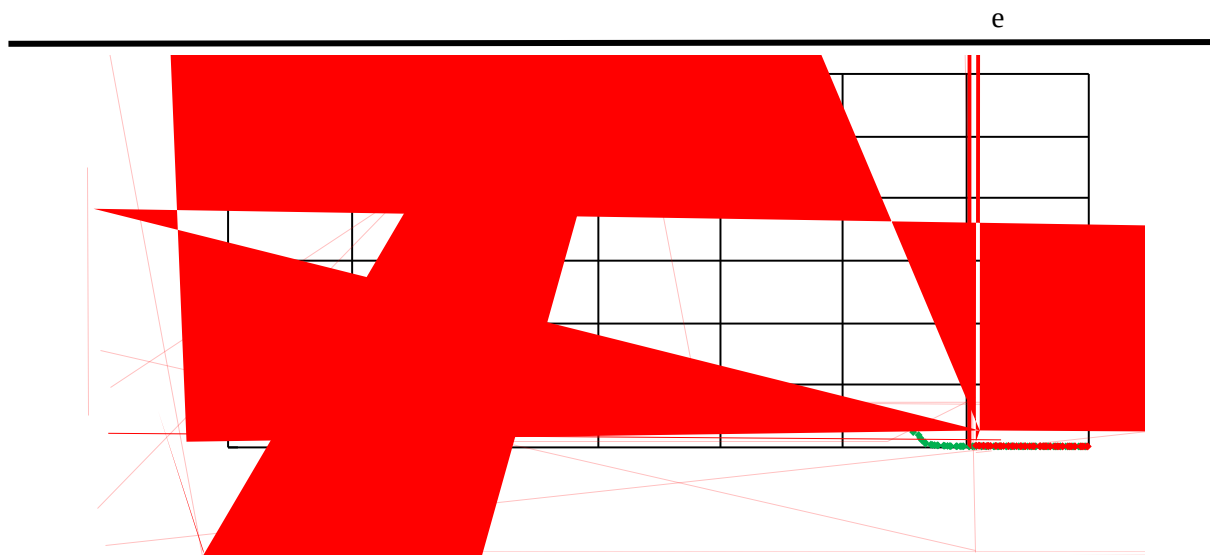


Fig.6.11.

Pentru materialul F4

mm/s.

Fig.6.12 i Fig.6.13.
mm/s.

nu s-a realizat din cauza cantii

-a optat

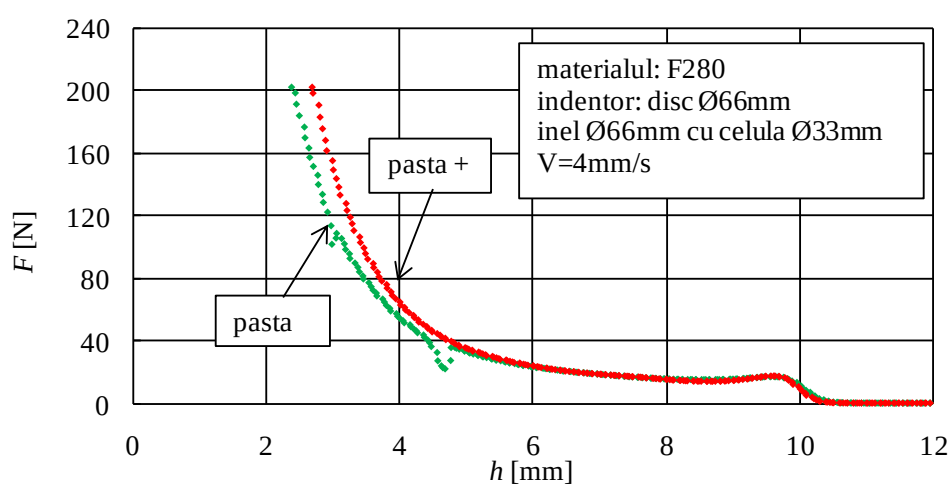


Fig.6.12.

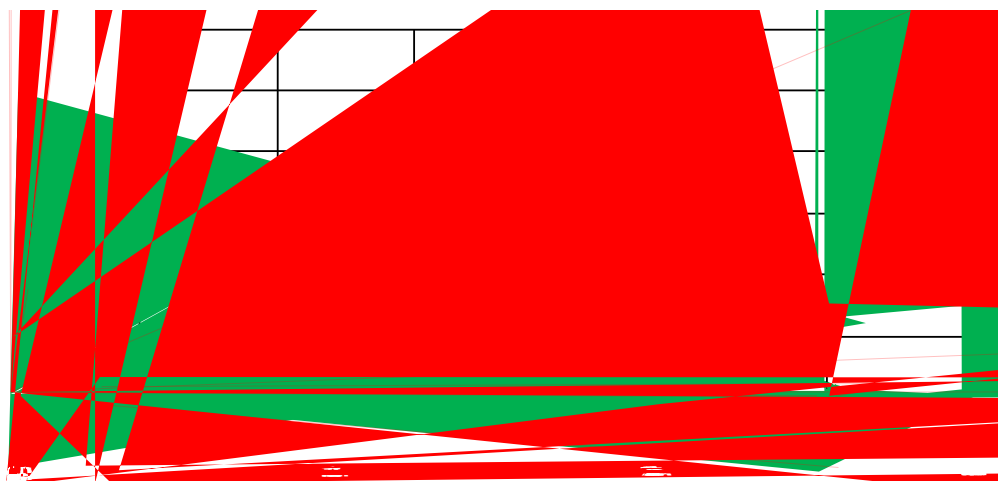


Fig.6.13.

Fig.6.14

materialul cu porozitatea cea mai mare, rezisten a la curgere a fluidului este

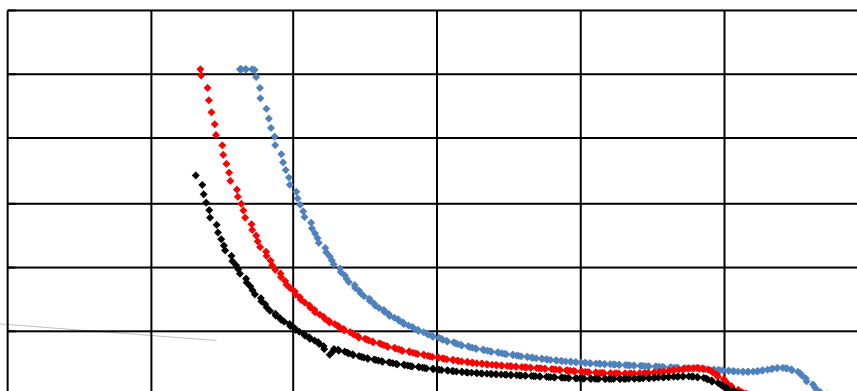


Fig.6.14.

