

Leandru-Gheorghe BUJOREANU
Mihai POPA

MATERIALE ELECTRO ȘI MAGNETOREOLOGICE

Note de curs

Traduceri selective

2025

CUPRINS

1.	NOȚIUNI FUNDAMENTALE DESPRE FLUIDELE COMPLEXE	1
1.1	Comparație între fluidele complexe și solidele și fluidele clasice	1
1.2	Exemple de fluide complexe	6
1.3	Proprietăți reologice	11
1.3.1	Curgerea prin forfecare	12
1.3.2	Curgerea prin extensie	19
1.3.3	Curgerea mixtă	22
1.4	Cinematica și dinamica curgerii	23
1.4.1	Tensorul gradientului de viteză	23
1.4.2	Tensorul gradientului de deformare	26
1.4.3	Tensorul tensiunii	28
1.5	Metode de caracterizare a fluidelor complexe	30
1.5.1	Curgerea	30
1.5.2	Alunecarea pe perete	31
1.5.3	Curgerea aparentă	33
1.5.4	Microscopie	34
1.5.5	Dispersie de lumină, raze X și neutroni	35
1.5.6	Polarimetrie	37
1.6	Forțe electromagnetice intermoleculare	37
1.6.1	Interacțiuni de contact (sterice)	38
1.6.2	Interacțiuni Van der Waals	43
2.	PROPRIETĂȚILE FLUIDELOR COMPLEXE	45
2.1	Fluide polimerice	45
2.1.1	Structura fluidelor polimerice	45
2.1.2	Teorii moleculare elementare	48
2.1.3	Reologia fluidelor polimerice ramificate	52
2.2	Fluide vitroase	56
2.2.1	Structura fluidelor vitroase	56
2.2.2	Fenomenologia tranziției vitroase	58
2.2.3	Reologia fluidelor vitroase	60
2.3	Geluri polimerice	62
2.3.1	Structura gelurilor polimerice	62
2.3.2	Reologia gelurilor polimerice	64
3.	FLUIDE ELECTROREOLOGICE	69
3.1	Noțiuni generale despre fluidele electrorreologice (ER)	69
3.1.1	Structura fluidelor electrorreologice	69
3.1.2	Fenomene electrorreologice	71
3.2	Tehnologia fluidelor electrorreologice	78
3.2.1	Dependența comportării ER de structura particulelor	78
3.2.2	Fluide ER cu particule de Fe_2O_3	80
3.2.3	Fluide ER cu particule polimerice	85
3.2.4	Fluide ER criogenice	94
3.2.5	Fluide ER de uz comercial	95
3.3	Mecanismul fizic al fenomenului ER	99

Materiale ER & MR-Note de curs (traducere)

3.3.1	Simularea formării structurii solide în fluidele ER	99
3.3.2	Modelul de conducție al efectului ER	106
3.3.3	Rolul structurii suspensiilor în reacția dinamică a fluidelor ER	109
3.3.4	Efectele morfologiei electrozilor asupra reacției ER	114
3.4	Proprietățile fluidelor ER	116
3.4.1	Vâscoelasticitatea fluidelor ER	116
3.4.2	Proprietăți reologice statice ale fluidelor ER	119
3.4.3	Determinarea parametrilor reologici ai fluidelor ER, cu vâscozimetre de rotație	122
3.4.4	Influența mărimii particulelor asupra rezistenței dinamice a fluidelor ER	130
3.5	Aplicațiile fluidelor ER	134
3.5.1	Ambreiaje de mare turanție	135
3.5.2	Supape ER	143
3.5.3	Sisteme de suspensie cu amortizoare ER	147
4.	SUSPENSII MAGNETOREOLOGICE	157
4.1	Noțiuni generale despre fluidele magnetoreologice (MR)	157
4.1.1	Structura suspensiilor magnetoreologice	159
4.1.2	Fenomene magnetoreologice	169
4.1.3	Geluri magnetoreologice	174
4.1.4	Principiul amortizării magnetoreologice	180
4.2	Aplicațiile suspensiilor magnetoreologice	193
4.2.1	Industria automobilelor	193
4.2.2	Finisarea cu fluide MR	206
4.2.3	Controlul vibrațiilor la motoarele Diesel la bordul navelor	217
4.2.4	Sistemul de amortizare al trenurilor de aterizare	222
4.2.5	Protecția antiseismică a clădirilor	227
	Bibliografie	

1. NOȚIUNI FUNDAMENTALE DESPRE FLUIDELE COMPLEXE

1.1 Comparație între fluidele complexe și solidele și fluidele clasice

O substanță lichidă simplă, cum ar fi apa:

- ❑ este un solid dur, cristalin, tridimensional *sub punctul de îngheț*;
- ❑ este un lichid Newtonian, de mică vâscozitate, *deasupra* acestuia.

În stare lichidă, proprietățile mecanice ale unei astfel de substanțe sunt apreciate prin vâscozitatea sa de forfecare, η , care este dependentă de temperatură și de presiune, $\eta = f(T, p)$.

De peste un secol se știe că există o serie de fluide complexe, rezultate din fază condensată, care nu sunt nici lichide nici solide cristaline simple, din punct de vedere al definiției clasice.

Aceste fluide complexe au proprietăți mecanice intermediare între cele ale solidelor și lichidelor clasice, proprietăți care nu pot fi descrise prin valori ale modulului de elasticitate și ale vâscozității.

Diferența esențială dintre solidele și lichidele clasice este capacitatea lichidelor de a lua forma containerului (incintei) în care sunt plasate.

Solidele cristaline clasice sunt anizotrope (proprietățile lor depind de orientarea deformăției aplicate față de axele cristalografice).

Lichidele clasice sunt izotrope. Cristalele lichide curg ca lichidele dar sunt anizotrope.

Spre deosebire de acestea, fluidele complexe sunt capabile, în anumite condiții să-și mențină forma iar în alte condiții pot să curgă. Deoarece pot fi considerate ”solide” pentru perioade scurte de timp și ”lichide” pentru perioade mai lungi, fluidele complexe au fost denumite *vâscoelastice*. În funcție de tipul fluidului complex, timpul de trecere de la starea ”solidă” la cea ”lichidă” poate varia de la fracțiuni de secundă la zile sau chiar la ani.

Exemple de fluide complexe:

- lichide amorfizabile (En.: *glass-forming liquids*) (**Fig. 1.1**);
- topituri și soluții polimerice (**Fig. 1.2**);
- soluții micelare (En.: *micellar solutions*) (**Fig. 1.3**).

Caracteristicile altor tipuri de fluide complexe:

- pot evolua de la tipul solid la tipul lichid sau invers, atunci când sunt supuse unor deformări reduse (geluri polimerice sau particulate);
- se pot transforma în solide atunci când sunt plasate în câmp electric sau magnetic (suspensii electrorheologice și magnetoreologice).

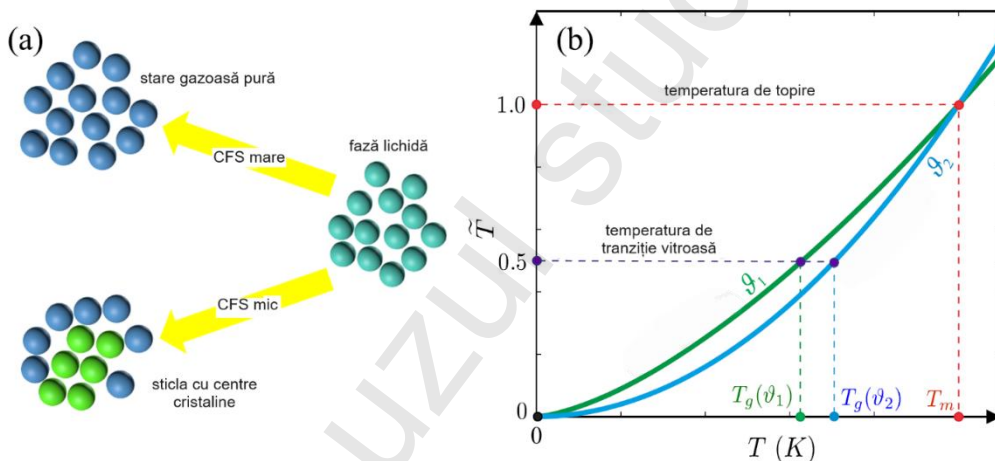


Fig. 1.1 (a) Reprezentarea schematică a CFS (capacitatea de formare a sticlei) a lichidelor care formează sticla. (b) Corespondența dintre temperatura redusă a $\tilde{T}$ și temperatura absolută T la viteze de răcire lente ϑ_1 și rapide ϑ_2 [1]

Spre deosebire de acestea, lichidele clasice nu-și modifică caracterul decât dacă sunt aduse la o temperatură foarte apropiată de transformarea de fază.

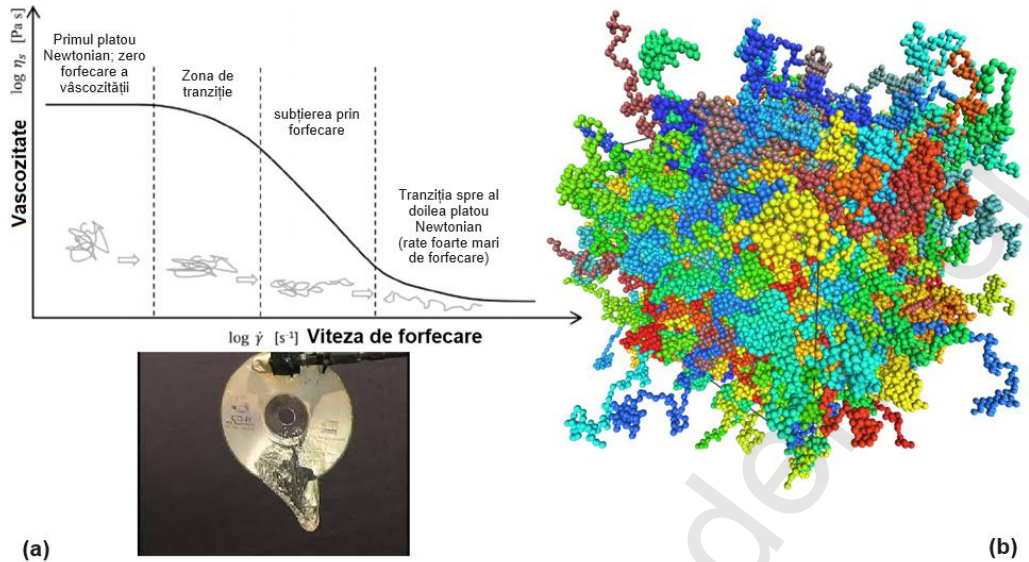


Fig. 1.2 (a) Curba tipică vâscozitate-viteza de forfecare pentru o topitură de polymer obținută prin forfecare; al 2-lea platou newtonian este de obicei detectabil numai pentru soluții de polimeri diluați. Ilustrația descrie orientarea moleculelor odată cu creșterea vitezei de forfecare [2], (b) Simularea unei topituri polimerice la o fracție de volum $\eta \approx 0.54$ [3]

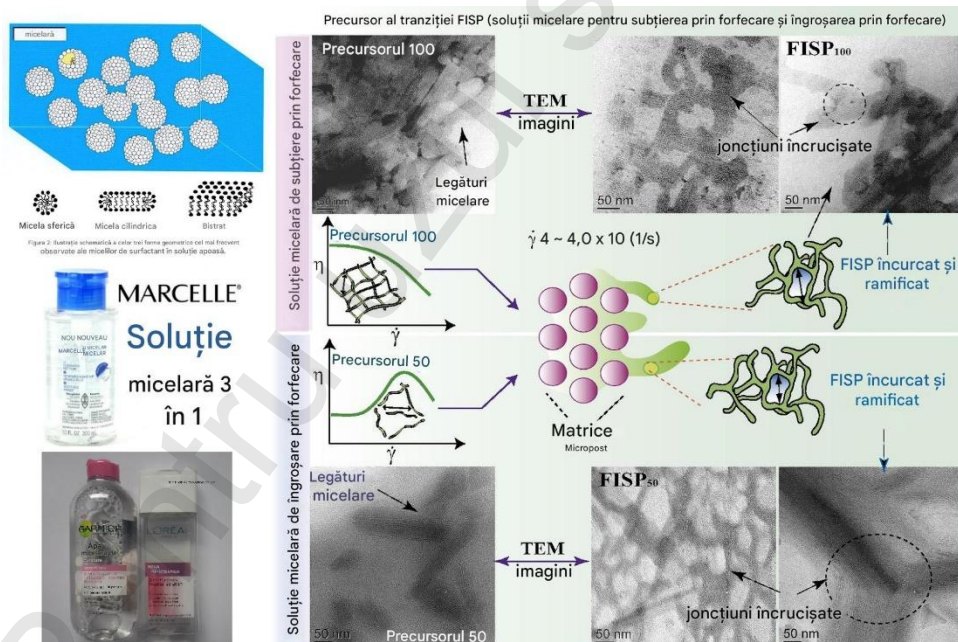


Fig. 1.3 Scheme ale tranziției structurale, de la precursor la FISP, a soluțiilor micelare de tip vierme, de subțiere prin forfecare (Sus) și îngroșare prin forfecare (Jos). Această diagramă de fază evidențiază tranziția de la miceliile liniare, încurcate, semidiluate la particulele micelare încurcate, ramificate și multiconectate în condiții de curgere, la concentrații scăzute de sare. Observații TEM (microscopie electronică prin transmisie) [4]

Alte fluide complexe reprezintă stări intermediare între lichide și solide, din mai multe puncte de vedere:

- polimerii cristalini lichizi (En.: *liquid crystalline polymers*, LCP) sunt atât lichide cristaline cât și vâscoelastice **Fig. 1.4**;
- polimerii bloc, ordonați (En.: *ordered block polymers*) sunt vâscoelastici și anizotropi **Fig. 1.5**;
- polimerii vitroși prezintă perioade mari de vâscoelasticitate, datorită naturii lor polimerice și amorse **Fig. 1.6**;
- topiturile polimerice saturate (En.: *filled polymeric melts*) au proprietăți de suspensii și de topituri polimerice **Fig. 1.7**.

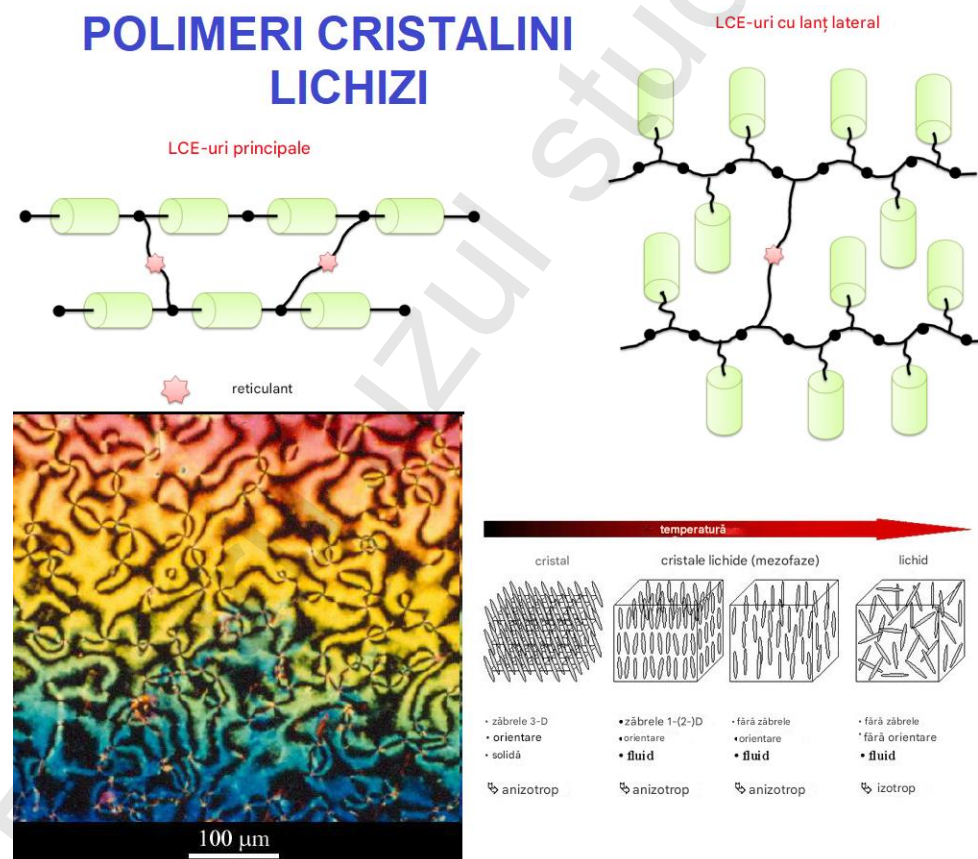


Fig. 1.4 Reprezentarea schematică a macromoleculelor de polimeri lichizi LC cu (a) lanț principal și (b) grupări mezogene cu catenă laterală (polimeri LC în formă de pieptene). (1) grupare mezogenă, (2) distanțier și (3) lanț principal [5]

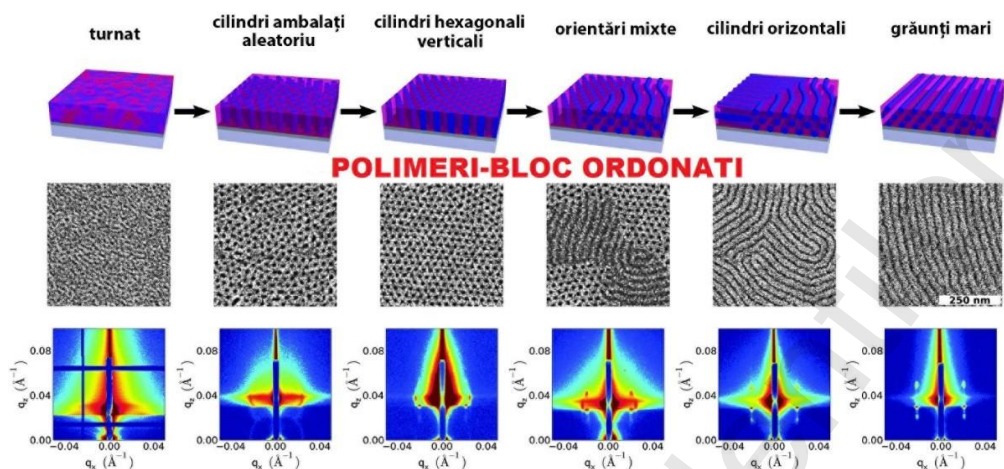
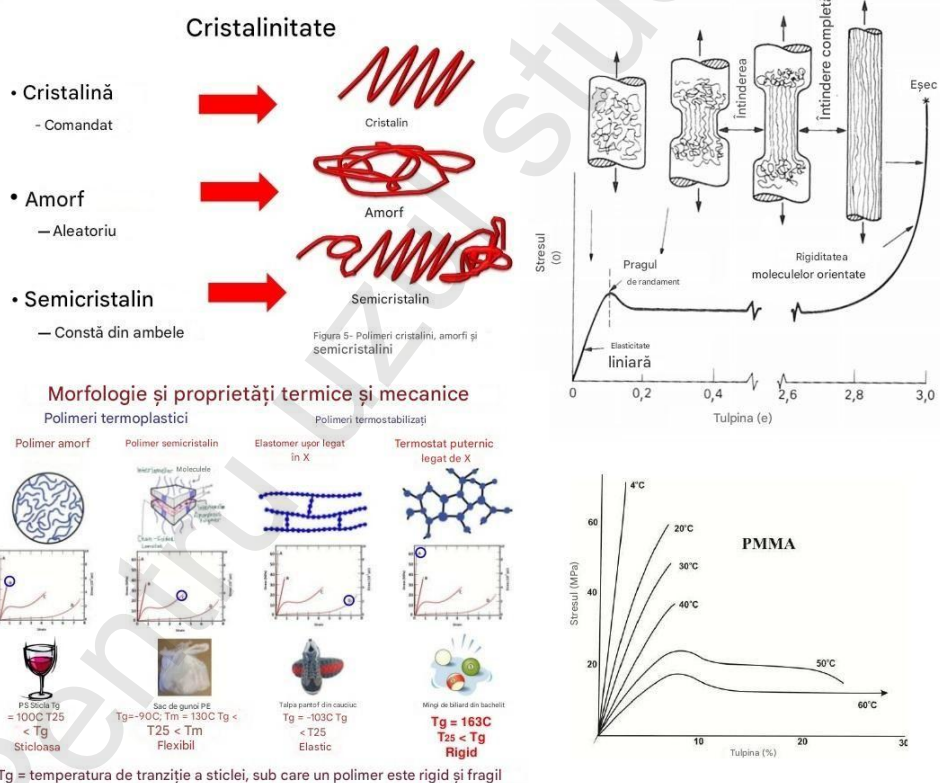


Fig. 1.5 Modelarea polimerilor-bloc ordonați (de jos în sus, auto-asamblare) [6]



Tg = temperatura de tranziție a sticlei, sub care un polimer este rigid și fragil

Fig. 1.6 Polimeri vitroși

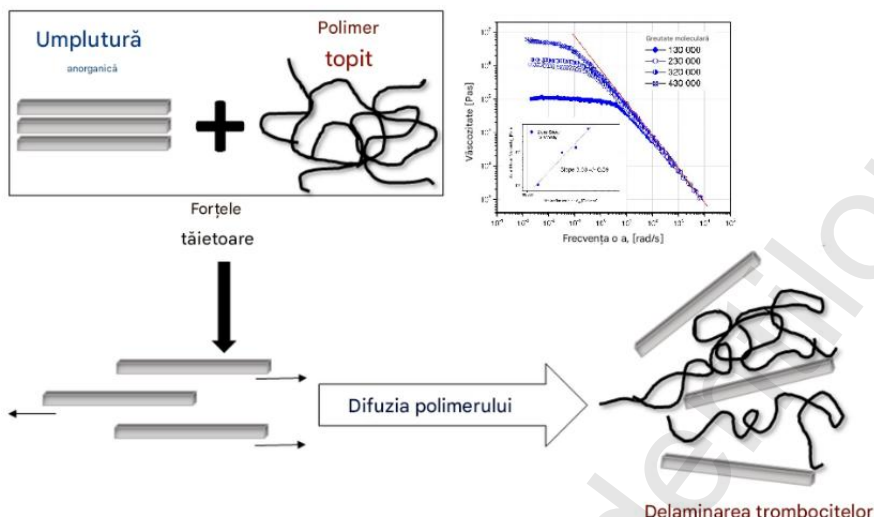


Fig. 1.7 Topituri polimerice saturate

Principalele proprietăți reologice (de curgere) ale diferitor tipuri de fluide complexe, sunt:

- vâscozitatea liniară, determinată prin intermediul modulelor de înmagazinare (*stocare*), G' și de pierdere, G'' (care reflectă proprietățile materialului în stare de repaus);
 - curba de curgere, care exprimă relația dintre vâscozitatea de forfecare, η și viteza de forfecare, $\dot{\gamma}$ (care arată modul în care se modifică materialul, în timp, atunci când este supus la deformare continuă),
- Fig. 1.2.**

1.2 Exemple de fluide complexe

A. Mâncărurile, cum ar fi maioneza, înghețata, muștarul, ciocolată sau brânza, sunt foarte bune exemple de fluide complexe.

Maioneza, **Fig.1.8**, conține ulei vegetal, oțet sau suc de lămâie și gălbenuș de ou. Picăturile de ulei sunt stabilizate în oțet sau suc de lămâie prin lecitină, care este un surfactant natural (substanță superficial activă) din gălbenușul de ou. Maioneza își păstrează forma învingând gravitația, dar curge

ușor sub efectul unor forțe aplicate mici, având o limită de curgere cu atât mai scăzută cu cât picăturile de ulei sunt mai mici (ideal 10 μm).

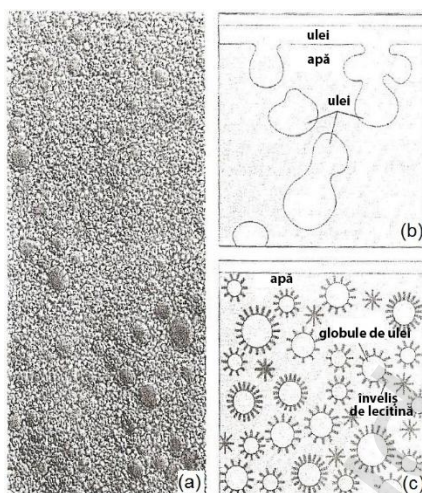


Fig.1.8 Maioneza: (a) aspect general al suspensiei de picături de ulei în apă; (b) tendință generală de separare a uleiului de apă; (c) suprimarea tendinței de separare a uleiului de apă, în maioneză, în urma formării învelișurilor din lecitină

Un alt exemplu de mâncare de tip fluid complex este *înghețata* care este o emulsie parțial congelată de smântână, lapte, zahăr și arome, emulsionată în aer în proporție de 40-50 % din volum. Atât maioneza cât și înghețata au o tensiune de curgere, produsă de picături și de bule de aer care se deformează la apariția curgerii.

Muștarul este tot un produs culinar de tip fluid complex, reprezentat printr-o suspensie sau pastă ce conține particule de circa 30 μm care se atrag între ele, formând o rețea cu o slabă rezistență la curgere. Muștarul se obține prin măcinarea boabelor de muștar împreună cu oțet, sare, mirodenii și apă până se formează (un fel de piuré).

Ciocolata este un fluid complex cu proprietăți mecanice remarcabile. În stare solidă poate fi extrudată la rece, proces în urma căruia se transformă dintr-o substanță solidă, fragilă, într-una plastică și maleabilă, care poate fi remodelată după dorință. Starea plastică se menține câteva minute după care ciocolata redevine fragilă, probabil din cauza recrystalizării zaharurilor care

s-au topit sub efectul tensiunilor de extrudare. Dacă ciocolata solidă este plasticizată în timpul curgerii, ciocolata topită poate solidifica în câmp electric, deoarece picăturile care formează emulsia topită se aliniază, formând o structură rigidă, la aplicarea câmpului electric.

Brânză este un aliment de tip fluid complex, făcut din lapte care este și el un fluid complex ce conține **micele** (mici sfere de $0.04 - 0.3 \mu\text{m}$) ale proteinei numită caseină. Prin adăugarea unui acid slab sau a unei enzime corespunzătoare, miclele sunt distruse iar proteinele gelează (agregă) formând o masă solidă de lapte covăsit care se separă de restul lichidului. Micrografiile SEM ale brânzei mozzarella, din **Fig.1.9**, arată că alungirea laptelui covăsit orientează fibrele de proteină.

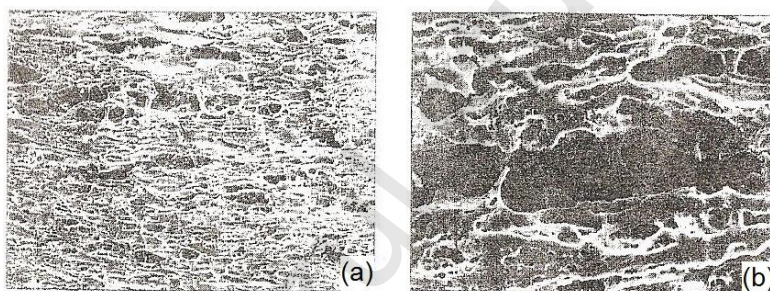


Fig.1.9 Micrografii SEM ale brânzei mozzarella: (a) la mică putere; (b) detaliu la putere mare indicând dispunerea aproximativ paralelă a fibrelor de proteină față de direcția de întindere

B. Biofluidele sunt fluide complexe din structura organismelor animale.

Sângele este o suspensie care conține circa 40 % celule roșii (discuri turtite flexibile, cu diametrul de circa $10 \mu\text{m}$) într-un lichid limpede, numit plasmă (care este și el un fluid vâscoelastic ce conține molecule de proteină care interacționează reciproc). Proprietățile vâscoelastice ale sângelui determină sarcina de pompă a inimii. La viteze reduse de forfecare, curgerea și proprietățile de orientare ale celulelor roșii sunt similare cu cele ale unor discuri rigide (**Fig.1.10**) și se pot bloca, aranjându-se ca jetoanele de la poker, când formează așa-numitele fișicuri. La viteze mari de forfecare, curgerea

celulelor roșii seamănă cu cea a unor picături de lichid.

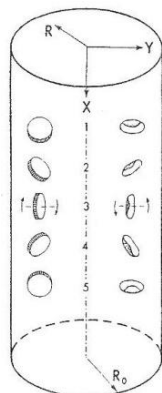


Fig.1.10 Mișcările de rostogolire ale celulelor roșii din sânge atunci când sunt forfecate la viteze reduse (sub 20 s^{-1}) în timpul curgerii printr-un tub (dreapta), sunt similare cu mișcările unor discuri rigide (stânga). Cea mai mică viteză de rostogolire este în poziția 3 (marcată pe axul tubului)

Vâscozitatea sângelui depinde de mărimea acestor agregate care, la rândul ei, depinde de viteza de forfecare. În corpul uman există și alte biofluide complexe, cum ar fi: mucoasa, fluidul sinovial, etc.

Alte animale pot produce fluide complexe mult mai remarcabile:

Păianjenii pot sintetiza și toarce la temperatura ambiantă fire de mătase incredibil de rezistente, cu reziliențe de ordinul a 100 kJ/kg , superioare față de orice altă substanță sintetică sau naturală.

Viermii de mătase fac fibre foarte rezistente, prin sinteza unei soluții precursorare lichid-cristalină a mătăsii, care este extrudată, țesută cu ajutorul unui adeziv solubil în apă care îmbină fibrele. În final, viermii de mătase își folosesc gurile drept filiere pentru a trage fibre, ale căror caracteristici nu pot fi reproduse integral de nivelul actual al tehnologiei.

C. Produsele de îngrijire personală, ca șampoanele, lacurile de unghii, deodorantele și rujurile au reologia modificată în funcție de cerințe. Șampoanele și balsamurile de păr trebuie să curgă ușor din recipient, să păstreze "volumul" după aplicare și să nu picure cu ușurință. Pentru aceasta se controlează concentrația de surfactant și se aduagă polimeri de îngroșare,

ex.: *acidul poliacrilic* cu greutate moleculară foarte mare sau *hidroxi-etil-celuloza (HEC)* modificată hidrofobic care produce spume foarte groase (Fig.1.11)

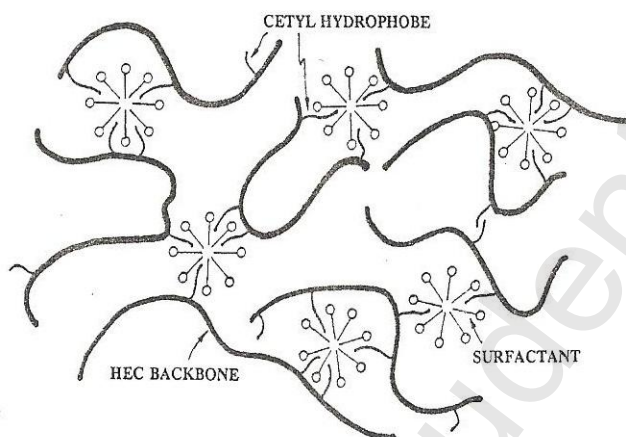


Fig.1.11 Spumă realizată prin intermediul structurii tip rețea, formată de o soluție de surfactant apos amestecată cu un copolimer de hidroxi-etil-celuloză (HEC) cu ramificații laterale de cetil

D. Materialele electronice și optice de tip fluide complexe se regăsesc în componența computerelor, sub forma cristalelor lichide ale monitoarelor sau a pastelor de lipit componentele pe plăcile respective.

Cristalele lichide sunt compuse din molecule mici, semirigide, cu formă eliptică sau alungită, care se orientează spontan, formând fluide anizotrope. Ele se pot orienta în funcție de câmpul electric aplicat, modificându-și proprietățile optice. Viteza de reorientare este controlată prin proprietățile vâscoase și elastice ale cristalului lichid, precum și prin susceptibilitatea sa dielectrică.

Pasta de lipit componentele electronice pe plăcile de bază, se depun pe plăcile respective sub forma unor bile de 50 μm diametru, care sunt topite prin încălzire, transformându-se într-un "flux". Pasta de lipit trebuie să aibă o rezistență la curgere destul de mare astfel încât să nu curgă unind toate punctele de lipit împreună, dar nici prea mică încât să nu permită modelarea lipiturii

după conformația componentelor care trebuiesc lipite.

E. Polimerii de tip fluide complexe includ materiale prelucrate în stare fluidă, cum ar fi:

- compact-discurile (CD-DVD) de polycarbonat topit prin injecție,
- învelișurile de cabluri din polietilenă extrudată,
- fibrele de mare rezistență trase din Kevlar lichid,
- sticlele din polietilen tereftalat,
- amortizoare auto din poliuretan injectat.

În stare topită, acești polimeri sunt fluide vâscoelastice complexe, ale căror proprietăți reologice determină costul prelucrării și proprietățile finale ale produsului.

Alte exemple ale fluidelor complexe includ:

- ☐ fluidele care apar pe câmpurile petroliere, ce controlează forajul sau mobilitatea țițeiului brut,
- ☐ vopselele,
- ☐ cimentul proaspăt amestecat,
- ☐ asfaltul.

1.3 Proprietăți reologice

În linii mari, proprietățile reologice indică caracterul de tip solid sau lichid al unui material. Deoarece aceste proprietăți depind de intervalul de timp în care se face determinarea, analiza lor se face cu ajutorul **reometrelor** care măsoară proprietățile reologice ale unui fluid complex în funcție de viteza sau de frecvența de deformare. În cazul lichidelor, cele mai simple dispozitive reologice presupun aplicarea unei:

- ❖ tensiuni de forfecare → vitezei de forfecare rezultantă (antrenare: $\tau \rightarrow \dot{\gamma}$)
- ❖ curgeri de forfecare → tensiunilor rezultante (presiune: $\dot{\gamma} \rightarrow \tau$)

1.3.1 Curgerea prin forfecare

Cele mai simple geometrii de impunere a unei curgeri de forfecare sunt sintetizate în Fig.1.12, care ilustrează, în ordine:

1. placa de alunecare;
2. cilindru concentric;
3. con și placa (unghi de $5-10^0$ între con și placă);
4. discuri paralele;
5. capilaritate;
6. curgere despicată;
7. inel axial.

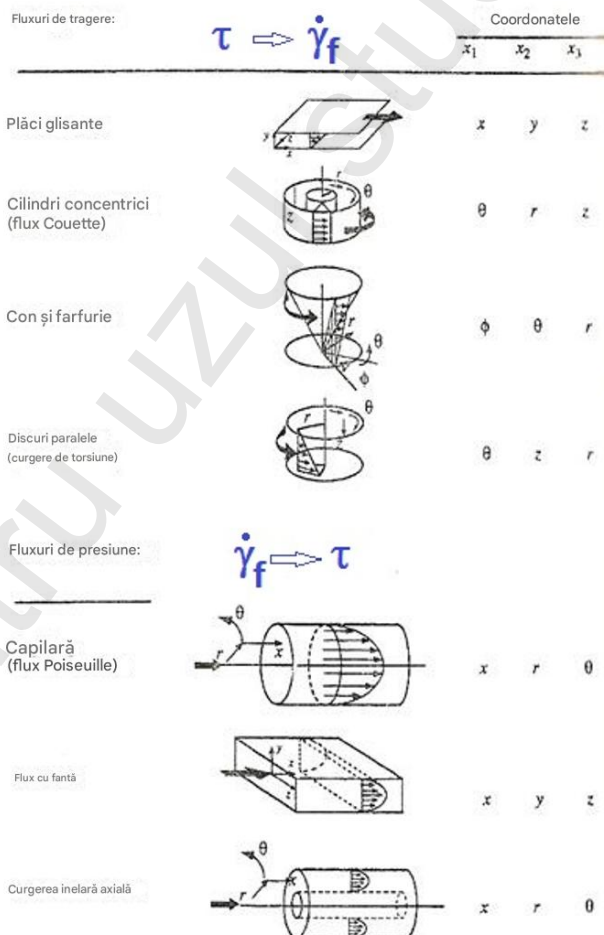


Fig.1.12 Geometrii de producere a curgerilor prin forfecare

Principalele configurații de curgere sunt: **A** - de antrenare (sus) de către un element mobil și **B** - de presiune (jos) și au toate în comun faptul că sunt vâscometrice (fiecare element de fluid suferă a curgere simplă și stabilă, prin forfecare, cu o viteză constantă).

A. Vâscozitatea de forfecare în stare stabilă este definită prin raportul dintre tensiunea (σ) și viteza de forfecare:

$$\eta = \sigma / \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

unde viteza de forfecare poate avea formele:

$$\dot{\gamma} = V/h \quad (1.2)$$

în cazul geometriei cu placă de alunecare, în care:

V este viteza de deplasare a plăcii mobile,

h este distanța (golul dintre plăci), sau

$$\dot{\gamma} = \Omega / \tan \Phi \quad (1.3)$$

în cazul geometriei con și placă, în care:

Ω este viteza unghiulară stabilă,

Φ este unghiul conului.

În regim staționar, tensiunea de forfecare atinge o valoare stabilă care, dacă este raportată la viteza de forfecare definește, prin intermediul ecuației (1.1), vâscozitatea de forfecare în stare stabilă.

B. Vâscozitatea de forfecare în stare tranzitorie este cea care intervine la începutul curgerii, pornind din starea de repaus și până în momentul instaurării curgerii stabile. Forma acestei vâscozități este dată de:

$$\eta^+(\dot{\gamma}, t) = \sigma(\dot{\gamma}, t) / \dot{\gamma} \quad (1.4)$$

în care semnul + indică faptul că viteza de forfecare a crescut de la valoarea zero, avută în momentul $t = 0$. Măsurătorile lui $\eta^+(\dot{\gamma}, t)$ dau informații despre vitezele de rearanjare structurală în cadrul unui fluid complex care se deformează.

C. Modulul de înmagazinare și de pierdere sunt determinate prin intermediul analizorilor mecano-dinamici (DMA), capabili să impună fluidului complex o forfecare oscilatorie de mică amplitudine. O astfel de deformare se poate obține în cadrul geometriei con și placă prin rotația conului în jurul axei sale cu o viteză unghiulară ω , care variază sinusoidal, de forma: $\Omega(t) = \Omega_0 \cos(\omega t)$.

În acest caz și viteza de forfecare devine o funcție sinusoidală de timp, de forma:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{tg \alpha} = \Omega_0 \cos(\omega t) / tg \alpha \quad (1.5)$$

iar deformarea de forfecare γ , devine integrala vitezei de forfecare, în funcție de timp:

$$\gamma = [(\Omega_0 / \omega) \sin \omega t] / tg \alpha \quad (1.6)$$

Raportul (Ω_0 / ω) este amplitudinea deflecției (deformației) unghiulare a conului iar $y_0 = \Omega_0 / (\omega) / tg \alpha$ este amplitudinea deformației care este impusă fluidului.

Dacă amplitudinea deformației y_0 este destul de mică (de obicei $y_0 \ll 1$), astfel încât structura fluidului să nu fie mult perturbată de deformare, atunci tensiunea măsurată în timpul deformațiilor oscilatorii este controlată de vitezele de producere a rearanjamentelor spontane, numite și rearanjări, care sunt prezente în fluid în stare calmă sau de echilibru.

Tensiunea de forfecare $\sigma(t)$ produsă de o deformare de mică amplitudine este proporțională cu amplitudinea deformației aplicate y_0 și variază și ea sinusoidal în timp. Maximele și minimele semnalului tensiunii care variază sinusoidal nu coincid în mod necesar cu maximele și minimele deformației. În general, tensiunea care variază sinusoidal poate fi reprezentată prin:

$$\sigma(t) = y_0 [G'(\omega) \sin(\omega t) + G''(\omega) \cos(\omega t)] \quad (1.7)$$

Termenul proporțional cu $G'(\omega)$ este în fază cu deformația fiind numit *modul de înmagazinare* sau *stocare* (En.: *storage*) iar termenul care conține $G''(\omega)$ este în fază cu viteza de deformare $\dot{\gamma}$, fiind numit *modul de pierdere*.

Modulul de stocare reprezintă înmagazinarea energiei elastice iar modulul de pierdere reprezintă disiparea vâscoasă a acelei energii.

Raportul G''/G' este numit *frecare internă*, $\tan \delta$ și este:

- mare ($\gg 1$) la materialele de tip lichid
- mic ($\ll 1$) la materialele de tip solid.

Modulul complex este definit prin $G^* \equiv G' + iG''$ și are valoarea $|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2}$.

Vâscozitatea complexă este definită prin $G^*(\omega)/i\omega \equiv \eta^* \equiv \eta' - i\eta''$ și are valoarea dată de $|G^*(\omega)|/\omega$. Regimul deformării la amplitudini mici, cu tensiunea definită prin ecuația (1.7), este numit *regim cu vâscozitatea liniară*.

D. Tipurile de reacție reologică evidențiază diferențele dintre fluidele complexe de tip solid și cele de tip lichid, sub trei forme:

- vâscozitatea de forfecare în stare tranzitorie $\eta^+(\dot{\gamma}, t)$;
- vâscozitatea de forfecare în stare stabilă $\eta(\dot{\gamma})$
- modulele vâscoelastice liniare $G'(\omega)$ și $G''(\omega)$.

Tensiunile tranzitorii $\sigma = \dot{\gamma}\eta^+(\dot{\gamma}, t)$ ale fluidelor complexe de tip lichid și de tip solid sunt ilustrate în **Fig.1.13**.

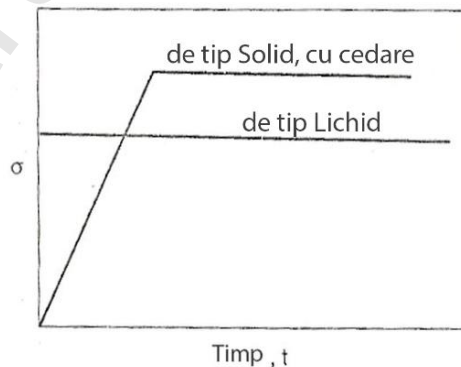


Fig.1.13 Ilustrarea tensiunii tranzitorii de forfecare $\sigma(t)$ pentru materiale „de tip lichid” și „de tip solid”

La fluidul de tip lichid, vâscozitatea atinge instantaneu o valoare stabilă după începerea forfecării. La fluidele de tip solid, tensiunea crește liniar odată cu deformarea până la o valoare critică a forfecării după care se produce curgerea la tensiune constantă.