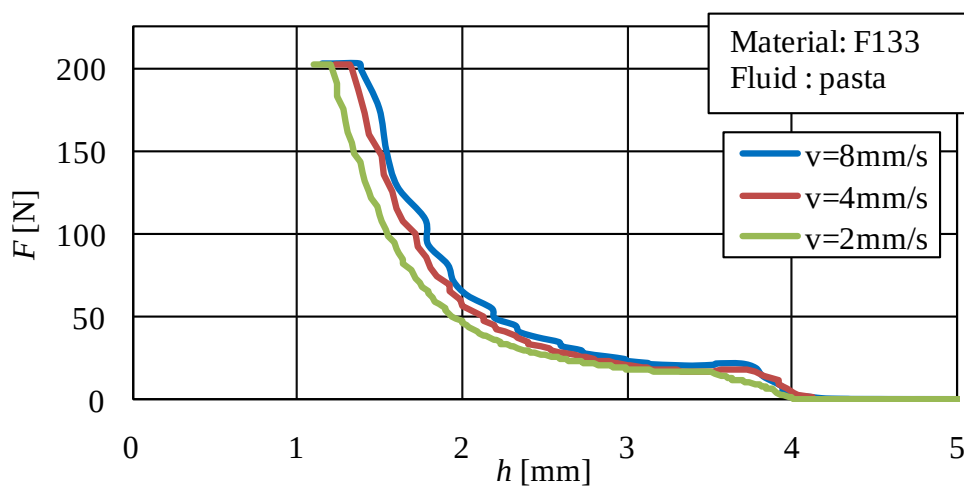


Fig.6.15.

-UMT2

În Fig.6.15

mm/s

e poate observa o
mm/s la 4 mm/s i

la 8 mm/s. Acest lucru este în acord cu modelul teoretic. Pentru deformarea materialului pe intervalul $4 \div 3,5$ mm

În graficele din Fig.6.16, Fig.6.17 i Fig.6.18 este r
materialului la comprimare atât în

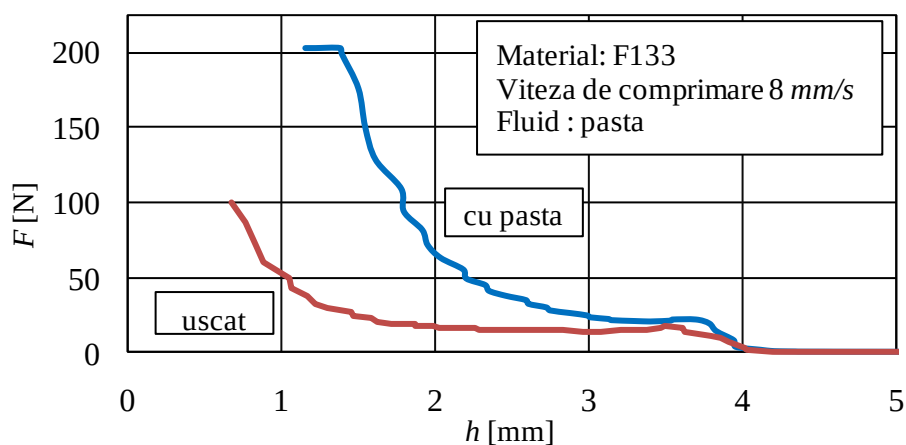


Fig.6.16.

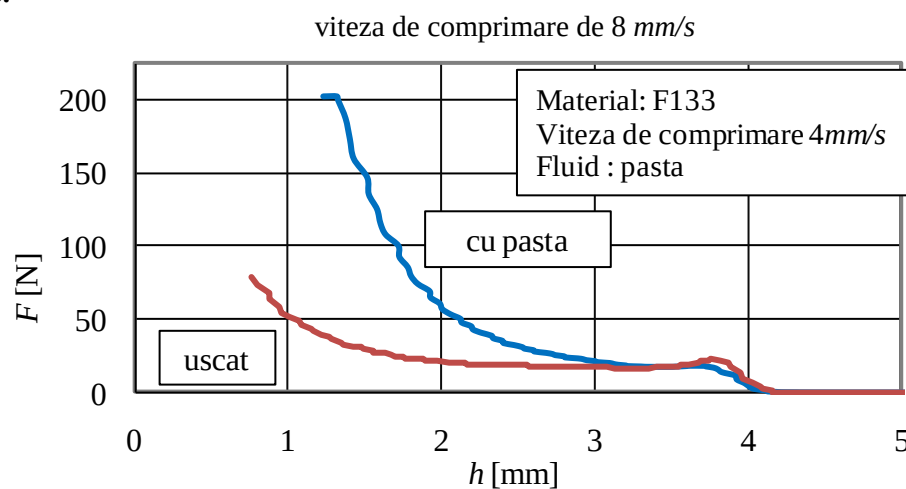


Fig.6.17.

viteza de comprimare de 4 mm/s

Înainte

-UMT2 se scad

Bazat pe principiul

XPHD.

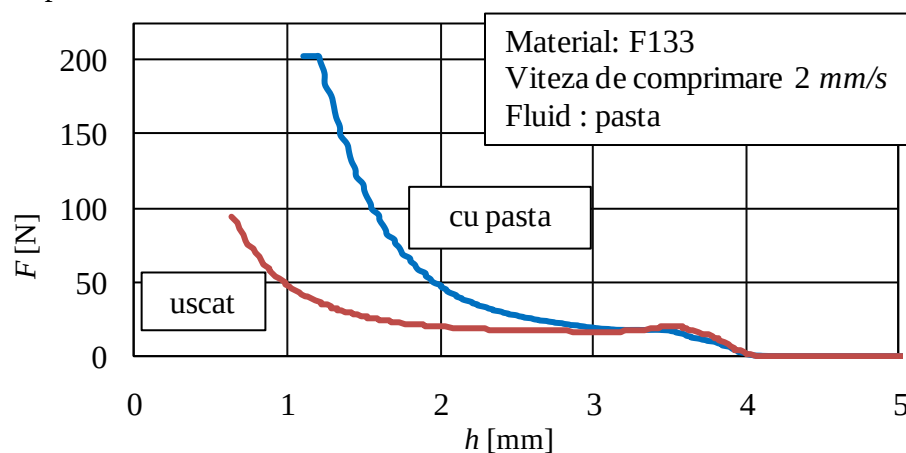


Fig.6.18.

viteza de comprimare de 2 mm/s

În Fig.6.19

XPHD determinate pentru toate vitezele de

comprimarea materialului uscat disp

XPHD

de 1 mm/s. Valorile înregistrate au fost mai mari decât cele înregistrate pentru comprimare cu 2 mm/s