Fig.1.14 prezintă curbele schematice ale variației cu viteza de forfecare a tensiunii de forfecare (σ) și ale vâscozității de forfecare (η) în stare stabilă, pentru fluidele complexe de tip solid și de tip lichid. Se observă că, pentru fluidele complexe de tip solid, tensiunea de forfecare în stare stabilă este independentă de viteza de forfecare iar vâscozitatea de forfecare scade la creșterea vitezei de forfecare, deoarece $\eta(\dot{\gamma}) \sim \dot{\gamma}^{-1}$.

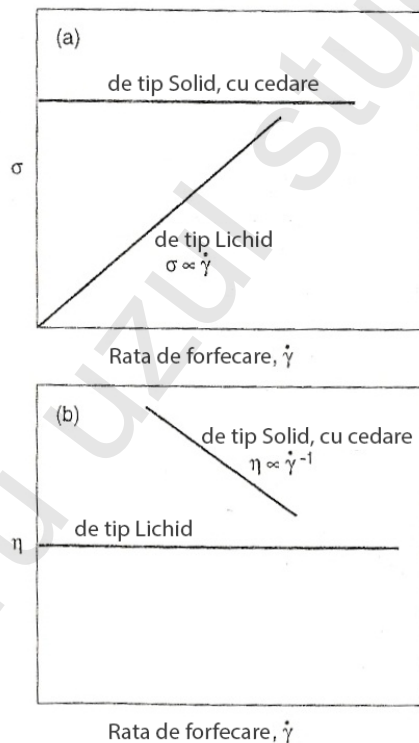


Fig.1.14 Ilustrarea dependenței de viteza de forfecare, $\dot{\gamma}$: (a) a tensiunii de forfecare, $\sigma(t)$; (b) a vâscozității de forfecare, η , pentru materialele prototip, „de tip lichid” și „de tip solid”

O vâscozitate de forfecare care scade la creșterea vitezei de forfecare este definită drept *subțiere la forfecare*. În cazul fluidelor complexe de tip

lichid, vâscozitatea este constantă iar tensiunea de forfecare crește odată cu viteza de forfecare $\sigma(\dot{\gamma}) \sim \dot{\gamma}$.

Variațiile cu frecvența ale modulelor de înmagazinare și de pierdere, G' și G'' , pentru fluidele complexe de tip solid și de tip lichid, sunt prezentate în **Fig.1.15**.

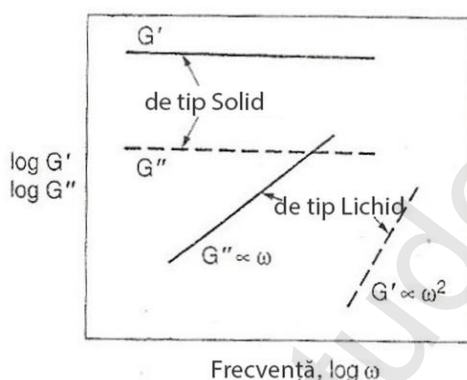


Fig.1.15 Ilustrarea modulelor de elasticitate de înmagazinare și de pierdere, G' și respectiv G'' , pentru materialele prototip, „de tip lichid” și „de tip solid”

La *fluidele de tip lichid*, modulul de stocare, G' , este mult mai mic decât modulul de pierdere G'' deoarece $G' \sim \omega^2$, pe când $G'' \sim \omega$. Porțiunea, de frecvență scăzută, din regiunea de tip lichid, în care $G' \sim \omega^2$ și $G'' \sim \omega$, se numește regiune terminală.

La *fluidele de tip solid* $G' \gg G''$ iar G' este aproape independent de frecvență.

Adevăratele fluide complexe prezintă adesea comportamente intermediare între tipul solid și tipul lichid. **Fig.1.16** prezintă vâscozitatea de forfecare în stare stabilă în funcție de viteza de forfecare pentru o topitură de polietilenă.

La viteză de forfecare redusă $\eta(\dot{\gamma})$ este aproape constantă, ca la fluidele de tip lichid însă la viteze de forfecare ridicate vâscozitatea scade rapid, într-un mod asemănător fluidelor de tip solid dar ceva mai puțin accentuat. Porțiunea cu vâscozitate aproape liniară este numită vâscozitate de forfecare zero η_0 .

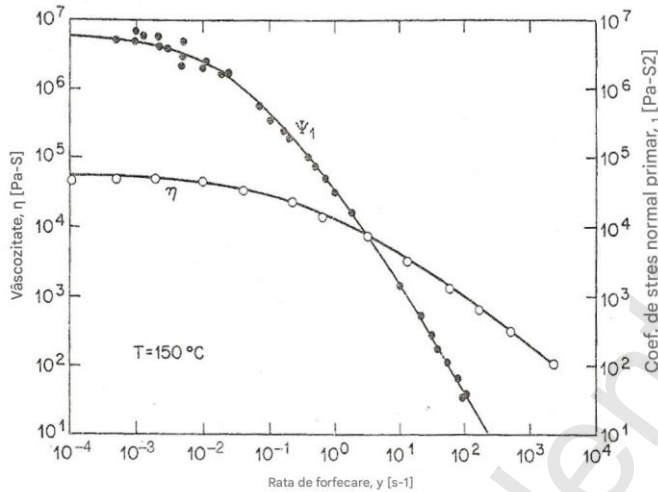


Fig.1.16 Vâscozitate de forfecare în stare stabilă, η și primul coeficient de tensiune normală, Ψ_1 , în funcție de viteza de forfecare, pentru o topitură de polietilenă de mică densitate

Fig.1.17 prezintă variația tensiunii tranzitorii de forfecare, $\sigma(\dot{\gamma}, t)$, pentru aceeași topitură polimerică.

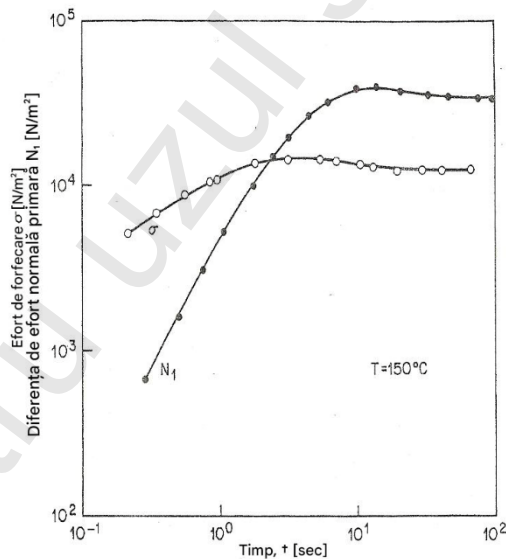


Fig.1.17 Tensiune de forfecare tranzitorie, σ și diferența primei tensiuni normale, N_1 , după declanșarea forfecării stabile, pentru o topitură de polietilenă de mică densitate

Se observă creșterea ”*de tip solid*” a lui σ , la valori reduse ale intervalului de timp și palierul de la intervale mari (comportament ”*de tip lichid*”, la sfârșit).

Fig.1.18 Prezintă variațiile modulelor de înmagazinare și de pierdere, G' și respectiv G'' , pentru aceeași topitură de polietilenă.

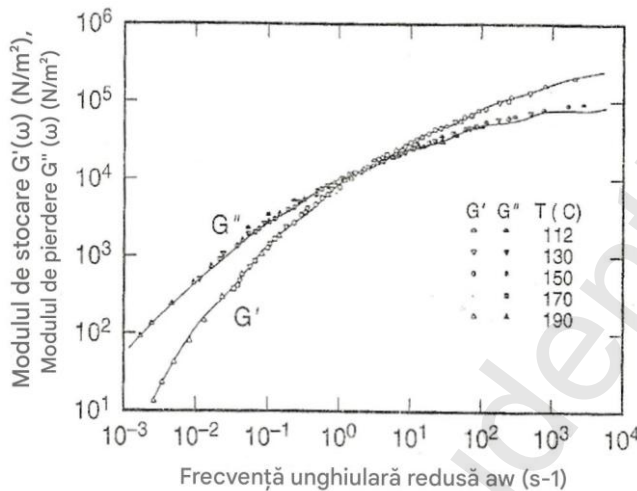


Fig.1.18 Modulele de depozitare și de pierdere ale unei topituri de polietilenă de mică densitate

În Fig.1.18 frecvența este înmulțită cu un factor de deplasare, a_T , care este egal cu 1 la 150 °C (și poate fi ignorat).

- la frecvențe reduse, topitura are un comportament "de tip lichid", deoarece $G' \ll G''$
- la frecvențe mari, topitura are un comportament "de tip solid", caracterizat prin $G' > G''$. Se observă că, la temperatura de 150 °C, tranziția de la comportarea de tip lichid la cea de tip solid se produce la frecvența $\omega_c \approx 1 \text{ s}^{-1}$, la care se produce, cu oarecare aproximație, intersecția dintre G' și G'' .

1.3.2 Curgerea prin extensie

Într-o curgere prin extensie stabilă a unei topituri polimerice, comportarea unui fluid reologic este cu atât mai diferită de curgerea prin forfecare, cu cât moleculele de polimer sunt mai alungite. Caracteristica curgerii prin extensie este că elementele fluidului sunt alungite fără a fi rotite

sau forfecate. Un dispozitiv tipic, de generare a curgerii uniaxiale prin extensie este redat în **Fig.1.19**.

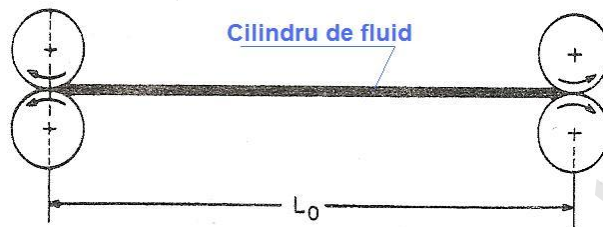


Fig.1.19 Dispozitive rotative utilizate pentru deformarea la întindere uniaxială a unui filament cilindric de polimer de lungime L_0

Capetele unui cilindru de fluid, care plutește pe o baie de ulei, sunt fixate pe loc, în spațiu, cu caje care și se rotesc cu o viteză constantă, impunând o viteză V la un capăt al cilindrului și o viteză $-V$ la celălalt capăt. În felul acesta, fiecărui element i se impune un gradient de viteză $= 2V / L_0$, care se numește *viteză de curgere prin extensie*.

În cazul topiturilor polimerice lipicioase, curgerea prin extensie poate fi obținută prin aducerea unor plăci plate în contact cu partea superioară și cu partea inferioară a cilindrului de fluid. La deplasarea relativă a celor două plăci, se formează un filament de fluid complex în care există un gradient de viteză de deformare, aproximativ constant (cu excepția regiunilor din vecinătatea plăcilor), ca în **Fig.1.20**.

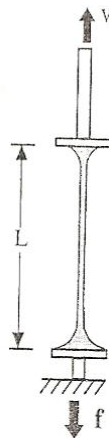


Fig.1.20 Alungirea unui filament cilindric de lichid vâscoelastic, care se lipește de două plăci plate, dintre care una se deplasează iar alta este atașată la un traductor de forță

Tensiunea instantanee de extensie este definită prin:

$$\bar{\sigma}(\dot{\epsilon}, t) \equiv F(\dot{\epsilon}, t)/A(\dot{\epsilon}, t) \quad (1.8)$$

în care $F(\dot{\epsilon}, t)$ este forța necesară alungirii filamentului cilindric de fluid iar $A(\dot{\epsilon}, t)$ este secțiunea transversală a acestuia.

Vâscozitatea de extensie, dependentă de timp, are expresia:

$$\bar{\eta}(\dot{\epsilon}, t) = \bar{\sigma}(\dot{\epsilon}, t)/\dot{\epsilon} \quad (1.9)$$

Atunci când vâscozitatea devine independentă de timp, ea se numește vâscozitatea de extensie în stare stabilă, $\bar{\eta}(\dot{\epsilon})$.

Fig.1.21 compară dependențele de timp, după declanșarea curgerii, ale vâscozității curgerii prin extensie și ale vâscozității de forfecare, pentru aceeași topitură polimerică de polietilenă, supusă la mai multe viteze de extensie. Se observă că pot exista foarte mari diferențe între vâscozitatea curgerii prin extensie și vâscozitatea de forfecare, deoarece prima crește iar cea de-a doua scade, în același interval de timp, la creșterea vitezei de forfecare, după începerea curgerii.

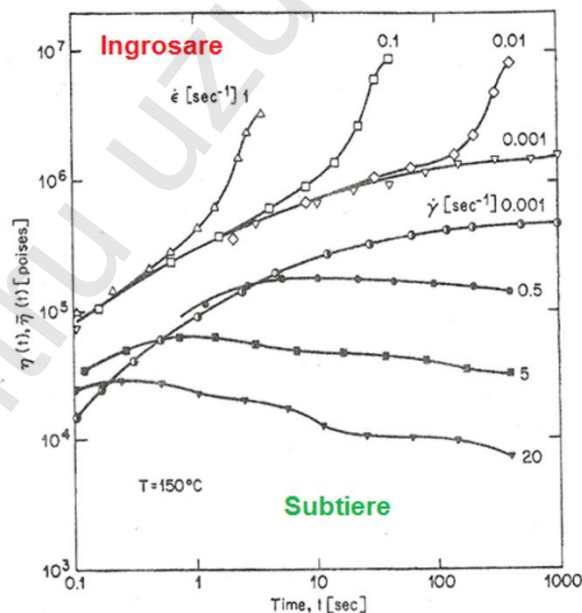


Fig.1.21 Vâscozitate uniaxială la întindere (simboluri goale) și la forfecare (simboluri pline și semi-pline) în funcție de timpul scurs după declanșarea alungirii uniaxiale și a forfecării stabile a topiturii de polietilenă de densitate redusă

Din acest motiv, se poate vorbi despre:

- ☐ subțiere prin forfecare, în cazul vâscozității de forfecare;
- ☐ îngroșare prin alungire, în cazul vâscozității prin extensie.

1.3.3 Curgerea mixtă

Fluidele complexe pot fi expuse și unor câmpuri intermediare de curgere, între extensie și forfecare, pentru obținerea cărora se utilizează laminorul cu patru roți, care se rotesc într-un container de fluid complex, după cum arată **Fig.1.22**.

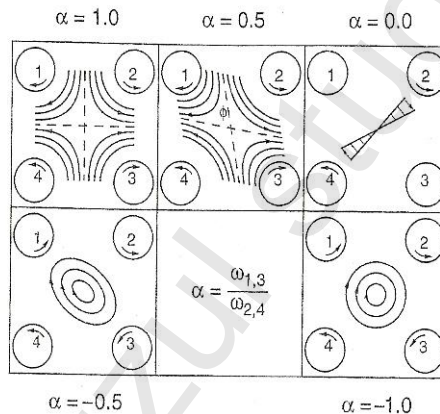


Fig.1.22 Câmpuri de curgere produse de laminorul cu patru roți. $\omega_{1,3}$ este viteza unghiulară a laminoarelor 1 și 3 iar $\omega_{2,4}$ este viteza unghiulară a laminoarelor 2 și 4; α este parametrul tipului de curgere

Prin variația vitezei de rotație a unei perechi de role, față de cealaltă pereche, în vecinătatea punctului de stagnare situat la centru, se pot obține diverse câmpuri de viteză, variind de la extensie pură ($\alpha = 1$), până aproape de forfecare pură ($\alpha = 0$).

Laminorul cu patru roți este util mai ales pentru studiul fluidelor cu vâscozitate modestă din care se pot îndepărta foarte ușor bulele de aer introduse în timpul turnării/umplerii. Din cauză că modelul dorit de curgere este atins doar într-o singură regiune a dispozitivului, laminorul cu patru roți nu poate fi utilizat pentru măsurări directe de tensiune.

Totuși, la unele materiale polimerice, regiunea de fluid din vecinătatea punctului de stagnare poate fi folosită pentru măsurători de *birefringență optică*.

Pentru un fluid complex, tensiunea nu depinde numai de faptul că modul de curgere este prin forfecare, prin extensie sau mixt ci și de întreaga istorie a gradientului de viteză. Din acest motiv, caracterizarea proprietăților reologice ale unui fluid complex nu poate fi efectuată dacă nu sunt oferite detalii teoretice, astfel încât măsurătorile efectuate asupra unei istorii de curgere să poată fi aplicate celor efectuate într-altă istorie de curgere.

Scopul general este de a dezvolta o ecuație constitutivă de curgere, care să permită calcularea tensorului tensiunii pornind de la o anumită istorie de curgere, dată.

1.4 Cinematica și dinamica curgerii

Pentru a descrie gradientii de curgere mai generali decât cei produși în punctul de stagnare al unui laminar cu patru roți, trebuie introduse unele noțiuni tensoriale:

- tensorul gradientului de viteză;
- tensorul gradientului de deformare;
- tensorul tensiunii.

1.4.1 Tensorul gradientului de viteză

Se definește vectorul $\mathbf{x} \equiv (x_1, x_2, x_3)$ ca fiind un punct în spațiul tridimensional de coordonate (direcțiile) x_1, x_2 și x_3 . Vectorul viteza în punctul $\mathbf{x}$ este $\mathbf{v}(\mathbf{x}) \equiv [v_1(\mathbf{x}), v_2(\mathbf{x}), v_3(\mathbf{x})]$, în care v_1 este componenta vitezei pe direcția x_1 (analog pentru v_2 și v_3).

Tensorul gradientului de viteză (divergența vitezelor) este (*nabla de V*):

$$\nabla v \equiv \begin{pmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} & \frac{\partial v_2}{\partial x_1} & \frac{\partial v_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial v_1}{\partial x_2} & \frac{\partial v_2}{\partial x_2} & \frac{\partial v_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial v_1}{\partial x_3} & \frac{\partial v_2}{\partial x_3} & \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

Gradientul vitezei descrie rata de variație a vitezei, atunci când se efectuează o deplasare dintr-un punct într-altul, în orice direcție a curgerii, la un moment dat.

Dacă într-un punct al curgerii, care se ia drept origine, viteza de curgere este v_0 iar gradientul de viteză este ∇v (*nabla de v*), atunci în punctul x , aflat în apropiere, viteza de curgere este $v_0 + x \cdot \nabla v$. Transformata lui ∇v , obținută prin transformarea liniilor în coloane și vice-versa, este exprimată prin:

$$K \equiv (\nabla v)^T \quad (1.11)$$

Într-o curgere prin forfecare, simplă, cu placă alunecătoare (curgere cu geometrie Couette) există doar un singur component diferit de zero al vitezei de curgere și anume v_1 care variază doar pe direcția 2 ($\partial v_1 / \partial x_2$), care este perpendiculară la plăci. Din acest motiv, la curgerea prin forfecare simplă, tensorul gradientului de viteză devine:

$$\nabla v = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \dot{\gamma} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

unde $\dot{\gamma} = \partial v_1 / \partial x_2$. Planul care conține direcțiile 1 și 2 de curgere va fi numit „*plan de deformare*” iar în literatura referitoare la cristalele lichide este numit „*plan de forfecare*”.

Curgerea prin extensie este definită, la modul general, printr-un gradient de viteză de forma:

$$\nabla v = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\varepsilon}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_3 \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

În relația (1.13) $\dot{\epsilon}_1 \equiv \partial v_i / \partial x_i$ este gradientul vitezei pe direcția i .

Condiția de incompresibilitate impune ca suma elementelor de pe diagonala matricii tensorului gradientului de viteză din relația (1.10) să fie nulă:

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} = 0 \quad (1.14)$$

În cazul unei extensii uniaxiale incompresibile, se consideră că un cilindru de fluid este alungit axisimetric pe direcția 1 cu un gradient de viteză $\dot{\epsilon}_1 \equiv \partial v_1 / \partial x_1$. Atunci, dacă sunt considerați egali, gradientii de viteză pe celelalte două direcții vor fi: $\partial v_2 / \partial x_2 = \partial v_3 / \partial x_3 = -\dot{\epsilon}_1 / 2$.

În aceste condiții, tensorul gradientului de viteză al unei curgeri prin extensie uniaxială incompresibilă cu viteza de alungire $\dot{\epsilon}_1$ va avea expresia:

$$\nabla v = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon} & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{\epsilon}/2 & 0 \\ 0 & 0 & -\dot{\epsilon}/2 \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

În cazul unei **extensii planare incompresibile** pe direcțiile 1 și 2, gradientii de viteză sunt: $\dot{\epsilon}_2 = -\dot{\epsilon}_1$; $\dot{\epsilon}_3 = 0$ iar tensorul vitezei:

$$\nabla v = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon} & 0 \\ 0 & -\dot{\epsilon} \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

În ecuația 1.16 s-au omis rândul și coloana 3 din cauză că sunt ambele nule.

Când se studiază fenomenele de curgere, acestea pot avea un caracter mixt sau intermediar combinând forfecarea cu extensia. În două dimensiuni (*curgere plană*), cel mai general tensor al gradientului de viteză poate fi exprimat sub forma:

$$\nabla v = \frac{1}{2}G \begin{pmatrix} 1 + \alpha & 1 - \alpha \\ -(1 - \alpha) & -(1 + \alpha) \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

unde: α este un parametru al tipului de curgere care este $\alpha = 0$, la forfecarea simplă și $\alpha = 1$ la extensia plană,

$G = \dot{\gamma}$ la curgerea prin forfecare și $G = \dot{\epsilon}_1$ la curgerea prin

extensie plană.

Cu ajutorul laminorului cu patru roți, din Fig.1.22, se pot genera diverse configurații de curgere.

1.4.2 Tensorul gradientului de deformăție

Tensiunea unui fluid complex, de tipul unei topituri polimerice, depinde de gradientul instantaneu de viteză și de perioada de timp în care este impus acest gradient de viteză. Cu alte cuvinte, tensiunea dintr-un element de fluid depinde de *istoria deformăției* acelu element exprimată prin intermediul tensorului E , definit în mod analog cu tensorul gradientului de viteză. Se consideră un punct de fluid care în timpul trecut t' ocupa poziția x' dar ocupă în prezent poziția x . Fie vectorul $\delta x'$, încorporat într-un element de fluid, vector care are originea în x' și vârful în poziția $\delta x' + x$.

Între momentele t' și t , vectorul este alungit și rotit, împreună cu elementul de fluid în care este încorporat iar în momentul t vectorul încorporat este δx . De exemplu, dacă elementul de fluid este alungit pe direcția 1, raportul $\lambda(t', t) \equiv \delta x_1 / \delta x'_1$ se numește raport de alungire (extensie, alungire) pe direcția respectivă și reprezintă raportul dintre lungimea elementului de fluid la momentul t și lungimea elementului la momentul t' .

Pentru o deformăție tridimensională, generală, tensorul istoriei deformăției este:

$$E(t', t) \equiv \frac{\partial x}{\partial x'} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial x'_1} & \frac{\partial x_2}{\partial x'_1} & \frac{\partial x_3}{\partial x'_1} \\ \frac{\partial x_1}{\partial x'_2} & \frac{\partial x_2}{\partial x'_2} & \frac{\partial x_3}{\partial x'_2} \\ \frac{\partial x_1}{\partial x'_3} & \frac{\partial x_2}{\partial x'_3} & \frac{\partial x_3}{\partial x'_3} \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

Tensorul E conține informații despre alungirea și rotația elementului de fluid. Inversa acestui tensor, $F \equiv E^{-1} = \partial x' / \partial x$, se numește *tensorul gradientului de deformăție*.

Fig.1.23 prezintă modul de alcătuire a tensorului deformației, E , pentru forfecare simplă. Se consideră un vector încorporat, orientat în direcția de curgere 1, vector care este de lungime unitară în momentul de timp t' și are forma: $x' = (1, 0, 0)$.

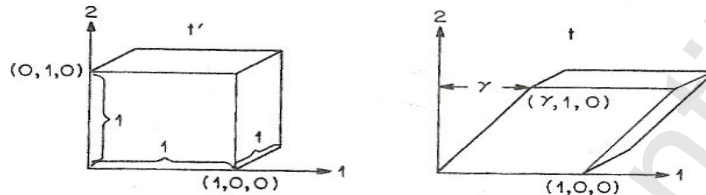


Fig.1.23 Definiția tensorului deformației E , pentru forfecarea prin deformație a unui cub unitar

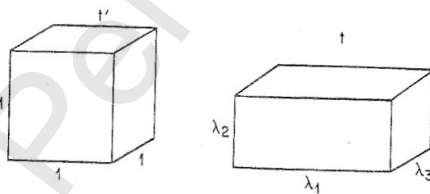
Atunci E_{11} , E_{12} și E_{13} sunt componentele acestui vector încorporat, după deformare, care devine: $x = (E_{11}, E_{12}, E_{13})$. Cum forfecarea nu alungește sau rorește liniile de fluid care se găsesc pe direcția de curgere, $(x_1, x_2, x_3) = (E_{11}, E_{12}, E_{13}) = (1, 0, 0)$.

În mod analog, se poate considera că E_{21} , E_{22} , E_{23} sunt coordonatele unui vector încorporat care este egal cu unitatea, în momentul t' și este orientat pe direcția 2, sub forma $(0, 1, 0)$. Acest vector este rotit și alungit de forfecare astfel încât $(E_{21}, E_{22}, E_{23}) = (\gamma, 1, 0)$. În fine, $(E_{31}, E_{32}, E_{33}) = (0, 0, 1)$. Așadar, tensorul deformației la forfecare simplă devine:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \gamma & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

Tensorul unei deformații generale prin extensie se determină ca în

Fig.1.24.



$$E = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ \gamma & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$$

Fig.1.24 Definiția tensorului deformației E pentru o deformație generală prin extensie a unui cub unitar

În cazul deformațiilor fără variație de volum $\det(E) = 1$.

În cazul **deformației uniaxiale prin extensie**, incompresibilitatea implică $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^{-1/2}$, unde λ_1 este raportul de întindere pe direcția alungirii.

Tensorul E poate fi exprimat în funcție de tensorul gradientului de viteză ∇v ($\frac{\partial \dot{x}}{\partial x}$):

$$\frac{\partial}{\partial t} E = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x'} = \frac{\partial x}{\partial x'} \cdot \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} = E \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = E \cdot \nabla v \quad (1.20)$$

1.4.3 Tensorul tensiunii

Componentele după o anumită axă ale tensorului tensiunii, T , sunt forțele unitare pe care materialul, de la exteriorul cubului unitar, le exercită asupra suprafeței perpendiculare pe axa respectivă, ca în **Fig.1.25**.

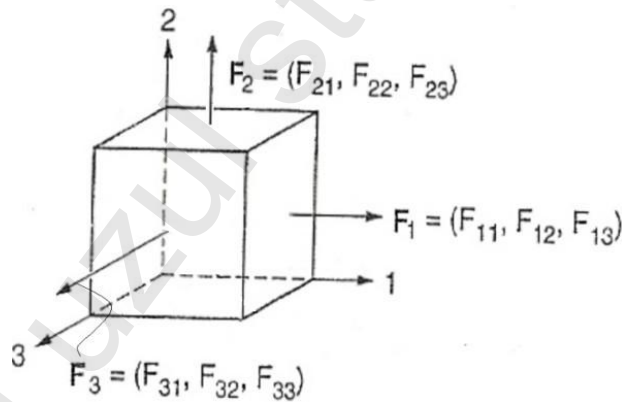


Fig.1.25 Definiția tensorului tensiunii în funcție de componentele care acționează pe fețele cubului unitar

$$T = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix}$$

Cea mai simplă stare de tensiune este cea în care elementul de fluid din cubul elementar este supus doar la presiunea hidrostatică. Atunci tensorul tensiunii devine $T = -p\delta$, unde δ este tensorul unitar:

$$\delta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Prin convenție, o presiune negativă este echivalentă cu o tensiune pozitivă. Tensiunile suplimentare, față de presiunea hidrostatică, sunt exprimate prin tensorul tensiunii suplimentare, σ și tensorul tensiunii devine $T = \sigma - p\delta$. Tensorii proporționali cu δ se numesc tensori izotropi. La materialele izotrope (ale căror proprietăți de repaos sunt independente de direcție) tensiunea este simetrică, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$. Anizotropiile apar numai din cauza deformării. Multe lichide cu grad mare de dezordonare sunt considerate materiale izotrope:

- lichidele simple,
- topituri și soluții ale moleculelor polimerice flexibile ordinare,
- sticlele,
- suspensiile de particule rotunde dezordonate,
- gelurile coloidale și polimerice.

Lichidele anizotrope au un anumit grad de ordine orientatională sau pozițională, la mare distanță, în stare de repaos:

- cristalele lichide,
- polimerii lichid-cristalini,
- copolimerii bloc ordonați.

La o curgere prin forfecare, Fig.1.23, a unui lichid izotrop incompresibil, tensorul tensiunii conține, drept componente nenule:

- cel puțin două, $\sigma_{12} = \sigma_{21}$, precum și un termen al presiunii izotrope, dacă fluidul este Newtonian ($\sigma = \eta_0 \dot{\gamma}$);
- σ_{12} , σ_{21} , p și tensiunile normale σ_{11} , σ_{22} și σ_{33} dacă fluidul nu este Newtonian.

Din cauză că tensorul tensiunii poate fi determinat numai cu ajutorul unui tensor izotrop suplimentar, pot fi măsurate doar diferențele de tensiune normală: $N_1 \equiv \sigma_{11} - \sigma_{22}$ și $N_2 \equiv \sigma_{22} - \sigma_{33}$. De obicei N_1 este pozitiv iar N_2 negativ și cu peste trei ordine de mărime mai mic.

1.5 Metode de caracterizare a fluidelor complexe

În continuare sunt prezentate principalele metode de caracterizare cantitativă a curgerii, a alunecării de perete și a fenomenului de curgere aparentă. La acestea, se adaugă metode calitative: microscopia, difracția radiațiilor și polarimetria.

1.5.1 Curgerea

Curgerea vâscoasă a lichidelor simple este exprimată prin vâscozitatea η_0 . În absența curgerii macroscopice, moleculele pulsează în mod individual (*mișcare Browniană*). Sub efectul unei tensiuni aplicate, amplitudinea pulsațiilor în același sens cu tensiunea devine mai mare decât în sens contrar → se produce o deplasare în timp.

Considerând Ω_0 drept viteza de pulsație și ΔH valoarea barierei entalpiei de activare pe care trebuie s-o învingă o moleculă pentru a sări într-o nouă poziție, atunci viteza de pulsație în absența tensiunii aplicate este $\Omega_0 e^{-(\Delta H/k_B T)} = \Omega_0 \exp[-(\Delta H/k_B T)]$.

Viteza tipică de coliziune moleculară este $\Omega_0 \approx 10^{13} \text{ s}^{-1}$. Sub efectul unei tensiuni de forfecare aplicate, σ , bariera de activare a pulsațiilor directe (în sensul tensiunii aplicate) este coborâtă la $\Delta H - v^* \sigma$, unde v^* este volumul de activare, care exprimă locul din materialul lichid implicat în pulsație (la moleculele mici poate fi aproximat prin volumul molecular). În mod analog, bariera de activare a pulsațiilor inverse este ridicată la $\Delta H + v^* \sigma$. Din diferența celor două viteze de pulsație, se exprimă viteza de forfecare sub forma:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \Omega_0 \left\{ \exp \left[\frac{-\Delta H + v^* \sigma}{k_B T} \right] - \exp \left[\frac{-\Delta H - v^* \sigma}{k_B T} \right] \right\} \quad (1.21)$$

unde: factorul $\frac{1}{2}$ ține cont de faptul că jumătate dintre pulsații sunt directe și jumătate inverse.

Dacă tensiunea aplicată, σ , este mică, atunci $v^* \sigma \ll \Delta H$ și vâscozitatea

$(\eta_0 \equiv \sigma/\dot{\gamma})$ devine:

$$\eta_0 = \frac{k_B T}{v^*} \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta H}{k_B T}\right) \quad (1.22)$$

unde: $\tau_0 \equiv 1/\Omega_0 \approx 10^{-13}$ s.

Expresia vâscozității din (1.22) poate fi scrisă sub forma $\eta = G\tau$, în care:

$G = k_B T v$ – este modulul de elasticitate, cu $v = 1/v^*$ iar

$\tau = \tau_0 \exp(\Delta H/k_B T)$ – este timpul de relaxare.

Măsurarea curgerii se face cu reometre care sunt proiectate să impună:

- deformația unor fluide complexe, prin deplasarea diferitor suprafețe marginale;
- scăderi de presiune pe suprafețe opuse ale fluidului,

și care urmăresc deformarea continuă și eventual omogenă a fluidului.

La viteze mari de curgere pot apare instabilități hidrodinamice ale fluidelor simple care duc la curgeri secundare, datorate efectelor inerțiale sau elastice.

1.5.2 Alunecarea de perete (wall slip)

La curgerea fluidelor simple există limite solide, reprezentate prin suprafețele marginale, față de care fluidul trebuie să curgă, fără să adere. Pe de altă parte, dacă un bloc solid este plasat între două plăci, dintre care una este în mișcare, se va produce o alunecare a materialului față de cel puțin una dintre plăci.

Un fluid complex se poate comporta ca un lichid, la viteze de forfecare mici sau ca un solid, la viteze mari. Din acest motiv, atunci când prezintă o comportare de tip solid, fluidele complexe pot aluneca față de pereții solizi. Comportarea de tip solid apare atunci când modulul de înmagazinare, G' este mult mai mare decât modulul de pierdere, G'' . Un exemplu de alunecare de perete îl poate oferi o spumă apoasă care este forfecată între două suprafețe

netede. Apa din spumă poate forma un strat lubrifiant, la perete, ceea ce face ca masa principală de spumă să fie forfecată într-o mai mică măsură.

Metode de măsurare a alunecării de perete:

- măsurarea vitezei aparente de forfecare V/h , dependentă de mărimea golului dintre plăci (h);
- considerarea efectului tratamentului de suprafață al plăcilor;
- utilizarea particulelor de marcare;
- evaluarea undelor evanescente (care dispar) – măsurate prin spectroscopie;
- velocimetrie laser-dopler – măsoară viteza unor particule de marcare cu $\Phi 150$ nm;
- reometrie prin rezonanță magnetică nucleară (*rheo-NMR*).

Pentru măsurarea alunecării de perete se utilizează lungimea de extrapolare, care definește distanța față de interfața solid-lichid, la care viteza de alunecare a lichidului V_s scade la zero. Conform **Fig.1.26**, expresia lungimii extrapolate este:

$$b = \frac{V_s}{\dot{\gamma}} \quad (1.23)$$

Se estimează că lungimea de extrapolare este de ordinul a câtorva zeci de diametre moleculare și anume:

- 1-100 nm, în cazul moleculelor mici;
- de la câțiva μm la fracțiuni de mm, în cazul macromoleculelor.

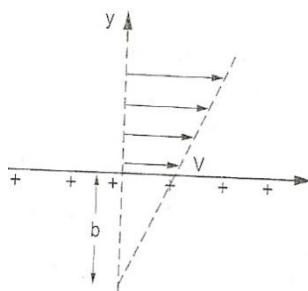


Fig.1.26 Lungimea b , de extrapolare a alunecării, este distanța de sub suprafață la care viteza profilului se extrapolează la zero

1.5.3 Curgerea aparentă

Curgerea aparentă sau deformăția plastică la tensiune constantă este caracteristică lichidelor vâscoase. Ea se declanșează după depășirea tensiunii de curgere σ_y , care depinde de viteza de deformare și de temperatură. Exemple tipice de fluide complexe care suportă fenomenul de curgere aparentă sunt polimerii sticloși (vitroși), ale căror curbe caracteristice, tensiune-deformație, sunt prezentate în **Fig.1.27**.

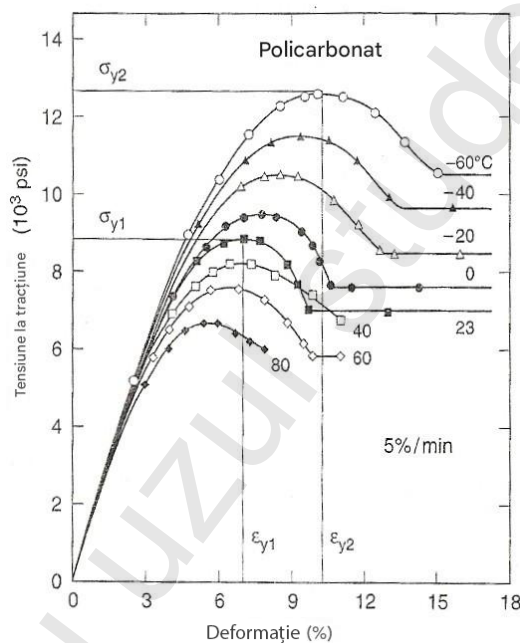


Fig.1.27 Curbe tensiune-deformație la tracțiune ale polycarbonatului testat la diverse temperaturi, cu o viteză de deformare specifică de 0.05 min^{-1}

Deși Fig.1.27 s-a obținut pentru tracțiune, curbe similare de curgere s-au obținut și la forfecare.

Un mecanism simplu de curgere aparentă a solidelor cristaline este ilustrat în **Fig.1.28**.

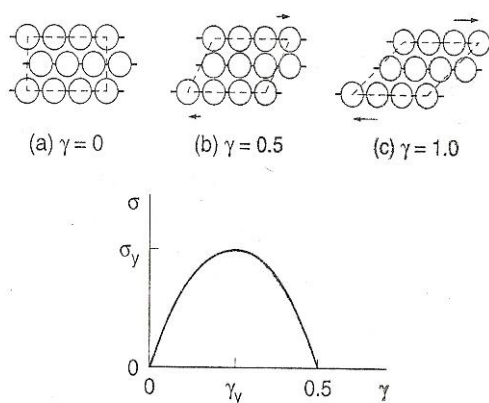


Fig.1.28 Ilustrarea mecanismului idealizat al cugerii aparente. (a) poziții inițiale de echilibru ale atomilor; (b) jumătatea distanței de forfecare a rândurilor atomice de jos și de sus; (c) poziție de echilibru după forfecarea rândurilor atomice de jos și de sus cu câte un parametru de rețea

Se poate observa o variație periodică a tensiunii de forfecare a straturilor atomice compacte. Energia este maximă în Fig.1.28(b) iar tensiunea este nulă în Fig.1.21(a), (b) și (c). Din Fig.1.28 se observă că energia de deformare este o funcție periodică de deformare, care oscilează între zero și o valoare maximă. Tensiunea este nulă pentru valori ale lui γ din 0.5 în 0.5 și atinge valoarea maximă la $\gamma=0.25$.

1.5.4 Microscopia

Microscopia este una dintre cele mai directe moduri de a obține informații despre structura fluidelor complexe.

Microscopia optică poate analiza imagini cu rezoluția de $0.5 \mu\text{m}$. La acest nivel pot fi analizate structurile și texturile supermoleculare, generatoare de tensiuni, care sunt prezente în emulsii, amestecuri, cristale lichide și suspensii de particole mari. Pentru analizarea curgerii sau deformării, se montează celule de curgere pe microscopice optice. Unele macromolecule biologice (ex.: AND) pot fi observate direct, la microscopice cu fluorescență. Microscopia optică poate fi combinată cu micromanipularea, în scopul

măsurării proprietăților mecanice ale fluidelor complexe. În acest scop se folosesc *capcane optice* numite și pensete optice (*En: optical tweezers*) care constau dintr-un fascicul focalizat de raze laser care captează mici particule din fluid, exercitând forțe de $\sim 10\text{pN}$ (10^{-12}N).

Microscopia electronică poate atinge rezoluții de:

- (i) 15 Å la baleiaj, *SEM*;
- (ii) 0.5 Å la transmisie, *TEM*.

Din cauza condițiilor de vid, microscopia electronică nu se poate utiliza la studiul curgerii fluidelor complexe. *SEM* s-a folosit pentru studiul in situ al deformării și ruperii polimerilor, folosind *markere de deplasare*, trasate cu fasciculul de electroni sau ioni din dotarea microscopului. O variantă mai bună este *AFM*.

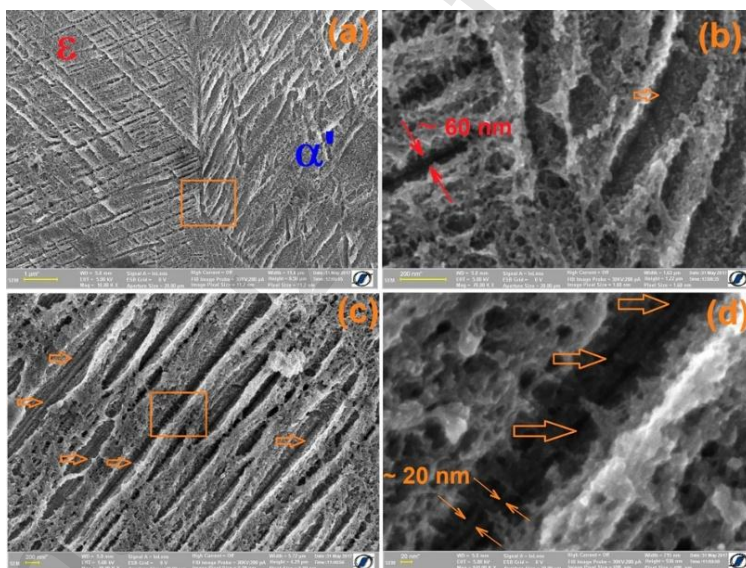


Fig. 1.29 Observații SEM ale diferitelor zone de curgere a materialului [7]

1.5.5 Dispersia de radiații

Dispersia luminii, a razelor X și a neutronilor oferă una dintre cele mai eficiente metode de studiu al fluidelor complexe. Rezoluțiile metodelor de dispersie sunt:

- ❖ 2000 Å – 100 μm, pentru lumină;
- ❖ 10-1000 Å, pentru raze X;
- ❖ 10-200 Å, pentru neutroni.

Devierea radiației se produce sub efectul neomogenităților din mediul de dispersie. Numărul de undă este definit drept $k=2\pi n/\lambda$, unde n este ordinul de refracție al mediului iar λ/n este lungimea de undă în mediul de dispersie. Vectorul de undă, atât cel incident cât și cel dispersat, se exprimă sub forma produsului dintre $2\pi n/\lambda$ și un vector unitar, pe direcția de propagare.

Se consideră două puncte ale mediului de dispersie distanțate la intervalul x' . În **Fig.1.30**, diferența de drum între două fascicule paralele care lovesc cele două particule este $\ell_2 - \ell_1$.

Vectorul de dispersie se definește prin $q = k_s - k_i$ și are valoarea:

$$|q| = \frac{4\pi n}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.24)$$

Deoarece q este un vector cantitativ, dispersia este un mod foarte bun pentru a determina lungimile particulelor componente și orientările fluidelor complexe.

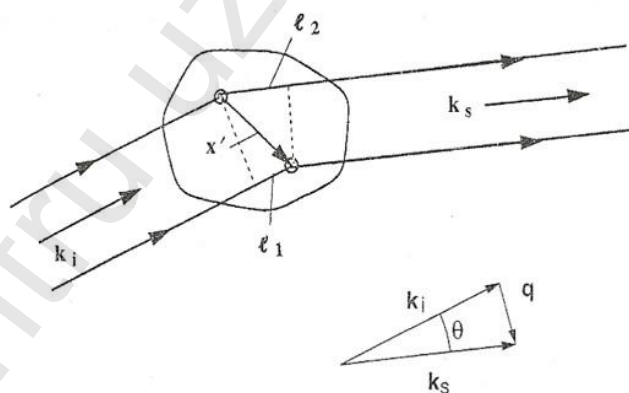


Fig.1.30 Principiul dispersiei radiațiilor se bazează pe devierea cu unghiul θ a unui fascicul incident de radiație cu vector de undă k_i care, după dispersie capătă vectorul de undă k_s

Dispersia razelor X sau dispersia de neutronilor sunt utile pentru studiul structurilor moleculare. Opțiunea între cele două tipuri de radiații dispersate se face în funcție de:

- contrastul dorit al imaginilor;
- adâncimea de penetrație;
- disponibilități.

1.5.6 Polarimetria

Multe dintre fluidele complexe conțin microstructuri, particule și molecule orientabile care se rotesc în timpul curgerii sau sub efectul câmpurilor electrice sau magnetice aplicate. Dacă aceste molecule au polarizabilități anizotrope, atunci indicele lor de refracție va fi dependent de orientare. În acest caz materialul respectiv este *birefringent*.

În general, partea anizotropă a indicelui de refracție este un tensor n care este dependent de polarizabilitatea probei, α . Polarizarea, P este tendința probei de a deveni polarizată atunci când i se aplică un câmp electric, E . Rezultă $P = \alpha E$. Atunci când partea anizotropă a indicelui de refracție este mult mai mică decât partea izotropă, tensorul indicelui de refracție (tensorul birefringenței) n poate fi exprimat în funcție de polarizabilitate prin formula:

$$n = \frac{(n^2 + 2)^2}{6n} \frac{4\pi}{3} \alpha \quad (1.25)$$

în care n este partea izotropă a indicelui de refracție.

La lichidele polimerice simple, tensorul birefringenței este proporțional cu tensorul tensiunii: $n = C \sigma$, în care C este un coeficient optic de tensiune.

1.6 Forțe electromagnetice intermoleculare

Structura materiei, la o scară mai mare decât cea atomică, este guvernată de forțele electromagnetice. Tendința spre electroneutralitate, combinată cu agitațiile termice și cu substructura discretă sau cuantică a materiei dau naștere unei uluitoare diversități de aranjamente atomice. Considerând moleculele drept indivizibile singurele forțe electromagnetice

care trebuie luate în considerație sunt cele dintre molecule. Forța F dintre două molecule sferice aflate la distanța r , se exprimă prin intermediul unei funcții potențial $W(r)$ sub forma: $F = - (dW)/dr$. Forțele care crează acest potențial pot fi:

- sterice (de contact);
- de tip van der Waals;
- electrostatice;
- de tip legături de hidrogen;
- hidrofobice.

1.6.1 Interacțiuni de contact (sterice)

Atunci când moleculele sau atomii sunt aduse în contact, norii lor electronici ajung să se suprapună, producând forțe de respingere care la distanțe mici devin predominante față de toate celelalte forțe. Din cauza acestei forțe de respingere, la mică distanță, fiecare moleculă posedă un anumit interval de distanță în care moleculele vecine nu pot pătrunde. Această forță a volumului exclusiv determină structura la mică distanță a lichidelor sau ordinea cristalografică a solidelor compuse din particule coloidale împachetate compact.

Natura interacțiunii de volum exclusiv depinde de forma și flexibilitatea moleculelor sau particulelor care interacționează. În continuare sunt analizate forțele volumului exclusiv pentru:

- particule sferice rigide,
- molecule sau particule nonsferice rigide,
- macromolecule flexibile,
- macromolecule semiflexibile.

A. Interacțiunile de contact între sferele rigide pot fi analizate cu ajutorul diagramei de echilibru din **Fig. 1.31** care clasifică dispersia de

particule, în stare de echilibru, în funcție de fracțiunea de volum, Φ :

- $\Phi < \Phi_1 = 0.49$ – sfere dezordonate;
- $\Phi = 0.49$ – sferele încep să se ordoneze într-o structură macrocristalină cu împachetare compactă care poate fi un amestec de *cfc* (ABC) și *hc* (AB);
- $0.49 < \Phi < 0.545$ – faza dezordonată coexistă cu cea coloidală;
- $0.545 < \Phi < 0.74$ (gradul de compactitate al celei elementare compacte, *cfc* sau *hc*) – existența teoretică a fazei coloidale cristaline.

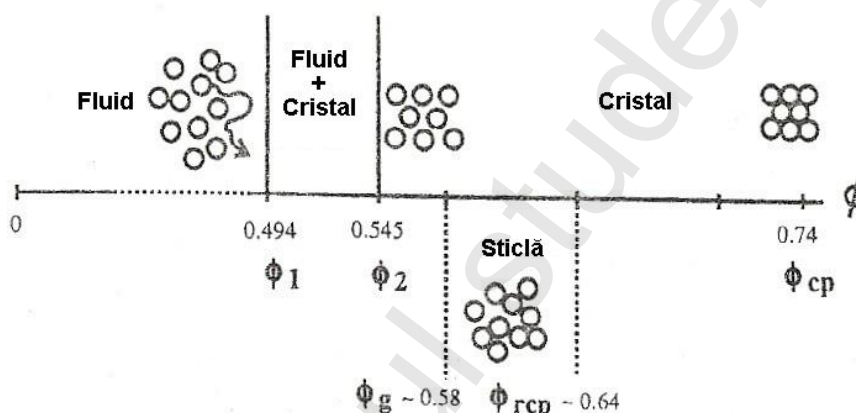


Fig.1.31 Diagrama de fază a sferelor rigide. Pentru fracțiuni de volum $\Phi < \Phi_1 = 0.494$ dispersia este un fluid dezordonat. Între $\Phi_1 = 0.494$ și $\Phi_2 = 0.545$ fluidul dezordonat coexistă cu faza cristalină coloidală cu ordonare *cfc* sau *hc*. Faza cristalină coloidală este în stare de echilibru între $\Phi_2 = 0.545$ și $\Phi_{cp} = 0.74$. Între $\Phi_g = 0.58$ și limita de împachetare compactă întâmplătoare, $\Phi_{rcp} = 0.64$ poate apărea comportarea vitroasă coloidală în afara de echilibru

În condiții aflate afară de echilibru, pentru $0.56 < \Phi < 0.64$, se poate forma o fază metastabilă, vitroasă și dezordonată, din cauza suprimării mișcării Browniene prin „efectul de cușcă” al sferelor învecinate care împiedică formarea centrelor de cristalizare. În general, starea vitroasă coloidală apare dacă densitatea sferelor rigide poate fi majorată brusc (*ex.: prin centrifugare*) depășindu-se valorile critice ale fracțiunii de volum la care se produce cristalizarea.

Valoare de 0.64 a fracțiunii de volum se numește *limită de împachetare întâmplătoare* și reprezintă circa 86 % din gradul maxim de compactitate.

Corelațiile poziționale între perechile de molecule învecinate sunt descrise prin funcția de distribuție radială, $g(r)$ – probabilitatea de a găsi centrul de masă al unei a doua molecule la distanța r față de centrul de masă al unei molecule date. $g(r) = 1$ pentru moleculele fără corelare pozițională. **Fig.1.32** arată un maxim la $r/2a = 1$.

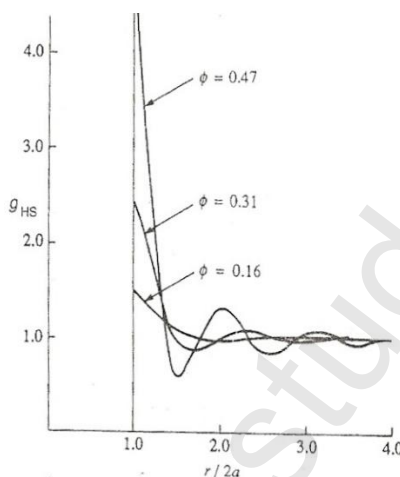


Fig.1.32 Funcția de distribuție radială, $g_{HS}(r)$ pentru suspensiile dezordonate de sfere rigide, la diverse fracțiuni de volum, Φ

B. Interacțiuni de contact și tranziții de ordonare dintre moleculele rigide nonsferice sunt mult mai complexe. **Fig.1.33** analizează împachetarea unor molecule dure, nonsferice, cu forma de tijă cilindrice. Cea mai compactă împachetare a tijelor cilindrice apare atunci când acestea sunt paralele și împachetate hexagonal, în planul perpendicular la axe. În acest caz, $\Phi=0.9069$.

La scăderea densității tijelor ordonate lungi, apare o “topire” în urma căreia se pierde ordinea hexagonală dar se păstrează parțial ordinea orientatională a axelor. Această stare parțial ordonată se numește *nematică*.

Gradul de orientare al unei soluții nematice este descris prin S – parametrul ordinii orientatională, care cuantifică măsura în care orientările moleculare sunt paralele cu o axă nematică comună.

$S = 1 \rightarrow$ orientare paralelă perfectă;

$S = 0 \rightarrow$ orientare complet întâmplătoare (stare izotropă).

La echilibru, S se determină cu: $S=3/2\cos^2\theta-1/2$, în care θ este unghiul dintre axa unei tije date și axa nematică, generală.

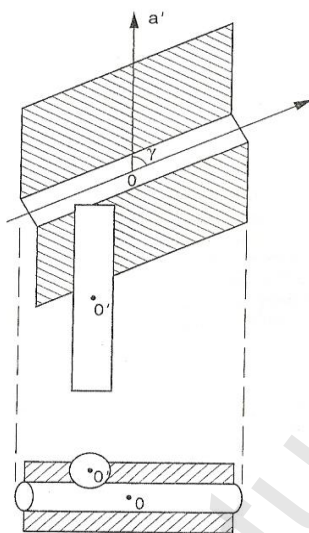


Fig.1.33 Împachetarea unor molecule cu formă de tijă. Pentru a evita intersecția, tija O exclude din regiunea hașurată centrul de masă al oricărei alte tije, cum ar fi O' . Volumul acestei regiuni, din jurul tije O , este proporțional cu unghiul γ dintre axele celor două tije

C. Interacțiunile de contact între macromolecule flexibile, apar în cazul lanțurilor moleculare lungi, care conțin până la zeci de mii de monomeri. După cum arată **Fig.1.34**, materialele confecționate din macromolecule flexibile sunt omniprezente în viața cotidiană, incluzând ambalajele alimentare, conductele din *PVC*, recipientele din polistiren, pneurile din cauciuc poliizoprenic, fibrele de nailon, etc.

Moleculele flexibile permit mișcări de rotație ale unei legături în raport cu alta, ceea ce poate da naștere unui număr considerabil de configurații posibile. La nivelul macromoleculelor formate din zeci sau sute de astfel de monomeri, se obține o configurație echivalentă cu un “mers întâmplător”, ca în **Fig.1.35**.

Din cauza flexibilității ridicate a acestor molecule, ele rămân neorientate, chiar și în stare împachetată compact.

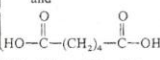
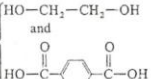
Polymer	Monomer(s)	Structural Unit
Polyethylene	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	$-\text{CH}_2-$
Polyvinylchloride	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$	$-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$
Polystyrene	$\text{CH}_2=\text{CH}$ 	$-\text{CH}_2-\text{CH}-$ 
Polyacrylamide	$\text{CH}_2=\text{CH}$ CONH_2	$-\text{CH}_2-\text{CH}-$ CONH_2
Polyisobutylene	$\text{CH}_2=\text{C}$ CH_3	$-\text{CH}_2-\text{C}-$ CH_3
Polyisoprene (natural rubber)	$\text{CH}_2=\text{C}-\text{CH}=\text{CH}_2$ CH_3	$-\text{CH}_2-\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_2-$ CH_3
Polydimethylsiloxane	$\text{HO}-\text{Si}-\text{OH}$ CH_3	$-\text{Si}-\text{O}-$ CH_3
Polyethyleneoxide (Polyox)		$-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$
Polyhexamethylene adipamide (Nylon 66)	$\text{NH}_2-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2$ and 	$-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{C}(=\text{O})-(\text{CH}_2)_4-\text{C}(=\text{O})-$
Polyethylene terephthalate (polyester)	$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ and 	$-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-$

Fig.1.34 O serie de polimeri comuni, monomerii din care sunt sintetizați și blocul structural care este reprodus în lanțul polimeric

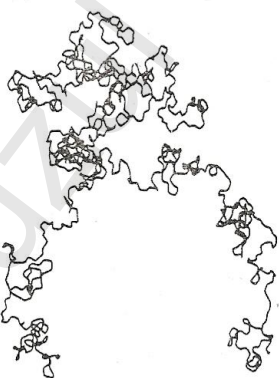


Fig.1.35 Mers întâmplător, format dintr-o mie de legături

D. Interacțiunile de contact între macromoleculele semiflexibile

depind de modul de distribuire a flexibilității, la nivelul scheletului polimeric:

- distribuție uniformă,
- distribuție neuniformă.

Macromoleculele cu flexibilitate uniform distribuită sunt de tip grindă flexibilă sau „lanț sub formă de vierme”, care are o rigiditate finită la

încovoiere, care este uniform distribuită de-a lungul lanțului.

Macromoleculele cu flexibilitate neuniformă sunt constituite din fragmente rigide intercalate cu segmenete flexibile.

1.6.2 Interacțiuni van der Waals

Acest tip de interacțiuni caracterizează tranzițiile lichid-vapor sau lichid-lichid și provin din forțele de atracție dintre dipolii electrici sau dintre particulele independente.

Interacțiunile dipolare sunt prezente în acele substanțe moleculare unde există separație între cele două sarcini electrice, de exemplu moleculele organice care conțin oxigen (atomii de O atrag electronii din atomii de C din vecinătate).

Dacă cele două sarcini electrice, q și $-q$ se găsesc la distanța r , atunci momentul magnetic dipolar este $u = rq$. Câmpul electric creat de un dipol poate să atragă sau să respingă dipolii învecinați. Într-un lichid, unde pot să se rotească liber, dipolii tind să se reorienteze reciproc astfel încât să maximizeze interacțiunile de atracție și să le minimizeze pe cele de respingere. Chiar și în cazul unui lichid izotrop, deși nu există orientări moleculare permanente, este prezentă o forță netă de atracție între molecule, care le ține împreună, în cadrul ansamblului.

Interacțiunile dintre particulele independente sunt prezente în fluidele complexe multifazice. Considerând două particule sferice de rază a ale căror centre se află la distanța r . Golul dintre ele va fi $D = r - 2a$. Dacă se consideră $x = D/2a$, potențialul de interacțiune van der Waals este:

$$W_{vdw}(sfere) = -\frac{A_H}{12} \left\{ \frac{1}{(x+1)^2-1} + \frac{1}{(1+x)^2} + 2\ln \left[1 - \frac{1}{(1+x)^2} \right] \right\} \quad (1.26)$$

unde semnul și valoarea constantei Hamaker, A_H , sunt controlate de forțele van der Waals.

Dacă $D \ll a$ ($x \ll 1$) atunci:

$$W_{vdw}(sfere) \approx \frac{-A_H a}{12D} \quad (1.27)$$

Pentru suprafețe paralele, plate, aflate la distanța D potențialul pe unitatea de suprafață este:

$$W_{vdw}(placi\ plate) = \frac{-A_H}{12\pi D^2} \quad (1.28)$$

Valoarea constantei lui Hamaker are expresia:

$$A_H = \frac{3}{4} k_B T \left(\frac{\varepsilon_A - \varepsilon_B}{\varepsilon_A + \varepsilon_B} \right)^2 + \frac{3h\nu_e}{16\sqrt{2}} \frac{(n_A^2 - n_B^2)^2}{(n_A^2 + n_B^2)^{3/2}} \quad (1.29)$$

unde: $\varepsilon_{A,B}$ sunt constantele dielectrice statice ale materialului particulelor (A) sau mediului (B),

$n_{A,B}$ indicii de refracție ale materialelor respective,

ν_e este frecvența principală de absorbție în ultraviolet.

Fig.1.36 prezintă variația forței *van der Waals* în funcție de distanță pentru două suprafețe cilindrice de mică separate prin soluții de electrolit apos. Se constată că legea de variație a forței, $F = \partial W / \partial D = -A_H R / 6D^2$, aplicabilă pentru această geometrie, este valabilă pentru distanțe de până la 10 nm. Peste această valoare Forța de atracție este redusă din cauza unor efecte de întârziere.

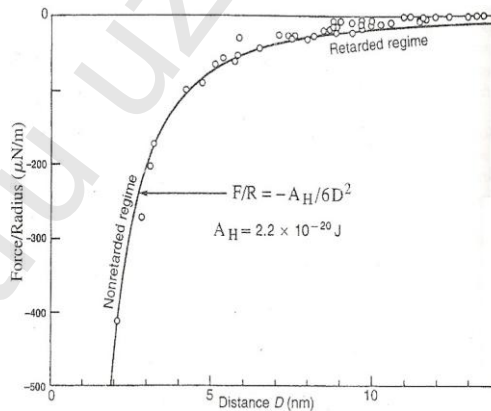


Fig.1.36 Forța *van der Waals* între 2 suprafețe curbate de mica, dispuse în soluții apoase de electrolit. Linia este forța *van der Waals* a fost aproximată considerând o constantă Hamaker $a_H = 2,2 \times 10^{-20} \text{ J}$

2. PROPRIETĂȚILE FLUIDELOR COMPLEXE

2.1 Fluide polimerice

Fluidele polimerice sunt cele mai studiate fluide complexe datorită comportării lor reologice extrem de bogate. În continuare este analizat cazul particular al *polimerilor flexibili, monocomponenți*.

2.1.1 Structura fluidelor polimerice

Din cauza moleculelor lor lungi care se pot distorsiona chiar și la viteze de curgere reduse, fluidele polimerice pot prezenta efecte vâscoelastice puternice cum ar fi:

- subțierea sau îngroșarea la întindere;
- apariția tensiunilor vâscoelastice normale;
- reologia dependentă de timp.

Fig. 2.1 prezintă o moleculă de ADN cu un capăt fixat de o „pensetă optică” care se alungește sub efectul curgerii lente a unui solvent. Se observă că, la o viteză de curgere a solventului de $50 \mu\text{m/s}$, molecula s-a alungit de mai multe ori față de starea ei de la viteza de $1 \mu\text{m/s}$.

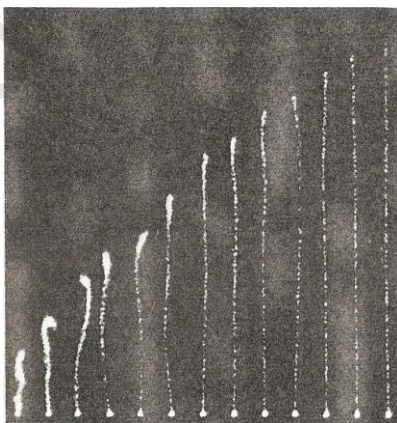


Fig.2.1 Imagini fluorescente ale moleculelor de ADN având un capăt fixat prin intermediul unei „pensete optice”, cu o rază laser și antrenate de curgerea unui solvent cu vitezele: 1; 2; 3; 4; 5; 7; 10; 12; 15; 20; 30; 40 și $50 \mu\text{m/s}$

Un fluid polimeric, cu astfel de molecule care se pot alungi, poate avea un comportament foarte elastic. Însă, odată cu creșterea concentrației, fluidele polimerice care conțin molecule lungi, pot deveni extrem de vâscoase. **Fig.2.2** prezintă creșteri spectaculoase ale vâscozității la forfecare nulă, η_0 , odată cu creșterea greutateții molare, M .

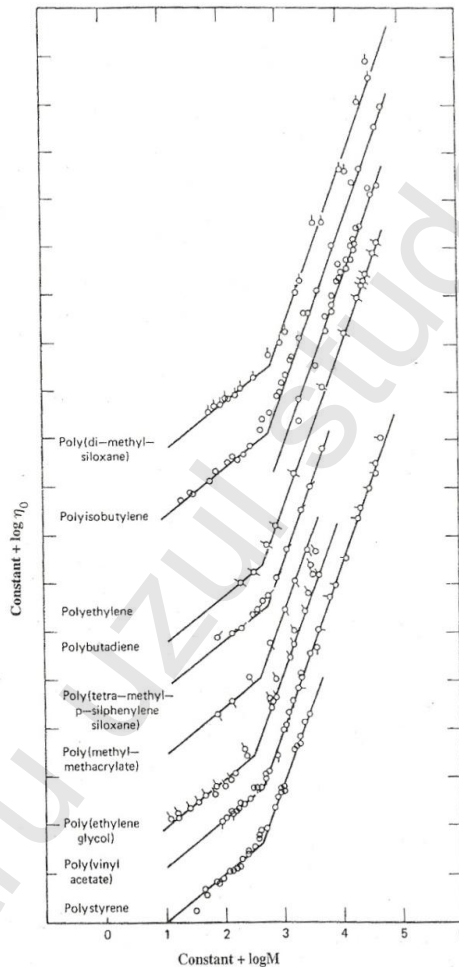


Fig.2.2 Dependența vâscozității la forfecare nulă (η_0) de greutatea moleculară, M , pentru mai multe topituri polimerice, aproape monodisperive

Există o greutate moleculară, M_c , peste care vâscozitatea de forfecare crește brusc:

$$M < M_c \rightarrow \eta_0 \text{ crește liniar cu } M (\eta_0 \sim M)$$

$$M > M_c \rightarrow \eta_0 \text{ crește exponențial } (\eta_0 \sim M^p, \text{ unde } p \approx 3.4).$$

Creșterea bruscă a vâscozității odată cu creșterea masei moleculare peste M_c se datorează ramificărilor (*încâlcărilor*) care sunt restricții topologice în calea mișcării moleculare deoarece lanțurile nu pot trece unul printr-altul.

Din cauza ramificațiilor, o moleculă lungă înconjurată de altele asemănătoare nu se poate mișca prea mult pe direcții perpendiculare față de propriul său contur molecular. Din acest motiv, difuzia sau relaxarea moleculară este limitată la o mișcare șerpuitoare a moleculei în jurul propriului contur. Această lentă mișcare șerpuitoare se numește **reptație** (*lat. = târâre*).

Fig.2.3 prezintă o singură moleculă fluorescentă de ADN alungită pe un traseu contorsionat, moleculă care este ramificată cu alte molecule de AND invizibile pe figură.

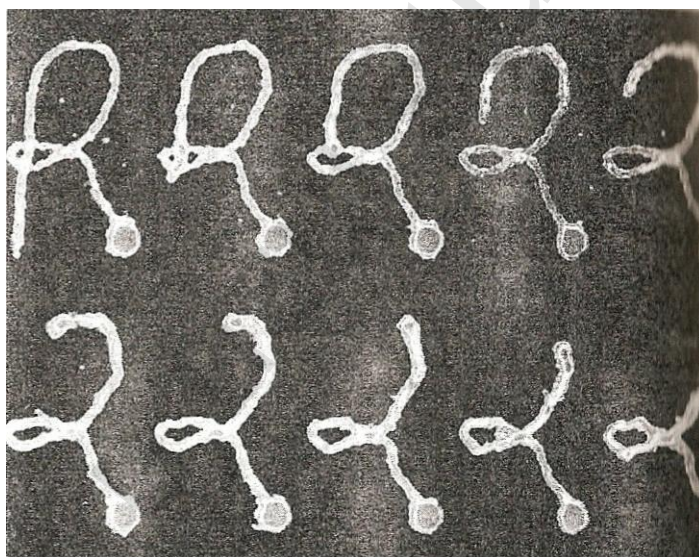


Fig.2.3 Secvență de imagini, în timp, prezentând retragerea unei molecule de ADN lungă de 60 μm , în lumină fluorescentă, având o mică sferă fixată la un capăt, care a fost trasă prin solvent cu ajutorul unei pensete optice, astfel încât să formeze litera R

Molecula vizibilă este fixată la un capăt prin intermediul unei „pensete optice”, cu rază laser. În timpul relaxării, capătul liber se retrage pe un traseu contorsionat definit de propriul său contur. În felul acesta, mișcarea moleculelor ramificate este limitată la o regiune tubulară. La greutatea

moleculare mari, mișcarea se limitează la reptăție într-un tub astfel încât relaxarea este lentă iar vâscozitatea topiturii polimerice ridicată.

Moleculele polimerice flexibile sunt modelate frecvent prin intermediul unor lanțuri cu resorturi și bile, ca în exemplul din **Fig.2.4**.

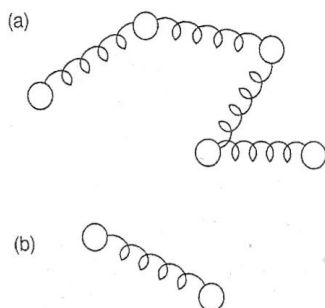


Fig.2.4 Modelarea polimerilor prin lanțuri cu resorturi și bile: (a) exemplu de model de lanț cu resorturi și bile; (b) sonerie elastică cu un resort și două bile

Atunci când moleculele sunt alungite, resorturile imită forțele elastice din moleculele flexibile în timp ce bilele produc frânarea hidrodinamică. Cel mai simplu model cu resorturi și bile este *soneria elastică* (clopoțelul de la hoteluri), din Fig.2.4(b), care conține doar două bile legate printr-un resort. Modelul soneriei elastice reproduce cele mai simple aspecte ale comportamentului de curgere a topiturilor polimerice și poate fi ușor generalizat la nivel de lanțuri cu resorturi și bile multiple.

2.1.2 Teorii moleculare elementare

Distribuția configurațiilor unei fluid polimeric aflat în stare de echilibru poate fi exprimată prin configurația unui lanț de bile cu legăturile libere. Considerând că un capăt al unui astfel de lanț molecular, care conține N_K legături, fiecare de lungime b_K , se află în origine, atunci probabilitatea $\Psi_0 dR^3$, ca celălalt capăt să se găsească într-o poziție între R și $R+dR$ este:

$$\Psi_0(R) = \left(\frac{\beta}{\sqrt{\pi}}\right)^3 \exp(-\beta^2 R^2) \quad (2.1)$$

unde $\beta^2 \equiv 3/(2N_K b_K^2)$ iar R este vectorul de-la-cap-la-cap al lanțului polimeric.

Din configurația funcției de distribuție din (2.1) poate fi anticipată elasticitatea moleculelor flexibile. Se presupune că capetele lanțului polimeric sunt fixe, astfel încât vectorul de-la-cap-la-cap este R . Numărul configurațiilor interne, Ω , care satisfac această condiție este $\Omega = c\Psi_0(R)$, unde c este constantă. Considerând expresia (2.1) pentru Ψ_0 , entropia de configurație se determină cu:

$$S = k_B \ln(\Omega) = k_B \ln(c\Psi_0) = k_B [\ln c + 3\ln(\beta/\sqrt{\pi}) - \beta^2 R^2] \quad (2.2)$$

Dacă entalpia lanțului nu depinde de configurație, atunci energia liberă de configurație, W , este $-TS$. Dacă acum se trage de lanțul polimeric, pentru a-l alungi, distanța R crește iar forța necesară este:

$$F^S = \frac{\partial W}{\partial R} = -\frac{\partial S}{\partial R} = 2k_B T \beta^2 R \quad (2.3)$$

S-a observat că creșterea distanței de separație, R , reduce numărul configurațiilor permise și din acest motiv molecula rezistă la alungire cu o forță proporțională cu $R \rightarrow$ lanțul molecular acționează ca un resort. Cea mai simplă teorie care explică acest comportament este teoria elasticității, care se aplică la cauciucuri ramificate ca în **Fig.2.5**.

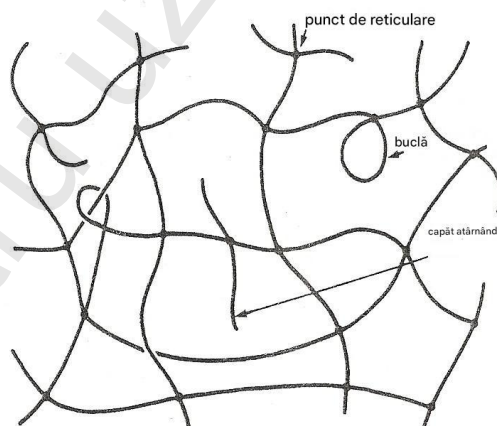


Fig.2.5 Schema unei rețele polimerice ramificate, cu funcționalitate 4

Se consideră alungirea unei rețele de cauciuc incompresibile, la care axele de alungire sunt orientate de-a lungul axelor de coordonate și unde

rapoartele de alungire λ_1 , λ_2 și λ_3 sunt pe direcțiile 1, 2 și respectiv 3. În exemplul din **Fig.2.6** deformăția este o alungire uniaxială care mărește lungimea cilindrului cu raportul λ_1 din lungimea inițială. Datorită legii volumului constant, raza cilindrului trebuie să se reducă la $\lambda^{-1/2}$.

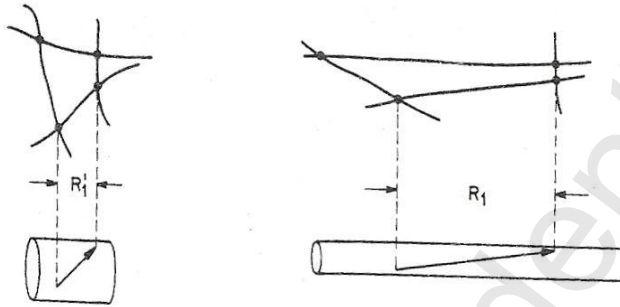


Fig.2.6 Rețeaua cauciucului ramificat înainte (stânga) și după (dreapta) alungire uniaxială

Dacă punctele de ramificație sunt conectate cu deformăția macroscopică, atunci se poate considera că, la nivel global, volumul de material se transformă dintr-o sferă într-un elipsoid, având axele egale cu raza sferei înmulțită cu λ_1 , λ_2 și λ_3 .

Ținând cont de legea volumului constant, $\lambda_1\lambda_2\lambda_3=1$ și atunci componentele tensorului tensiunii devin:

$$\sigma_{ii} = \nu k_B T \lambda_1^2 \quad (2.4)$$

unde ν este concentrația medie de puncte de joncțiune fizică pe unitatea de volum. Sub formă tensorială, relația devine:

$$\sigma = \nu k_B T \begin{pmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{pmatrix} = GB \quad (2.5)$$

unde G este modulul de elasticitate iar B este „*tensorul Finger*” al deformăției generale prin întindere.

Modelul rețelei polimerice temporale consideră că o topitură polimerică este formată din joncțiuni temporare care se formează și se rup în mod spontan. Cu toate acestea, concentrația medie de puncte de joncțiune fizică, ν , este considerată constantă, ceea ce înseamnă că legăturile se formează

și se rup cu aceeași viteză.

Expresiile generale ale modulelor de elasticitate, de pierdere și de înmagazinare sunt:

$G'(\omega) = \sum_i G_i \frac{\omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2}$; $G''(\omega) = \sum_i G_i \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}$, unde $1/\tau$ este probabilitatea ca un punct de joncțiune să se rupă pe unitatea de timp.

În **Fig.2.7** sunt prezentate modulele de pierdere și de înmagazinare pentru opt moduri de relaxare, descrise în **Tab.2.1**.

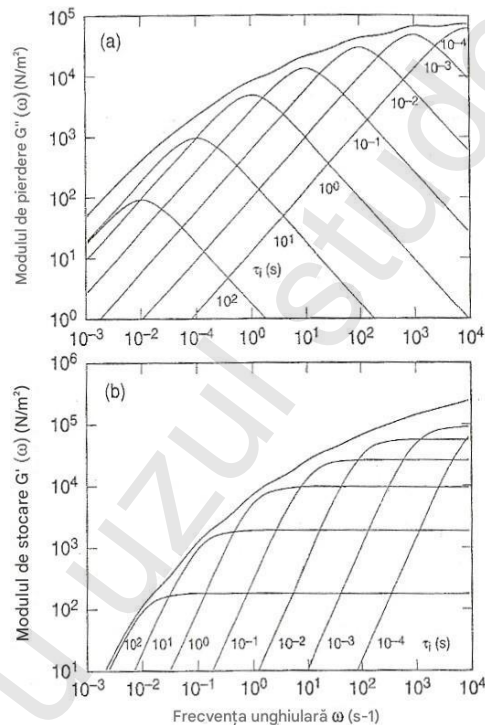


Fig.2.7 Dependența de frecvență: (a) a modulului de pierdere, G'' ; (b) a modulului de înmagazinare, G' , calculate pentru opt moduri de relaxare

Tab.2.1 Spectrul modurilor de relaxare

Număr mod, i	τ_i, s	G_i, Pa	Număr mod, i	τ_i, s	G_i, Pa
1	10^3	$1,00 \times 10^0$	5	10^{-1}	$2,67 \times 10^4$
2	10^2	$1,80 \times 10^2$	6	10^{-2}	$5,86 \times 10^4$
3	10^1	$1,89 \times 10^3$	7	10^{-3}	$9,48 \times 10^4$
4	10^0	$9,80 \times 10^3$	8	10^{-4}	$1,29 \times 10^5$

Se observă că, prin cumulara contribuțiilor a opt moduri de relaxare, se poate obține „fitarea” modulelor de elasticitate pe un interval de frecvențe care acoperă 7 ordine de mărime.

2.1.3 Reologia fluidelor polimerice ramificate

În topiturile polimerice, lanțurile moleculare se întrepătrund și din acest motiv mișcările moleculare sunt mult îngreunate de efectele de interferență ale celorlalte lanțuri. Aceste interferențe sunt atribuite ramificațiilor intermoleculare.

În cazul polistirenului topit s-a constatat apariția unor paliere ale variației modulului de înmagazinare, G' , în funcție de frecvență. Palierele devin cu atât mai lungi cu cât masa moleculară a topiturii este mai mare. Concomitent, s-a observat că și timpul de relaxare a acestor topituri crește odată cu masa moleculară. În intervalul de existență a palierului, topitura acționează ca un cauciuc ramificat, deoarece G' este aproape constant. O explicație pentru creșterea perioadei de relaxare odată cu creșterea masei moleculare se obține dacă se analizează mișcarea unui lanț molecular lung, care se deplasează într-o masă formată dintr-alte lanțuri moleculare, cu care este încălțit, **Fig.2.8**.

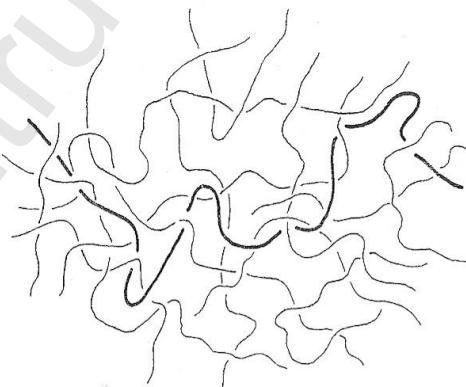


Fig.2.8 Moleculă de polimer încălțită în încurcătura altor lanțuri polimerice

Deoarece nu se poate deplasa în lateral, lanțul polimeric principal trebuie să se relaxeze prin alunecarea de-a lungul propriului său contur.

Această mișcare de târare seamănă cu cea a unui șarpe și din acest motiv a fost numită reptăție. Rezultatul constrângerilor exercitate de ansamblul de lanțuri moleculare adiacente este crearea unei *regiuni tubulare*, ilustrată în Fig.2.9.

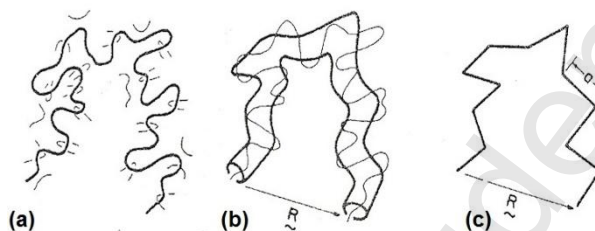


Fig.2.9 (a) Molecula de polimer este încâlcită cu moleculele vecine ceea ce (b) limitează mișcarea lanțului dat la o regiune tubulară. (c) Conturul tubului este cu aproximație un mers întâmplător având mărimea pasului egală cu diametrul tubului, a . Acest mers întâmplător se numește calea primitivă; conturul său fiind mult mai scurt decât lungimea pe contur a lanțului polimeric, în sine

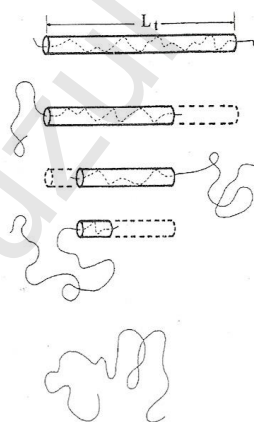


Fig.2.10 Reptăția (târârea) unei molecule de polimer în afara tubului său unde, pentru a ușura vizualizarea, tubul din Fig.2.9 a fost „îndreptat”

Se consideră că un lanț molecular, care interacționează cu moleculele vecine cu care este încâlcit, poate să lunece înainte și înapoi de-a lungul *regiunii tubulare*. Însă unele porțiuni ale moleculei scapă pe la capetele tubului unde devin libere și pot căpăta orientări întâmplătoare. Deplasându-se înainte și înapoi, față de tubul inițial, aceste fragmente de lanț „uită” configurația

tubului și ia naștere o nouă configurație care este transmisă treptat, întregului lanț molecular. În final, configurația inițială a tubului este complet pierdută, ca în **Fig.2.10**.

Din cauză că este un proces difuzional, timpul necesar lanțului să evacueze complet tubul inițial este proporțional cu pătratul conturului lungimii, L_t , împărțită la coeficientul de difuzie a mișcării de șerpuire. Tubul însuși este rezultatul unui traseu întâmplător, numit *calea primitivă a lanțului polimeric*. La polimerii cu masa moleculară mare, lungimea conturului tubului este mai mică decât cea a lanțului în sine, ca în Fig.2.9.

Teoria reptăției este controversată din cauză că intervin și alte procese de relaxare în afara mișcării de șerpuire, mai ales în cazuri extreme, cum ar fi fluidele complexe cu greutatea moleculare mari, cu polidispersie scăzută și viteză de curgere redusă. Cele mai importante procese nonreptative sunt:

- fluctuațiile căii primitive;
- eliberarea constrângerii.

A. *Fluctuațiile căii primitive* se pot observa în cazul unui polimer ramificat care are un capăt fixat care nu se poate deplasa înainte și înapoi, deci nu poate efectua reptăția. În acest caz, relaxarea se produce prin fluctuații ale căii primitive, după cum ilustrează **Fig.2.11**.

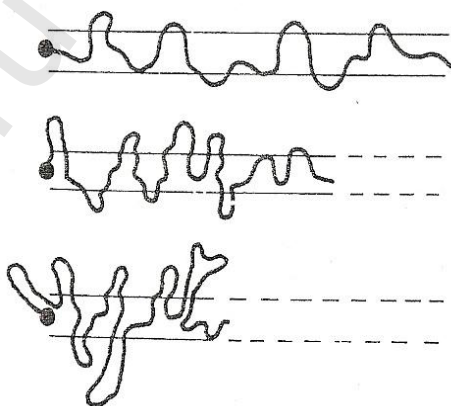


Fig.2.11 O fluctuație a lungimii căii primitive are loc atunci când un lanț își trage în mod întâmplător capetele, în afara capătului tubului. Probabilitatea unei astfel de fluctuații scade exponențial cu mărimea fluctuației

Se observă retragerea inițială a capătului liber al lanțului molecular față de capătul tubului. Atunci când molecula se extinde din nou, porțiunea de capăt a tubului este „uitată” și tensiunea asociată cu această porțiune se pierde.

Dacă capătul liber al tubului difuzează până aproape de capătul fix și apoi se extinde din nou, se produce relaxarea totală a lanțului polimeric.

B. Eliberarea contrângerii este cel de-al doilea mecanism de relaxare nonreptativă, ilustrat în **Fig.2.12**. Considerând un lanț polimeric dat, A, dacă un capăt al unuia dintre lanțurile care-i limitează mișcarea, de ex.: C, se deplasează, astfel încât să elibereze lanțul dat, acesta devine liber și se poate reorienta.