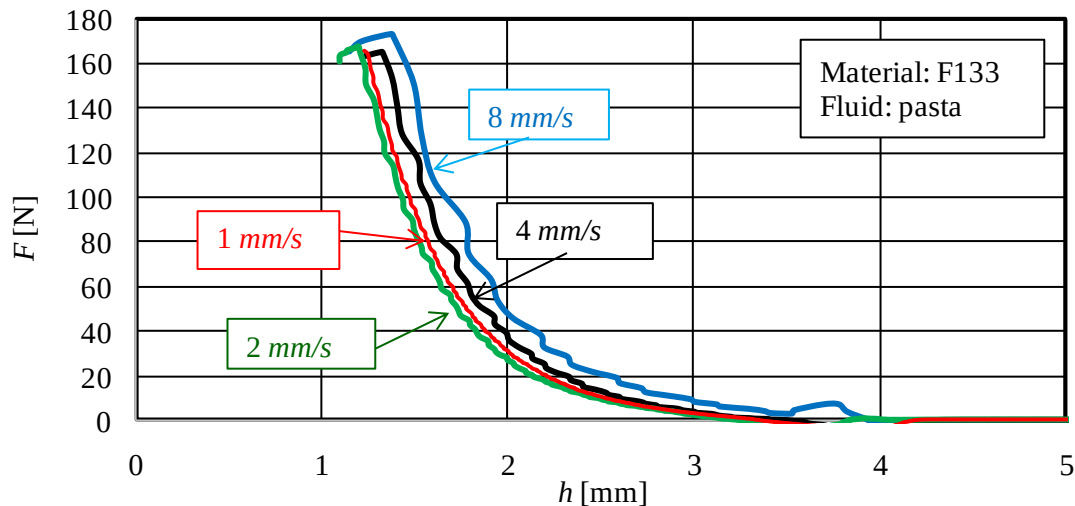


Fig.6.19. XPHD

6.5. VALIDAREA MODELULUI TEORETIC

$$S_0 = R_0 V \eta / (h_0^2 \tau_0)$$

îmbibat, grosimea

stratului de

. Intervalul de valori pentru

S_0 este $0,001 < S_0 < 0,11$

mm/s, pentru

grosimi ale stratului de material comprimat mai mici de 2 mm

$$S_0 < 0,05.$$

-0

osind rezultatele prezentate

în Fig.6.19

realizate pentru valori c

$\eta = 0,33 Pa \cdot s$ i a unei tensiuni de

prag $\tau_0 = 350 Pa$

$$\bar{F} = \frac{4\tau_0\pi(1-\sigma_0)h}{(h-h_0\sigma_0)} \frac{R_0^3}{d^*} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{h/h_0-\sigma_0}} - 1 \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{h/h_0-\sigma_0}} - 1 \right) \right. \\ \left. \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{h/h_0-\sigma_0}} + 2 \right) \right] + \frac{2\pi}{3h/h_0} + \frac{4\pi}{7(h/h_0)^2} \sqrt{2S_0} \quad (6.46)$$

Pentru determinarea lui d^*

Fig.6.4

drumului real parcurs de fluid prin pori a fost construit un model bidimensional. Pentru

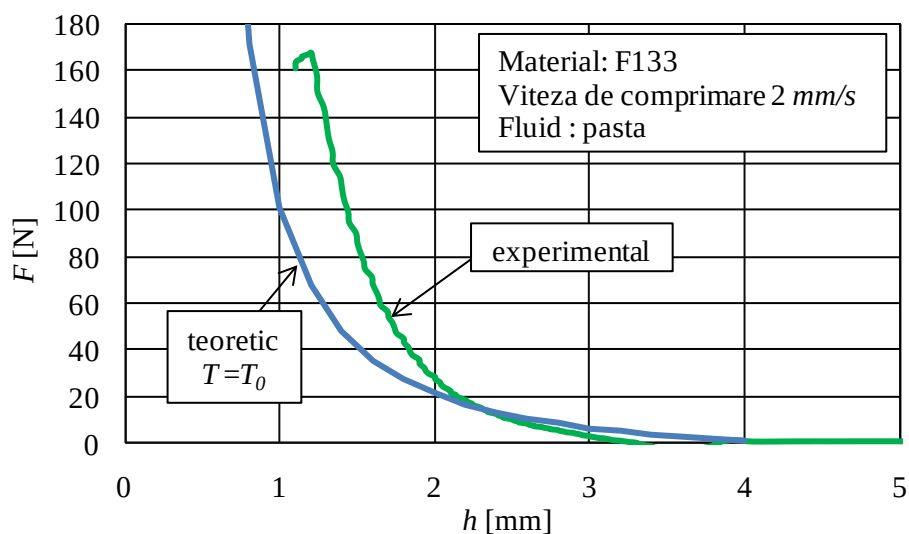
structur

-

 $T_0 = 1,33$

pentru materialul nedeformat (Anexa 2)

$$T = T_0 = 1,33.$$

**Fig.6.20.** Compara ia analitic-

($\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4 \text{ mm}$, $R_0 = 16,5 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $\tau_0 = 350 \text{ Pa}$, $\eta = 0.33 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

6

a fluidului. Se p

relativ

Fig.6.20 i Fig.6.21

ezpulzare.

Fig.6.21. analitic-

($\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4 \text{ mm}$, $R_0 = 16,5 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $\tau_0 = 350 \text{ Pa}$, $\eta = 0.33 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

Pentru intervalul $4 \div 2,8 \text{ mm}$

precizia modelului
expulzat prin materialul poros.

ipotezei 1 i a ipotezei 2, pe baza
are le forme:

$$F = \frac{4\pi\tau_0(1-\sigma_0)^2 h^2}{(h-h_0\sigma_0)^2} \frac{R_0^3}{d_0^*} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{h/h_0-\sigma_0}} - 1 \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{h/h_0-\sigma_0}} - 1 \right) \right] + \frac{2\pi}{3h/h_0} + \frac{4\pi}{7(h/h_0)^2} \sqrt{2S_0} \quad (6.47)$$

$$F = \frac{4\pi\tau_0(1-\sigma_0)h_0}{(h-h_0\sigma_0)} \frac{R_0^3}{d_0^*} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{h/h_0-\sigma_0}} - 1 \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{1-\sigma_0}{h/h_0-\sigma_0}} - 1 \right) \right] + \frac{2\pi}{3h/h_0} + \frac{4\pi}{7(h/h_0)^2} \sqrt{2S_0} \quad (6.48)$$

graficul din Fig.6.22
teoretic pentru expulzare cu 2 mm/s

onstante.

mm/s.

rezultatele experimentale. Pentru $h < 2$

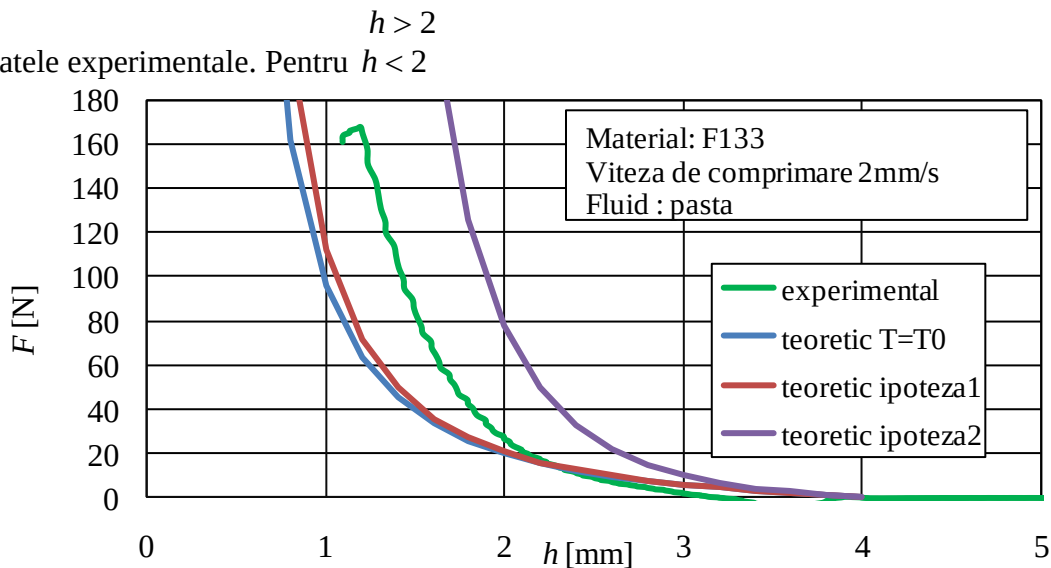


Fig.6.22.

-experimental folosind modelul cu tortuozitate T
ipotezei 1 i ipotezei 2 ($\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4$ mm, $R_0 = 16,5$ mm,
 $d = 1$ mm, $\tau_0 = 350$ Pa, $\eta = 0,33$ Pa · s) pentru expulzare cu 2 mm/s

fluidului prin porii materialului poros comprimat

curgerea

a

, prin urmare i a de expulzare.
expulzarea cu

În graficele din Fig.6.23 i Fig.6.24

viteza de 4 mm/s, respectiv 8 mm/s. Pentru vitezele de 4mm/s i 8 mm/s

mm/s

Fig.6.23. -experimental folosind modelul cu tortuozitate T
 ipotezei 1 și ipotezei 2 ($\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4 \text{ mm}$, $R_0 = 16,5 \text{ mm}$,
 $d = 1 \text{ mm}$, $\tau_0 = 350 \text{ Pa}$, $\eta = 0.33 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) pentru expulzare cu 4 mm/s

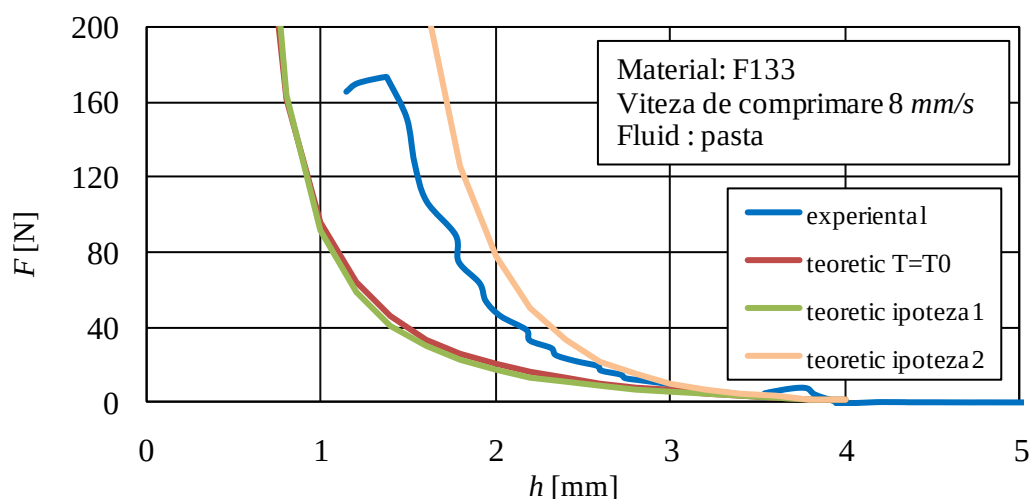


Fig.6.24. -experimental folosind modelul cu tortuozitate T
 ipotezei 1 și ipotezei 2 ($\sigma_0 = 0,05$, $h_0 = 4 \text{ mm}$, $R_0 = 16,5 \text{ mm}$,
 $d = 1 \text{ mm}$, $\tau_0 = 350 \text{ Pa}$, $\eta = 0.33 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) pentru expulzare cu 8 mm/s

6.6. CONCLUZII

În acest capitol este prezentat un model analitic original de estimare a comportamentului materialelor poroase cu rezervor de fluid Bingham supuse compresiunii. Rezervorul este central liber al uid inelului de material poros

inelului de material poros cu un

sunt de tip XPHD

ultimul pas

în cadrul doctoratului în studierea sistemelor
C le

un

fluid Bingham.

-a folosit conceptul de tub de curgere/tub de curent la modelarea proceselor rheostatice de expulzare a fluidelor/mediilor Bingham prin

poros

Calcululele

e

, lucru care

al modelelor pentru

Pentru toate materialele utilizate, precizia modelului teoretic de calcul

calculate analitic ca urmare a unor fenomene neglijate

-a materializat prin considerarea

CAPITOLUL 7.CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE

7.1. CONCLUZII GENERALE ASUPRA STUDIULUI PROCESELOR DE CURGERE PRIN SPEC

Prezenta teză de doctorat abordează o temă de cercetare inedită

La nivel național, studiul

ocurilor s-a efectuat numai în cadrul Universității Politehnica din București de către echipa Pascovici.

Studiul *medii complexe* a fost abordat atât teoretic, cât și experimental. Au fost construite modelele teoretice care au la bază dezvoltarea lor a avut loc de la simplu la complex, până la validarea modelelor teoretice dezvoltate.

-
-
- expulzare;
-
-
-
- modelarea curgerii fluidelor ne-

studierea

mentale inedite imaginate

7.2.

structura tezei:

- Studierea
 -
- caracteristicilor curgerii în medii poroase;

•

-al doilea

lui Einstein, așa cum a fost de Brinkman;

- Reprezentarea profilului normal al curgerii de tip Poiseuille pentru un mediu Brinkman;
- Reprezentarea raportului debitului normal al curgerii pentru medii

parametrii caracteristici ai mediului poros utilizat.

•

1

Brinkman;

- Evid

lui Einstein asupra profilului curgerii mediului. Acest lucru a fost pus în valoare prin kman și

•

i construit în cadrul unui stagiu pentru

doctorat;

•

dispozitivul proiectat;

•

esute;

•

•

materialului poros;

- Determinarea structurii interioare a materialului cu ajutorul microscopului;
- -Forcheimmer;
- Validarea rezultatelor cu Kozeny-

-

Green.

•

pentru materiale poroase în folosind un indenter de tip sferic și unul de tip disc;

•

,

-plastice, prin intermediul

unui indenter sferic.