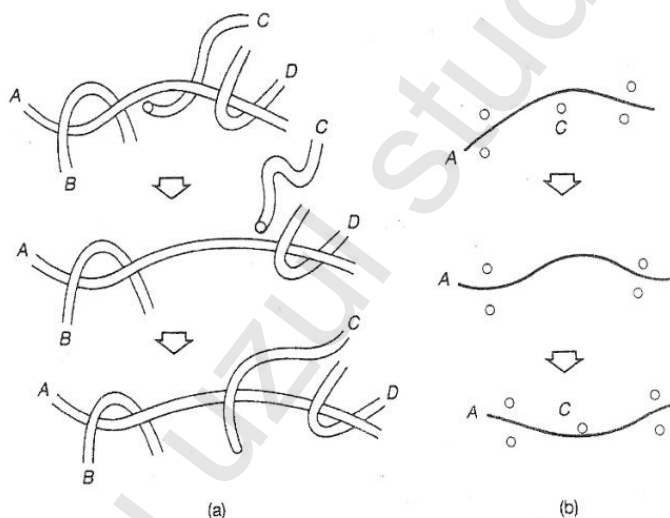


Fig.2.12 Ilustrarea mecanismului de relaxare prin „eliberarea constrângerii”. În (a) constrângerea topologică, impusă lanțului A de către lanțul C este eliberată și lanțul C iese de sub lanțul A. Chiar dacă lanțul C se re-încâlcește cu lanțul A, acesta din urmă are o șansă să se reorienteze, după cum arată schema bidimensională din (b)

În Fig.2.12(b) s-a considerat că, după eliberare, lanțul principal A își modifică complet curbura. Mecanismul de eliberare a contrângerii devine efectiv, mai ales la lanțurile polimerice lungi care sunt încâlcite cu lanțuri înconjurătoare mai scurte. Lanțurile scurte pot elibera constrângerile mult mai ușor decât pot lanțurile lungi să execute mișcarea de reptăție.

2.2 Fluide vitroase

Când un lichid este răcit, moleculele care îl compun se strâng mai aproape pentru a maximiza interacțiunile de atracție. Dacă formele moleculelor sunt compatibile cu o anumită împachetare regulată, atunci este de așteptat ca lichidul să cristalizeze, formând un solid ordonat, în momentul atingerii punctului de îngheț. Însă, dacă moleculele sunt grolosane și au forme neregulate, ca în **Fig.2.13**, sau dacă lichidul este răcit prea brusc pentru ca structura cristalină să se formeze, atunci el se vitrificază formând o fază rigidă care menține aranjamentele moleculare dezordonate tipice lichidului. Acest material rigid dezordonat se numește **sticlă** (*fluid vitros*).

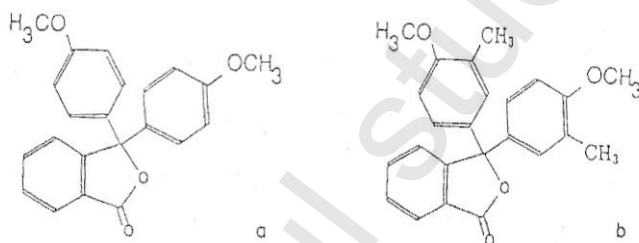


Fig.2.13 Structuri chimice ale generatorilor de fluide vitroase, cu molecule mici: (a) dimetileter-fenolftaleină ($T_g=294\text{K}$) și (b) dimetileter-kresolftaleină ($T_g=311\text{K}$)

2.2.1 Structura fluidelor vitroase

Sticlele sunt lichide cu moleculele împachetate atât de compact încât nu se pot relaxa, ca să revină la echilibru, nici chiar în perioade îndelungate de timp (ani). Aranjamentul moleculelor unei sticle se aseamănă cu mobila de formă neregulată împachetată atât strâns, într-o dubă aflată în mișcare, încât nu se deplasează în timpul mersului.

Exemplele cele mai comune de sticle includ sticlele silicioase de la geamuri, polistirenul vitros din ceștile de unică folosință și policarbonatul vitros din CD-uri. Sticle utile combină adesea proprietățile optice ale unui simplu lichid (ex.: izotropia și transparența) cu rigiditatea corpurilor solide.

Din cauză că tranziția vitroasă nu este bruscă, temperatura la care

aceasta se produce nu este clar definită. Deși nu este o transformare termodinamică bruscă, tranziția vitroasă poate fi recunoscută prin schimbarea pantei de variație, la încălzire, a unei proprietăți termodinamice, cum ar fi de exemplu cantitatea de căldură acceptată/cedată. **Fig.2.14** prezintă variația unei proprietăți generice P , la răcirea cu viteză constantă.

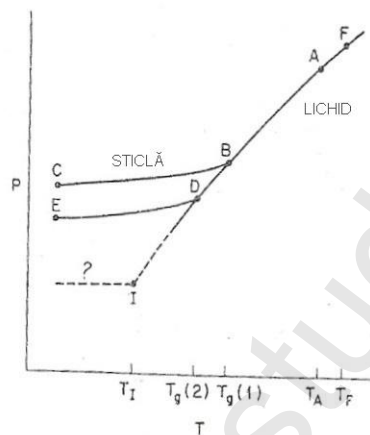


Fig.2.14 Dependenta generică de temperatură a proprietății P , în timpul suprarăcirii în stare vitroasă. Temperatura T_F este temperatura de cristalizare la echilibru iar T_I este o temperatură ipotetică ideală de tranziția vitroasă, obținută prin extrapolarea liniei lichidului la un punct de entropie de configurație zero. Cele două curbe vitroase BC și DE se obțin la viteze mari și respectiv mici de răcire

La temperatură înaltă, A , materialul este lichid. La răcire, lichidul rămâne la început în echilibru, AB , însă pe măsură ce se densifică, variația proprietății P se abate de la echilibru în punctul B , la viteze de răcire mari sau în D , la viteze mici.

După abaterea de la echilibru, variația cu temperatura, a proprietății P are o curbă vizibil diferită, ceea ce reflectă în special grade vibraționale de libertate diferite, precum și relaxările structurale localizate, care nu au fost „înghețate” în punctele B sau D .

Din acest motiv, sticla aflată în starea caracterizată prin punctul E este mai densă și are o valoare diferită a proprietății P , față de materialul aflat în punctul C , deși inițial, ambele stări își au originea în starea A . Din acest motiv, temperatura tranziției vitroase aparente este $T_g(1)$ pentru viteză de răcire mare

și $T_g(2)$ pentru viteză mică.

Pentru a defini mai bine T_g , se recomandă viteze de răcire reduse, de ordinul a 1-100 K/h. La DSC se folosesc viteze de răcire de ordinul a 10 K/min. Cu fiecare variație de câte 10 K/min a vitezei de răcire, temperatura tranziției vitroase aparente variază cu circa 2-3 grade. Din acest motiv, precizia de determinare a temperaturii tranziției vitroase este de ordinul a 5 °C.

Tranziții vitroase au fost identificate la materiale dintre cele mai diverse, de la polimeri, aliaje metalice, sticle silicioase și săruri compuse. Se consideră că până și argonul lichid poate avea o tranziție vitroasă cu condiția atingerii unei viteze foarte mari de răcire. Pe de altă parte, s-a arătat că suspensiile de particule coloidale sferice formează a stare vitroasă dacă ating o densitate de împachetare destul de mare.

2.2.2 Fenomenologia tranziției vitroase

Procese de relaxare vitroasă sunt asociate cu un spectru larg de perioade de relaxare. Una dintre metodele de determinare a perioadei de relaxare a materialelor dielectrice este funcția *Cole-Davidson*:

$$\varepsilon^* - \varepsilon_\infty = \frac{\Delta\varepsilon}{(1+i\omega\tau)^\beta} \quad (2.6)$$

unde: ε^* - constanta dielectrică complexă;

ω - frecvența de excitație a câmpului electric;

ε_∞ - constanta dielectrică de înaltă frecvență;

$\Delta\varepsilon$ - rezistența de relaxare;

τ - timpul de relaxare;

β - exponent *Cole-Davidson*.

Fig.2.15 prezintă spectrul pierderilor dielectrice, la diverse temperaturi, pentru dimetileter fenolfaleină (PDE), o moleculă organică amorfizabilă simplă, ilustrată în Fig.2.13 (a).

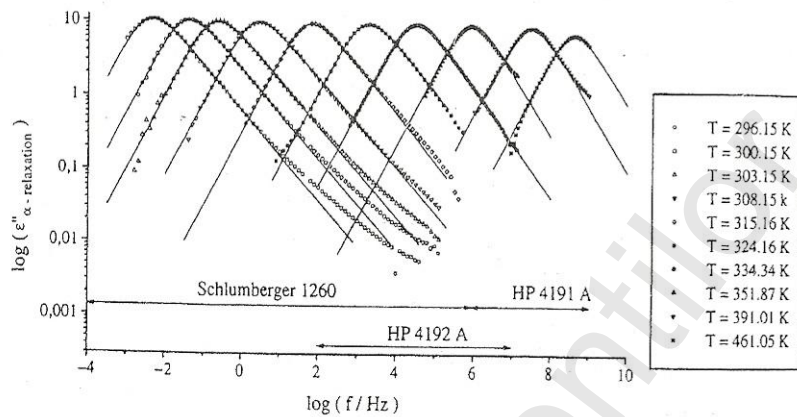


Fig.2.15 Dependența de frecvență a părții imaginare (*de pierdere*) a funcției de relaxare dielectrică a dimetileter-fenolftaleinei. Liniile sunt aproximări ale funcției *Cole-Davidson*, cu $\omega=2\pi f$ și cu exponentul de temperatură dat de Fig.2.16

Analizând dependența de temperatură a exponentului *Cole-Davidson*, s-a constatat că, pe măsură ce temperatura T scade, maximul frecvenței, ω_p , se deplasează spre frecvențe mai mici iar spectrul se lărgăște. Coeficientul *Cole-Davidson*, de temperatură, β_{CD} , scade de la 0.9 la 0.6, ca în **Fig.2.16**.

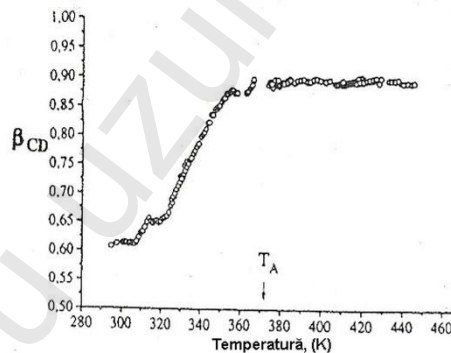


Fig.2.16 Dependența de temperatură a exponentului *Cole-Davidson* β_{CD} , pentru dimetileter-fenolftaleină

Pentru unele lichide simple cu moleculă mică, cum este cazul PDE, valoarea lui β se apropie de unitate, la temperaturi situate cu mult peste T_g .

Dependența de temperatură a perioadei medii de relaxare, τ , variază în funcție de sistemul material analizat. Deoarece modulul de la frecvență ridicată, G_∞ , al majorității sticlelor este aproape independent de temperatură, dependența de temperatură a vâscozității, $\eta \approx G_\infty \tau$ este similară cu cea timpului

de relaxare. **Fig.2.17** prezintă variația vâscozității, (coordonate logaritmice, în funcție de temperatura reciprocă redusă, T_g/T , pentru mai multe fluide vitroase.

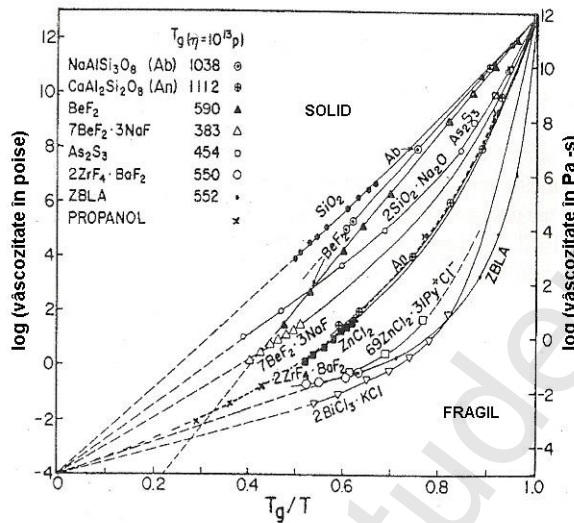


Fig.2.17 Variația vâscozității cu inversa temperaturii pentru lichidele vitroase, prezentând o comportare clasificată drept „puternică”, până la „fragilă”, tipică lichidelor moleculare și ionice. Aici T_g este definită prin criteriul conform căruia $\eta(T_g) = 10^{13}$ P. Pentru majoritatea lichidelor, vâscozitățile par să se extrapoleze la o valoare comună în jur de 10^{-4} P, la temperaturi înalte, corespunzătoare unei frecvențe de vibrație moleculară fundamentală de cca. 10^{13} s^{-1}

Lichide de tipul SiO_2 , care formează rețele, prezintă o variație aproape liniară:

$$\frac{\eta}{G_\infty} \sim \tau = \tau_\infty \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.7)$$

Acestea sunt lichide vitroase „puternice”.

Cele pentru care variația din Fig.2.17 este puternic curbată se numesc lichide vitroase „fragile” ($2\text{BiCl}_3\text{KCl}$), vâscozitatea variind după:

$$\frac{\eta}{G_\infty} \sim \tau = \tau_\infty \exp\left(\frac{A}{T-T_0}\right) \quad (2.8)$$

2.2.3 Reologia fluidelor vitroase

La tensiuni de forfecare reduse, vâscozitatea de forfecare în stare stabilă a unui fluid vitros se reduce la vâscozitatea dinamică la frecvență

scăzută $\eta'(\omega \rightarrow 0)$. La tensiuni de forfecare ridicate la presiunea ambiantă, se produc fenomene de curgere aparentă și rupere.

Aceste fenomene sunt suprimate prin aplicarea unor presiuni înalte (până la 300 MPa). În aceste condiții se observă subțierea la forfecare, caracterizată prin curbe vâscozitate-viteză de forfecare asemănătoare lichidelor polimerice. Componenta normală a tensiunii variază cu pătratul tensiunii (regim quadratic), la tensiuni de forfecare scăzute: $N_1 = \left(\frac{2}{\nu k_B T}\right) \sigma^2$ și liniar cu tensiunea, la tensiuni ridicate, conform: $N_1 = 1.26 \sigma$, conform **Fig.2.18**.

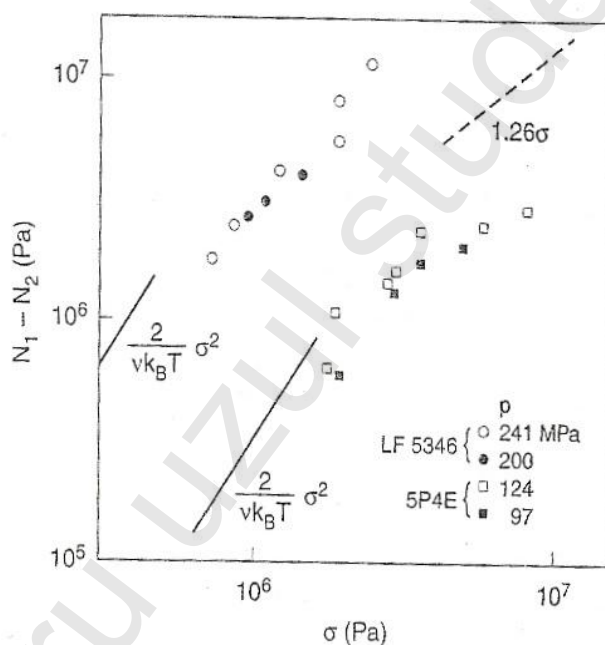


Fig.2.18 Variația diferenței între componentele normale ale tensiunii în primele două moduri, N_1-N_2 , cu tensiunea de forfecare σ , a polifenil-eterului (5P4E) și a unei soluții de 20 % de polibuten, în ulei mineral (LF5346) la 20 °C și la presiune ridicată (> 90 MPa). Pentru 5P4E s-au observat benzi de forfecare la $\sigma=20$ MPa; pe baza orientării lor, teoria *Mohr-Coulomb* sugerează că $N_1=1.26 \sigma$. Liniile solide sunt simulările modelului *Maxwell*, cu un singur mod, cu $N_2=0$

La presiuni scăzute, lichidele vitroase curg la tensiuni mari, nu doar prin forfecare, ci și prin alte moduri de deformare.

Curgerea aparentă, denumită și deformare plastică, este un fenomen

foarte complex. Se consideră că deformarea plastică a fluidelor vitroase presupune localizarea deformației și evoluția până la formarea benzilor de forfecare.

Fig.2.19 prezintă structura regiunilor de forfecare locală în timpul fluajului simulat prin modelarea deformării plastice. La temperatură ridicată, regiunile puternic deformate nu sunt corelate spațial, Fig.2.19(a). La temperaturi scăzute regiunile puternic forfecate se acumulează în benzi.

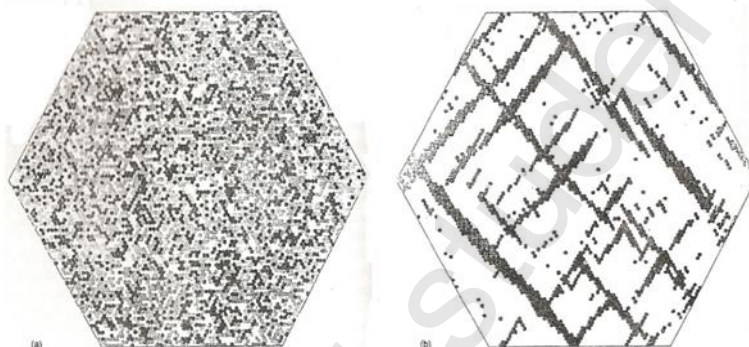


Fig.2.19 Regiuni de deformare plastică (întunecate) descrise prin modelul de fluaj al unui lichid (a) la o temperatură ridicată, peste T_g și (b) la o temperatură scăzută, în stare vitroasă. La temperaturi scăzute, regiunile de deformare puternică se acumulează în benzi de deformare

2.3 Geluri polimerice

Gelația reprezintă transformarea unui lichid precursor (*sol*) într-un solid dezordonat (*gel*), prin formarea unei rețele de legături fizice sau chimice între moleculele sau particulele care compun lichidul. Exemple de geluri sunt: rășinile epoxidice (adeziv), jeleurile, bezelele, cremele, etc.

2.3.1 Structura gelurilor polimerice

Structura tipică a unui gel polimeric, prezentată în Fig.2.5, se bazează pe ramificare sau multifuncționalitate, asigurată de punctele de reticulare. Funcționalitatea f a unei molecule este numărul maxim de legături pe care le poate forma cu alte molecule, într-un punct de reticulare.

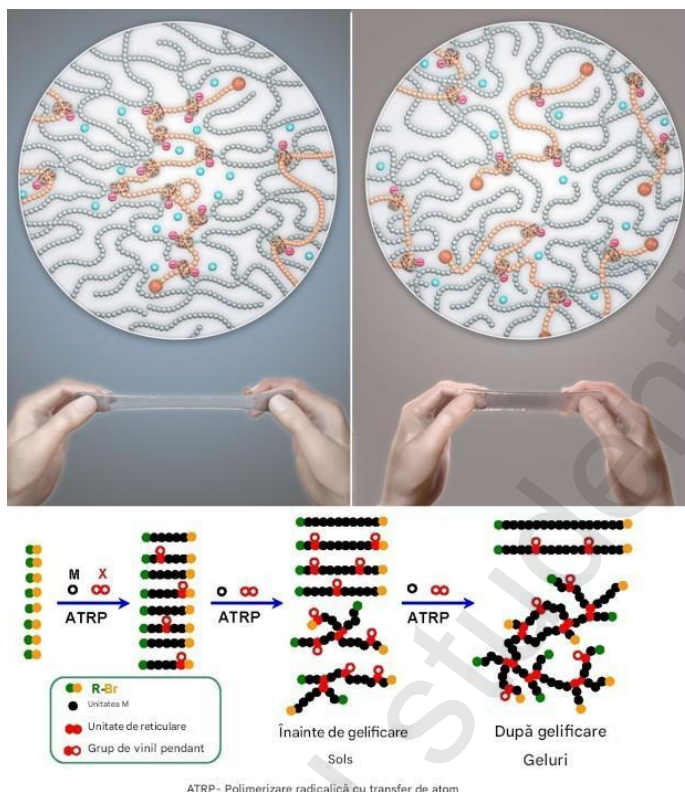


Fig. 2.20 Schema rețelelor polimerice obținute cu HPRx-C de diferite greutate moleculare [8]

În Fig.2.5 se consideră $f=4$. Pentru producerea acestor ramificații chimice se pot folosi:

- ❖ reacții de condensare, prin care o moleculă, cu trei sau mai multe grupuri reactive, (ex.: radicalul hidroxil, OH) reacționează cu un agent de ramificare;
- ❖ polimerizarea de adiție, la care se deschide o legătură dublă, printr-o reacție cu radical liber $\rightarrow$ legături libere care leagă monomerii și prelungesc lanțul molecular;
- ❖ ramificarea spațială a precursorilor polimerici.

Gelația fizică apare ca rezultat al asocierii intermoleculare, prin care ia naștere o rețea, ca în **Fig.2.21**.

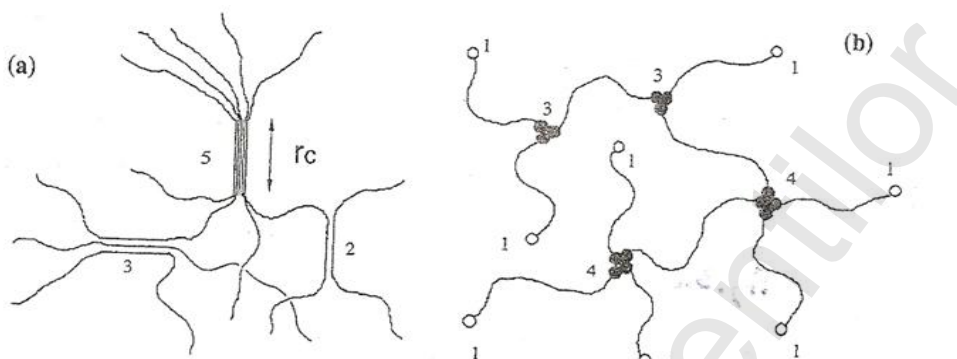


Fig.2.21 Ilustrații ale gelurilor fizice, cu formarea joncțiunilor prin intermediul: (a) microcristalitelor; (b) grupurilor de capăt ale polimerilor telechelici. Funcționalitățile diferitelor puncte de ramificație sunt indicate prin numerele de lângă joncțiunile respective

Spre deosebire de legăturile chimice, care sunt de tip covalent și disociază la creșterea temperaturii în intervale normale, asocierile intermoleculare sunt *slabe, reversibile*, putând fi cauzate de forțe van der Waals, atracții electrostatice sau legături de hidrogen.

Pentru a nu fi predispuși la disociere, asocierile intermoleculare trebuie să nu fie prea mari. Aceste asocieri pot fi:

- structuri locale elicoidale (o moleculă răsucită în jurul alteia);
- microcristalite;
- domenii nodulare (asocieri produse în locuri preferențiale de-a lungul lanțului eterogen).

2.3.2 Reologia gelurilor polimerice

Gelația prin formarea structurilor elicoidale este un rezultat al formării unor substanțe complexe de tip solvent-polimer, fiind tipică pentru moleculele cu o anumită rigiditate. Polimerii care formează domenii nodulare conțin grupuri specifice, numite „aderenți” (*En: stickers*) care realizează legarea fizică cu lanțurile vecine, ceea ce duce la formarea rețelei. O clasă de astfel de

polimeri sunt solubili în apă dar conțin grupuri hidrofobe care se asociază împreună, reușind să se ecraneze față de mediul apos înconjurător. Acești polimeri formează cu ușurință rețele de tip gel care favorizează creșterea vâscozității la concentrații de sub 5 % în soluție.

Agregarea lanțurilor polimerice se poate realiza și prin intermediul legăturilor de hidrogen (ca în **Fig.2.22**) care, deși nu sunt permanente, pot da naștere la geluri, atunci când sunt în număr mare.

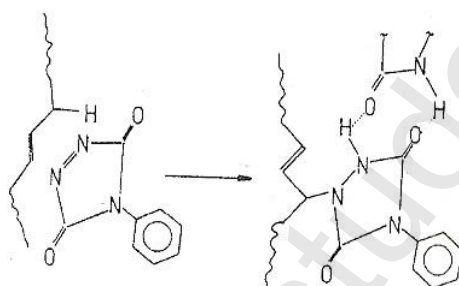


Fig.2.22 Reacția unui lanț de polibutadienă cu un grup de 4-fenil, 1,2,4-triazolin, 3,5-dionă.

După atașarea la lanțul de butadienă, acest grup are câte un atom de oxigen și de hidrogen care pot forma legături de hidrogen (prezentate cu linii punctate) cu aceleași grupuri dintr-un lanț vecin

Deoarece interacțiunile de atracție dintre polimeri pot produce atât gelația cât și separarea de fază, s-a considerat că ambele fenomene se produc în condiții similare. **Fig. 2.23** ilustrează apariția separării de fază și a gelației polistirenului atactic în disulfură de carbon. Se observă că gelația apare atât în regiunea monofazică cât și regiunea bifazică a diagramei de fază.

Între gelație și separarea de fază există o relație subtilă datorită capacității de aderare a grupurilor de tip *stickers*.

O categorie aparte de geluri polimerice sunt polimerii telechelici. Aceștia sunt lanțuri liniare ce conțin grupuri asociative de tip *sticker*, la capete. În timpul curgerii staționare, prin forfecare, soluțiile de polimeri telechelici prezintă o creștere de vâscozitate odată cu creșterea inițială a vitezei de forfecare (îngroșare la forfecare) urmată de o scădere de vâscozitate (subțiere la forfecare) la viteze mai mari.

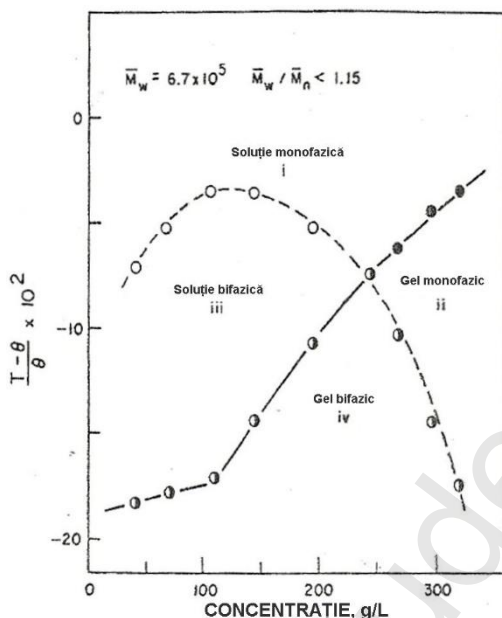


Fig.2.23 Diagramă de fază a polistirenului atactic în nitropropan. Temperatura teta este $\Theta = 200$ K

Exemple de polimeri telechelici includ uretanii etoxilați modificați hidrofobic (*En: hydrophobically modified ethoxylated urethanes = HEUR*) care au capete hidrofobice, constând din alcooli alifatici, alchilfenoli sau fluorocarboni, cu structura tipică ilustrată în **Fig.2.24**

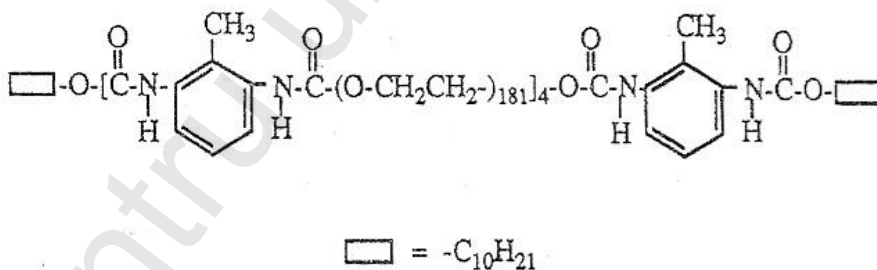


Fig.2.24 Structura unui polimer HEUR

Grupurile de capăt care conțin alcani se strâng împreună, formând „micele” nodulare. Acestea conțin mai multe grupuri de capăt, în soluție apoasă, ceea ce mărește în mod substanțial vâscozitatea soluției. Creșterea ulterioară a vâscozității, chiar și la concentrații mici de HEUR, se realizează prin adăugarea unui surfactant. Vopselele produse după această formulă

împroașcă mai puțin atunci când sunt aplicate .

Deoarece polimerii telechelici conțin două cozi, reprezentate prin grupurile de stickers, separate printr-un lanț hidrofil lung, este de așteptat ca miclele să conțină „bucle”, ca în **Fig.2.25**.

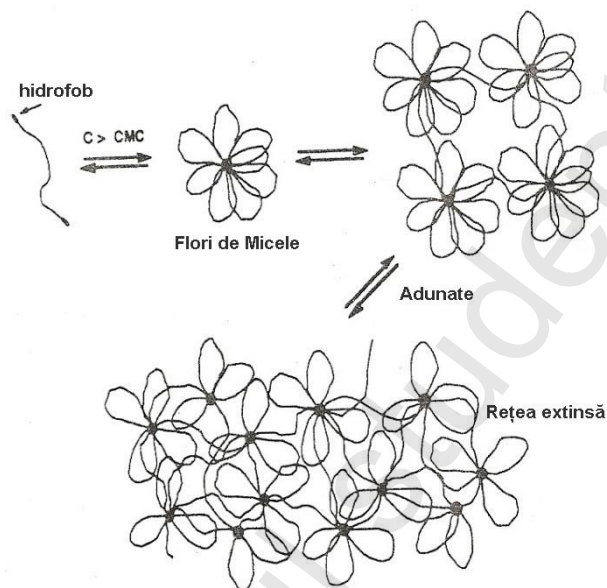


Fig.2.25 Model de asociere a polimerilor telechelici, odată cu creșterea concentrației. La asocieri puternice, se formează micle izolate, de tip „floare”, chiar deasupra concentrației critice a miclei (CMC) care este în general în jur de 2-10 ppm. La concentrații mai mari, florile devin conectate prin „punți”

Se consideră că buclele sunt predominante la concentrații care sunt prea scăzute pentru ca lanțurile hidrofile să se poată uni între miclele adiacente. Aceste micle izolate, dominate de către bucle, sunt numite „flori”. S-a stabilit că există un interval de concentrație unde se produce separația între faza densă în micle de tip floare și faza săracă în acestea. La concentrații foarte ridicate (peste 20 %) prin împrăștierea razelor X s-a observat formarea unor sisteme cubice ordonate de micle legate.

Diversele moduri de asociere ale unei singure molecule telechelice sunt ilustrate în **Fig.2.26(a)**. La concentrații ridicate, este de așteptat să se formeze rețele, ca în **Fig.2.26(b)**.

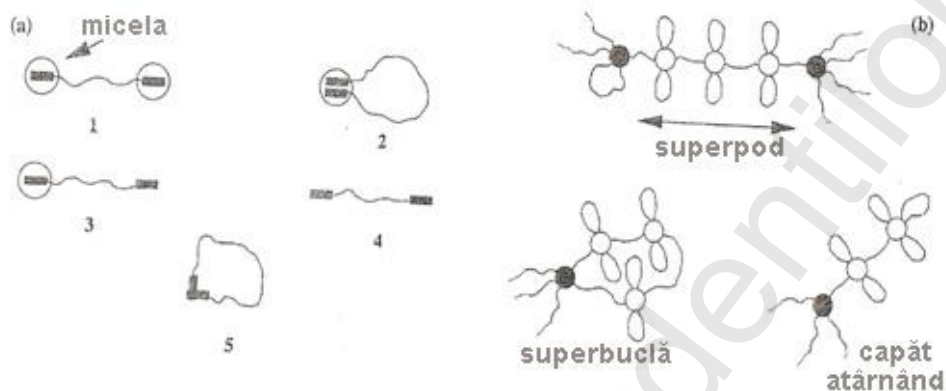


Fig.2.26 (a) Ilustrarea tipurilor de asocieri de lanțuri la polimerii telechelici; (b) arhitecturi de lanțuri care se pot forma în soluții; micellele care au o funcționalitate în rețea mai mare de doi sunt înegrite

Dacă greutatea moleculară a polimerului telechelic este suficient de scăzută sau dacă concentrația soluției este destul de ridicată astfel încât lanțurile să nu se încâlcească, atunci se produce ușor relaxarea unei joncțiuni a rețelei, ori de câte ori un grup de stickers reușește să se desprindă dintr-una dintre micelle.

Proprietățile reologice ale unei astfel de rețele polimerice sunt, prin urmare, destul de simple. În cazul particular al polimerilor telechelici, relaxarea structurală a rețelei este descrisă prin momentul relaxării unice (*En: single-relaxation-time*).

3. FLUIDE ELECTROREOLOGICE

3.1 Noțiuni generale despre fluidele electrorologice

3.1.1 Structura fluidelor electrorologice

Fluidele electrorologice (*ER*) sunt suspensii de particule sensibile la câmpurile electrice aplicate. Aceste fluide complexe „solidifică” sau devin foarte vâscoase atunci când sunt plasate în câmp electric. Particulele din aceste fluide au dimensiuni tipice de 1 până la 100 μm și pot fi făcute din:

- amidon de porumb;
- silice;
- titanat de calciu;
- alți semiconductori ce ocupă o fracțiune de volum de la 5 până la 50 % din fluidul hidrofobic purtător care poate fi un ulei mineral sau de porumb.

La aplicarea unui câmp electric $E = 50 \div 5000 \text{ V/mm}$, particulele se aliniază și formează lanțuri care se întind pe tot intervalul dintre electrozi, ca în **Fig.3.1**.

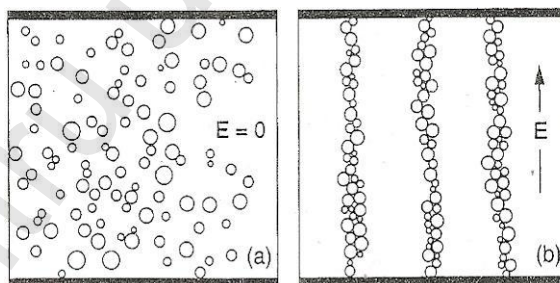


Fig.3.1 Ilustrarea efectului de formare a lanțurilor de particule la aplicarea unui câmp electric E , într-o suspensie *ER*: (a) starea inițială; (b) formarea lanțului

La forfecarea (glisarea) unui electrod față de altul, lanțul de particule rezistă cu o forță proporțională aproximativ cu E^2 . Acest efect a fost observat de W.M.Winslow, care a patentat fluidele *ER* în 1947. Deși primele fluide *ER*, compuse din particule de amidon de porumb în ulei de porumb, aveau efect

ER, comercializarea lor a fost împiedicată de o serie de inconveniente (eroziune termică; sedimentarea particulelor; agregarea ireversibilă și abrazivitate).

Eficacitatea primelor fluide *ER* depindea de prezența umidității, care tinde să se evapore la temperaturile ridicate dezvoltate de încălzirea produsă de curgerea vâscoasă. Fluidele *ER* moderne sunt uscate sau polimerizează în urma formării suspensiilor de particule (rezultând un „mușchi artificial”) care se transformă într-un cauciuc.

Cel mai simplu mecanism electrorheologic (*ER*) constă din înlănțuirea particulelor aduse în starea de polarizare prin aplicarea unui câmp electric (observat de Winslow în 1949).

Înlănțuirea particulelor apare când există nepotriviri între constanta dielectrică a particulelor, ϵ_p și cea a mediului de suspensie, de ϵ_s . De obicei $\epsilon_r = \epsilon_p / \epsilon_s > 1$. **Fig.3.2** prezintă interacțiunile dintre particulele polarizate de un câmp electric orientat vertical. Perechile de particule pentru care linia ce separă centrele lor de masă este paralelă cu câmpul electric, sunt atrase una de cealaltă, iar cele cu aliniamentul perpendicular se resping reciproc.

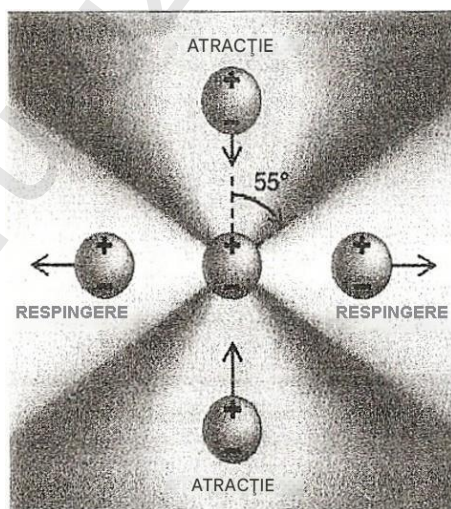


Fig.3.2 Interacțiuni între particule polarizate de un câmp electric. Particulele a căror separație este perpendiculară pe câmp, se resping, iar cele care au linia de separație paralelă cu câmpul, se atrag

Perechile de particulele pentru care linia care separă centrele lor de masă este paralelă cu câmpul electric, sunt atrase una de cealaltă, iar cele cu aliniamentul perpendicular, se resping reciproc.

Dacă θ este unghiul dintre direcția câmpului și linia care unește centrele particulelor, s-a constatat că particulele de atrag dacă $\theta < 55^\circ$, altfel se resping. Mecanismul de interacțiune a particulelor este baza modelului de polarizare a fluidelor *ER*, care simulează formarea rapidă a lanțurilor de particule, la aplicarea câmpului electric.

La menținerea câmpului aplicat, lanțurile tind să se consolideze treptat, transformându-se în coloane mai groase, care se pot organiza, în extremis, într-o **simetrie tv**. Tensiunea de forfecare, σ , dintr-un fluid *ER* forfecat, este reprezentată prin *modelul Bingham*:

$$\sigma = \sigma_y + \eta_{pl}\dot{\gamma} \quad (3.1)$$

unde: η_{pl} este vâscozitatea plastică,

σ_y este tensiunea de curgere,

$\dot{\gamma}$ este viteza de forfecare.

Fig.3.3 prezintă exemple de variație a tensiune de forfecare pentru un fluid *ER*. Se observă că rezultatele experimentale, (simboluri discrete) respectă modelul *Bingham*.

3.1.2 Fenomene electrorheologice

În cazul fluidelor *ER*, tensiunea de curgere poate fi dinamică, având forma din ecuația (3.1) sau statică, definită drept valoarea minimă a tensiunii de forfecare necesară pentru a induce o curgere continuă prin forfecare, într-un fluid cu stare inițială statică. Forțele care intervin în timpul curgerii fluidelor *ER* sunt de natură:

- electrostatică,
- hidrodinamică,

- sterică (legată de aranjamentul atomilor).

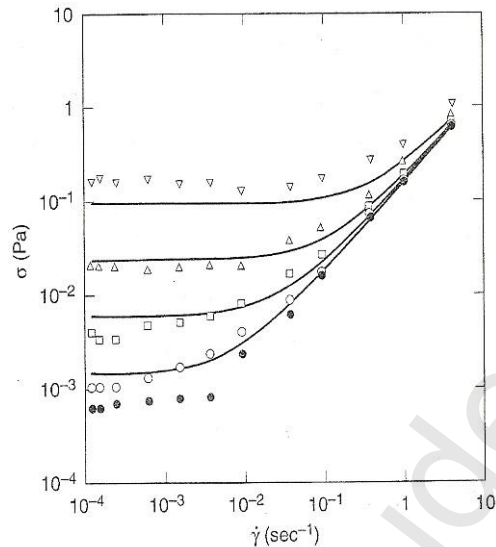


Fig.3.3 Variația tensiunii de forfecare în funcție de viteza de forfecare a unui fluid ER, la valori ale câmpului electric aplicat de 0, 50, 100, 200 și 400 V/mm (în sens ascendent, de la cerc plin la triunghi gol) și comparația cu variația modelată (cu linie continuă) prin ecuația Bingham

Pentru a nu interveni și *forțe Browniene*, dimensiunea particulelor nu trebuie să fie prea mică (de obicei au dimensiuni peste 1 μm). **Fig.3.4** ilustrează cinetica de agregare a particulelor dipolare care interacționează în absența curgerii.

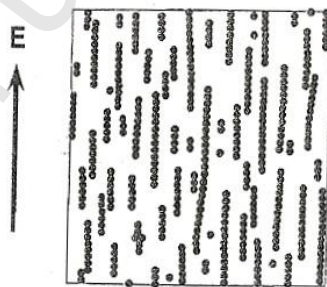


Fig.3.4 Înlănțuirea particulelor imediat după aplicarea unui câmp electric, într-o simulare bidimensională, utilizând modelul polarizării simple

Dependența de timp a procesului de agregare poate fi descrisă printr-un model ierarhic. Conform acestuia, după un timp t_1 , particulele izolate se grupează formând perechi, după timpul t_2 , perechile formează grupuri de

câte patru particule și așa mai departe.

Prin estimarea forței electrostatice și a rezistenței hidrodinamice ce acționează asupra unor grupuri alungite de particule multiple agregate, se pot calcula perioadele de timp de mai sus.

După o perioadă de timp, t , mărimea medie a clusterului de particule este dată de :

$$s_{ave} \propto (t\epsilon_0\epsilon_s\beta^2 E^2/\eta_s)^{D/(D+3)} \quad (3.2)$$

în care: D - dimensionalitatea sistemului;

$\beta=(\epsilon_r-1)/(\epsilon_r+1)$ - polarizabilitatea efectivă a particulei,

cu $\epsilon_r=\epsilon_p/\epsilon_0$ - permitivitatea electrică relativă, unde:

$\epsilon_0=8,85\times 10^{-12}C^2J^{-1}m^{-1}$ este permitivitatea vidului,

E - câmpul electric aplicat,

η_s - vâscozitatea.

După ce s-au format, lanțurile de particule se îngroașă încet, formând coloane. Acest lucru este surprinzător dacă se ține cont de tendința de respingere care apare între particulele al căror aliniament este perpendicular pe linia câmpului electric. Însă atunci când două lanțuri de particule interacționează, fiecare particulă a unui lanț interacționează cu toate particulele celuilalt lanț și majoritatea interacțiunilor sunt de atracție.

Odată ce lanțurile sau coloanele de particule încep să se dezvolte și să umple spațiul dintre electrozi, este necesară atingerea unei anumite valori a tensiunii, a tensiunii de curgere statică σ_y , pentru a rupe lanțurile sau coloanele și să înceapă să se producă curgerea.