•

•

• Descrierea curgerii prin materialele poroase folosind legea lui Brinkman;

•

-Carman pentru determinarea parametrilor

- Efectuarea unui studiu experimental complex pentru procesele de comprimare a unui

impuls constant;

- Validarea modelelor analitice cu rezultatele experimentale.

idelor ne-Newtonine prin spume reticulate

-

-

fluid Bingham printr-

-

unui fluid Bingham printr-
de curent/curgere.

-a utilizat conceptul de tub

- Aplicarea un
- Efectuarea unui studiu experimental complex pentru procesele de comprimare a unui
- Compararea rezultatelor modelelor teoretice prezentate cu rezultate experimentale pentru validare.

7.3. PERSPECTIVE

a curgerii prin structuri solide

poroase deformate elastic

- expulzare ridicate (medii sau mari);
- Investigarea cu un prin comprimare pentru spume reticulate;
- Investigarea cu un permeamtru realizat prin comprim materiale poroa
- Reproiectarea permeametrului în vederea atingerii unor presiuni de alimentare mai ;
- Reproiectarea permeametrului existent
- Dezvoltarea de modele structurii solide a straturilor poroase comprimate;
- neîmbibate;
- de tub de curent/curgere în regim dinamic materialului poros utilizat;
- au cu fluid ne-Newtonian;

BIBLIOGRAFIE

- [1] ***, 1988, Test 220 - "Method of test for permeability of soil", Department of Transportation, Engineering Service Center, Transportation Laboratory;
- [2] ***, 1996, National Highway Safety Transportation Administration (NHTSA) - "Traffic safety facts", US., Young Drivers, 1-6;
- [3] ***, 1999, National Highway Safety Transportation Administration (NHTSA) - "Motorcycle safety facts", US., Young Drivers, 1-6;
- [4] Journal of Geotechnical Engineering, 16, p. 27 40;
- [5] Bakhmeteff B.A., Feodoroff N.V., 1937, Journal of Applied Mechanics, 4A, 97;
- [6] Bear J., 1968, "Physical properties of water percolage and seepage", UNESCO;
- [7] Bear J., 1972, "Dynamics of fluids in porous media", Dover Publications, New York;
- [8] Berdichevsky A., Cai Z., 1993, "Preform permeability predictions by self-consistent method and finit element simulation", Polimer Composites, 14; 132;.
- [9] Boer R., 1996, "Porous Media", Appl. Mech. Rev., 49, 4;
- [10] Bowden, F.P., Tabor, D., 1950, "The Friction and Lubrication of Solids", Oxford, Clarendon Press, p. 259-284;
- [11] Brinkman H.C., 1949, "A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles", Appl.Sci. Res., A1, p. 28-34;
- [12] Carman P.C., 1937, "Fluid flow through granular beds", Transactions, Institution of Chemical Engineers, London, 15, p. 150-166;
- [13] Chapman R.E., 1981, "Geology and Water An introduction to fluid mechanics for geologists", Martinus Nijhoff & Dr. W. Junk Publishers, The Hague & Boston & London;
- [14] Chevalier T., Chevalier C., Clain X., Dupla J.C., Canou J., Rodts S., Coussot P.,
of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 195, p. 57 66;
- [15] Coussot P., 2014, "Yield stress fluid flows: A review of experimental data", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 211, p. 31 49;
- [16] Covey G.H., Stanmore B.R., 1981, "Use of the parallel-plate plastometer for the characterization of viscous fluids with a yield stress", Journal of Non-Newtonian fluid mechanics, 8, p. 249-260;
- [17] Darcy H., 1856, "Les fontaines publiques de la ville de Dijon", Paris/Dalmont;
- [18] Davies C.N., 1952, "The separation of airborne dust and particles", Proc. Instn. Meh. Engrs., 165, p. 185-213;
- [19] Dawson, M.A., 2008," Modeling the dynamic response of low-density, reticulated, elastomeric foam impregnated with Newtonian and non-Newtonian fluids", PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology;
- [20] Dawson, M.A., 2009, Composite plates with a layer of fluid-filled, reticulated foam
ngineering, 36,
p. 1288-1295;
- [21] Dawson, M.A., Germaine, J., Gibson, L.J., 2007, "Permeability of open-cell foams under compressive strain", Int. J. Solids Struct. 44, p. 5133-5145;

-
- [44] Iberall A.S., 1950, "Permeability of glass wool and other highly porous media", J. Res. Nat. Bur. Stand., 45, p. 398-406;
 - [45] Ilie M.B., 2011, "Capacitatea de amortizare a straturilor poroase foarte compresibile
 - [46] Ilie M.B., Pascovici M.D., Cicone T., Predescu A., 2011, "Compliant porous layers imbibed with liquids squeezed at constant velocity by a rigid sphere", U.P.B. Sci. Bull., Series D, 4, 73;
 - [47] armour sheets", J. Banhart, N.A. Fleck: Cellular Metals and Metal Foaming Technology, MIT;
 - [48] Kamke E., 1971, "Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie", Leipzig 1932, -367;
 - [49] Kuang. P.Q., 1989, "Two-phase flow of Bingham fluid through porous media", Mechanical Resrch Communications, 16, 6, p. 333-338;
 - [50] Lage J.L., 1993, Natural convection within a porous medium cavity: predicting tools for flow regime and heat transfer, INT. COMM. HEAT MASS TRANSFER, Vol. 20, p. 501-513;
 - [51] Lange U., Vassileva S., Zipser L., 2002, "Controllable shock and vibration Dampers based on magnetorheological fluids", Proceedings of the WSEAS International Conference, may 12-16, Cancun Mexico;
 - [52] Lundstrom T.S., 2000, "The permeability of non-rimp stithed fabrics", Composites: Part A, 31, p. 1345-1353;
 - [53] Lundstrom T.S., Toll S., Hakanson J.M., 2002, "Measurement of the permeability tensor for compressed fibre beds", Transport in Porou Media, nr. 47, p. 363-380;
 - [54] Mahmoodi P., Keel C.J.

Aerodynamics, 36, p. 749-756;
 - [55] Mao N., Russel J., 2009, "Directional permeability in homogeneous nonwoven structures part I: The relationship between directional permeability and fibre orientation", Journal of textile Institute, 91:2, p. 235-243;
 - [56] Mao N., Russel J., 2009, "Directional permeability in homogeneous nonwoven structures part II: Permeability in idealised structures", Journal of textile Institute, 91:2, p. 244-258;
 - [57] Mendes P.R.S., Naccache M. F., Braga C. V. M., Nieckele A. O., Ribeiro F. S., 2002, "Flows of Bingham materials through ideal porous media: An experimental and theoretical study", J. Braz. Soc. Mech. Sci., 24, 1, Rio de Janeiro Mar;
 - [58] Merriman M., 1903, "The Principle of Least Work in Mechanics and Its Use in Investigations regarding the Ether of Space", Proceedings of the American Philosophical Society, 42, 173, p. 162-165;
 - [59] Mikualowski G., 2008, "Adaptive impact absorbers based on magnetorheological fluids", PhD thesis, Smart Technology Centre Institute of Fundamental Technological
 - [60] Milne A.A., 1954, A Theory of Rheodynamic Lubrication, Kolloidk-Z. 139, Haft 1/2, p. 96-101;
 - [61] Mirbod P., Andreopoulos Y., Weimbaum S., 2008, "An airborne jet train that flies on a soft porous track", The American Physical Society 61th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, San Antonio/Texas;
 - [62] Mirbod P., Andreopoulos Y., Weinbaum S., 2009, "On the generation of lift forces in random soft porous media", J. Fluid Mech., 619, p. 147-166;
 - [63] Ong C.W., Boey C.W., Hixson R.S., Sinibaldi J.O., 2011, "Advanced layered personnel armor", International Journal of Impact Engineering, 38, 369-383;

-
- [64] Pampolini G., 2010, Les proprietes mecaniques des mousses polymeriques a cellules
Universitatea din Provence
- [65] Pampolini G., Piero G.D., 2008, "Strain localization in open-cell polyurethane foams: Experiments and theoretical model", *Journal of mechanics of materials and structures*, 3, 5;
- [66] Pascovici M.D, Cicone T., Marian V., 2009, "Squeeze process under impact in highly compressible porous layers imbibed with liquids", *Tribology Int.*, Vol. 42, p. 1433-1438;
- [67] Pascovici M.D., 1994, "Procedeu de pompare prin dislocarea fluidului si dispozitiv pentru realizarea acestuia", Patent Nr. 109469;
- [68] Pascovici M.D., 2001, "Lubrication by dislocation: a new mechanism for load carrying capacity", In *Proceedings of the 2nd World Tribology Congress*, Vienna, p. 41;
- [69] Pascovici M.D., 2007, "Lubrication of red blood cells in narrow capillaries. A heuristic approach", *2nd Vienna Intern. Conf. on Micro and Nano-technology*, p. 95-100;
- [70] Pascovici M.D., 2010, "Lubrication processes in highly compressible porous layers", *Lubrification et tribologie des revetements minces, Actes des journees internationales francophones des tribologie (JIFT)*, Poitiers University (2007), 1, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, p. 3-12;
- [71] Pascovici M.D., Cicone T., 2003, "Squeeze-film of unconformal, compliant and layered contacts", *Tribology International*, 36, p. 791-799;
- [72] Pascovici M.D., Popescu C.S., Marian V.G., 2009, "Impact of a rigid sphere on a highly compressible porous layer imbibed with a Newtonian liquid", *Proc. IMechE*, 224, Part J: *J. Engineering Tribology*;
- [73] Pascovici M.D., Russu C., Cicone T., 2004, "Squeeze film of conformal, layeres compliant and porous contacts", *The 9th International Conference of Mechanisms and Mechanical Transmissions, Acta Tehnica Napocensis, Applied Mathematics and Mechanics*, 47, I;
- [74] Poh C.W., 2008, "Investigation of new materials and methods of construction or personnel armor", thesis, Naval Postgraduate School;
- [75] Polak J., Kucinska I., Grabowska G., Blaszczyk J., Ledwon E., Romek R., Struszczyk M.H., 2009, "Bullet Proof Vests with the Ballistic Inserts Based on the Fibrous Composites", *The Institute of Security Technology "Moratex"*, Project No. POIG 01.03.01-10-
- [76] Popescu C., 2010, "Procese de curgere în straturi poroase, foarte compresibile, supuse
- [77] Popescu C., 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", *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, 2, 73;
- [78] Popescu C., Marian V., Pascovici M.D., 2009, "Experimental and theoretical analysis of the permeability for highly compressible porous layers", *Journal of the Balkan Tribological Association*, vol. 15, 1, p. 86-92;
- [79] -layer beams with embedded
electro-
vol.10, p. 521-529;
- [80]

-
- [81] Radu M., Cicone T., 2014, "Experimental determination of the damping capacity of highly compressible porous materials imbibed with water", 8th International Conference on Tribology, 30th Oct.-1th Nov., Sinaia, Romania;
 - [82] Radu M., Cicone T., Pascovici M.D., Turtoi P., Istrate M., 2015, "A comparative experimental study of impact damping using highly compressible porous material imbibed with fluids", 6th International Conference Computational Mechanics and Virtual Engineering, COMEC, 15-
 - [83] Robbins J.R., Dinga J.L., Gupta Y.M., 2004, Load spreading and penetration resistance of layered structures a numerical study, *International Journal of Impact Engineering*, 30, p. 593-615;
 - [84] Rodrigues J.F., 2015, "On the mathematical analysis of thick fluids", *Journal of Mathematical Sciences*, 210, 6, p. 835-848;
 - [85] Rushton A., Green D.J., 1968, "The analysis of textile filter media", *Filtration and separation*, 5, p. 516-523;
 - [86] Scheidegger A.E., 1974, "The physics of flow through porous media", a 3-a editie, University of Toronto Press;
 - [87] Shen X., 1996, "An application of needle-punched nonwovens in the press casting of concrete", teza doctorat, University of Leeds;
 - [88] The experiment", *Technical Sciences*, 17, 4, p. 321-335;
 - [89] Staiger J., 2012, "Magnetic body armor", California State Science Fair, J0320;
 - [90] Suciu V., Fukui S., Kimura Y., 2011, "Modeling and simulation of a shock absorbing shell for ballistic vests and helmets to achieve optimal protection", *International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*;
 - [91] Sullivan R.R., Hertel K.L., 1940, "Flow of air through porous media", *J. Appl. Phys.*, 11, p. 761-765;
 - [92] Thorbjorn A., Moldrup P., Blendstrup H., Komatsu T., Rolston D.E., 2008, "A gas diffusivity model based on air-, solid-, and water-phase resistance in variably saturated soil", *Vadose Zone Journal*, November, 7, p. 1276-1286;
 - [93]
 - [94]
 - Industry ;
 - [95] Turtoi P., Cicone T., Pascovici M.D., 2012, "Squeeze flow of a power-law fluid between parallel circular plates", *Proceedings of VAREHD*, 16;
 - [96] Turtoi P., Pascovici M.D., 2016, Finite volume squeeze flow in highly compressible porous annular discs , *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, 78, 2, p. 43-56;
 - [97] Squeeze of a Bingham fluid through a multi-disc package
 - [98] Vossen B.G., 2010, "Modeling the application of fluid filled foam in motorcycle helmets", PhD Thesis, Eindhoven University of Technology;
 - [99] Wenzel L.K., 1942, "Methods for determining permeability of water-bearing materials", US Government Printing Office, Washington;
 - [100] Woltmann R., 1792, "Beytrage zur hydraulischen architektur", Dritte Band, Johann Christian Dietrich, Gottingen;
 - [101] Wu Q., Andreopoulos Y., Weinbaum S., 2004, "From Red Cells to Snowboarding: A New Concept for a Train Track", *Phys. Review Letters*, 93, 19, p. 194501-1 - 194501-4;
 - [102] Zunker F., Z. 1932, *Pfl. Ernähr. Dng.* A25,1;