Pe măsură ce deformarea începe să se aplice (creșterea tensiunii) unui fluid *ER* aflat în câmp electric, lanțurile de particule se înclină și se alungesc, după cum s-a ilustrat schematic în **Fig.3.5**.

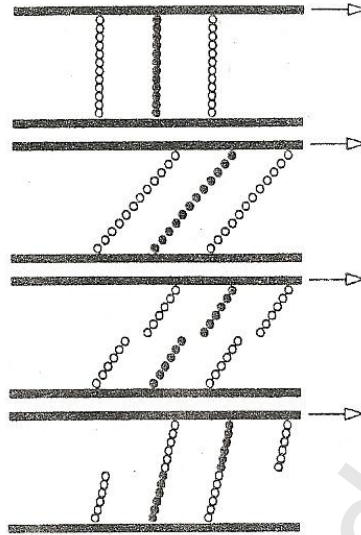


Fig.3.5 Ilustrare schematică a înclinării, ruperii și reformării lanțurilor de particule, în timpul forfecării unui fluid *ER* sub efectul unui câmp electric. Mișcarea afină a sferelor în cea de-a doua imagine este idealizată; în realitate se produc instabilități care produc rearanjamente mult mai complicate ale particulelor

La un unghi critic de înclinare, θ_m , forța exercitată de către lanțuri atinge un maxim. Continuarea forfecării produce o instabilitate care rupe lanțurile.

Presupunând că lanțul:

- are grosimea unei singure particule,
- se deformează în mod afin (întrudit),
- suportă interacțiuni neglijabile cu alte lanțuri,

atunci unghiul de înclinare la care se produce instabilitatea este $\theta_c = 21^\circ$, corespunzător unei deformații de curgere $\gamma_c \approx \tan \theta_c \approx 0,4$.

Această valoare este mult mai mică decât valoarea unghiului la care particulele nu se mai atrag, care este de 55° .

Experimental, ruperea lanțurilor s-a fost observat la circa 28° .

Tensiunea maximă de curgere a unui fluid *ER* cu particule conductive cu diametrul de $100 \mu\text{m}$, distanțate la 1 nm , este de 1.2 kPa , la un câmp electric aplicat $E = 1 \text{ kV/mm}$.

În practică se preferă particule mai puțin conductive, limita acceptată a conductivității fiind de $10^{-5} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ (ca în cazul particulelor de poliacenchinonă*, PANQR în ulei clorinat), caz în care tensiunea de curgere este de circa 1 kPa, la un câmp aplicat de 1kV/mm, putând crește până la 10 kPa, pentru $E=3 \text{ kV/mm}$.

Tensiunea de curgere dinamică a fluidelor *ER* se determină prin reducerea treptată a vitezei de forfecare a unui astfel de fluid până când se produce curgerea cu viteză constantă.

Mecanismul curgerii dinamice consideră că lanțurile de particule orientate perpendicular la suprafețele de forfecare tind să se deformeze până când depășesc deformația critică, γ_c , apoi se rup în apropiere de mijloc și se reunesc rapid cu fragmente din lanțurile adiacente. **Fig.3.6** prezintă variația tensiunii de curgere dinamică, simulată și experimentală, în funcție de fracțiunea de volum, Φ , ocupată de particule.

- Valorile simulată și experimentală, ale tensiunii de curgere, σ_y , variază aproape liniar pentru $\Phi < 0.3$;
- Pentru $\Phi > 0.3$, σ_y prezintă un maxim sau un palier din cauza formării coloanelor de particule care îngreunează transferul mișcării.

Valoarea simulată a lui σ_y este de circa 25-50 de ori mai mică decât cea experimentală.

Spre deosebire de curentul continuu, se consideră că cel alternativ este favorabil curgerii deoarece una dintre alternanțe minimizează migrația indusă electric sau reacțiile chimice.

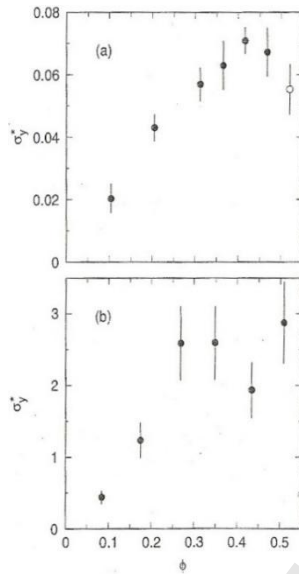


Fig.3.6 Variația tensiunii adimensionale de curgere dinamică, σ_y^* , în funcție de fracțiunea de volum, Φ , pentru: (a) particule, într-o simulare tri-dimensională, utilizând modelul polarizării simple; (b) sfere goale de silica în ulei de porumb. Tensiunea a devenit adimensională în urma împărțirii la $3\pi\epsilon_0\epsilon_s\beta^2E^2/16$

În cazul unei suspensii de particule de silice într-un fluid naftenic (C_3H_6) s-a observat scăderea bruscă a vâscozității, la valoarea fixă, $f = 753$ Hz, **Fig.3.7.**

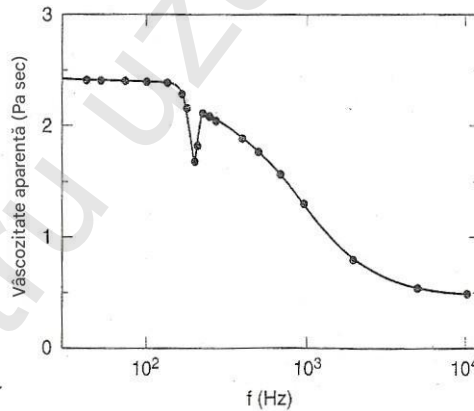


Fig.3.7 Variația vâscozității aparente în funcție de frecvența de oscilație, f , a câmpului electric, pentru o dispersie de particule de silice într-un fluid naftenic, la o intensitate a câmpului electric de 930 V/mm și o viteză de forfecare de 753 s^{-1}

Acest efect (*relaxarea*) este atribuit scăderii constantei dielectrice, ϵ_p , a particulelor, odată cu creșterea frecvenței. Studiul detaliat al proceselor de

relaxare s-a efectuat prin experimente dinamice oscilatorii pe fluide *ER* supuse atât la curent continuu (*DC*) cât și la curent alternativ (*AC*). La deformății mici și câmpuri electrice aplicate mari, modulul de înmagazinare G' este aproape independent de frecvență și mai mare decât modulul de pierdere G'' (peste un ordin de mărime) ca și cum ar fi vorba despre un solid elastic.

Variațiile modulului de înmagazinare sunt ilustrate în **Fig.3.8**. Fig.3.8(a) arată că, dacă câmpul electric E este redus, G' scade și devine dependent de frecvență.

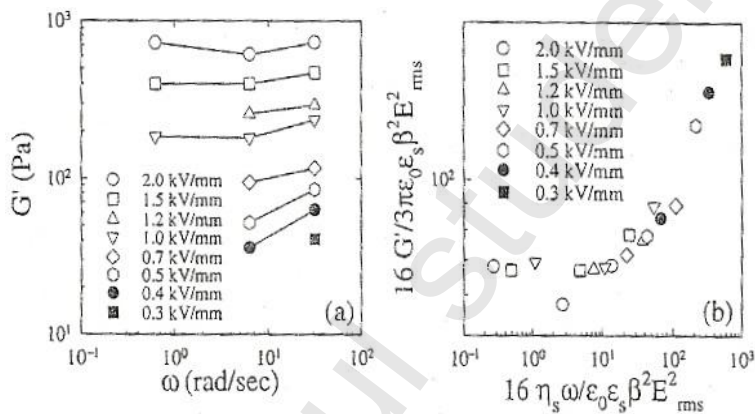


Fig.3.8 (a) Variația modulului de înmagazinare, G' , în funcție de amplitudinea deformației de forfecare, ω , a unui fluid *ER*, compus din 20 % particule de aluminiu în polidimetilsiloxan, supus unui câmp electric alternativ la frecvența de 500 Hz. (b) diagramă cumulativă adimensională de suprapunere a valorilor din (a). E_{rms}^2 este pătratul intensității câmpului electric la 500 Hz

Dacă se utilizează coordonate adimensionale, Fig.3.8(b) arată că variațiile $G' = f(\omega)$, la diverse valori ale câmpului electric, se cumulează într-un singur grafic.

Din punct de vedere experimental, chiar dacă G'' al particulelor are o valoare mică, ea este mult mai mare decât componenta vâscoasă a modulului G'' atribuită solventului. Din acest motiv, chiar dacă fluidele *ER* au fost „solidificate” sub efectul unui câmp electric puternic, este posibil să se mai producă procese de relaxare. Pe lângă acestea, modulele de elasticitate sunt foarte sensibile la deformație.

Fig.3.9 arată că, la câmpuri electrice puternice, G' depinde de deformare chiar și la amplitudini de 0.1. Aceste neliniarități au fost atribuite unor micro-aranjamente ale particulelor, la amplitudini mici de deformare. Se pare că configurația particulelor devine instabilă atunci când particulele sunt chiar și foarte puțin deplasate prin forfecare.

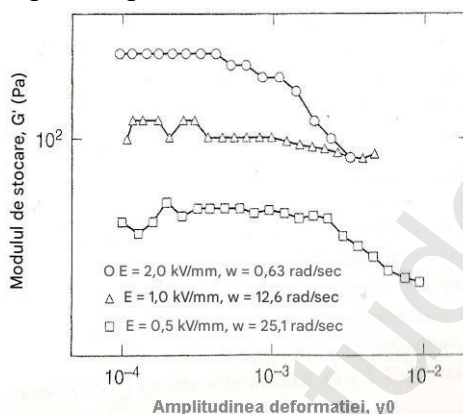


Fig.3.9 (a) Variația lui G' în funcție de amplitudinea deformației de forfecare, γ_0 , pentru o suspensie de 20 % particule de silice-alumină, în ulei siliconic, cu 2 % surfactant, la diverse câmpuri electrice de intensitate, E , cu frecvența de 500 Hz, supuse la pulsația de oscilație ω

La frecvențe mici de forfecare, aceste rearanjamente arată ca:

- ☐ mici discontinuități ale undei de tensiune;
- ☐ neliniarități ale modulelor de elasticitate

3.2 Tehnologia fluidelor electrorologice

În continuare sunt prezentate o serie de rezultate experimentale obținute pe mai multe clase de fluide electrorologice a căror preparare este de asemenea descrisă.

3.2.1 Dependența comportării ER de structura particulelor

Au fost alese pulberi ale mai multor materiale (**Tab.3.1**) având diametrul între 0,5 și 1 μm .

Tab.3.1 Proprietățile unor pulberi dielectrice comerciale

Denumirea materialului	Formula chimică	Densitatea, g/cm ³	Constantă dielectrică	Diametrul sferic echivalent, μm	Furnizor
Silice	SiO ₂	2,25	4	8,1	Morton Thiokol Inc.
Alumină	Al ₂ O ₃	3,97	10	0,2	Apache Chemical Inc.
Rutil	TiO ₂	4,26	90	0,6	TAM
Titanat de bismut	Bi ₄ TiO ₃	8,04	150	-	Molten Flux Growth*
Titanat de stronțiu	SrTiO ₃	5,12	300	0,7	Transelco
Titanat de bariu	BaTiO ₃	6,04	1000	0,8	Transelco
Niobiat de magneziu și plumb	Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃	8,02	20.000	0,3	Solid State Synthesis*

Ca fluid purtător a fost ales uleiul siliconic cu vâscozitatea de 50 cSt. Densitatea particulelor a fost de 20 %. Dispersarea particulelor s-a făcut cu ajutorul unei tehnici de amestecare cu forfecare puternică.

Fig.3.10 prezintă variațiile tensiunii de forfecare în funcție de viteza de forfecare, pentru titanatii de bariu și de bismut, sub efectul unor câmpuri electrice aplicate ale căror intensități cresc peste 0.2 kV/mm.

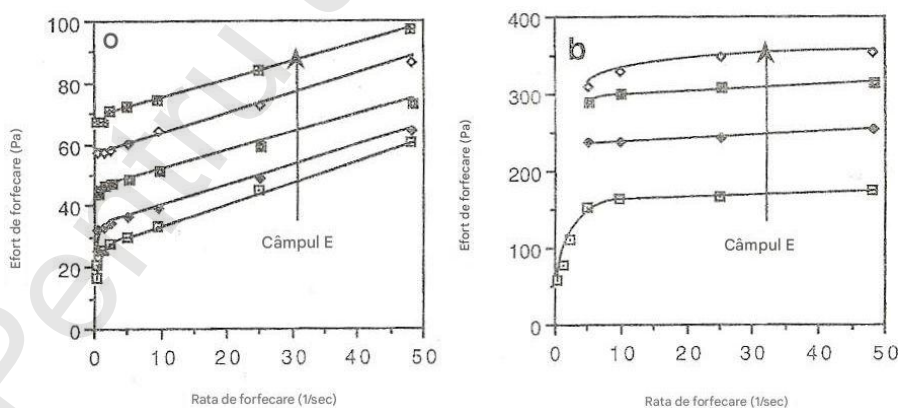


Fig.3.10 Exemple de reacție conform modelului Bingham a fluidelor ER studiate: (a) soluție de 20 % BaTiO₃ la 300 Hz și câmpuri electrice între 0.2 și 0.8 kV/mm; (b) soluție de 10 % Bi₄Ti₃O₁₂ la câmpuri electrice între 0.2 și 0.4 kV/mm

Se constată că valorile experimentale (*discrete*) respectă modelul *Bingham* dat de ecuația (3.1), atât în câmp electric continuu cât și în câmp alternativ.

Din graficele reologice care exprimă regimul *Bingham* în condiții dinamice, s-au extras tensiunile de curgere aparentă (*En: yield stress*). **Fig.3.11** reprezintă tendințele de variație ale tensiunii de curgere aparentă în funcție de pătratul intensității câmpului electric aplicat pentru cele șapte materiale prezentate în Tab.3.1. Se constată o variație liniară pentru AC. Soluția de 20 % titanatul de bismut avea tensiuni de curgere prea mari și din acest motiv s-a utilizat o soluție de 10 % (cele mai mari tensiuni de curgere).

3.2.2 Fluide ER cu particule de Fe_2O_3

S-au folosit particule necoloidale de Fe_2O_3 cu mărimea medie de 0.6 - 1 μm , prezentate în **Fig.3.12**. Acestea au fost învelite cu un surfactant pe bază de amină, pentru a le conferi sensibilitate la câmpurile electrice. Aminele sunt compuși organici care conțin în molecula lor grupa amino ($-\text{NH}_2$) legată de un radical hidrocarbonat. Aminele seamănă structural cu amoniacul, cu diferența că unul sau mai mulți atomi de hidrogen sunt înlocuiți cu substituenți precum grupe alchilice sau arilice.

Nu trebuie făcută confuzia între amine și amide. Aminele și amidele au structuri și deci proprietăți diferite, deci distincția este din punct de vedere chimic foarte importantă.

Drept fluid purtător s-a folosit uleiul de transformator. Pentru a împiedica sedimentarea particulelor grele s-a folosit o adiție stabilizatoare (coloid puternic dispersat).

Măsurătorile reologice au fost efectuate cu ajutorul vâscozimetruului de tip clopot atașat la tija de torsiune a unui vâscozimetru *HAAKE RV-12* din **Fig.3.13**.

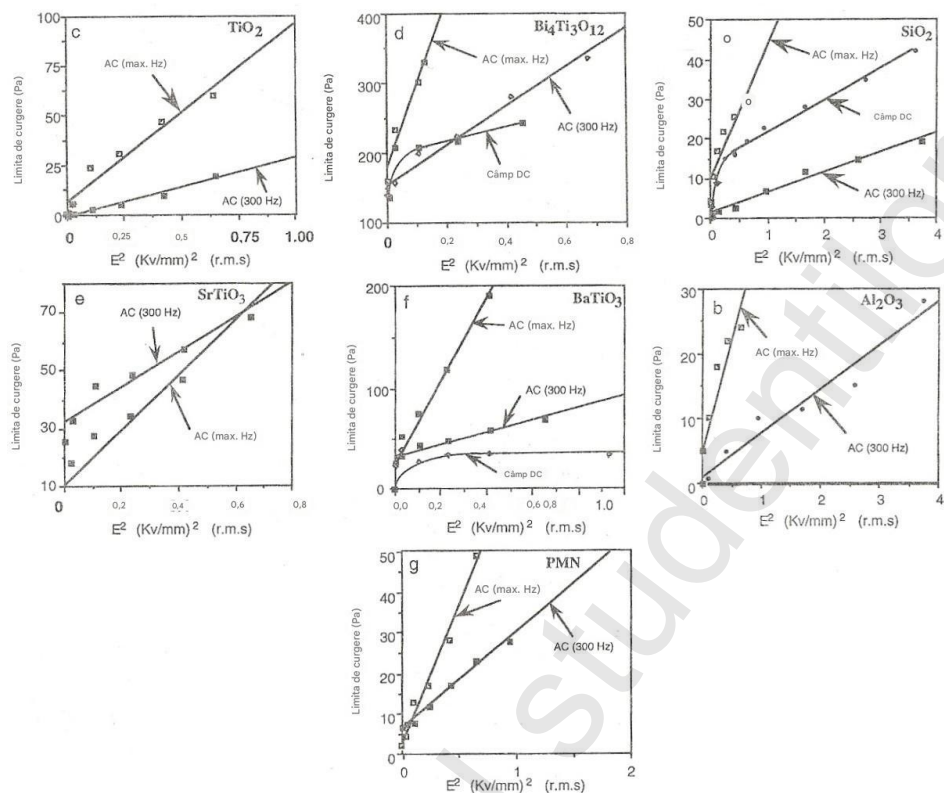


Fig.3.11 Serie de curbe de variație a tensiunii de curgere aparentă în funcție de pătratul intensității câmpului electric aplicat, pentru diverse fluide ER analizate

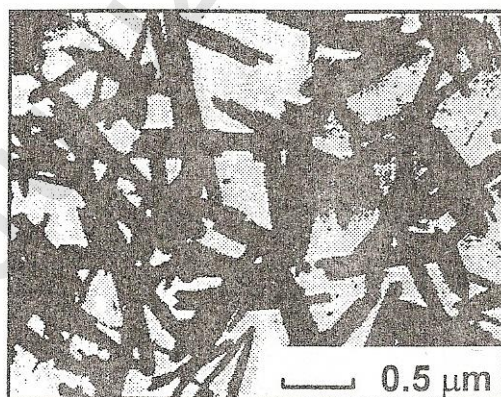


Fig. 3.12 Micrografie SEM a particulelor feromagnetice de Fe_2O_3

Cupa metalică fixă, care conține clopotul rotativ (legat la pământ), este izolată electric la exterior și conectată la o sursă de înaltă tensiune. Miliampermetrul, intercalat pe circuitul de împământare al clopotului, măsoară

conductivitatea fluidului *ER*, în celulă. În cadrul experimentelor s-au de terminat tensiunile de forfecare, τ , la diferite valori ale:

- câmpului electric (0-1kV/mm),
- vitezei de forfecare ($6-445s^{-1}$),
- concentrației de volum (2, 6, 8, 10%).

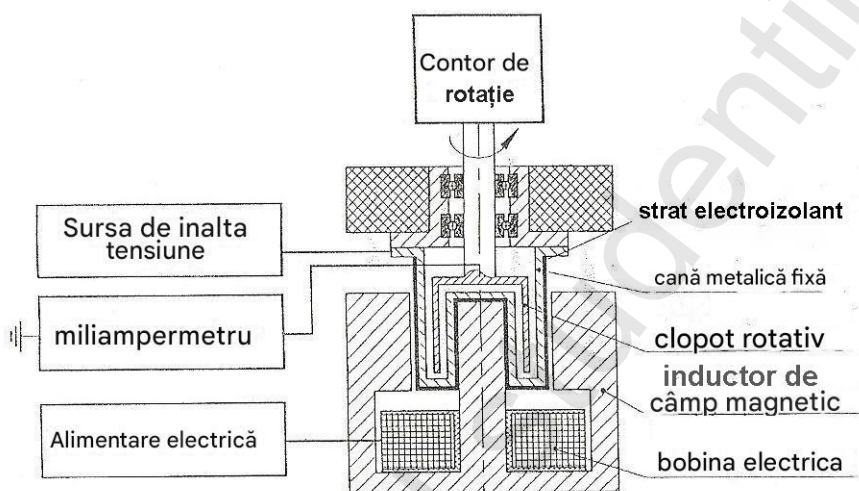


Fig.3.13 Ilustrare schematică a vâscozimetrului

Fig.3.14 arată că:

- ❑ în lipsa câmpurilor aplicate, fluidul se comportă ca un mediu vâscoplastic liniar cu o deformare de curgere, τ_0 , foarte redusă;
- ❑ aplicarea câmpului electric de 1 kV/mm produce o creștere vizibilă a tensiunii de forfecare.

Dacă peste acest câmp electric se aplică și unul magnetic, efectele celor două câmpuri asupra tensiunii de forfecare se cumulează și efectul combinat al câmpurilor este mai mare decât suma celor două variații individuale produse de câmpurile respective, ca în Fig.3.15.

Pentru vizualizarea proceselor care se produc în fluidele *ER* trebuie concepute sisteme speciale, cum ar fi cel ilustrat în Fig.3.16.

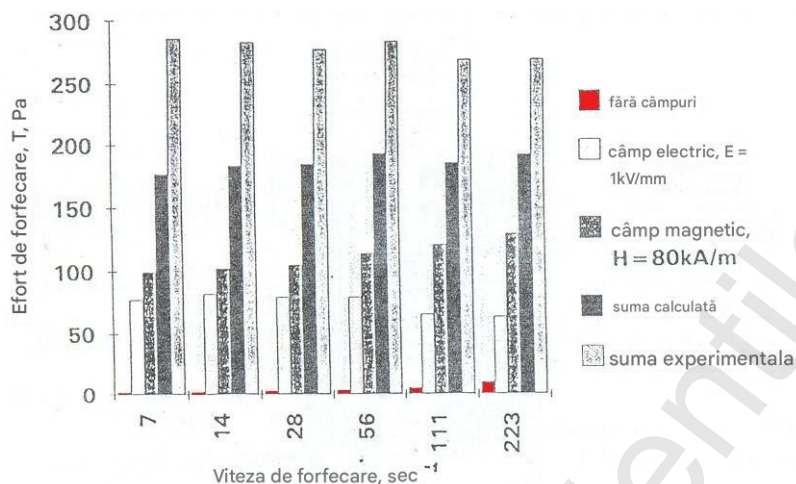


Fig.3.14 Efectul câmpului electric asupra tensiunilor de forfecare

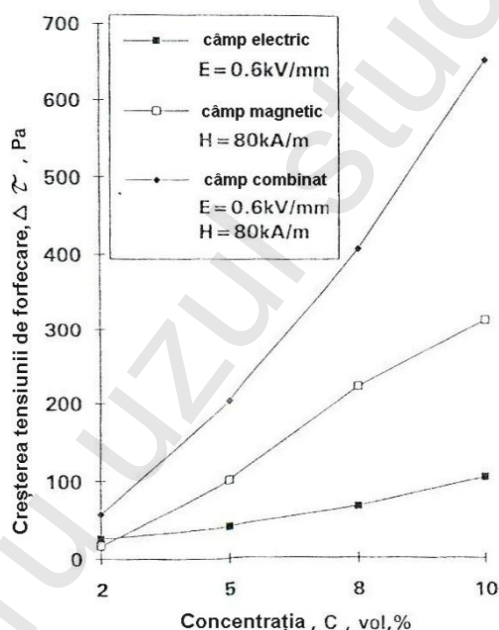


Fig.3.15 Efectul concentrației fazei solide asupra proprietăților reologice ale unui fluid ER, la diverse câmpuri aplicate

Formarea structurilor columnare poate fi urmărită pe monitor. Microscopul permite înregistrarea filmelor la puteri de mărire de 200x, pe secțiunea unui canal de 0.5 x 2 mm.

Aplicarea concomitentă a câmpului electric, sub efectul înaltei tensiuni dintre conductori și a câmpului magnetic produs de magnetul

permanent, produce efectele prezentate în Fig.3.17.

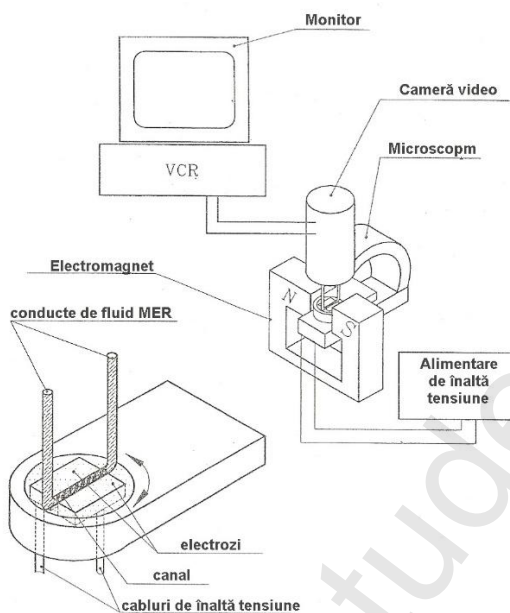


Fig.3.16 Sistem de înregistrare video

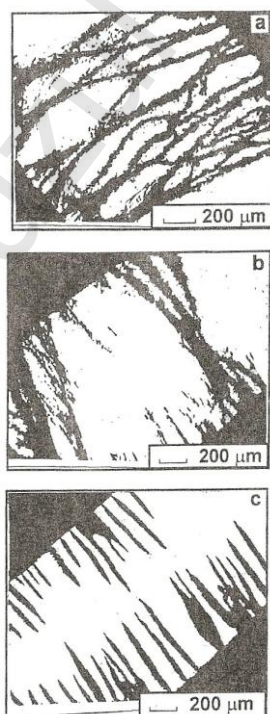


Fig. 3.17 Micrografii optice: (a) în câmp electric $E=1$ kV/mm; (b) în câmp magnetic $H=160$ kA/m; (c) în câmp combinat electric $E=1$ kV/mm și magnetic $H=160$ kA/m

Câmpul magnetic produce lanțuri structurale fine și relativ subțiri, în Fig.3.17(a), care se întind pe tot spațiul dintre electrozi. Câmpul magnetic produce agregate alungite, compacte, care nu se ating între ele, Fig.3.17(b).

În fine, Fig.3.17(c) sunt prezentate efectele cumulării câmpurilor electrice și magnetice. Se observă formarea unor agregate compacte care se ramifică peste golul dintre electrozi.

3.2.3 Fluide ER cu particule polimerice

Primele fluide *ER* se bazau pe absorbția apei de către silica gel, aflat în soluție de 1-5 %. Adăția de *polixiloxani funcționali speciali* a fost de importanță critică pentru îmbunătățirea stabilității la sedimentare a silica gelului. Fluidele *ER* bazate pe silica gel au următoarele:

❑ Avantaje:

- tensiuni de forfecare ridicate;
- valori scăzute ale rezistenței minime de câmp (electric).

❑ Dezavantaje:

- vâscozitate ridicată la câmp electric nul;
- conductivitate relativ ridicată;
- sunt abrazive;
- predispuse la sedimentare și stabilizare.

Pentru a evita aceste dezavantaje, s-a dezvoltat o nouă generație de fluide *ER* care au:

❖ scopuri primare:

- stabilitatea;
- efect *ER* reproductibil;
- lipsa apei;
- fază dispersă neabrazivă.

❖ scopuri secundare:

- vâscozitatea scăzută la câmp electric zero;
- conductivitate redusă;
- interval larg de temperatură efectivă.

Se constată că criteriile de importanță practică au prioritate față de criteriul maximizării efectului *ER*. Fazele dispersate, din componența fluidelor *ER*, pot fi anorganice sau organice (conductori organici). **Fig.3.18** prezintă câteva exemple de faze dispersate în fluidele *ER*.

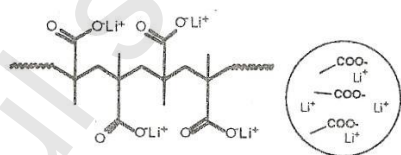
Materiale anorganice - zeoliți - aluminosilicati - hidroxizi metalici	Mecanisme importante 1) Polarizarea ionilor este asistata prin prezenta apei 2) Cationii dopanti sunt conductori 3) Stabilizare printr-o matrice ionica de contraioni
Materiale organice - polimeri conductori (dopati) - polielectroliti, cum ar: polimetacrilatul de litiu polisulfonat stiren de sodiu	

Fig.3.18 Exemple de faze dispersate în fluidele *ER* pe baza mecanismelor de conducție ionică

Dintre fazele anorganice:

- zeoliți (grupuri minerale care reprezintă aluminosilicați naturali hidratați de calciu, sodiu, potasiu, bariu, magneziu etc. Zeoliții pot fi naturali sau sintetici),
- aluminosilicații au cele mai mari efecte *ER* deoarece conțin defecte de rețea care permit mobilitatea ionilor sau sunt dopate cu cationi.
- hidroxizii metalici prezintă efecte *ER* ridicate dacă sunt activați cu apă sau cu solvenți lichizi care facilitează mobilitatea ionilor. Printre fazele organice:

- polielectroliti sunt activați cu apă pentru accentuarea efectului *ER*.

Fig.3.18 prezintă structura polimetacrilatului de litiu. În stare de pulbere uscată, particulele de Li sunt puternic legate de grupurile carboxilat ($-\text{COO}-$) care se dizolvă la adăugarea apei, eliberând ionii de Li.

Rezultate promițătoare, din punct de vedere al proprietăților *ER*, s-au obținut la elastomerii pe bază de poliuretani. Un interes deosebit îl prezintă sistemele care conțin fragmente de oxid de polietilenă (*PEO*).

În urma interacțiunii dintre perechile de electroni și oxigen, segmentele de *PEO* dizolvă atomii metalici și îi eliberează. S-a utilizat eterul 18-coroană-6, ca agent de legătură între ionii de litiu și de sodiu, datorită aranjamentului circular avantajos al atomilor de oxigen care coordonează cationii metalici.

În **Fig.3.19** sunt reprezentate structura agentului 18-coroană-6 eter și interacțiunea acestuia cu ionii de litiu.

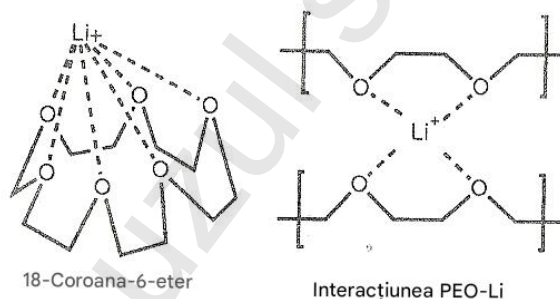


Fig.3.19 Reprezenatre schematică a interacțiunii polieter: Li^+

Structuri similare, cu un cation metalic central, înfășurat într-un lanț elicoidal de *PEO*, s-au observat și la complexele cristaline formate de oligomerii de elilen glicoli și săruri de metale alcaline. După o cercetare îndelungată a structurii și proprietăților poliuretanilor, s-a reușit optimizarea rețelei polimerice pentru controlul mobilității ionilor, rezultând o nouă metodă de control al polarizării fazelor disperse din fluidele *ER*.

Proprietățile electrice și mecanice ale fazelor dispersate în fluidele *ER* pot fi variate în limite largi. Unele exemple de structură și proprietăți ale fazelor de poliuretan, dispersate în fluidele *ER* sunt ilustrate în **Fig.3.20**.

Segment de poliester sau de segment moale	Ramificarea poliuretanilor
Tg scazut permite mobilitatea ionilor dizolva si uneste purtatorii de sarcina	favorizeaza stabilitatea temperaturii furnizeaza integritate structurala

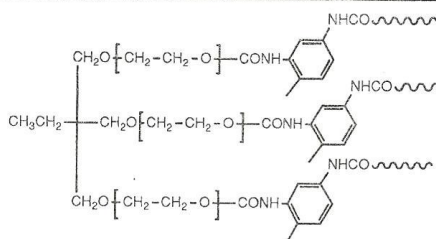


Fig.3.20 Exemple de structură și proprietăți ale fazelor dispersate de poliuretan în fluidele ER

Particulele prezente în fluidele ER pot fi sub formă:

1. dispersată, cu caracteristicile:

- poliuretani ramificați care conțin săruri dispersate;
- fracțiunea de fază solidă circa 60 %;
- dimensiunea particulelor între 3-5 μm ;
- densitatea aparentă 1.09.

2. continuă, cu caracteristicile:

- ulei de polidimetilsiloxan cu agenți de dispersare din siliciu;
- conține stabilizatori;
- densitatea aparentă 0.917.

În cazul fazelor continue se utilizează siliciu datorită înaltei sale stabilități și al coeficientului scăzut de variație a vâscozității cu temperatura. Stabilitatea la sedimentare este asigurată de agenți speciali de dispersare și de stabilizatori.

Fig.3.21 ilustrează dependența de temperatură a vâscozității fluidelor ER la câmp electric zero, pentru diverse fracțiuni de volum ale fazei dispersate.

În general, vâscozitățile sunt destul de scăzute (sub 500 mPa·s), dacă se ține seama de fracțiunile ridicate de volum ale fazei dispersate. Se constată că dependența vâscozității de temperatură se accentuează odată cu creșterea

fracțiunii de volum de fază solidă.

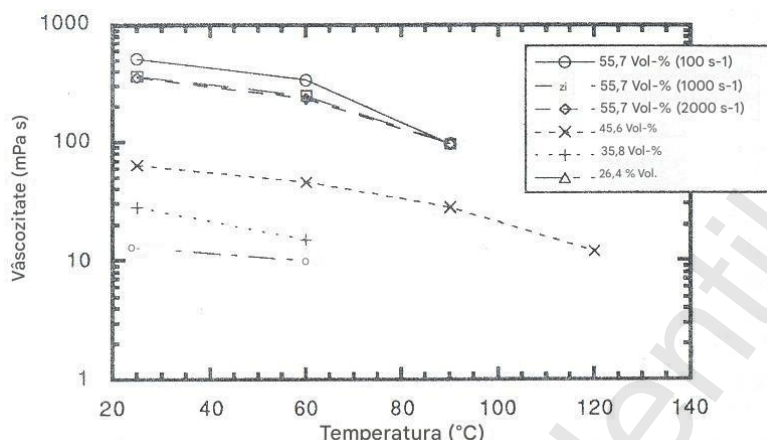


Fig.3.21 Efectul temperaturii și a fracțiunii de volum a particulelor solide de poliuretan asupra vâscozității de câmp zero

Vâscozitatea este independentă de viteza de forfecare până la fracțiunea de volum de 45.6 %. La o fracțiune de 55.7 % s-a observat o subțiere prin forfecare (scăderea vâscozității la creșterea vitezei de forfecare de la 100 s⁻¹ la 2000 s⁻¹). Intervalul optim al fracțiunii de volum a fost 40-50 %.

Fig.3.22 prezintă reacția electrorheologică a unui fluid *ER* cu particule disperse de poliuretan (*PU-ERF*) care a fost optimizat pentru a prezenta efect *ER* maxim între 60-100 °C (aplicații la temperaturi ridicate).

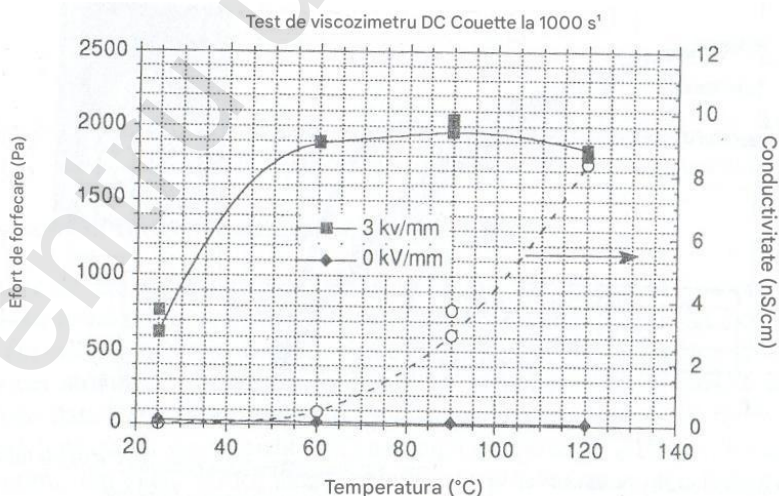


Fig.3.22 Comportare *ER* a fluidului pe bază de poliuretan, pentru aplicații la temperaturi înalte

Caracteristica sistemelor de *PU* are valoarea foarte scăzută a vâscozității lor la câmp zero și conductivitatea lor relativ ridicată, ceea ce asigură un interval relativ larg de comutație pentru fluidul *ER*.

Factorul de comutație are valori între 10 (la 25 °C) și până la aproximativ 200 (la 90 °C). Între 100-120 °C factorul de comutație crește exponențial și din acest motiv *PU-ERF* nu sunt utilizate la aceste temperaturi. Reacția *ER* apare la un câmp electric aplicat de 1 kV/mm și crește liniar odată cu creșterea tensiunii câmpului peste această valoare.

PU-ERF poate fi formulat și pentru aplicații la temperatura ambiantă (aplicații la temperaturi scăzute). Reacția *ER* a unui astfel de fluid este redată în **Fig.2.23**. În acest caz, tensiunea maximă de forfecare este atinsă la temperatura camerei. Factorul de comutație și conductivitatea sunt comparabile cu cele întâlnite la aplicațiile pentru temperaturi ridicate.

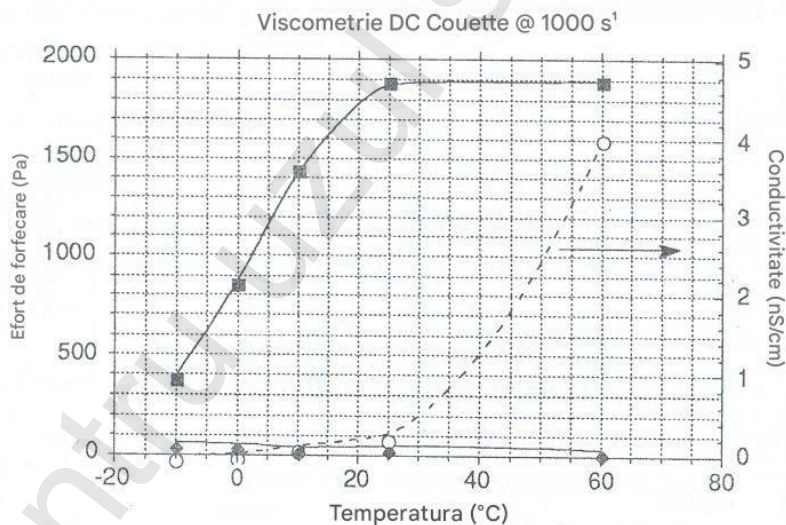


Fig.3.23 Comportare *ER* a fluidului pe bază de poliuretan, pentru aplicații la temperaturi scăzute

Totuși, se remarcă translarea reacției *ER*, cu circa 35 °C spre temperaturi *mai scăzute*. S-a constatat atingerea unui factor de comutație de 7-8, la o temperatură de – 10 °C. Această particularitate este *foarte utilă* pentru aplicațiile care necesită reacții moderate la temperaturi scăzute.

Rezultate remarcabile s-au obținut prin utilizarea particulelor de radical de poliantracen chinonă (*PAnQR*), cu diametre sub $38\ \mu\text{m}$, dispersate, în diferite fracții de volum, în uleiuri siliconice cu vâscozități diferite.

La aplicarea câmpurilor electrice s-a constatat că *PAnQR* dezvoltă structuri columnare care evoluează în timp, în mod diferențiat, pentru câmpuri aplicate brusc (direct) și câmpuri aplicate progresiv (lent), după cum prezintă micrografiile optice din **Fig.3.24**.

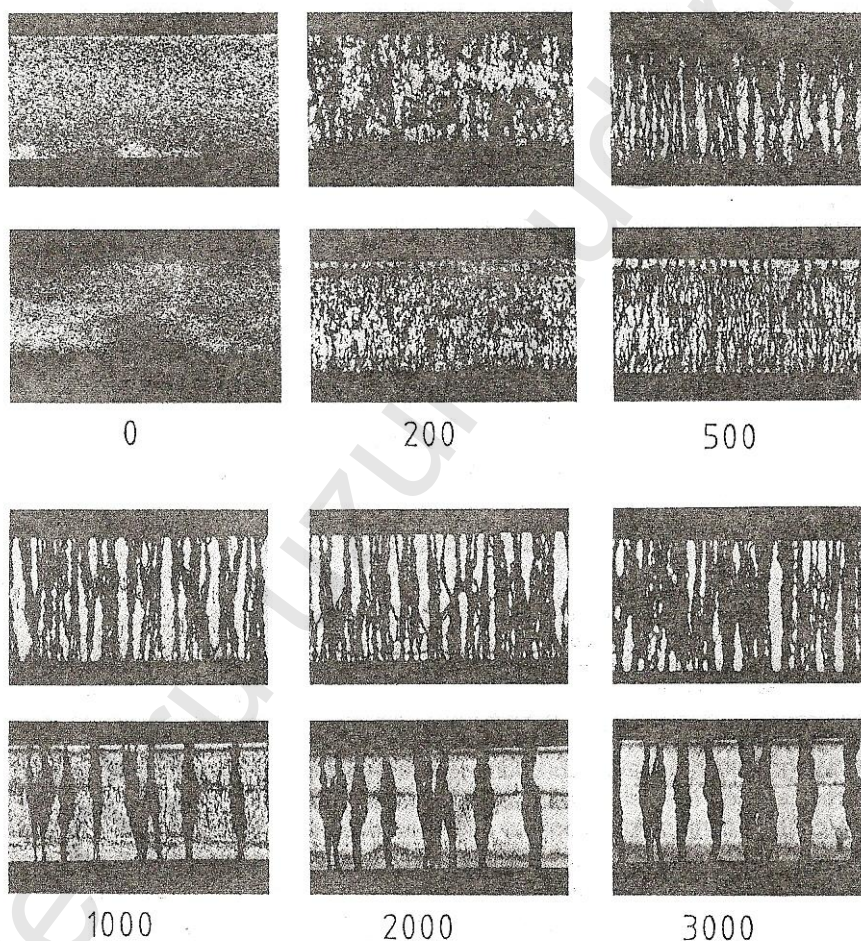


Fig.3.24 Dezvoltarea structurilor columnare în câmpuri electrice (s-a notat tensiunea, în V, la un interstițiu de 1 mm) pentru un fluid ER de 5 % *PAnQR*/ silicon.