ANEXA 1. PROFILULUI DE VITEZE PENTRU O CURGERE POISEUILLE PRINTR-UN MEDIU BRINKMAN

[29]
[11]

$x,$

$$\frac{d^2 u}{dy^2} - \frac{u}{\phi} - \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} = 0 \quad (A1.1)$$

Pentru reprezentarea profilului curgerii s-
(A1.1). În cazul unui film de fluid de grosime h

$$\alpha^2 = \frac{h^2}{\phi}, \quad \frac{d^2 \bar{u}}{d\bar{y}^2} - \alpha^2 \bar{u} - \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = 0, \quad (A1.2)$$

unde $\bar{u} = u/U$, $\bar{y} = y/h$, $\bar{x} = x/h$ i $\bar{p} = ph^2 / \eta UL$.

$$\alpha^2 \bar{u} + \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = z \quad (A1.3)$$

Derivând

$$\alpha^2 \frac{d\bar{u}}{d\bar{y}} = \frac{dz}{d\bar{y}}, \quad (A1.4)$$

i

$$\alpha^2 \frac{d^2 \bar{u}}{d\bar{y}^2} = \frac{d^2 z}{d\bar{y}^2} \quad (A1.5)$$

$$\frac{d^2 z}{d\bar{y}^2} - \alpha^2 z = 0 \quad (A1.6)$$

[48]:

$$z = C_1 \operatorname{ch}(\alpha \bar{y}) + C_2 \operatorname{sh}(\alpha \bar{y}) \quad (A1.7)$$

Pentru determinarea vitezei adimensionale $\bar{u}$ are forma:

$$\bar{u} = \frac{1}{\alpha^2} C_1 \operatorname{ch}(\alpha \bar{y}) + C_2 \operatorname{sh}(\alpha \bar{y}) - \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \quad (\text{A1.8})$$

$$\text{pentru } \begin{cases} \bar{y} = 0 \\ \bar{y} = 1 \end{cases} \text{ viteza } \bar{u} = 0 \quad (\text{A1.9})$$

$$C_1 = \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \quad (\text{A1.10})$$

$$C_2 = -\frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \frac{\operatorname{ch} \alpha - 1}{\operatorname{sh} \alpha} \quad (\text{A1.11})$$

$$\bar{u} = \frac{1}{\alpha^2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \left[\operatorname{ch}(\alpha \bar{y}) + \frac{\operatorname{ch} \alpha - 1}{\operatorname{sh} \alpha} \operatorname{sh}(\alpha \bar{y}) - 1 \right] \quad (\text{A1.12})$$

ANEXA 2. DETERMINAREA TORTUOZITĂȚII PENTRU O STRUCTURĂ BIDIMENSIONALĂ A PORILOR TIP HEXAGON

porii

real parcurs de fluid prin pori a fost considerat un model bidimensional care este prezentat în e lungime L_c . Lungimea

acestui drum parcurs de fluid este $L_c \approx 2d \frac{2}{\sqrt{3}}$

$T_0 \approx 1,33$.

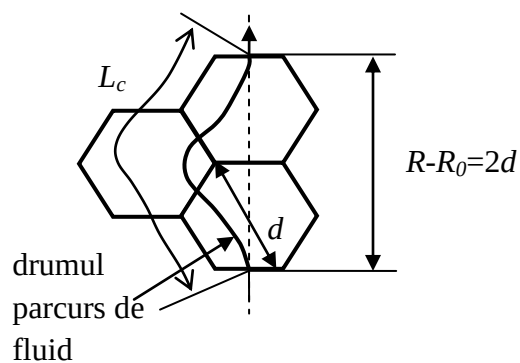


Fig.A2.1. Model bidimensional de curgere printr-

ANEXA 3. MODELUL DE EXPULZARE REODINAMICĂ A UNUI FLUID BINGHAM PRINTR-O STRUCTURĂ MULTISTRAT³

Procesul de expulzare nu este specific doar sistemelor poroase îmbibate supuse o multitudine de studii care propun utilizarea unui fluid Bingham [35][54] [59][79]. Un strat poate fi aproximat cu un strat de fluid care este expulzat liber, prin urmare este firesc ca

d [60]
descrie cu modelul Bingham sunt caracterizate prin intermed

straturi mari poate reduce efectul de amortizare din cauze multiple printre care poate se poate elor în deplasare. Energia

bazate pe straturi
curi [35][54] i amortizarea

printr- e suprapuse. Fluidul

A3.1 MODELUL ANALITIC

lizarea de discuri solide de grosime δ suprapuse, de R_0

volumul W_0 -
straturile de fluid au grosimi egale h_0

³
Bingham fluid through a multi-

squeeze of a
[97]

generic: *modelul structurii circulare multistrat cu rezervor de fluid Bingham.*

h_t i cu h_{t0}
dedeformare.

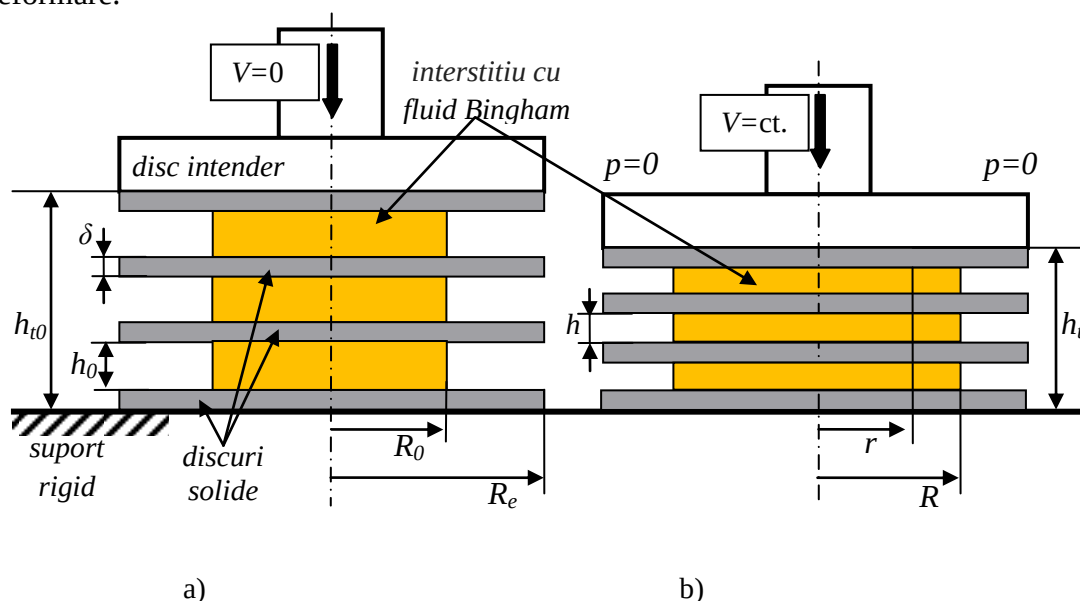


Fig.A3.1. Geometria modelului structurii circulare multistrat cu rezervor de fluid Bingham

$n+1$) discuri solide suprapuse este:

$$h_t = nh + (n+1)\delta \quad (\text{A3.1})$$

Înainte de comprimare, grosimea

$$h_{t0} = nh_0 + (n+1)\delta \quad (\text{A3.2})$$

modelul lui Covey-Stanmore [16], care descrie curgerea în

$$S_0 = R_0 V \eta / (h_0^2 \tau_0)$$

în

plasticitate: pentru $S_0 < 0.05$

pentru $S_0 > 10$

-al doilea poate fi aplicat pentru expulzare prin impact.

$S_0 < 0.05$ este:

$$F = \frac{2\pi\tau_0 R^3}{3h} + \frac{4\pi}{7h^2} \sqrt{2\tau_0 \eta V R^7} \quad (\text{A3.3})$$

h :

$$h = (h_t - (n+1)\delta) / n \quad (\text{A3.4})$$

La comprimare volumul

$$R_0^2 h_0 = R^2 h \quad (\text{A3.5})$$

Raza R h :

$$R = R_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} \quad (\text{A3.6})$$

grosimea d :

$$F = \frac{2\pi\tau_0 R_0^3 h_0^{1.5}}{3h^{2.5}} + \frac{4\pi}{7h^2} \sqrt{2\tau_0 \eta V R_0^7 h_0^{3.5} / h^{7.5}} \quad (\text{A3.7})$$

 $S_0 > 10$ conform [16]

este:

$$F = \frac{h\pi\tau_0 R^3}{h} + \frac{3\pi\eta V R^4}{2h^3} \quad (\text{A3.8})$$

 d :

$$F = \frac{h\pi\tau_0 R_0^3 h_0^{1.5}}{h^{2.5}} + \frac{3\pi\eta V R^4 h_0^2}{2h^5} \quad (\text{A3.9})$$

A3.2 REZULTATE EXPERIMENTALE

Validarea modelului experimental s-

 $S_0 < 0.05$. Experimentele au fost efectuate pe

standul CETR-

mm a fost

$$R_0 = 16.5 \text{ mm}$$

1 ml la începutul

 $h_0 = 1.7 \text{ mm}$. Comportamentul reologic al pasteii poate fiaproximat cu cel al unui fluid Bingham cu tensiunea de curgere de $\tau_0 = 350 \text{ Pa}$ i vîscozitatea $\eta = 0.33 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

mm/s.

este relativ mare. Rezultatele (Fig.A3.2)

în

e pot fi puse pe seama preciziei de dozare a fluidului.

A3.3 VALIDAREA MODELULUI TEORETIC

Folosind rezultatele experimentale prezentate anterior s-

-

$$R_e = 33 \text{ mm}$$

validare.

Tabelul A3.1

Parametrul	Valoarea	Parametrul	Valoarea
R_0	16.5 mm	τ_0	350 Pa
h_0	1.17 mm	η	0.33 Pa s

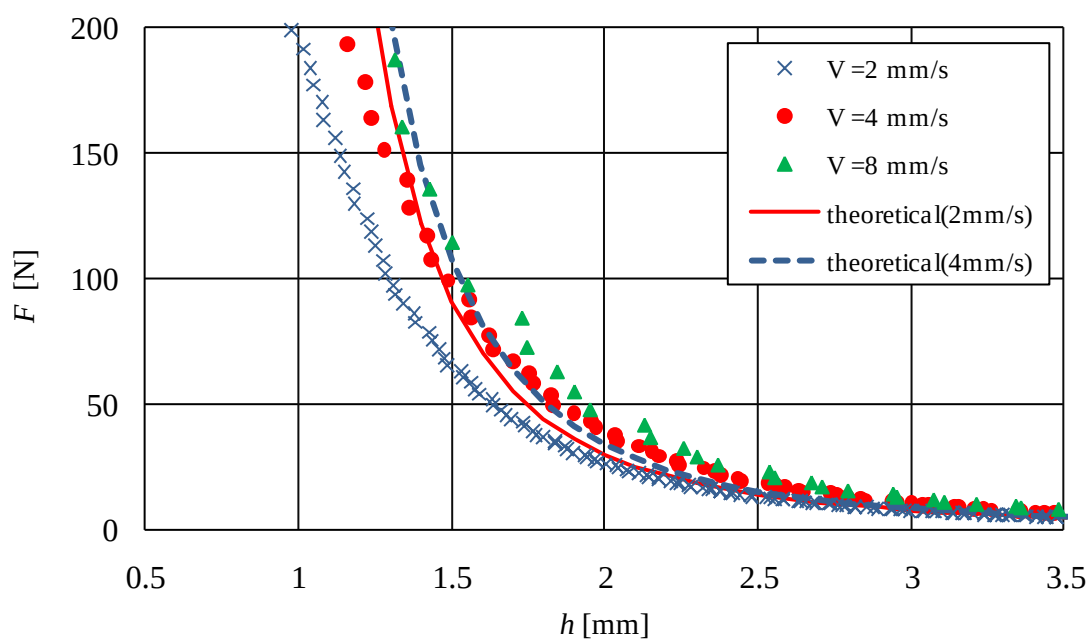


Fig.A3.2. Rezultate experimentale pentru structura multistrat

imprecizii ale experimentelor efectuate. Deoarece comprimarea se face între straturi succesive

A3.4 CONCLUZII

succesive.

-Stanmore.

aturile de material poros îmbibate.
Compararea rezultatelor experimentale cu rezultatele generate folosind modelul teoretic a

pentru numere de plasticitate mari.

DISEMINAREA REZULTATELOR

Turtoi P. teoretic privind curgerea tip Poiseuille a unui mediu

Turtoi P. pentru materiale

Turtoi P. - din

Turtoi P. pentru

Turtoi P. -

LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE SAU ÎN CURS DE PUBLICARE ÎN
REVISTE DE SPECIALITATE

Turtoi P., Pascovici M.D., 201

CNCSIS];

Turtoi P.
permeability ,
acceptată pentru publicare;

Turtoi P. -disc
în curs de publicare

CNCSIS];

Turtoi P., Cicone T., Pascovici M.D., 2012, "Squeeze flow of a power-law fluid between parallel circular plates", Proceedings of VAREHD, 16;

Radu M., Cicone T., Pascovici M.D., **Turtoi P.**, Istrate M., 2015. A comparative experimental study of impact damping using highly compressible porous materials imbibed with fluids, Proceedings of 6th International Conference, Computational Mechanics and Virtual Engineering -

Turtoi P., Cicone T., Fatu T., 2016, "In-plane permeability variation with porosity for
Conference on Advanced Concepts on Mechanical Engineering -
[proce