Sus: efectele aplicării directe a câmpului electric la valoarea maximă;

Jos: efectele aplicării progresive/treptate, în pași de 0.2, 0.3, 0.5 și apoi 1 kV, echilibrul fiind atins într-un singur stagiū și fiecare dintre stagiile metodelor alternative în mai multe etape

Se observă că aplicarea progresivă (jos) a câmpului electric produce o structură mult mai grosolană și că aplicarea directă (sus) produce apariția mai multor coloane care sunt mai fine.

După ce s-a observat că modul de aplicare a câmpului (brusc sau treptat) poate afecta reacția *ER*, s-a observat că același efect există și la nivel de permitivitate electrică.

Fig.3.25 arată variația incrementelor dielectrice, $\Delta\epsilon'$, ale fluidelor *PAnQR/* silicon, evaluată prin intermediul arcelor de cerc *Cole-Cole*, și este mai puternică atunci când, de exemplu, un câmp electric de curent continuu este aplicat direct, într-o singură etapă.

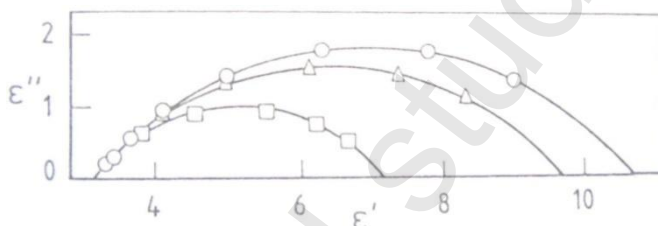


Fig.3.25 Grafice *Cole-Cole* pentru fluidele *PAnQR/* silicon fără câmp aplicat ($\square$), sub efectul unui câmp de 1kV/mm aplicat brusc ($\circ$) și în etape progresive de 100 V/mm (Δ). Incrementul dielectric, $\Delta\epsilon'$, este lungimea arcului de cerc *Cole-Cole*

Efecte similare se constată și în ceea ce privește câmpurile de curent alternativ. Deși s-a constatat că vâscozitatea are un efect slab asupra incrementului dielectric, variația fracțiunii de volum are un efect puternic asupra incrementului dielectric $\Delta\epsilon'$, **Fig.3.26**.

Considerând că mecanismul de polarizare al fluidelor *PAnQR/* silicon este de tip interfacial, migrația sarcinii electronice producându-se pe limita particulă/ fluid, atunci incrementul dielectric este mult mai mare în cazul formării bruște a unui număr mare de structuri aliniate, cum se întâmplă la aplicarea câmpului într-o singură etapă. Acest rezultat este ilustrat în **Fig.3.27** unde cercurile goale corespund aplicării unice (bruște) iar cele pline, aplicării treptate (lente) a câmpului electric.

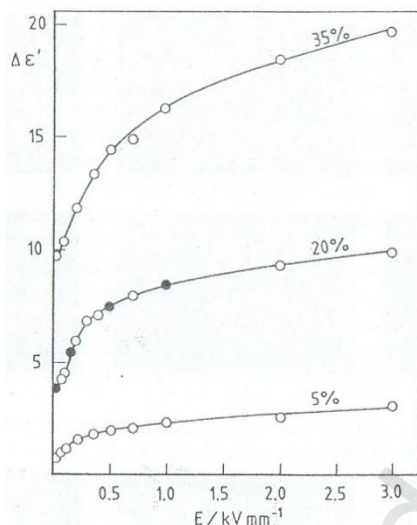


Fig.3.26 Efectul modificării fracțiunii de volum al particulelor asupra variației incrementului dielectric, $\Delta\epsilon'$, în funcție de câmpul electric aplicat, la fluidele ER PAnQR/silicon, cu aplicarea câmpului într-un singur stagiu

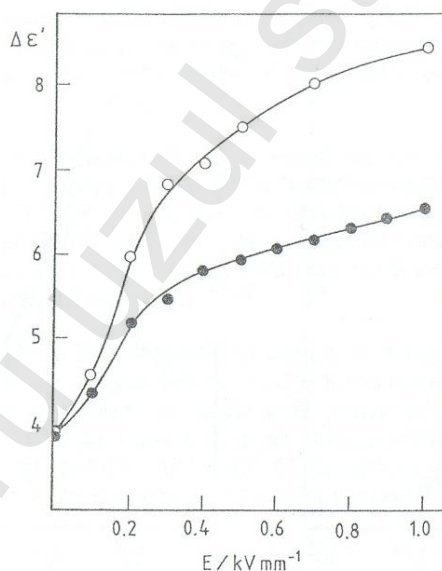


Fig.3.27 Rezultatul diferitelor metode de aplicare a câmpului electric asupra variației lui $\Delta\epsilon'$ cu câmpul electric, pentru 20 % PAnQR într-un fluid siliconic cu vâscozitatea de 98 mPas. (○) corespunde câmpului aplicat într-un singur stagiu, (●) corespunde aplicării în etape de 100 V/mm

Din punct de vedere al frecvenței de relaxare, f_R , **Fig.3.28** arată că variația fracțiunii de volum de *PAnQR* are un efect destul de redus asupra influenței câmpului electric, aplicat într-o singură etapă.

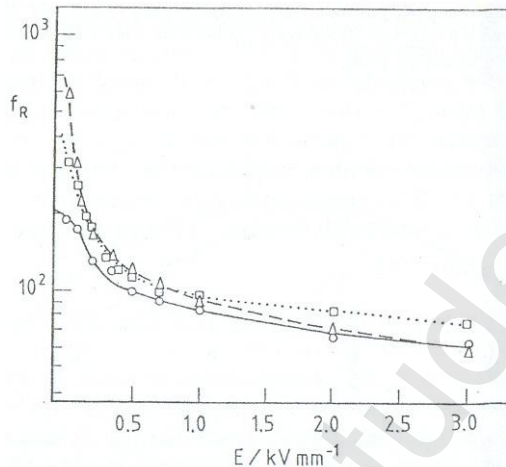


Fig.3.28 Frecvențe de relaxare (f_R) pentru câmpul electric aplicat într-un singur stagi, la fluidele ER de *PAnOR*/silicon cu diverse fracțiuni de volum: 5 ($\square$); 20($\circ$) și 35 % (Δ)

3.2.4 Fluide ER criogenice

Fluidele ER criogenice utilizează gaze lichefiate (N_2 , O_2 , H_2 , He, etc.) și au un puternic potențial aplicativ datorită reducerii substanțiale a mișcării browniene, care apare la temperaturi de ordinul a 100 K.

Unul dintre cele mai importante fluide ER criogenice este **combustibilul de rachetă**, o suspensie vâscoasă de pulbere de aluminiu ($10\ \mu m$) și oxigen lichid.

- oxidul de aluminiu depus la suprafața particulelor formează un strat dielectric izolator care împiedică formarea unui scurt-circuit la aplicarea câmpului electric.
- diferența dintre constanta dielectrică ridicată a Al și constanta scăzută a O_2 lichid, dă naștere unei puternice reacții ER.

Primele experimente au utilizat N_2 lichid în loc de O_2 pentru a evita riscurile de explozie. Pulberea de aluminiu a fost înmuiată în soluție apoasă de Na_2CO_3 , uscată în aer și încălzită în N_2 pentru formarea $Al(OH)_3$ care se descompune în Al_2O_3 la încălzire. Instalația din **Fig.3.29** utilizează AC la 60 Hz. La 6 kV/cm s-au format primele lanțuri care s-au întins între electrozi la 8.3 kV/cm și s-au dezvoltat la 10 kV/cm.

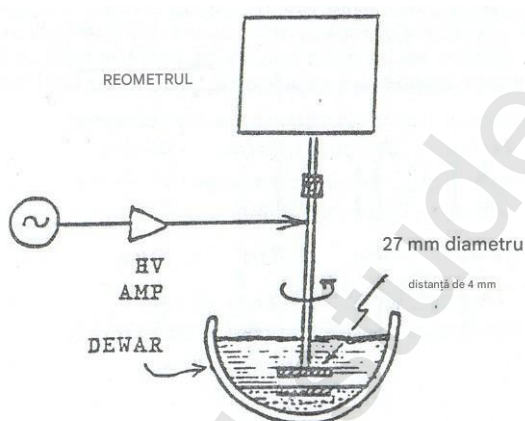


Fig.3.29 Schema instalației experimentale pentru determinarea reologiei fluidelor ER criogenice

Dimensiunile maxime ale coloanelor de particule au fost atinse la 10.7 kV/cm, unde s-a obținut un efect ER foarte puternic. La reducerea treptată a câmpului, coloanele au persistat până la 3.3 kV/cm.

3.2.5 Fluide ER de uz comercial

O clasă de fluidele ER devenite de uz comercial sunt produse de Lord Corporation sub denumirea comercială de *VersaFlo™ Controllable Fluids*, cu codurile ER-100, ER-200 și ER-201.

VersaFlo™ ER-100 este versiunea optimizată a lui ERX02 sau ER-II și este destinat controlului prin DC. Densitatea sa tipică de curent este sub 20 $\mu A/cm^2$ la un câmp aplicat de 4 kV/mm. Tensiunea curgerii aparente și vâscozitatea dinamică este de circa 1 kPa la 4 kV/mm, având o vâscozitate de

câmp zero de 200-300 mPa·s, după cum arată **Fig.3.30**.

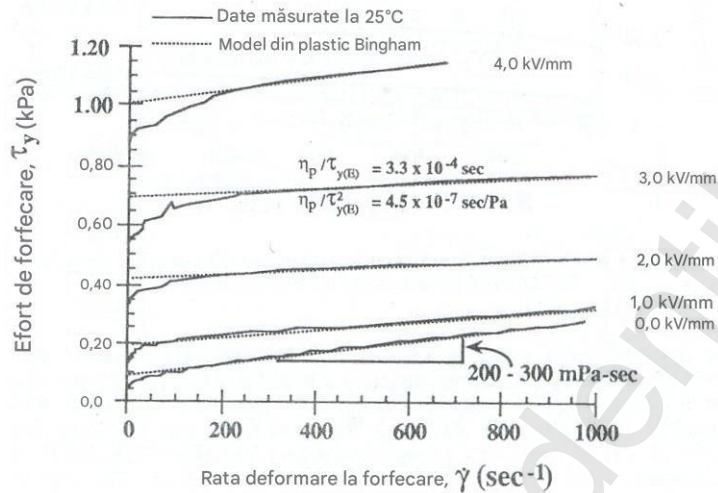


Fig.3.30 Variația tensiunii de forfecare în funcție de viteza deformației de forfecare pentru fluidul VersaFlo™ ER-100

Intervalul de temperatură recomandat pentru VersaFlo™ ER-100 este 10-90 °C. În acest interval de temperatură se observă o scădere a vâscozității plastice, $\Delta\eta_p$, de 73 % și o scădere a tensiunii de curgere dinamică, $\Delta\tau_{y(E)}$, de 53 %, după cum indică **Fig.3.31**.

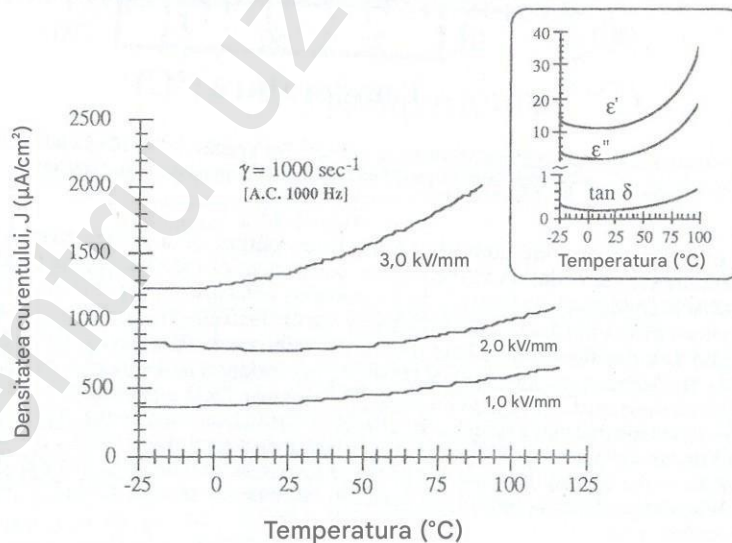


Fig.3.31 Variațiile cu temperatura ale tensiunii de curgere dinamică (linie continuă) și ale vâscozității plastice (linie punctată) pentru fluidul VersaFlo™ ER-100

Aceste scăderi însemnate sunt cauzate de reducerea polarizabilității la temperaturi ridicate ca efect al variației conductivității electrice.

În mod surprinzător, efectul global al temperaturii asupra rapoartelor de proiectare ale vâscozității și tensiunii de curgere, $\eta_p/\tau_{y,d}$ și $\eta_p/\tau_{y,d}^2$, este neglijabil din cauza variațiilor concomitente ale vâscozității și tensiunii de curgere plastică. Aceste rapoarte sunt prezentate în medalioanele din Fig.3.31.

Fluidele *VersaFloTM ER-200* și *201* sunt de natură anhidră și necesită control prin intermediul AC, pentru împiedicarea producerii fenomenului de electroforeză a particulelor (migrarea particulelor încărcate electric spre anod sau catod, la trecerea unui curent electric).

Funcționarea optimă a acestor fluide s-a obținut pentru curenți cu frecvențe de cel puțin 500 Hz și variație pătratică, alternativă. După cum arată **Fig.3.32**, densitatea de curent a fluidului *VersaFloTM ER-200* este relativ constantă pe intervalul util de temperatură, -25 ... 125 °C, sub efectul unui curent alternativ de 1 kV/mm, la o frecvență de 1 kHz.

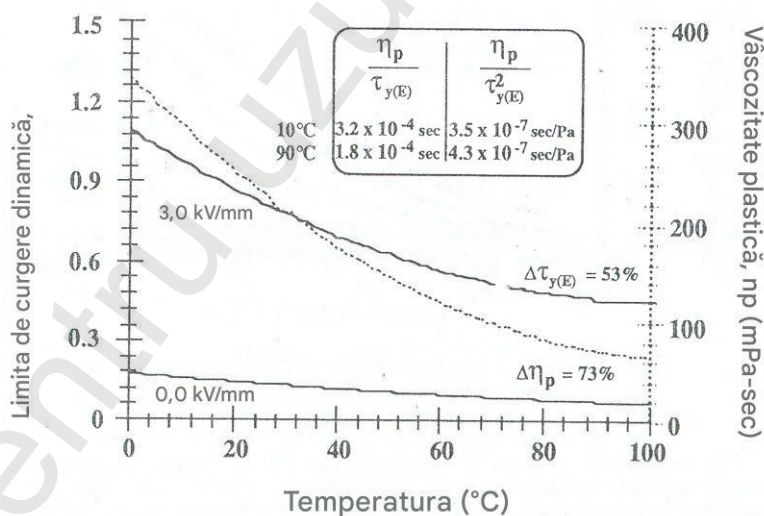


Fig.3.32 Variția densității de curent a fluidului *VersaFloTM ER-200*, în funcție de temperatură

În medalionul din cadrul Fig.3.32 este prezentată și variația constantelor dielectrice. Se observă că factorul real (ϵ' , de înmagazinare) și cel

imaginar (ε'' , de pierdere) ai permitivității electrice complexe, cresc odată cu creșterea temperaturii. Cu toate acestea, frecarea internă, $tg\delta$, se menține relativ constantă (deoarece ambii factori cresc în mod asemănător).

În **Fig.3.33** este prezentată variația tensiunii de forfecare a fluidelor *VersaFloTM ER-100* și *ER-200*, în funcție de temperatură, la o viteză de forfecare de 500 s^{-1} .

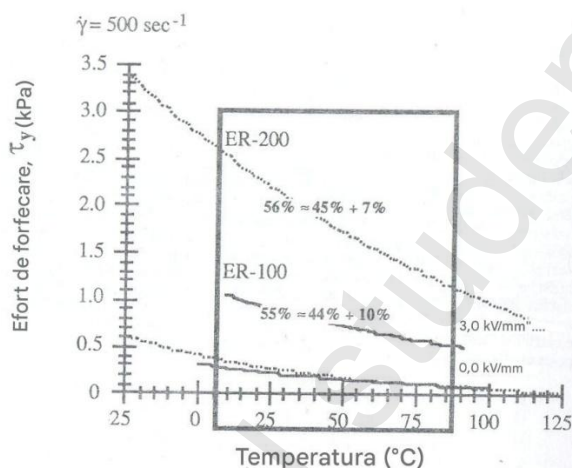


Fig.3.33 Variația în funcție de temperatură a tensiunii de forfecare la 500 Hz pentru fluidele *VersaFloTM ER-100* (linii continue) și *ER-200* (linii punctate)

Pentru comparație, s-au prezentat variațiile tensiunii de forfecare pentru cele două fluide pe intervalul de temperatură de $10-90^\circ\text{C}$, pe care ambele sunt utilizabile. La ambele fluide s-a observat o scădere a tensiunii de forfecare de circa 55-56 %. Asta înseamnă că un dispozitiv care utilizează fluidele respective, la o viteză de forfecare de 500 s^{-1} , trebuie să poată compensa o pierdere de forță de circa 55 % atunci când temperatura crește de la 10 la 90°C .

Scăderea totală a tensiunii de forfecare este produsă de doi factori cu următoarea proveniență:

- 44-45 % prin reducerea tensiunii de curgere dinamiă, $(\Delta\tau_{y(E)}/\tau_y)$;
- 7-10 % din reducerea componentei vâscoase, $(\Delta\eta_p / \Delta\tau_y)$,

obținută prin împărțirea formulei lui *Bingham* la tensiunea de curgere τ_y .

$$\left(\frac{\Delta \tau_y}{\tau_y} = \frac{\Delta \tau_{y(E)}}{\tau_y} + \frac{\Delta \eta_p \dot{\gamma}}{\tau_y} \right)_{\Delta V}$$

3.3 Mecanismul fizic al fenomenului ER

3.3.1 Simularea formării structurii solide în fluidele ER

Cunoașterea structurii fluidelor *ER* este esențială pentru înțelegerea mecanismului fizic al fenomenului care guvernează proprietățile acestor fluide. La aplicarea câmpului electric, particulele se aliniază formând lanțuri, coloane și *in extremis* o structură tetragonală cu volum centrat (*tvc*). Pentru a simula formarea structurilor ordonate în fluidele *ER* s-a pornit de la *modelări 2-D*. Rezultatele sunt prezentate în **Fig.3.34**.

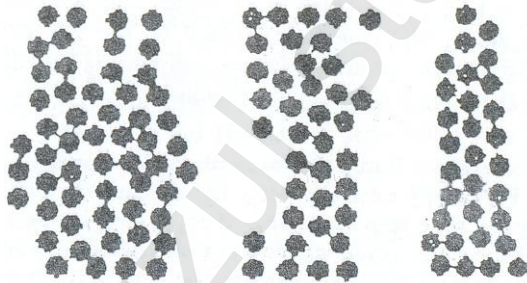


Fig.3.34 Rețeaua triunghiulară compactă obținută la simulările 2-D care țin cont și de fluctuațiile termice

Dacă fluctuațiile termice din fluidele *ER* sunt ignorate, simulările au indicat formarea unor structuri cu lanțuri unice separate. Dacă, între ipotezele inițiale sunt incluse și fluctuațiile termice, în 2-D se obține o rețea triunghiulară, singura structură compactă bi-dimensională existentă, ca în modelele din Fig.3.34.

La simulare s-a luat în considerație o suspensie monodispersă (un singur diametru) de particule dielectrice sferice într-un lichid neconductiv. Particulele au diametrul σ și constanta dielectrică ϵ_p . Lichidul are constanta dielectrică ϵ_f și vâscozitatea η . Sistemul este menținut între doi electrozi

paraleli considerați plani descriși prin $z=0$ și $z=L$.

Când nu există tensiune aplicată, particulele sunt distribuite întâmplător prin tot fluidul. În câmp electric, fiecare particulă capătă un moment dipolar indus, $p=\alpha\epsilon_f(\sigma/2)^3E_{loc}$, în care $\alpha=(\epsilon_p-\epsilon_f)/(\epsilon_p+2\epsilon_f)$ iar E_{loc} este intensitatea câmpului electric local.

Structura solidă ER este determinată de:

- interacțiunile dipolare,
- forțele de antrenare vâscoasă,
- mișcarea Browniană.

S-a observat că mișcarea termică joacă un rol foarte important în formarea structurii ER, deși raportul dintre energia electrică dipolară și cea termică este foarte ridicat, $(p^2/\epsilon_f\sigma^3)/k_BT \sim 10^6$.

Se definește parametrul B ca raportul dintre *forța Browniană* și cea dipolară. Dacă B este foarte mic, sistemul ER nu poate ieși dintr-o groapă de potențial pentru a atinge echilibrul energetic. Dacă B este foarte mare, vibrațiile împiedică formarea structurilor solide stabile. Mișcarea unei particule generice, notată i , poate fi descrisă prin ecuația Langevin:

$$m \frac{d^2 r_i}{dt^2} = F_i - 3\pi\sigma\eta \frac{dr_i}{dt} + R_i(t) \quad (3.4)$$

în care: F_i este forța electrică ce acționează pe particulă,
 $-3\pi\sigma\eta v_i$ este forța de tragere Stokes (vâscoasă).

A fost adăugată o *forță Browniană* întâmplătoare $R_i(t)$ care reprezintă efectul net al coliziunilor moleculelor de solvent cu particulele. Forța dipolară cu care acționează asupra unei particule aflată la distanța r_i , o altă particulă aflată la distanța r_j este dată de:

$$f_{ij} = \frac{3p^2}{\epsilon_f r_{ij}^4} [e_r(1 - 3\cos^2 \theta_{ij}) - e_\theta \sin^2 \theta_{ij}] \quad (3.5)$$

în care: $r_{ij}=r_i-r_j$,
 $0 \leq \theta_{ij} \leq \pi/2$ este unghiul dintre direcția z și linia ce unește centrele

celor doi dipoli.

Se definesc e_r ca fiind vectorul de unitate paralel cu r_{ij} și e_θ vectorul unitate paralel cu $e_r \times (e_r \times E_0)$. Se consideră că un dipol p , aflat în interiorul capacitorului, la distanța $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ produce un număr infinit de imagini la $(x_i, y_i, -z_i)$ și la $(x_i, y_i, 2kL \pm z_i)$, pentru $k = \pm 1, \pm 2, \dots$

Forța din interacțiune dintre un dipol și o imagine are aceeași formă cu ecuația (3.5). Particula j și imaginile sale infinite produc o forță electrică asupra particulei i , de forma:

$$f_{ij,x} = \frac{p^2}{\epsilon_f L^4} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{4s^3 \pi^3 (x_i - x_j)}{\rho_{ij}} K_1 \left(\frac{s\pi \rho_{ij}}{L} \right) \cos \left(\frac{s\pi z_i}{L} \right) \cos \left(\frac{s\pi z_j}{L} \right)$$

$$f_{ij,y} = \frac{p^2}{\epsilon_f L^4} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{4s^3 \pi^3 (y_i - y_j)}{\rho_{ij}} K_1 \left(\frac{s\pi \rho_{ij}}{L} \right) \cos \left(\frac{s\pi z_i}{L} \right) \cos \left(\frac{s\pi z_j}{L} \right)$$
(3.6)

$$f_{ij,z} = \frac{p^2}{\epsilon_f L^4} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{4s^3 \pi^3 (z_i - z_j)}{\rho_{ij}} K_1 \left(\frac{s\pi \rho_{ij}}{L} \right) \cos \left(\frac{s\pi z_i}{L} \right) \cos \left(\frac{s\pi z_j}{L} \right)$$

unde: $\rho_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$,

K_0 și K_1 se numesc funcții *Bessel* modificate.

Forța cu care acționează asupra particulei i propria sa imagine, este orientată după direcția z și este dată de:

$$f_{i,z}^{self} = \frac{3p^2}{8\epsilon_f} \left(-\frac{1}{z_i^4} + \sum_{s=1}^{\infty} \left[\frac{1}{(z_i - sL)^4} \right] - \left[\frac{1}{(z_i + sL)^4} \right] \right)$$
(3.7)

Pentru simularea sferelor rigide și a pereților rigizi se introduce o forță de respingere la mică distanță dintre două particule:

$$f_{i,j}^{rep} = \frac{3p^2 e_r}{\epsilon_f \sigma^4} \exp[-100(r_{ij}/\sigma - 1)]$$
(3.8)

și o forță de respingere la mică distanță între particulă și electrozi:

$$f_i^{wall} = \frac{3p^2 e_z}{\epsilon_f L^4} \{ \exp[-100(z_i/\sigma - 0,5)] - \exp[-100((L - z_i)/\sigma - 0,5)] \}$$
(3.9)

Cu noile expresii ale forțelor, forța electrică ce acționează pe particulă devine:

$$F_i = \sum_{j \neq i} [f_{ij} + f_{ij}^{rep}] + f_i^{self} + f_i^{wall} \quad (3.10)$$

Forța distribuită întâmplător are o distribuție de tip:

$$\langle R_{i,x} \rangle, \langle R_{i,\alpha}(0) R_{i,\beta}(t) \rangle = 6\pi k_B T \sigma \eta \delta_{\alpha\beta} \delta(t) \quad (3.11)$$

În simulare, s-a înlocuit $R_i(t)$ cu $R_i(t, \Delta t)$ care este media lui $R_i(t)$ într-o perioadă scurtă de timp, Δt :

$$R_{i,\alpha}(t, \Delta t) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} R_{i,\alpha}(t') dt' \quad (3.12)$$

$R_i(t, \Delta t)$ are o distribuție normală, $\langle R_{i,\alpha}(t, \Delta t)^2 \rangle = \Omega^2$ în care $\Omega = \sqrt{6\pi k_B T \sigma \eta / \Delta t}$ este forța la scară *Browniană*.

Scala intrinsecă de timp din ecuația (3.4) este $t_0 = m/(3\pi\sigma\eta)$. Considerând $t=t_0 t^*$, $F_i = F_0 F_i^*$ unde $F_0 = 3p^2/(\epsilon_f \sigma^4)$, $R_i = R^* i$ iar $r_i = \sigma r_i^*$, în ecuația (3.4). Transformarea de aducere la scară duce la obținerea unei noi ecuații:

$$\ddot{r}_i^* + \dot{r}_i^* = A(F_i^* + B R_i^*) \quad (3.13)$$

unde: $A = F_0/[3\pi\sigma\eta(\sigma/t_0)]$,

$$B = \Omega/F_0.$$

Se constată că A reprezintă raportul dintre forța dipolară și cea vâscoasă iar B raportul dintre forța *Browniană* și forța dipolară. Se observă că structura finală a fluidului ER este dependentă de valorile celor 2 constante, A și B . La un fluid real, compus din particule de alumina în ulei petrolier, $\epsilon_f \sim 2$; $\epsilon_p \sim 8$; $\eta \sim 0,2$ poise; $\sigma \sim 10 \mu m$ iar densitatea particulelor este $\rho \sim 3 g/cm^3$.

La $E_0 = 3 kV/mm$ și $T = 300K$, fluidul ER capătă suficientă vâscozitate ca să poată fi considerat „solidificat”. În aceste condiții se estimează scala de timp $t_0 = 8.33 \times 10^{-7} s$ și $A \sim 10^{-4}$. Considerând $\Delta t = 0.4 t_0$, se obține $B = 10^{-1}$. În simularea propriu-zisă se iau în considerație valorile constantelor A și B .

În continuare trebuie specificat criteriul δr_c . Fie δr_x cea mai mare

variație de poziție a particulelor în intervalul de timp δt . Dacă $\delta r_x > \delta r_c$, atunci, la continuarea simulării, etapa de timp se reduce la $\delta t/d$ ($d=ct.>1$). Dacă $\delta r_x < \delta r_c$, atunci, în etapa următoare, etapa de timp se va mări la $c\delta t$ ($c=ct.>1$). Prin constantele c și d se controlează mărimea pașilor de simulare.

În cadrul simulării, δr_x a fost relativ mare în stagiul inițial dar a devenit din ce mai redus în stagiile finale.

În cele ce urmează se consideră un ansamblu de 122 particule într-o cutie de dimensiuni $L_x=L_y=5\sigma$ și $L_z=14\sigma$. Se știe că dacă $L_z \leq 6\sigma$, structura cu un singur lanț de particule are o energie mai redusă decât coloanele groase. Din condițiile de limită pe direcțiile x și y se obține o fracțiune de volum $\Phi=0.183$.

În fiecare etapă de simulare se aplică trei parametri de ordine pentru caracterizarea structurii, cu forma generală:

$$\rho_i = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp(ib_j r_i) \right| \quad (3.14)$$

unde cei trei vectori ai celulei tvc reciproce sunt: $b_1=(2\pi/\sigma)(2e'_x/\sqrt{6}-e_z)$, $b_2=(2\pi/\sigma)(2e'_y/\sqrt{6}-e_z)$, $b_3=4\pi e_z/\sigma$. Cei trei vectori unitari reprezintă e_z fiind direcția câmpului electric iar e_x și e_y sunt orientați după axele celulei tvc. Parametrul de ordine ρ_3 caracterizează lanțurile de particule pe direcția z iar ρ_1 și ρ_2 caracterizează structura în planul x - y . **Fig.3.35** prezintă rezultatele din faza inițială.

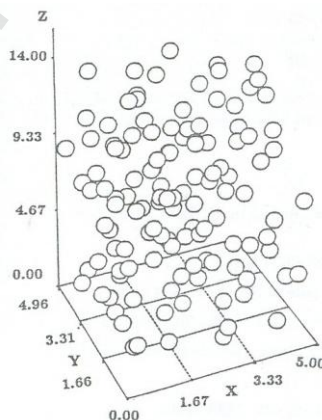


Fig.3.35 În stare inițială, particulele dielectrice sunt distribuite în mod întâmplător

Se observă că în Fig.3.35 particulele dielectrice sunt distribuite întâmplător iar cei trei parametri de ordine dispar. La momentul $t=0$, se aplică un câmp electric puternic iar cele două constante ating $A=10^{-4}$ și $B=10^{-1}$ și particulele încep să se miște.

Pentru primii 5 000 de pași, se consideră $\delta r_c=10^{-3}\sigma$, $\delta t=0.5 t_0$, $c=2$ și $d=2$. După primii 5 000 de pași (care durează circa 10 ms), se observă din **Fig.3.36** că s-au format lanțuri de particule pe direcția z pentru care $\rho_3=0.617$, însă ordinea laterală este foarte slabă și din acest motiv $\rho_1=0.32$ și $\rho_2=0.16$.

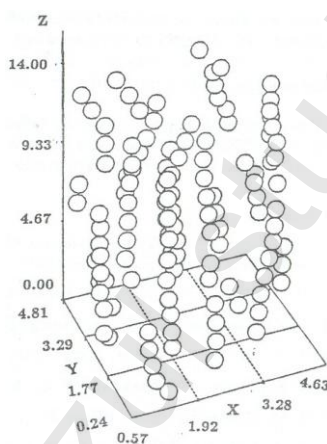


Fig.3.36 Configurația particulelor după primii 5 000 de pași

Următorii 15 000 de pași, c este redus de la 2 la 1.1 iar d este mărit de la 2 la 3. La sfârșitul acestui interval se obține $\rho_3=0.92$ dar ρ_1 și ρ_2 se mențin în jur de 0.4-0.5. Structura corespunzătoare (cu ordine aproape perfectă pe direcția câmpului) este ilustrată în **Fig.3.37**. După 20 000 de pași δr_c este redus la 0.0005σ și se continuă simularea.

Structura obținută după 90 000 de pași, din **Fig.3.38**, arată o foarte bună ordonare pe toate direcțiile. Lanțurile s-au agregat într-o rețea tvc . Parametrii de ordine au devenit: $\rho_3=0.991$, $\rho_1=0.915$ și $\rho_2=0.850$.

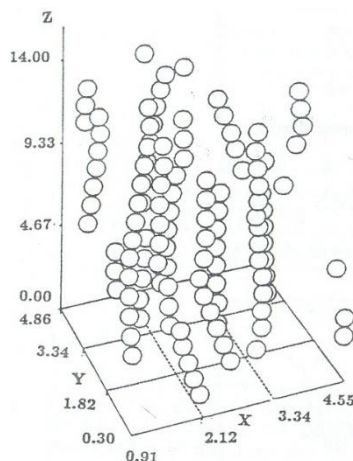


Fig.3.37 Configurația particulelor după primii 20 000 de pași

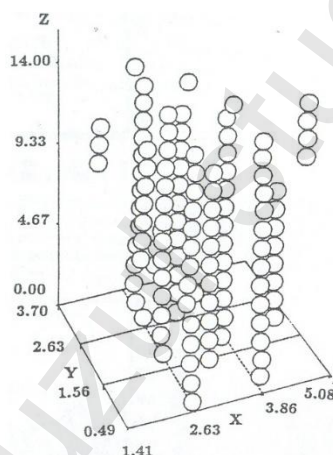


Fig.3.38 Configurația particulelor după primii 90 000 de pași

Proiecția structurii 3-D pe planul x-y este prezentată în **Fig.3.39**. Se observă că pătratul marcat corespunde unei rețele tvc. Latura sa este de circa $\sqrt{1.5}\sigma = 1.225\sigma$. Cele patru lanțuri din colțurile pătratului conțin câte 14 particule aliniate după direcția câmpului. Lanțul din mijloc are 12 particule împachetate compact cu cele patru lanțuri vecine (din colțuri). Această structură este o rețea ideală tvc dacă lanțului din mijloc nu-i lipsește nici o particulă. Punctele groase din Fig.3.39 arată faptul că particulele sunt foarte

bine aliniate pe direcția z , a câmpului electric aplicat.

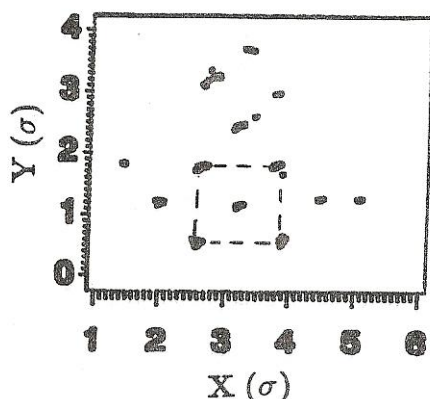


Fig.3.39 Proiecția configurației din Fig.3.38 pe planul xOy

3.3.2 Modelul de conducție al efectului ER

Ținând cont de importanța conducției atât în curent continuu cât și în curent alternativ la frecvențe mici, a fost dezvoltat un model prin care interacțiunea dintre particule este controlată prin intermediul conductivității electrice.

Se consideră particule de permitivitate ϵ_S și conductivitate σ_S , imersate într-un lichid cu ϵ_L și σ_L . Permitivitatea electrică sau constanta dielectrică, este o mărime care indică rezistența opusă la polarizare electrică a unui dielectric. Caracterizează proprietățile electrice ale unui mediu. Unitatea de măsură în sistemul internațional, SI , este farad pe metru.

În practică este utilizată o mărime adimensională exprimată prin raportul dintre permitivitatea unui mediu și cea a vidului numită permitivitate relativă. Sub efectul unui câmp electric de curent continuu, E_0 , se formează un dipol electric care este paralel cu câmpul, dacă $\sigma_S > \sigma_L$ și antiparalel dacă $\sigma_S < \sigma_L$. În ambele cazuri, particulele se atrag formând lanțuri.

Considerăm două sfere de rază R , cu conductivitate mult mai mare decât lichidul în care se află, $\sigma_S \gg \sigma_L$. Conform **Fig.3.40(a)** liniile de câmp se strâng în zona de contact.

Se pot distinge două regiuni:

- 1) pentru $x > \delta$ (raza de tranziție), suprafața sferei este echipotențială iar curentul care iese din sferă este neglijabil;
- 2) pentru $x < \delta$, câmpul din lichid este mai mult sau mai puțin saturat deoarece stratul de fluid este foarte subțire și majoritatea curentului traversează lichidul în această zonă.

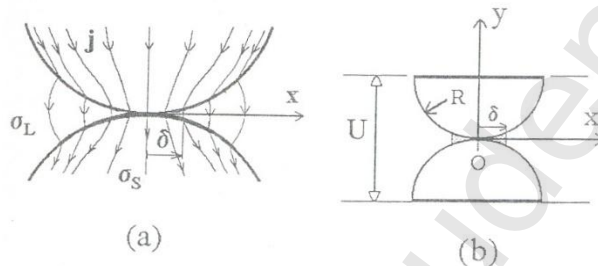


Fig.3.40 Ilustrare schematică a celor două emisfere în contact: (a) dispunerea liniilor de câmp în cele două medii; (b) definiția notațiilor

Forța de atracție dintre cele două sfere de rază R aflate sub acțiunea unui câmp electric slab E_0 este:

$$F = 4\pi R^2 \epsilon_L K_I T^2 E_0^2 \quad (3.15)$$

unde: $K_I = [\pi \ln(R/\delta)]^{-1}$,

$$\Gamma = \sigma_S / \sigma_L \gg 1.$$

Dacă se aplică un câmp electric E_0 puternic, atunci forța de atracție dintre sfere este:

$$F = 2\pi R^2 \epsilon_L E_c E_0 \{ \ln[(10\Gamma/\pi)(2E_0/E_c)^{1/2}] \}^2 \quad (3.16)$$

unde E_c este o constantă dependentă de lichid.

Pentru măsurarea efectivă a forței s-au ales două semisfere $R=0.7$ cm, din poliamidă, ca în **Fig.3.41**. S-au utilizat doi electrozi din duraluminiu, de 9 cm, distanțați la 1.4 cm.

Una dintre sfere este legată la pământ și la o balanță. Cea de-a doua (de jos) primește potențialul electric U . Poziția verticală a sferelor este reglabilă. Sferele sunt scufundate până când forța exercitată de balanță le face să se

separe. Aceasta este *forța de atracție dintre sfere*, cea care se ia în considerație în experimente.

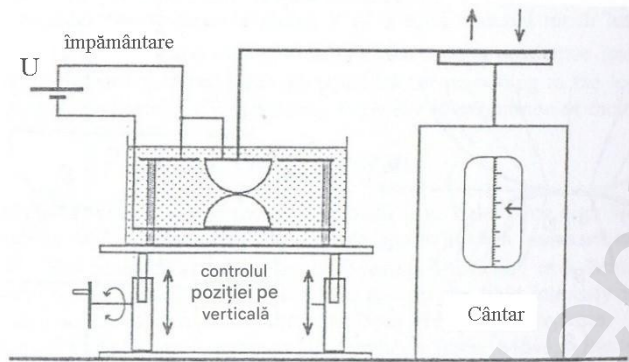


Fig.3.41 Instalație experimentală pentru măsurarea forței de atracție dintre cele 2 semisfere

Fig. 3.42 prezintă variația forței de atracție, F , dintre cele două semisfere în funcție de tensiunea, U , pentru mai multe valori discrete ale raportului de conductivitate, $\Gamma = \sigma_s / \sigma_L$, dintre conductivitățile particulelor și lichidului.

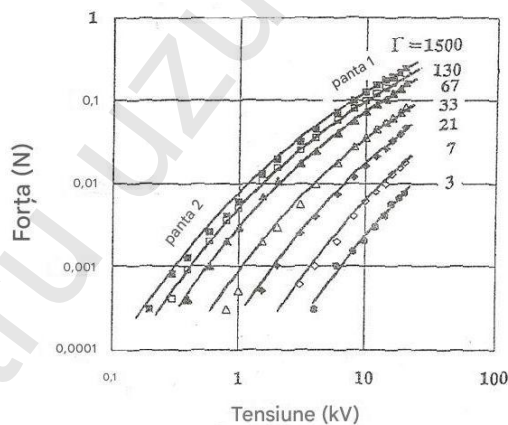


Fig.3.42 Variația forței de atracție F dintre sfere în funcție de tensiunea aplicată, U , pentru diverse valori ale raportului de conductivitate Γ

Pentru valori ale lui Γ destul de ridicate, forța este proporțională cu U^2 la câmpuri cu intensități scăzute ale tensiunii (slope 2) și cu U pentru câmpuri puternice (slope 1).

Aceste rezultate, marcate sub forma diferitor simboluri, sunt în bună

concordanță cu ecuațiile (3.15) și respectiv (3.16), trasate cu linie continuă.

Fig. 3.43 prezintă valorile discrete ale forței măsurate, F , în funcție de raportul de conductivitate Γ , pentru mai multe valori diferite ale tensiunii.

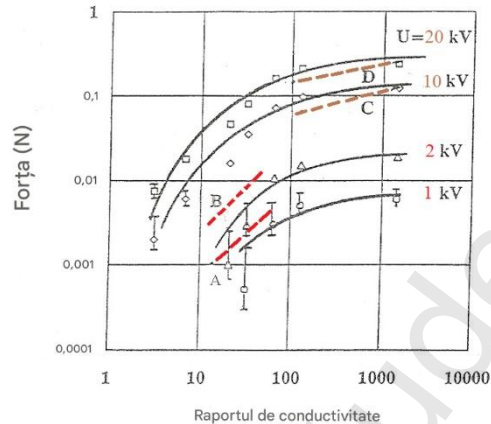


Fig.3.43 Variația forței de atracție F dintre sfere în funcție de raportul de conductivitate Γ pentru diverse valori ale tensiunii aplicate U . Curbele întrerupte A și B corespund ecuației (3.15) iar C și D ecuației (3.16)

Se pare că există o puternică tendință de scădere a forței atunci când Γ scade sub 10. Acest lucru arată că pentru obținerea efectului ER este necesar ca σ_s să fie mai mare decât σ_L . Un test cantitativ al ecuației (3.15) pentru $U=1$ kV și $U=2$ kV, dă o bună concordanță cu valorile experimentale pentru intervalul 15-50 al lui Γ .

Tot o bună concordanță se obține și între valorile măsurate ale forței în intervalul 100-2 000 al lui Γ , atunci când se consideră valorile $U=10$ kV și $U=20$ kV ale tensiunii și valorile date de ecuația (3.16).

3.3.3 Rolul structurii suspensiilor în reacția dinamică a fluidelor ER

Pentru studierea rolului structurii suspensiilor în cadrul reacției dinamice a fluidelor ER, s-a pregătit o suspensie de 20 % particule de alumina, cu dimensiuni între 63 și 90 μm și constanta dielectrică $\epsilon_p=9$, în polidimetilsiloxan (PDMS). S-au efectuat măsurători reologice dinamice, la o

frecvență de 500 Hz.

Expresiile adimensionale ale modulelor de elasticitate sunt:

$$\frac{G'}{\frac{3}{16}\pi\epsilon_0\epsilon_c\beta^2E_0^2} = f_1\left(\frac{16\eta_c\omega}{\epsilon_0\epsilon_c\beta^2E_0^2}\right) \quad (3.17)$$

$$\frac{G''}{\frac{3}{16}\pi\epsilon_0\epsilon_c\beta^2E_0^2} = f_2\left(\frac{16\eta_c\omega}{\epsilon_0\epsilon_c\beta^2E_0^2}\right) \quad (3.18)$$

ceea ce arată că cele două module depind doar de frecvența ω .

Rezultatele experimentale pentru câmpuri aplicate între 300 și 2000 kV sunt prezentate în **Fig.3.44**.

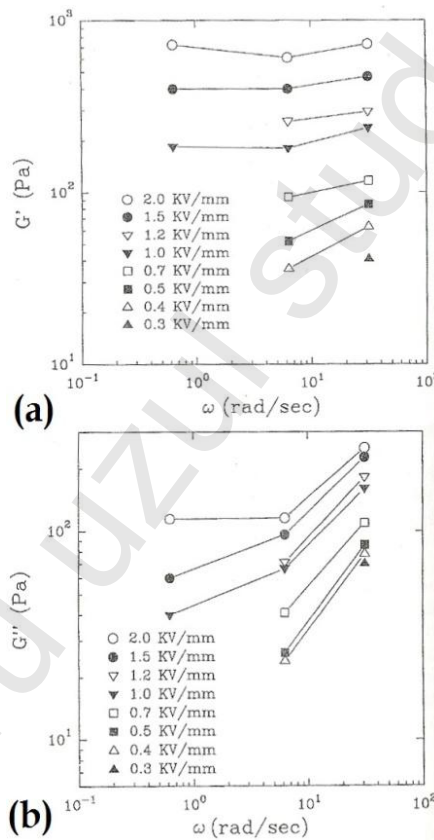


Fig.3.44 Variația modulelor de elasticitate în funcție de frecvența ω și de intensitatea câmpului electric E_0 : (a) variația modului de înmagazinare G' ; (b) variația modului de pierdere, G''

Se consideră reacția dinamică a unui șir de 10 particule aliniate în câmp electric, astfel încât să unească electrozii, unul cu altul. Pentru o astfel de structură, modulul de înmagazinare, $G'*(\omega)$ este independent de frecvență.

Modulul de pierdere, $G''^*(\omega)$, este negativ dar neglijabil. Pentru toate frecvențele mărimea frecării interne, avem $|\tan\delta(\omega^*)| = G''^*(\omega) / G'^*(\omega) \leq 10^{-3}$.

Această situație este cauzată de mișcarea afină a sferelor care constă din deplasarea fiecărei sfere în concordanță cu curgerea de forfecare a ansamblului de sfere înconjurătoare. Din acest motiv, nu există rezistență hidrodinamică și nici mecanisme de relaxare. Deoarece structura suspensiei este independentă de frecvență, nici tensiunile electrostatice și nici modulele nu sunt dependente de frecvență. Această situație este redată în **Fig.3.45**.

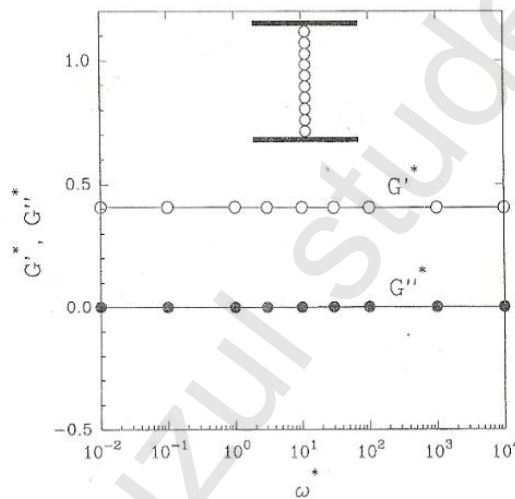


Fig.3.45 Reacția oscilatorie dinamică a unui lanț de particule cu lățimea unei singure sfere, care ocupă golul dintre electrozi

Structura din Fig.3.45 a fost o *reprezentare suprasimplificată* a modelelor de aranjare a particulelor observate în suspensiile ER, cu concentrație moderată până la ridicată. În mod curent se observă formarea unor coloane, cu lățimi de câteva particule, care se dezvoltă în golul dintre electrozi.

Cea mai simplă astfel de structură consideră prezența unui șir inițial de 10 particule care devine flancat de alte două șiruri de câte 9 particule, ca în **Fig.3.46** unde s-a reprezentat variația modulelor de elasticitate. Modulul de pierdere variază după:

- $G''^*(\omega^*) \sim \omega^*$, la frecvențe joase,

- $G''^*(\omega^*) \sim \omega^{*-1}$, la frecvențe înalte,

obținându-se o valoare maximă la frecvența adimensională $\omega^* \approx 25$. În apropierea acestei frecvențe, modulul de înmagazinare crește, de la un palier scăzut la alt palier, caracterizat printr-o valoare ridicată.

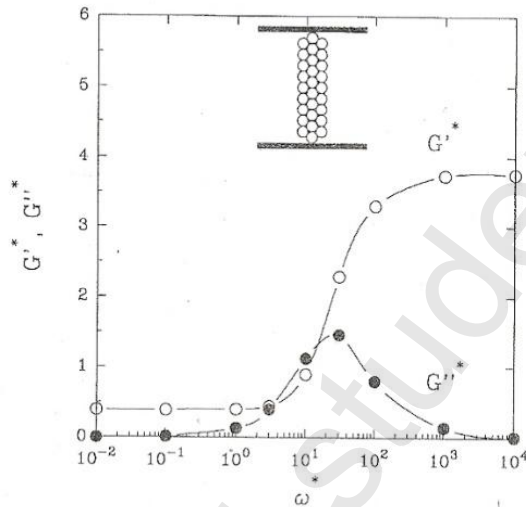


Fig.3.46 Reacția oscilatorie dinamică a unui cluster gros din 3 coloane, compus din 28 de sfere

Comparând cele două structuri, se poate constata că clusterul de 28 de particule prezintă o relaxare puternică, în timp ce șirul de 10 particule, nu. Capacitatea de relaxare provine de la cele două șiruri suplimentare. Mecanismele de relaxare devin vizibile atunci când deplasarea sferelor individuale și deformarea globală a clusterului sunt analizate în intervale foarte mici sau foarte mari de frecvență.

La frecvențe foarte mici, deformarea este complet determinată de către sferele atașate de electrozi, din cauză că rezistența hidrodinamică, întâmpinată la mișcarea sferelor, este nesemnificativă la aceste viteze de deformare.

Drept rezultat, pe sferele neatașate la electrozi, rezultanta forțelor electrostatice și de respingere este zero în orice moment, **Fig.3.47(a)**.

La frecvențe foarte mari, mișcarea particulelor din lanțurile laterale este controlată de rezistența hidrodinamică. Există o componentă nenulă pe direcția

z, a rezultantei dintre forțele electrostatice și de respingere, dar particulele nu au suficient timp să se deplaseze pe această direcție, **Fig.3.47(b)**.

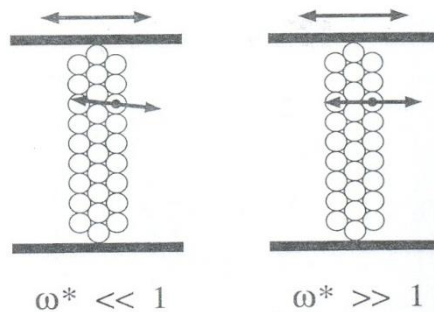


Fig.3.47 Ilustrarea structurilor dinamice ale limitelor de frecvență mică și mare pentru clusterul de 28 de sfere. Săgețile reprezintă direcții de deplasare ale electrozilor și ale unei anumite sfere din partea dreaptă a lanțului

Dacă se consideră o suspensie polidispersă (cu particule de diferite dimensiuni) se pornește de la ideea că, în esență, interacțiunile dintre două sfere sunt la fel, indiferent de diametrele lor. Pentru exemplificare, se analizează reacția dinamică la simulare a unei dispersii compusă din două sfere mari și treisprezece sfere mici, conform **Fig.3.48**.

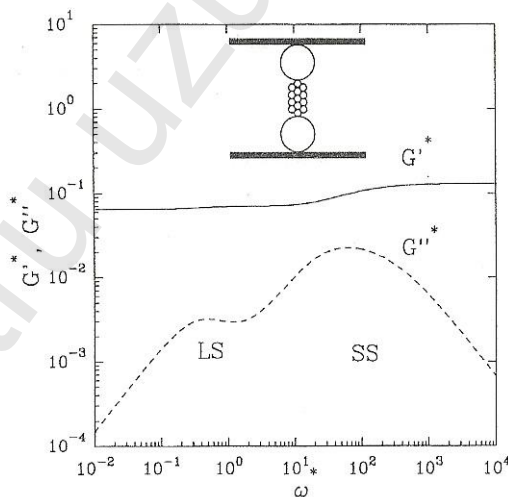


Fig.3.48 Reacția oscilatorie la simularea dinamică a unui cluster bi-dispers

Reacția oscilatorie simulată prezintă o dispersie mai mare decât cea a clusterului monodispers din Fig.3.46, deoarece modulul de pierdere are două

puncte de maxim. S-a determinat că picul de la frecvență redusă (*LS*) este cauzat de interacțiunile electrostatice dintre sfere mari și mici, în timp ce picul de la frecvențe ridicate (*SS*) provine din interacțiunile dintre sfere mici. Pe măsură ce diferențele dintre diametrele sferelor devin mai mari, *LS* scade ca intensitate și se deplasează spre frecvența mai mici.

3.3.4 Efectele morfologiei electrozilor asupra reacției ER

În încercarea de a mări tensiunea dezvoltată prin efect *ER*, cu două sau trei ordine de mărime, fără a crește nivelul curentului aplicat, s-au încercat diverse soluții cum ar fi:

- modificarea tipului și frecvenței câmpului electric aplicat;
- controlul permitivității și conductivității electrice a particulelor și lichidului purtător;
- controlul volumului și dispersivității particulelor, etc.

Însă toate acestea ating o limită de saturație peste care reacția *ER* nu se mai poate îmbunătăți.

În aceste condiții, s-au căutat soluții de îmbunătățire a fixării particulelor de electrozi, în zona de contact cu aceștia. În acest scop, s-au prelucrat caneluri pe suprafețele active ale electrozilor. Cu ajutorul unei suspensii de 25.3 % particule sferice cave de silice și alumină, cu diametrul mediu de 100 μm , în ulei mineral, s-a măsurat creșterea tensiunii de forfecare cu trei morfologii de electrod, conform **Fig.3.49**.

Cele trei morfologii ale plăcilor, de 30 mm diametru, presupun ca electrozii să fie:

- netezi,
- cu caneluri paralele la direcția vitezei (5 cercuri concentrice adânci de 0.3 mm),
- caneluri perpendiculare la direcția vitezei (8 caneluri diametrale

adânci de 0.15 mm).

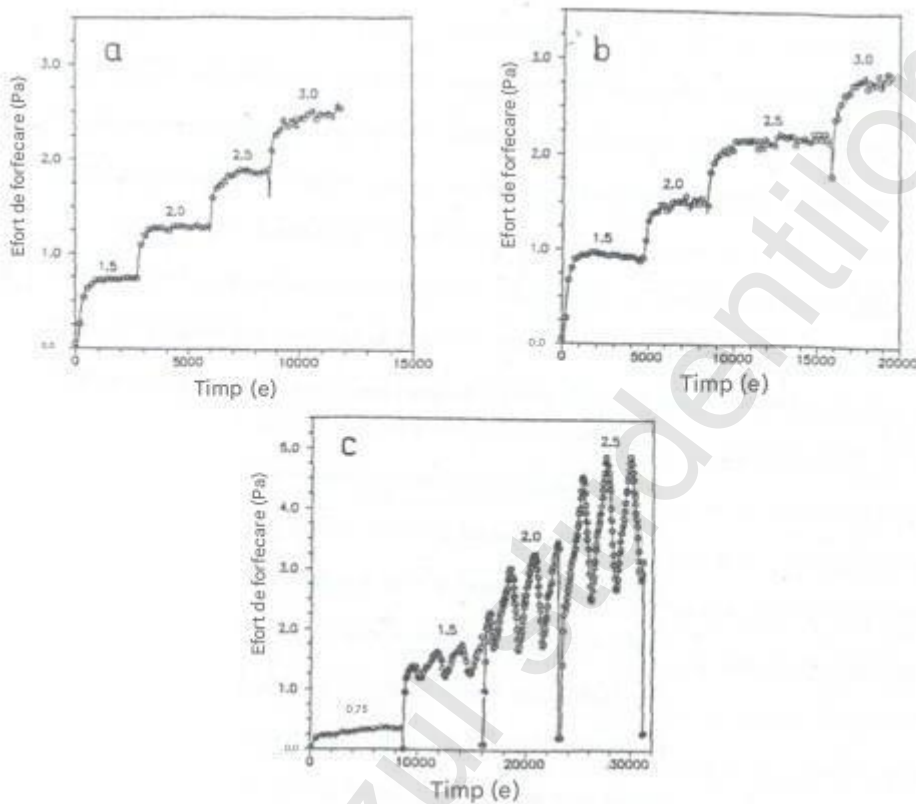


Fig.3.49 Tensiunea de forfecare a unui fluid *ER* dat în funcție de timp, la 4 intensități ale câmpului electric, în kV/mm pentru 3 tipuri de suprafețe ale electrozilor circulari: (a) netezi; (b) cu caneluri circulare concetrice (paralele la direcția vitezei); (c) cu caneluri radiale (perpendiculare la direcția vitezei)

Din Fig.3.49 se constată că stabilizarea se produce în mod monoton, în cazul electrozilor netezi, Fig.3.49(a) și al celor cu caneluri paralele la viteza fluidului.

În cazul electrozilor cu caneluri perpendiculare pe viteză, stabilizarea monotonă se observă numai pentru $E=750$ V/mm. La câmpuri mai mari, tensiunea prezintă o comportare repetabilă și periodică atingând o „*stare oscilatorie stabilă*”.

Valorile tensiunii de forfecare, caracteristice stării stabile, pentru cele trei geometrii ale suprafeței electrozilor, sunt trasate în funcție de curent, în

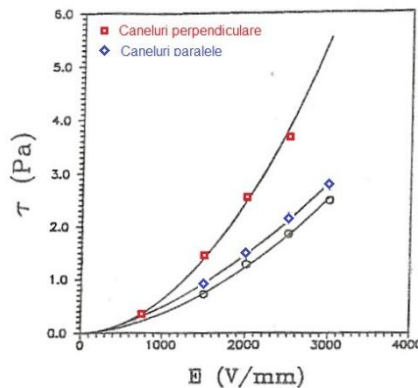
Fig.3.50.

Fig.3.50 Variația valorilor medii ale tensiunii de forfecare, în stare stabilă, în funcție de intensitatea câmpului electric. Pătratele corespund electrozilor cu caneluri perpendiculare pe direcția vitezei, diamantele – electrozilor cu caneluri paralele iar cercurile – electrozilor netezi tipici

Se observă clar dependența tensiunii de pătratul intensității câmpului electric. În plus, valorile tensiunii dezvoltate de electrozii cu caneluri radiale, perpendiculare pe direcția vitezei, reprezentate prin pătrate goale, sunt aproape duble față de cele obținute cu alte configurații ale suprafeței electrozilor.

3.4 Proprietățile fluidelor ER

Unul dintre scopurile primare ale cercetării-dezvoltării materialelor *ER* este obținerea unor fluide cu valori cât mai mari ale tensiunii mecanice induse prin câmpul electric aplicat. În acest scop, trebuie cunoscută comportarea elastică a fluidului *ER* în condițiile creșterii vâscozității. Pentru aceasta s-a studiat comportarea vâscoelastică a unui fluid *ER* supus la deformații oscilante prin forfecare.

3.4.1 Vâscoelasticitatea fluidelor ER

S-a utilizat o suspensie de 20 % BaTiO₃ în ulei siliconic care a fost studiată la temperatura ambiantă, utilizând drept electrozi mobili, cilindri concentrici (geometrie *Couette*) sau discuri paralele. Rezultatele obținute la

aplicarea simultană a unei deformății de forfecare sinusoidală la frecvența de 1 Hz și un câmp electric sinusoidal cu frecvența de 10 Hz, pot fi observate în **Fig.3.51**.

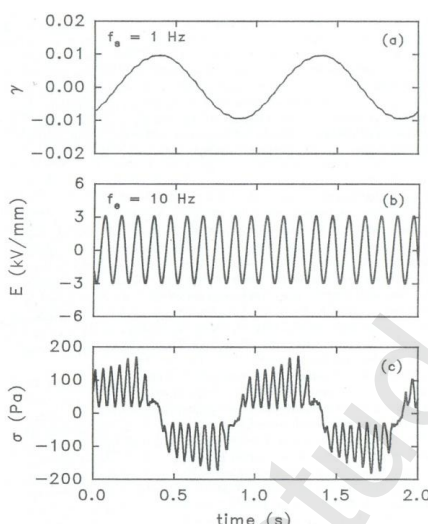


Fig.3.51 Variația în funcție de timp: (a) a deformăției de forfecare, γ ; (b) a câmpului electric, E ; (c) a tensiunii rezultante, σ , pentru o suspensie de 20 % BaTiO₃, cu geometrie Couette

Se constată că o porțiune din tensiunea de forfecare rezultantă este modulată la dublul frecvenței curentului aplicat, ca rezultat al interacțiunilor induse de câmp. În Fig.3.51(a), deformăția variază liniar (regim vâscoelastic liniar) doar pentru deformății foarte mici.

Fig.3.52 prezintă variațiile mărimilor absolute ale tensiunii totale de forfecare $|\sigma_1^{(tot)}|$ și ale porțiunii modulate electrostatic a tensiunii de forfecare $|\sigma_1^{(el)}|$ în funcție de amplitudinea tensiunii sinusoidale de forfecare, pentru diferite valori ale rădăcinii pătratică medii a câmpului electric.

Se observă că valoarea tensiunii totale este influențată de polarizarea particulelor (câmp electric) doar pentru a amplitudini ale deformăției de forfecare mai mari de 0.002. Variația liniară a tensiunii induse prin polarizare, la deformății mici, permite obținerea unui modul de elasticitate indus prin polarizare a cărui mărime, $|G_1^{(el)}|$ este definită ca $|\sigma_1^{(el)}|/d\gamma_{peak}$. Dependența de câmp a lui $|G_1^{(el)}|$ este comparată cu variația quadratică (cu E^2) în **Fig.3.53**.

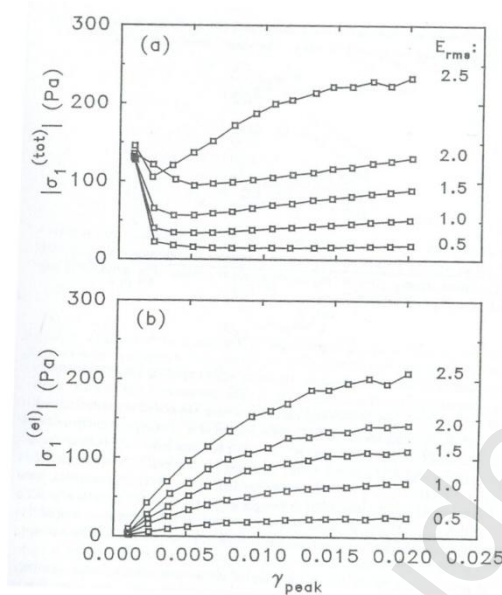


Fig.3.52 Dependența de amplitudinea de deformare a: (a) tensiunii totale; (b) contribuției electrostatice a tensiunii la amplitudinea de deformare, $f_s=2\text{Hz}$ și $f_e=20\text{Hz}$. Valorile rădăcinilor pătratice medii ale câmpului sunt în kV/mm

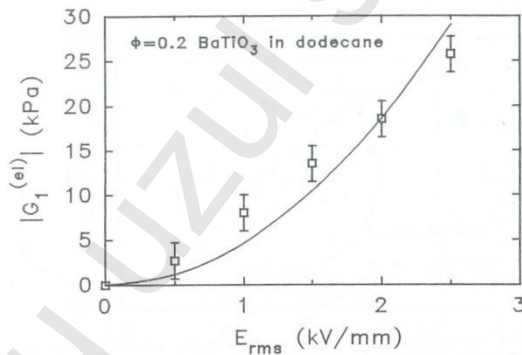


Fig.3.53 Variațiile contribuției electrostatice la modulul de forfecare în funcție de rădăcina pătrată medie a câmpului electric. Linia continuă reprezintă variația teoretică în funcție de E^2

Decalajul dintre valorile măsurate ale modulului și cele determinate de variația teoretică a acestuia, în funcție de E^2 , indică prezența unor efecte neliniare de conductivitate.

Deformația caracteristică la care se saturează componenta electrostatică a tensiunii este legată calitativ de intervalul adimensional de interacțiune dintre particule. Palierul din variația lui $|\sigma_1^{(el)}|$, observat la deformațiile cele mai mari, Fig.3.52(b), poate fi asociat cu contribuția indusă

prin polarizare la tensiunea statică de curgere, σ_y .

3.4.2 Proprietăți reologice statice ale fluidelor ER

În continuare sunt determinate proprietățile reologice ale unui fluid ER, în condițiile formării structurilor cu lanțurilor simple, duble și triple, precum și a rețelei tetragonale cu volum centrat, între doi electrozi plani.

Aplicarea unei tensiuni de forfecare se face prin deplasarea electrodului superior cu distanța δ , pe direcția x . Considerând că L este distanța dintre electrozi, deformarea de forfecare este δ/L .

A. Atunci când un lanț unic de 60 de particule este supus unei deformări de forfecare, se iau în considerație situațiile ilustrate în **Fig.3.54**. Se observă că lanțul înclinat, din Fig.3.54(a), are fiecare particulă deplasată în mod proporțional pe direcția x . În Fig.3.54(b), lanțul este rupt de la mijloc, distanța dintre cele două fragmente fiind cea a deplasării inițiale, δ .

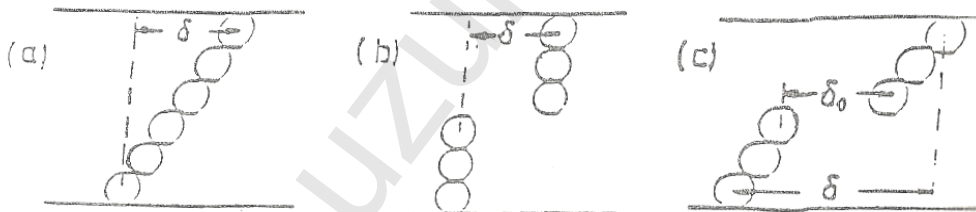


Fig.3.54 Comportarea unui lanț unic de particule supus la o deformare de forfecare:
(a) înclinat; (b) rupt; (c) rupt și înclinat

Pe de altă parte, lanțul simplu, rupt și înclinat, are părțile separate aflate la o distanță δ_0 mai mică decât forfecarea inițială δ , conform Fig.3.54(c). Odată cu creșterea distanței δ_0 , fragmentele rupte ale lanțului unic își pierd înclinarea.

Energiile dipolare ale lanțului unic înclinat (*En.: slanted*), înclinat și rupt sau pur-și-simplu-rupt (*En.: broken*) sunt notate cu $U_s(\delta)$, $U_{sb}(\delta)$ și respectiv $U_b(\delta)$. Variațiile acestor energii, în funcție de deformarea de forfecare, δ/L , sunt prezentate în **Fig.3.55**.

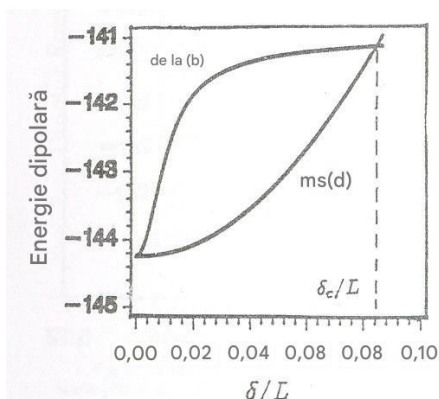


Fig.3.55 Energii dipolare ale lanțului unic înclinat de particule (u_s) și ale lanțului rupt (u_b), ambele cu câte 60 de particule. Energia este exprimată în $p^2/(\epsilon d^3)$

Se observă că $U_s(\delta) < U_b(\delta)$ până când δ atinge o valoare critică δ_c , unde curbele celor două energii se intersectează. Lanțul unic rupt și înclinat are o energie care poate fi interpolată între valorile corespunzătoare lanțului înclinat, $U_s(\delta)$ și cele ale lanțului rupt, $U_b(\delta)$.

Conform principiului minimizării energiei, rezultă că lanțul unic înclinat este preferat, din punct de vedere energetic, dacă deformarea de forfecare nu depășește δ_c/L . Totuși, la deformări de forfecare mai mari decât δ_c/L , lanțul unic rupt are energia liberă cea mai mică iar lanțul rupt și înclinat are energia mai mare decât cea a lanțului rupt și mai mică decât cea a lanțului înclinat. Deci formele lanțului unic, stabile din punct de vedere energetic, sunt „înclinat”, la $\delta < \delta_c$ și „rupt”, la $\delta > \delta_c$.

Dacă $\delta < \delta_c$, forța de reacție a lanțului unic este dată de energia lanțului înclinat:

$$\tau = -\partial U_s(\delta) / \partial \delta \quad (3.19)$$

Dacă $\delta > \delta_c$, forța de reacție a lanțului unic este dată de energia lanțului rupt:

$$\tau = -\partial U_b(\delta) / \partial \delta \quad (3.20)$$

Fig.3.56 prezintă variația forței de reacție a lanțului unic în funcție de deformarea de forfecare, δ/L .

Când $\delta < \delta_c$, lanțul înclinat dă o forță de reacție care variază aproape liniar cu δ/L . Când $\delta > \delta_c$, lanțul rupt, care este preferat din punct de vedere

energetic, produce o forță de reacție mult mai mică și aproape constantă. Unitatea de măsură a tensiunii de forfecare τ , din Fig.3.56, este $p^2/(\epsilon_f d^4)$, unde $d=2a$ este diametrul particulelor. Numărul de particule ale lanțului unic de lungime L este $N=L/d$.

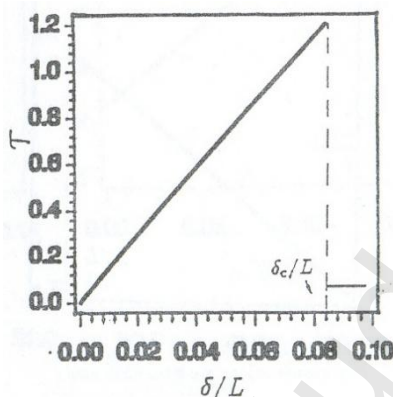


Fig.3.56 Variația forței de reacție a unui lanț unic de 60 de particule, în funcție de deformația de forfecare. Forța este exprimată în $p^2/(\epsilon_f d^4)$

Lanțul unic de particule își recuperează forma inițială, imediat ce tensiunea de forfecare este îndepărtată, dacă $\delta < \delta_c$. Atunci când $\delta > \delta_c$, lanțul se rupe și nu se mai poate reface în scurt timp. Din acest motiv, δ_c/L este definită drept limita de curgere. Se consideră că un lanț unic de particule este „de clasă A”, dacă particulele se extind de la un electrod la altul, ca în Fig.3.54(a).

Dacă un lanț de clasă A, este deplasat pe direcția z , cu o distanță egală cu raza sferei, se obține un lanț de clasă B. Un lanț de clasă A are L/d particule iar un lanț de clasă B are cu o particulă mai puțin și anume $L/d-1$ particule, din cauza deplasării lanțului cu o jumătate de diametru, pe direcția z .

B. În Fig.3.57 poate fi observat comportamentul unui lanț dublu de particule, compus din două lanțuri unice, unul de tip A și altul de tip B, împachetat compact cu primul. Fig.3.57(a) corespunde lanțului dublu înclinat, Fig.3.57(b) – lanțului rupt, iar Fig.3.57(c) – lanțului rupt și înclinat. Energiile $U_{b,s}(\delta)$ ale lanțului dublu de 119 (60+59) particule, variază la fel ca la cel unic.

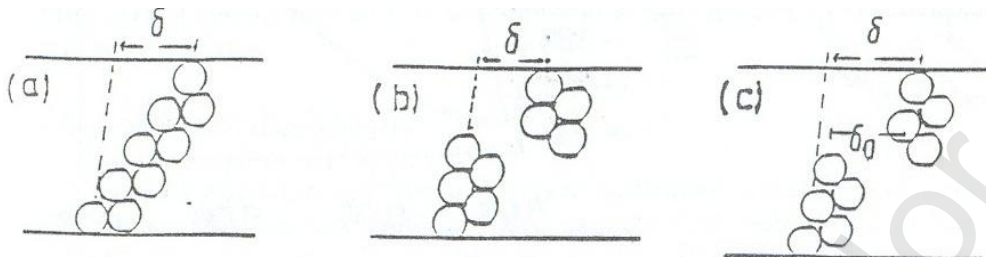


Fig.3.57 Comportarea unui lanț dublu de particule supus la o deformare de forfecare:
(a) înclinat; (b) rupt; (c) rupt și înclinat

C. Fig.3.58 redă comportarea unui lanț triplu, format din două lanțuri unice de *tip A* și dintr-un lanț unic de *tip B*, împachetate compact. Așadar, fie că este format din unul, două sau trei lanțuri, ansamblurile de particule se comportă în mod asemănător, în regim static, structurile înclinate fiind cele mai stabile deoarece au energiile libere cele mai mici.

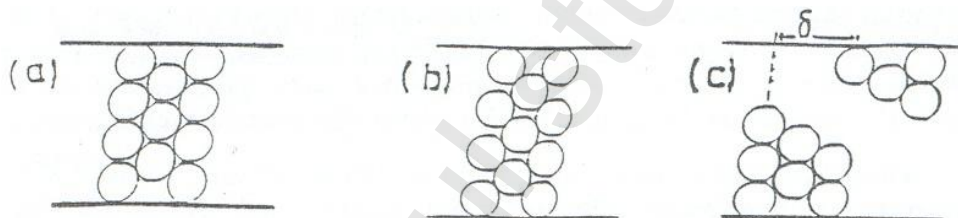


Fig.3.58 Comportarea unui lanț triplu de particule, supus la o deformare de forfecare:
(a) înclinat; (b) rupt; (c) rupt și înclinat

3.4.3 Determinarea parametrilor reologici ai fluidelor ER, cu vâscozimetru de rotație

Schema instalației de măsurare a parametrilor reologici ai fluidelor ER, cu vâscozimetru de rotație, este redată în **Fig.3.59**. Instalația conține sistemul de control al temperaturii, sursa de înaltă tensiune, și componente pentru măsurarea de precizie a curentului și tensiunii dintre electrozi.

Vâscozimetrelor de rotație li se impun următoarele condiții:

- izolarea electrică a elementelor de rotație care joacă rol de electrozi;
- ecranarea senzorilor și a circuitelor electronice față de semnalele de control al fluidului ER, în special atunci când aceste semnale sunt reprezentate prin tensiuni alternative de mare amplitudine (de ordinul

kV);

- izolarea electrică suplimentară a carcasei și aplicarea tensiunilor înalte numai după confirmarea stării de izolare;
- asigurarea unei uscări corespunzătoare (inclusiv prin pulverizare de gaz inert) pentru evitarea formării arcurilor electrice.

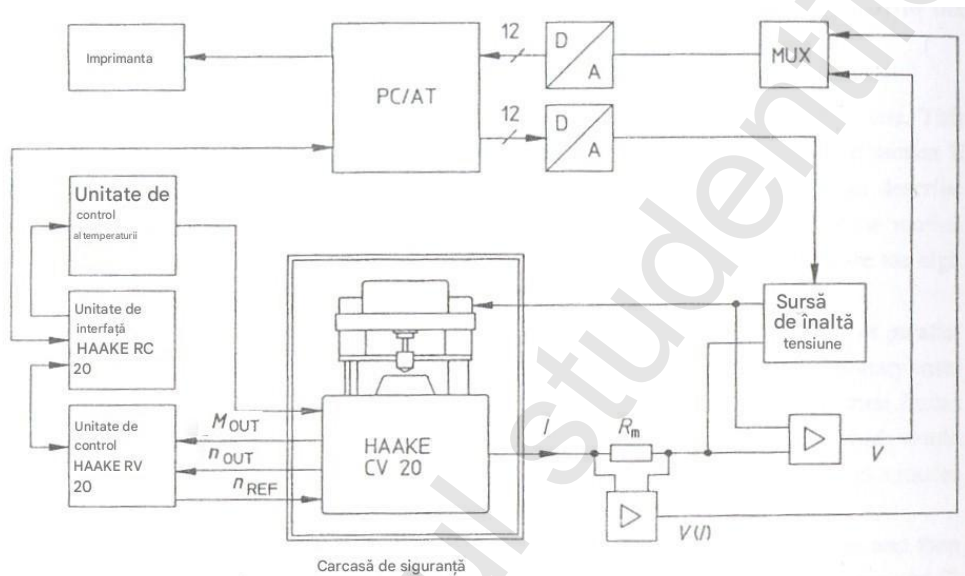


Fig.3.59 Schema stației de măsurare a fluidelor ER

Sursei de înaltă tensiune i se impune următoarele condiții:

- ❑ să poată să dezvolte o tensiune controlabilă până la amplitudinea de 5 kV, pentru un interstițiu tipic între electrozi de 1 mm;
- ❑ să poată produce atât curent continuu cât și curent alternativ, la frecvențe care să poată varia între 0 și 1 kHz.

Un exemplu de comportare dependentă de frecvență a unui fluid ER este prezentat sub forma curbelor de curgere din **Fig.3.60**.

Aceste rezultate au fost obținute cu ajutorul unor câmpuri de control sinusoidal, cu o rădăcină pătrată medie a intensității efective $E_{rms} = 2 \text{ kV/mm}$.

Pentru comparație, în Fig.3.60 au fost incluse și curbele obținute fără nici un câmp aplicat ($E = 0$), precum și cele obținute cu un câmp de curent continuu $E = 2 \text{ kV/mm}$ ($f = 0 \text{ Hz}$).

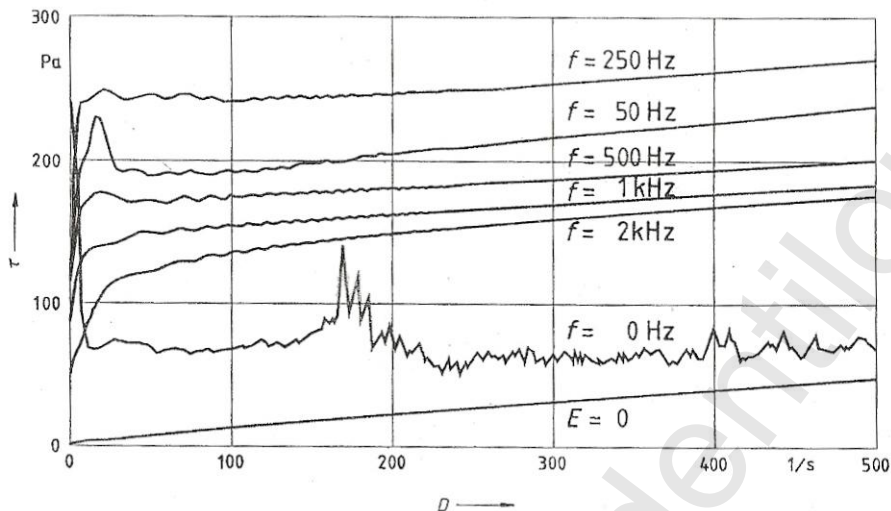


Fig.3.60 Curbe de curgere a unui fluid ER cu câmpuri sinusoidale de control, prezentând variația tensiunii de forfecare în funcție de viteza de forfecare

Măsurătorile au fost efectuate cu un vâscozimetru *HAAKE CV 20*, cu conformație cilindrică, la temperatura constantă de 25°C . Se observă că fluidul controlat prin curent continuu ($f = 0\text{ Hz}$), prezintă o variația nedorită și necontrolată a tensiunii de forfecare. Pe de altă parte, câmpurile de curent alternativ prezintă proprietăți corespunzătoare, fără a avea scăderi ale tensiunii de forfecare, nici măcar la viteze mari de forfecare. Se mai poate constata și că tensiunea de forfecare care poate fi dezvoltată, crește odată cu frecvența, până la 250 Hz , la care se obține o valoare maximă. Pentru frecvențe mai mari de 250 Hz , se constată scăderea tensiunii de forfecare dezvoltată de fluidul *ER*.

Efortul tehnic necesar producerii unor tensiuni alternative de formă sinusoidală, este mult mai intens decât cel necesar obținerii undelor de formă pătrată. Și componentele electronice de producere a undelor de formă pătrată sunt mai mici și mai ieftine. Din toate aceste motive, controlul fluidelor *ER* prin semnale cu undă de formă pătrată, poate juca un rol important în aplicațiile acestor fluide. De exemplu, amortizoarele auto, de tip bușă-suport pentru motor și sisteme de absorbție a șocurilor, realizează controlul vibrațiilor prin intermediul unor invertoare cu undă pătrată compactă, având transformatoare

de înaltă tensiune cuplate la fiecare amortizor. În acest concept de control divizat, circuitele inverter/ transformator pot fi alimentate de la o sursă de curent continuu, de mică tensiune.

Pe această bază, este util să se implementeze o undă de formă pătrată în plus, față de semnale de control de curent continuu și sinusoidal, pentru determinarea precisă a proprietăților fluidelor ER. Aceasta impune ca și sursa de înaltă tensiune să poată genera semnale de formă pătrată, a căror amplitudine, frecvență și lățime de puls a semnalului să poată fi controlate prin intermediul unui computer.

Curbele de curgere, care demonstrează influența variației lățimii pulsului asupra tensiunii de forfecare generată de un fluid ER, sunt prezentate în Fig.3.61.

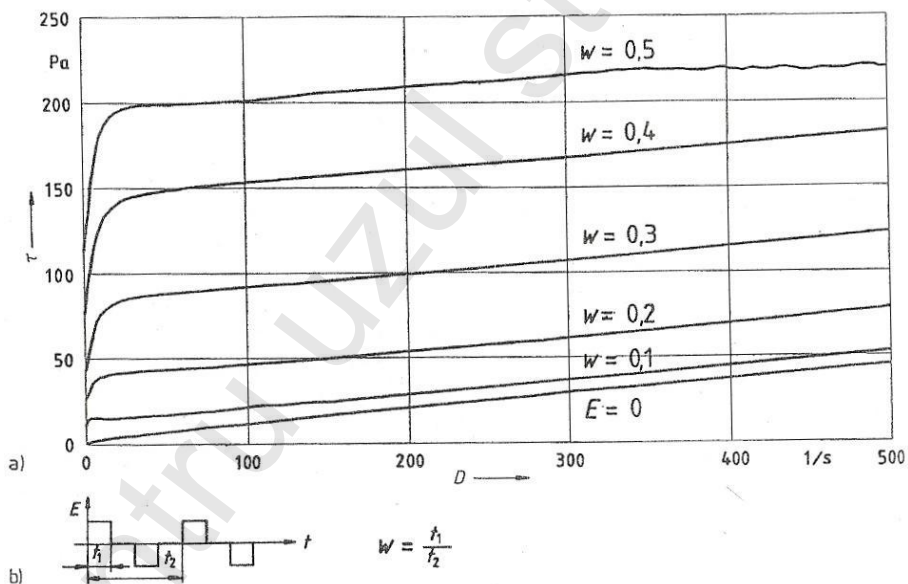


Fig.3.61 (a) Curbe de curgere a unui fluid ER, cu undă pătrată de control la diferite lățimi de puls; (b) definirea raportului de lățime a pulsului

Fluidul ER a fost controlat cu ajutorul unui semnal bipolar de câmp, cu undă de formă pătrată, având o amplitudine $E = 2 \text{ kV/mm}$ și o frecvență de 300 Hz. Au fost testate diferite rapoarte ale lățimii de puls. Raportul lățimii de puls, w , este definit drept raportul dintre lățimea pulsului t_1 și perioada pulsului

t_2 , conform Fig.3.61(b). Au fost aplicate aceleași condiții experimentale ca în Fig.3.60.

O comparație între curbe arată că cea mai mare valoare a tensiunii de forfecare este obținută în cazul raportului maxim al lățimii de puls, $w = 0.5$, pentru care lățimea pauzelor dintre pulsuri, este zero. La lățimi de puls mai mici (cărora le corespund lățimi mai mari ale pauzei), valorile tensiunii scad. Se observă că diferența dintre curba de curgere obținută la un raport de lățime de puls $w = 0.1$ și curba obținută fără aplicarea nici unui câmp electric, $E = 0$, este foarte mică.

Vâscozimetru *HAAKE CV 20* are viteza de forfecare controlată și folosește geometrie de tip *Couette* (cu electrozi cilindrici concentrici) la care cilindrul/placa interioară este condusă printr-un motor de curent continuu. Viteza de rotație este măsurată cu ajutorul unui taho-generator, localizat împreună cu motorul de antrenare, în carcasa inferioară.

Sistemul de măsurare a cuplului este instalat în capul sistemului de măsurare, care este reglabil, pe direcție verticală. Cuplul este determinat prin monitorizarea răscirii elementului de torsiune, cu ajutorul unui *Transformator Diferențial Variabil Liniar (LVDT)*.

Sistemul de măsurare trebuie izolat electric astfel încât să poată fi aplicată o diferență de potențial. Cel mai simplu mod de a realiza acest lucru este de a izola elementul de torsiune și clema de montaj față de sistemul de măsurare a cuplului și de carcasă.

Fig.3.62 prezintă o secțiune transversală prin capul sistemului de măsurare, în care izolația electrică din plastic este dublu hașurată. Miezul transformatorului diferențial este menținut printr-un braț izolator din plastic. Transformatorul *LVDT* și planșa de circuit care conține amplificatorul de semnal, sunt despărțite printr-un strat izolator. În cazul în care nu se aplică măsuri speciale de ecranare, în vâscozimetrele cu cuplu inductiv și senzori de

viteză rotațională, pot apare interferențe când se aplică tensiuni de mare amplitudine pentru controlul fluidelor ER. **Fig.3.63** prezintă variațiile tensiunii în cazul unei unde de formă sinusoidală, cu frecvență de 500 Hz și amplitudine de 4 kV.

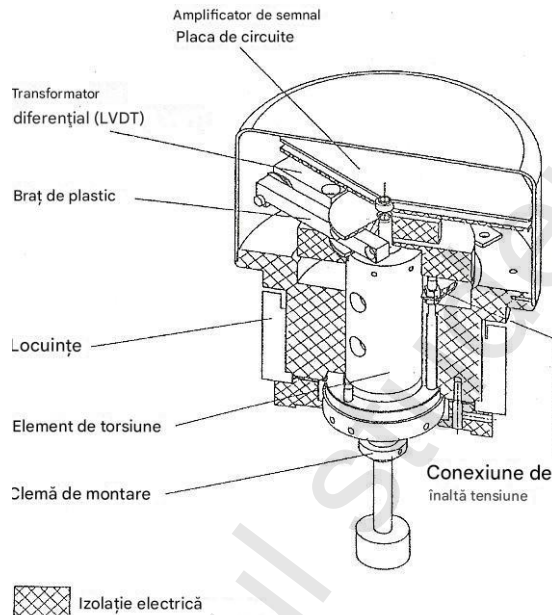


Fig.3.62 Vedere în secțiune a capului sistemului izolat de măsurare HAAKE CV20

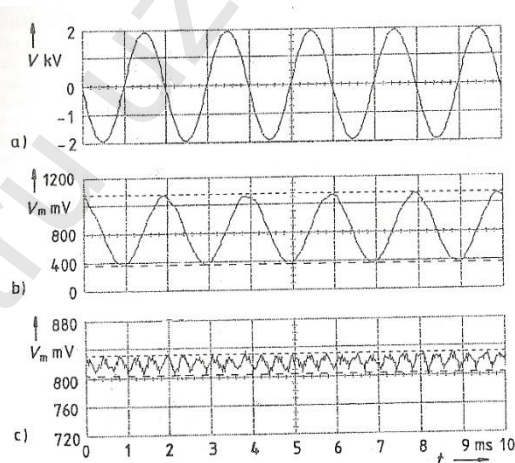


Fig.3.63 Variația semnalelor de formă sinusoidală: (a) tensiune sinusoidală de alimentare a fluidelor ER; (b) semnal neecranat al cuplului de forță; (c) semnal ecranat al cuplului

Semnalul cuplului, V_m , este compus dintr-o componentă de curent continuu și o tensiune sinusoidală suprapusă, cu o amplitudine de 987.7 mV,

în conformitate cu Fig.3.63(b), unde este prezentat semnalul neecranat. După implementarea ecranării carcasei legate la pământ, se obține semnalul din Fig.3.63(c), unde nu se mai observă perturbația creată de curentul de control al fluidului *ER* și provenind de la amplificatorul de semnal al *LVDT*. Se observă doar o tensiune alternativă cu frecvența de 2,77 kHz și amplitudine de 28 mV.

Fig.3.64 prezintă variația semnalelor în cazul unei unde de formă pătrată. S-a utilizat un semnal de formă pătrată cu frecvența de 50 Hz și amplitudine de 4 kV, conform Fig.3.64(a). Pe semnalul neecranat, din Fig.3.64(b), se observă apariția unor maxime la capetele semnalului pătrat de alimentare, cu o amplitudine de 800 mV. Semnalul ecranat din Fig.3.64(c) nu mai prezintă maxime, amplitudinea scăzând la valoarea de 28 mV, aceeași ca în Fig.3.63(c).

Perturbațiile de semnal observate în Fig.3.63(b) și 3.64(b) sunt cauzate de cuplarea (interferența) electro-magnetică dintre semnalul de control al fluidului *ER* și dispozitivul *LVDT* de măsurare a cuplului de forță. Această interferență a fost considerabil redusă prin introducerea plăcilor de ecranare în carcasa sistemului de măsurare.

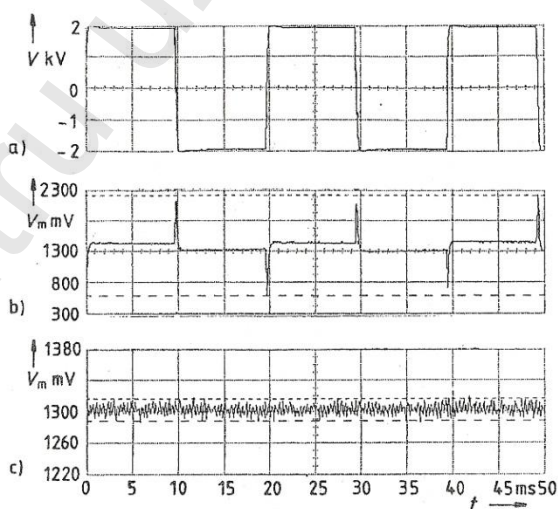


Fig.3.64 Variația semnalelor de formă pătrată: a) tensiune pătrată de alimentare a fluidelor *ER*; (b) semnal neecranat al cuplului de forță; (c) semnal ecranat al cuplului

Proprietățile reologice ale fluidelor *ER* depind în mod neliniar de un număr mare de factori. Din acest motiv comparația între diferite tipuri de fluide *ER* este posibilă doar dacă se compară valorile caracteristice obținute în aceleași condiții de măsurare.

Din cauză că nu există specificații standardizate pentru determinarea valorilor caracteristice ale fluidelor *ER*, în prezent se folosesc drept termene de comparație doar caracteristicile specificate de producători.

Fig.3.65 prezintă structura unui amortizor dinamic cu fluid *ER*. Funcționează la forfecare și conține o masă capabilă să oscileze atunci când este cuplată prin intermediul unor resorturi elastice la carcasa plină de fluid *ER*.

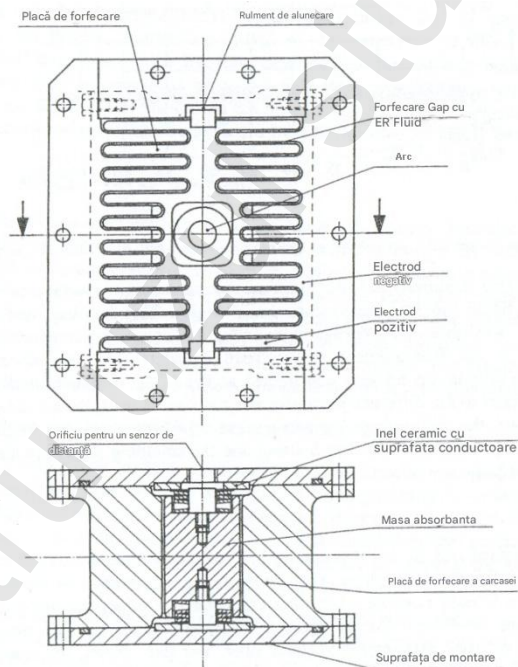


Fig.3.65 Construcția unui amortizor cu fluid *ER*

Fluidul *ER* este un component de amortizare controlabil care permite reglajul amortizorului. În felul acesta, amortizorul poate fi adaptat la structura care trebuie amortizată, chiar și în timpul schimbării comportamentului vibratoriu al acesteia.

Întregul circuit de control al amortizorului, incluzând serpentina de forfecare și sursa de înaltă tensiune, trebuie conduse de către un controler.

3.4.4 Influența mărimii particulelor asupra rezistenței dinamice a fluidelor ER

Atunci când intervin atât forțe de polarizare cât și forțe cauzate de vâscozitatea materialului, rezistența la forfecare a unui fluid ER este dată de:

$$\tau = \tau_E + \eta_s \dot{\gamma} \quad (3.21)$$

unde: τ_E este tensiunea de forfecare produsă de polarizare,

η_s este vâscozitatea suspensiei la câmp electric zero,

$\dot{\gamma}$ este viteza de forfecare.

Vâscozitatea relativă a unui fluid ER activ este descrisă prin *numărul lui Mason*:

$$Mn = \frac{\text{forța vâscoasă}}{\text{forța de polarizare}} = \frac{\eta_s \dot{\gamma}}{2\varepsilon_0 K_f (\beta E)^2} \quad (3.22)$$

în care:

$\eta_a = \tau / \dot{\gamma}$ este vâscozitatea aparentă,

ε_0 este permitivitatea interstițiului,

K_f este permitivitatea relativă a lichidului purtător,

$\beta = (K_p - K_f) / (K_p + 2K_f)$ parametrul nepotrivirii dielectrice,

K_p este permitivitatea relativă a particulei,

E este câmpul electric aplicat.

Din ecuația (3.21) rezultă că rezistența la forfecare este determinată de:

- forța de polarizare, la viteze de forfecare mici $\rightarrow$ regim cvasi-static, caracterizat prin formarea lanțurilor de particule, aliniate după direcția câmpului electric aplicat, care se rup și se reformează la τ_E ;

- forța vâscoasă, la viteze de forfecare mari $\rightarrow$ regim dinamic, caracterizat prin dezorganizarea lanțurilor de particule [9].

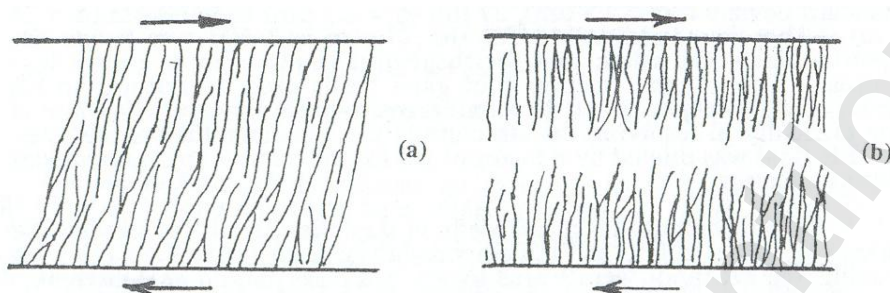


Fig.3.66 Schema unei structuri tipice a unui fluid ER supus la forfecare: (a) viteză mică de forfecare; (b) viteza mare de forfecare

Fig.3.66(a) este caracteristică regimului cvasi-static, în care tensiunea de forfecare scade la creșterea vitezei de deformare, din cauza *reducerii timpului* disponibil pentru *refacerea lanțurilor rupte*. **Fig.3.66(b)** corespunde regimului dinamic și reprezintă regiuni de particule împachetate dens, în vecinătatea electrozilor, separate prin regiuni mai diluate, de fluid purtător.

Pentru determinarea efectului dimensiunii particulelor, asupra proprietăților reologice ale unui fluid ER, s-a utilizat un amestec de sfere de sticlă, cu dimensiuni de 6-100 μm , în ulei siliconic (cu greutatea specifică 0.97, permitivitatea relativă de 2.6 și vâscozitatea 0.05 Pa·s, la 25 $^{\circ}\text{C}$). Variabilele independente au fost: tensiunea electrică, care a putut fi variată între zero și 4 kV/mm și viteza de forfecare, care a fost cuprinsă în intervalul 2-1000 s^{-1} .

În experimente, s-au utilizat particule de sticlă cu diametrele de $6 \pm 2.5 \mu\text{m}$; $27 \pm 7.7 \mu\text{m}$ și $100 \pm 24 \mu\text{m}$. În toate cazurile, fracțiunea de volum a particulelor a fost menținută la 20 % [9].

Fig.3.67 prezintă permitivitatea relativă a suspensiei, K_s , în funcție de câmpul electric, pentru cele trei mărimi de particule. Se observă că (în special în cazul particulelor celor mai mari) K_s crește la început puternic, odată cu câmpul electric, până la aprox. 1 kV/mm și apoi variază doar foarte puțin. Acesta dovedește că structura fibroasă cvasi-statică rămâne aproximativ

constantă pentru $E \geq 1 \text{ kV/mm}$.

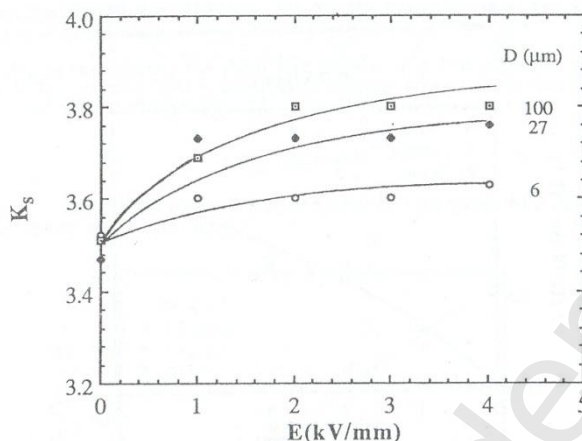


Fig.3.67 Permitivitate relativă, $K_s^{d.c.}$ a fluidelor ER în funcție de intensitatea inițială a câmpului electric pentru cele trei dimensiuni de particule [9]

Deși inițial toate particulele aveau aceeași permitivitate (ceea ce dovedește că K_s este independentă de mărimea particulei la câmp electric zero), după aplicarea câmpului, se constată o creștere ușoară a permitivității, odată cu creșterea atât a intensității câmpului cât și a diametrului particulei.

Conductivitatea uleiului silionic a fost aprox. $10^{-13} \text{ S (Siemens) cm}^{-1}$, pentru intervalul de valori ale câmpului electric utilizat în experimente. Graficele variației densității de curent, J , și ale conductivității suspensiilor, σ , în funcție de intensitatea câmpului electric, sunt prezentate în **Fig. 3.68**.

Este evident că ambele cresc odată cu câmpul electric, independent de mărimea particulelor. În plus, σ_s este cam cu trei ordine de mărime mai mare decât σ_p , ceea ce arată că conductivitatea particulelor este mult mai mare decât cea a fluidului purtător, în prezența unor câmpuri electrice intense. Adică $\sigma_p \gg \sigma_f$, la $E \geq 1 \text{ kV/mm}$.

Variația tensiunii de forfecare, τ , în funcție de deformația produsă prin forfecare, γ , pentru șase valori ale vitezei de forfecare, $\dot{\gamma}$, este prezentată în **Fig. 3.69**.

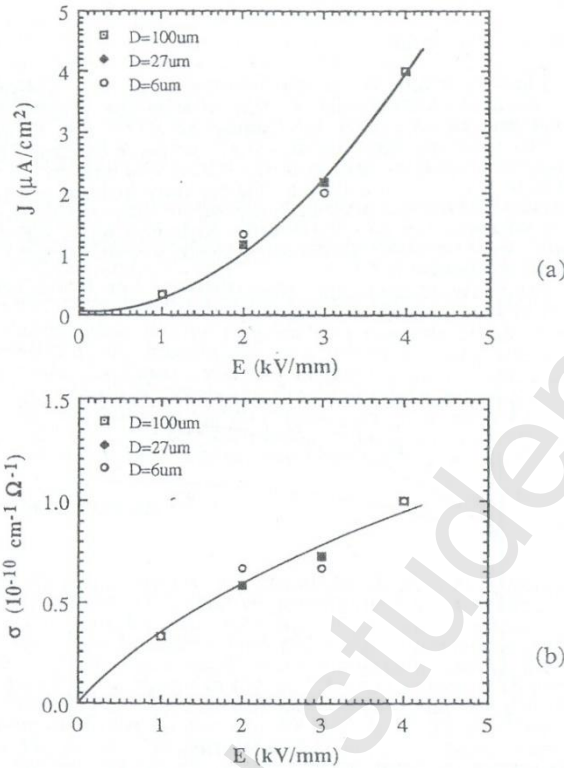


Fig.3.68 Efectul câmpului electric asupra: (a) densității de curent, b) conductivității suspensiilor care conțin trei mărimi de pulberi de sticlă în ulei siliconic [9]

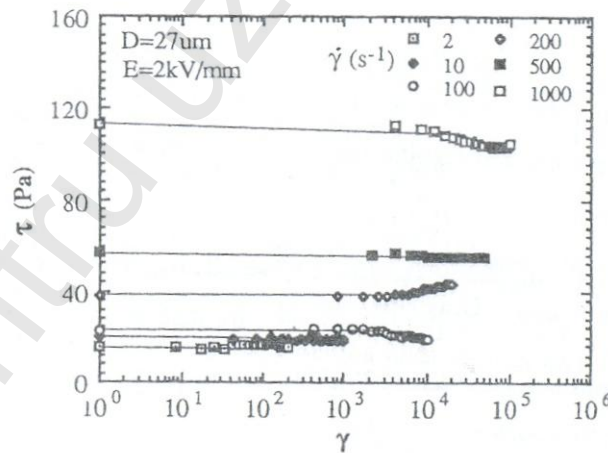


Fig.3.69 Tensiune de forfecare, τ , în funcție de deformația prin forfecare, γ , la $E=2 \text{ kV/mm}$, pentru mai multe viteze de forfecare a fluidului ER cu particule de dimensiunea $27 \mu\text{m}$

La fiecare viteză de deformare, tensiunea de forfecare a crescut rapid odată cu deformația până la $\gamma \approx 1$ și a rămas apoi aproximativ constantă, la

creșterea ulterioară a deformației. În felul acesta, se obține o așa-numită *stare stabilă*, caracterizată printr-o tensiune de palier, τ , care depinde de:

- viteza de forfecare, $\dot{\gamma}$,
- câmpul electric, E
- mărimea particulei, D [9].

Efectele lui $\dot{\gamma}$, E și D asupra lui τ au fost analizate în funcție de efectul asupra componentei de polarizare, τ_E , și a componentei vâscoase, $\tau_{vis} = \eta_s \dot{\gamma}$, conform ecuației (3.21).

3.5 Aplicațiile fluidelor ER

Principalele cerințe impuse aplicațiilor industriale, exceptând profitabilitatea, sunt:

- creșterea vitezei de operare;
- lărgirea flexibilității.

Aplicațiile electromagnetice (ex.: motoarele electrice) îndeplinesc cu succes condiția de flexibilitate însă au deficiențe din punct de vedere al vitezei de operare, din cauza limitărilor legate de generarea și stabilizarea câmpurilor electro-magnetice precum și de prezența fenomenelor de interferență dintre acestea.

În acest context, introducerea aplicațiilor bazate pe efectul electro-reologic prezintă un potențial deosebit pentru mărirea vitezei de funcționare, în condițiile păstrării unei flexibilități acceptabile. Principalele aplicații ale materialelor *ER* sunt:

1. – dispozitive controlabile tip:
 - a. supapă,
 - b. suport pentru motoare și mecanisme;
 - c. frână;
 - d. ambreiaj;

- e. amortizor, etc.
- 2. – structuri adaptive tip:
 - a. poduri;
 - b. blocuri, etc.

Supapele controlabile au fost descoperite și cercetate chiar de către W.M. Winslow. Atât supapele cât și ambreiajele:

- au configurație cu electrod fix, cu distanța dintre plăci de ordinul a 1 mm și diferența de potențial de ordinul a 1 kV;
- sunt închise la aplicarea câmpului electric;
- se deschid la îndepărtarea câmpului electric;
- permit controlul debitului și al pierderii de presiune, ce poate atinge circa 6.9 MPa, fără a necesita piese de mișcare;
- timpii de reacție sunt sub 1 ms.

Suportii controlabili pentru motoare și mecanisme sunt cunoscuți din 1987.

3.5.1 Ambreiaje de mare turație

Ambreiajele ER, brevetate în Hong Kong începând cu 2005, cumulează viteza de operare cu posibilitatea unui control precis al parametrilor de funcționare. Un sistem de ambreiaje pentru obținerea unui mecanism de mare viteză, cu transmitere alternativă a mișcării, este prezentat în **Fig.3.70**.

Sistemul conține două ambreiaje ER cilindrice, montate vertical, A și B, pentru că, în felul acesta, sunt evitate lagărele și etanșările. Rotoarele de intrare (1) ale ambelor ambreiaje sunt rotite cu viteză constantă în sensuri opuse de către motoarele lor proprii de antrenare, cu turație variabilă.

Inerția rotoarelor de intrare este mult mai mare decât inierția cumutată a rotoarelor de ieșire (3), a roților de curea (4) și a curelei (5). Rotoarele de ieșire (3) sunt confecționate din plastic, fiind placate cu metal doar pe

porțiunile conductive ale electrodului de înaltă tensiune. Pentru siguranță, rotorul de intrare este împământat. Rotorul de ieșire este legat la roata de curea care antrenează curea.

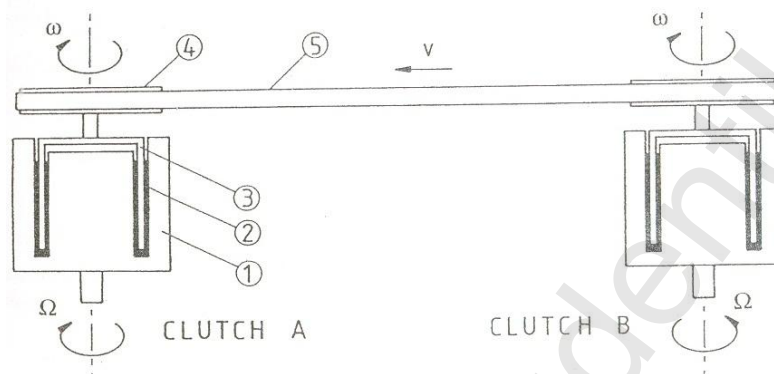


Fig.3.70 Vedere schematică a mecanismului ER de transmitere alternantă de mare viteză, cu ambreiajul A cuplat: 1-rotor de intrare; 2-fluid ER; 3-rotor de ieșire; 4-roată de curea; 5-curea

Valorile tipice ale parametrilor geometrici și proprietăților fluidului sunt: Pentru suprafața interioară a rotorului de ieșire:

- Diametrul $d_i = 47 \text{ mm}$;
- Interstițiul dintre electrozi $h_i = 0.5 \text{ mm}$;
- Lungimea activă d.p.d.v. ER $l_{ei} = 30 \text{ mm}$;
- Lungimea activă d.p.d.v. vâcos $l_{vi} = 30 \text{ mm}$;

Pentru suprafața exterioară a rotorului de ieșire:

- Diametrul $d_o = 51 \text{ mm}$;
- Interstițiul dintre electrozi $h_o = 0.5 \text{ mm}$;
- Lungimea activă d.p.d.v. ER $l_{eo} = 30 \text{ mm}$;
- Lungimea activă d.p.d.v. vâcos $l_{vo} = 40 \text{ mm}$;
- Raza efectivă a fuliei $r = 39.55 \text{ mm}$;
- Viteza constantă a curelei $v = 5 \text{ m/s}$;
- Viteza unghiulară a rotorului de intrare $\Omega = 1207 \text{ rot. /min}$
- Momentul de inerție al ansamblului rotor de ieșire-fulie

$$I = 3,83 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$$

- Masa curelei $m = 16$ g;
- Tensiunea de forfecare ER a fluidului $\tau_e = 10$ kPa;
- Vâscozitatea fluidului $\mu = 100$ m Pa s

Ciclul de transmitere periodică este descris în **Fig.3.71** și este produs prin activarea alternativă a ambreiajelor A și B.



Porțiune din mișcarea centurii	Viteza curelei	Ambreiajul A		Ambreiajul B	
		Energizat	Alunecarea	Energizat	Alunecarea
0 până la 1 viteză constantă	$-u$	Nu	Da	Da	Nu
1-A pornit, B oprit	$-u$	Da	Da	Nu	Nu
1 la 2 - încetinirea	$-u \leq v \leq 0$	Da	Da	Nu	Da
2 - oprit	0	Da	Da	Nu	Da
2 până la 3 accelerând	$0 \leq v \leq u$	Da	Da	Nu	Da
3 până la 4 viteză constantă	u	Da	Nu	Nu	Da
4 - A oprit, B pornit	u	Nu	Nu	Da	Da
4 până la 5 - încetinirea	$u \geq v \geq 0$	Nu	Da	Da	Da
5 - oprit	0	Nu	Da	Da	Da
5 până la 6 accelerând	$0 \leq v \leq -u$	Nu	Da	Da	Da
6 la 0 viteză constantă	$-u$	Nu	Da	Da	Nu

Fig.3.71 Ilustrarea unui ciclu de mișcare periodică reciprocă, prezentând mecanismul cu două ambreiaje, văzut de sus

Parametrii care descriu ciclul de mișcare periodică, în conformitate cu Fig.3.71, sunt:

- u – viteza constantă de transport a curelei;
- s_u – distanța de transport la viteză constantă;
- s_s – distanța de oprire;
- s_r – distanța de rulare;
- l_s – distanța de transport;
- t_u – durata de timp la viteză constantă;

t_s – durata de oprire;

t_r – durata de rulare

t_{tr} – durata totală defuncționare

t_c – durata ciclului

Relațiile dintre parametri sunt:

$$l_s = s_r + s_u + s_s$$

$$t_{tr} = t_s + t_r \quad (3.23)$$

$$t_c = 2(t_r + t_u + t_s)$$

Diagrama cinematică a celor două rotoare de ieșire, împreună cu roțile de curea asociate și cu cureaua, este ilustrată în **Fig.3.72**, în care ambreiajul A este activat iar ambreiajul B este oprit.

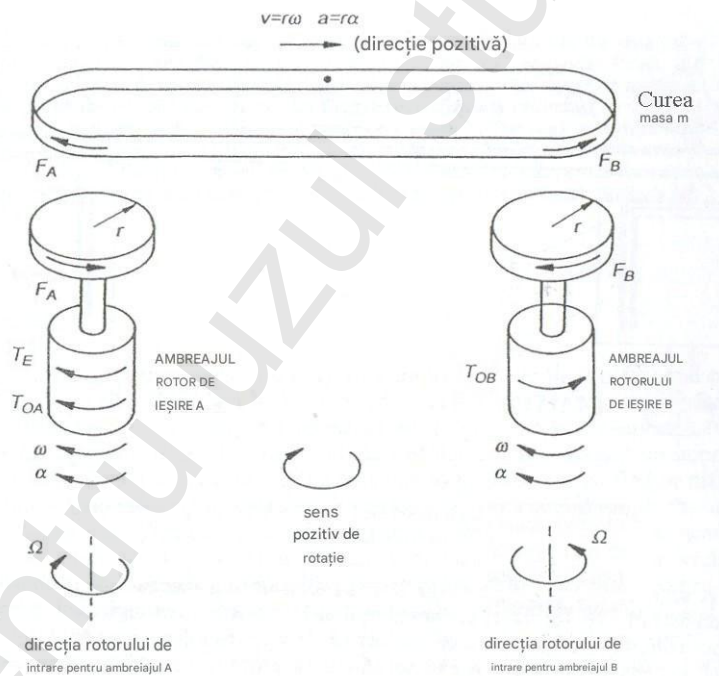


Fig.3.72 Diagrame cinematische ale mecanismului de transmitere alternativă reciprocă (ambreiajul A activat, ambreiajul B oprit)

Parametrii de mișcare a curelei (deplasarea s , viteza v și accelerația a) sunt legați de parametrii mișcării unghiulare a roților de curea/rotoarelor de ieșire (rotația θ , viteza unghiulară ω și accelerația α) prin:

$$s = r\theta; v = r\omega \text{ și } a = r\alpha \quad (3.24)$$

unde:

r este raza efectivă a roții de curea,

s și θ sunt zero în poziția liniei centrale O , din Fig.3.71, atunci când timpul t este zero.

Considerând activarea ambreiajului A , cuplul de forțe ER de pe rotorul de ieșire, este:

$$T_e = \tau_e(\pi d_o l_{eo}) \frac{d_o}{2} + \tau_e(\pi d_i l_{ei}) \frac{d_i}{2} \quad (3.25)$$

unde:

τ_e este tensiunea ER de forfecare,

d_o și d_i sunt diametrele suprafețelor exterioare și interioare ale rotorului de ieșire,

l_{eo} și l_{ei} sunt lungimile active d.p.d.v. ER ale suprafețelor de mai sus, toate fiind legate de ambreiajul A .

Cuplul vâscos T_{OA} de la rotorul de ieșire al ambreiajului A , este dat de:

$$T_{OA} = \mu \dot{\gamma}_{oA}(\pi d_o l_{vo}) \frac{d_o}{2} + \mu \dot{\gamma}_{iA}(\pi d_i l_{vi}) \frac{d_i}{2} \quad (3.25)$$

în care:

μ este vâscozitatea fluidului,

$\dot{\gamma}_{oA}$ și $\dot{\gamma}_{iA}$ sunt vitezele de forfecare de pe suprafața exterioară și respectiv interioară a rotorului de ieșire,

l_{vo} și l_{vi} sunt lungimile active d.p.d.v. vâscos, corespunzătoare suprafețelor de mai sus. Se consideră că vitezele forfecare sunt date de:

$$\dot{\gamma}_{oA} = \frac{(\Omega - \omega) \frac{d_o}{2}}{h_o} \text{ și } \dot{\gamma}_{iA} = \frac{(\Omega - \omega) \frac{d_i}{2}}{h_i} \quad (3.26)$$

unde:

Ω este viteza unghiulară a rotoarelor de intrare,

h_o și h_i sunt interstițiile radiale exterioare și respectiv interioare dintre rotoarele de intrare și cele de ieșire,

ω este viteza unghiulară a rotoarelor de ieșire la momentul generic de timp t . Introducând relațiile (3.26) în (3.25), se obține:

$$T_{oA} = \pi\mu \left(\frac{l_{vo}d_o^3}{4h_o} + \frac{l_{vi}d_i^3}{4h_i} \right) (\Omega - \omega) \quad (3.27)$$

Dacă se aplică legea a doua a lui *Newton* la rotorul de ieșire a ambreiajului A , împreună cu roata sa de curea (fulie), se obține:

$$T_e + T_{oA} - F_A r = I\alpha \quad (3.28)$$

în care:

F_A este forța de frecare dintre fulia A și curea,

α este accelerația,

I este momentul de inerție al ansamblului rotor de ieșire-fulie.

Acum se consideră ambreiajul B , care nu este activat. Cuplul vâscos T_{oB} , de pe rotorul său de ieșire este:

$$T_{oB} = \mu\dot{\gamma}_{oB}(\pi d_o l_{vo}) \frac{d_o}{2} + \mu\dot{\gamma}_{iB}(\pi d_i l_{vi}) \frac{d_i}{2} \quad (3.29)$$

în care:

vitezele de forfecare $\dot{\gamma}_{oB}$ și $\dot{\gamma}_{iB}$ pe de suprafața exterioară și respectiv interioară a rotorului de ieșire sunt date de:

$$\dot{\gamma}_{oB} = \frac{(\Omega - \omega) \frac{d_o}{2}}{h_o} \text{ și } \dot{\gamma}_{iB} = \frac{(\Omega - \omega) \frac{d_i}{2}}{h_i} \quad (3.30)$$

Introducând (3.30) în (3.29) se obține:

$$T_{oB} = \pi\mu \left(\frac{l_{vo}d_o^3}{4h_o} + \frac{l_{vi}d_i^3}{4h_i} \right) (\Omega - \omega) \quad (3.31)$$

Dacă se aplică legea a doua a lui *Newton* la rotorul de ieșire a ambreiajului B , împreună cu roata sa de curea (fulie), se obține:

$$F_B r - T_{oB} = I\alpha \quad (3.32)$$

în care:

F_B este forța de frecare dintre fulie și curea. Dacă se ia în considerație cureaua și se aplică legea a doua a lui *Newton*, se obține:

$$F_A - F_B = ma \quad (3.33)$$

unde:

m este masa curelei. Dacă se ține cont de relațiile (3.24) se obține:

$$F_A - F_B = mr\alpha \quad (3.34)$$

Combinând ecuațiile (3.28), (3.32) și (3.34) rezultă:

$$T_e + T_{oA} - T_{oB} = (2I + mr^2)\alpha \quad (3.35)$$

Combinând ecuațiile (3.25), (3.27), (3.31) și (3.35) rezultă:

$$\pi\tau_e \left(\frac{d_0^2 l_{eo}}{2} + \frac{d_i^2 l_{ei}}{2} \right) - \pi\mu\omega \left(\frac{l_{vo}d_0^3}{2h_0} + \frac{l_{vi}d_i^3}{2h_i} \right) = (2I + mr^2)\alpha \quad (3.36)$$

însă $\alpha = d\omega/dt$ și atunci:

$$dt = \frac{(2I + mr^2)d\omega}{\left[\frac{\pi\tau_e}{2}(d_0^2 l_{eo} + d_i^2 l_{ei}) - \frac{\pi\mu\omega}{2} \left(\frac{l_{vo}d_0^3}{h_0} + \frac{l_{vi}d_i^3}{h_i} \right) \right]} \quad (3.37)$$

Ecuația (3.37) este ecuația diferențială de bază care definește funcționarea mecanismului de ambreiaje din momentul în care ambreiajul A este activat (punctul 1 de pe Fig.3.71) până în momentul când nu se mai produce nici o alunecare în ambreiajul A (punctul 3 din Fig.3.71).

O ecuația similară poate fi determinată pentru a defini funcționarea mecanismului atunci când ambreiajul B este activat (din punctul 4 până în punctul 6 din Fig.3.71). Între punctele 6 și 1 și 3 și 4 mișcarea se produce doar la viteză constantă. Pentru experimente s-a monitorizat durata totală de funcționare, t_{tr} , în raport cu care s-au analizat efectele variației atât a parametrilor geometrici cât și a parametrilor de fluid.

Efectele parametrilor geometrici au constat în creșterea lui t_{tr} odată cu factorul de reducere a inerției și cu raza fuliei, dar și scăderea lui t_{tr} la creșterea lungimii rotorului.

Efectele principalilor parametri ai fluidului – tensiunea ER și vâscozitatea – asupra duratei totale de funcționare, sunt redate în Fig.3.73 și 3.74.

Fig.3.73 arată o scădere a lui t_{tr} care însoțește atât creșterea tensiunii de forfecare ER , τ_e , cât și scăderea vâscozității, μ .

Se observă că efectul vâscozității asupra duratei totale de funcționare devine neglijabil, odată cu creșterea tensiunii de forfecare ER . Însă la tensiuni reduse, efectul vâscozității devine semnificativ. Se observă că există o *limită a tensiunii* sub care curbele devin aproape verticale, ceea ce indică o creștere asimptotică a duratei totale de funcționare. Acest lucru indică *imposibilitatea funcționării mecanismului de ambreiaje*.

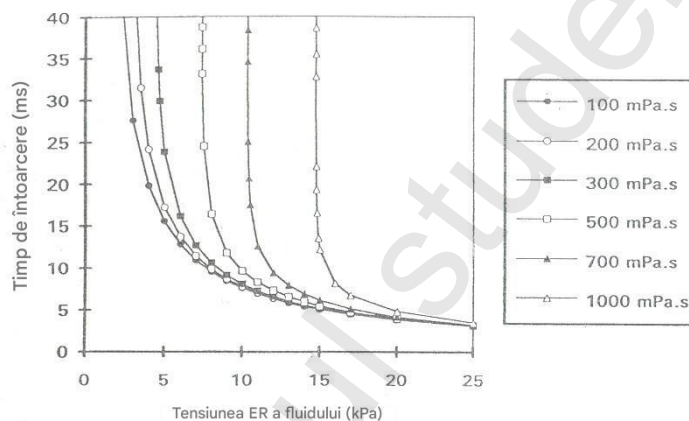


Fig.3.73 Efelul tensiunii de forfecare ER și al vâscozității fluidului asupra duratei ciclului

Pentru ilustrarea regiunilor de vâscozitate și tensiune de forfecare, în care este permisă sau nu funcționarea mecanismului de ambreiaje, s-a trasat în **Fig.3.74(a)**, variația tensiunii de forfecare în funcție de vâscozitate.

Un fluid ER cu tensiune de forfecare mare impune mărirea duratei de funcționare, ceea ce impune, la rândul său, mărirea puterii necesare funcționării și creșterea gradului de încălzire al fluidului, ceea ce constituie efecte inddezirabile. Pentru a reduce cuplul vâscos la un fluid dat, este necesar mărirea interstițiilor inter-electrod h_o și h_i .

Este necesară creșterea tensiunii aplicate fluidului pentru menținerea cuplului ER în limite acceptabile, ceea ce împiedică creșterea exagerată a interstițiilor. **Fig.3.74(b)** prezintă efectele măririi interstițiilor, de la 0.5 mm la

1 mm, asupra duratei de funcționare.

Efectul este semnificativ mai ales în cazul vâscozităților mari, când mecanismul poate funcționa doar cu interstiții mai mari. La vâscozități mai mici, se constată că durata de funcționare nu mai este influențată de mărimea interstițiului, însă rămân efectele reducerii consumului de putere și a încălzirii fluidului, care sunt benefice.

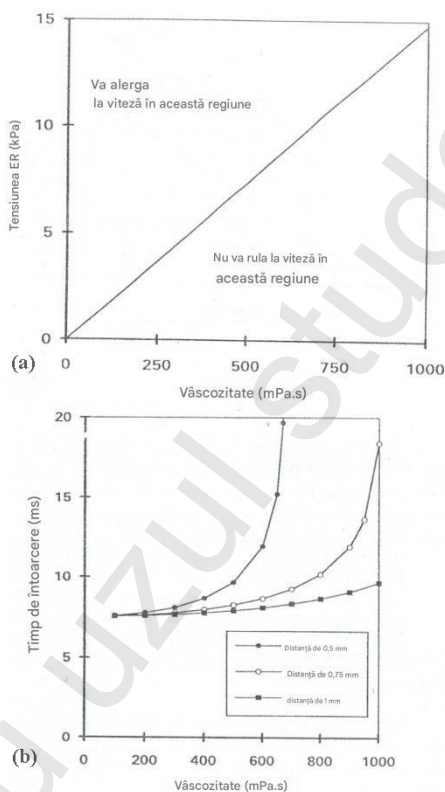


Fig.3.74 Efectele vâscozității: (a) asupra tensiunii dezvoltate prin efect *ER*, cu indicarea regiunilor de funcționare a mecanismului la o viteză a curelei de 5 m/s; (b) asupra duratei ciclului, la diverse valori ale spațiului inter-electrod

3.5.2 Supape ER

Condițiile impuse echipamentelor care utilizează fluide *ER* sunt:

- 1-viteza mare de reacție,
- 2-capacitatea de a controla zona de precurgere, astfel încât să se poată obține valori prestabilite ale deplasării, vitezei și forței.

În continuare sunt prezentate rezultatele unor experimente efectuate pe o supapă *ER*, cu configurație variabilă, la care s-a variat:

- 1-spațiul inter-electrod, între 0.5 și 1 mm,
- 2-lungimea activă, între 50 și 100 mm,
- 3-viteza de funcționare, între 0 și 2 m/s, în condițiile păstrării alunecării la perete în regim laminar, la o viteză de forfecare de max. 40.000 s^{-1} . Schema de principiu a instalației experimentale este prezentată în **Fig.3.75**.

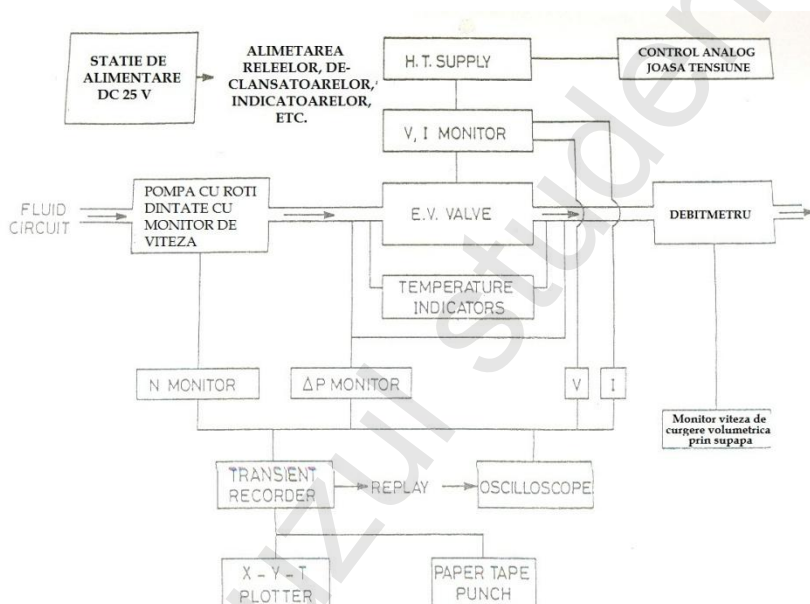


Fig.3.75 Schema de principiu a experimentelor

Pompa cu roți dințate este acționată de un motor electric, controlat prin tiristoare, putând atinge max. 1500 rot./min.

Pentru controlul vitezei de pompare a fluidului *ER*, s-a conceput un sistem special, ilustrat schematic în **Fig.3.76**, care permite variația turației de intrare la pompa cu roți dințate.

Cutia de viteze realizează patru rapoarte de reducere, 1:1, 2:1, 4:1 și 10:1, necesare controlului la valori mici a vitezei de funcționare a pompei cu roți dințate. Structura propriu-zisă a supapei este ilustrată în **Fig.3.77**.

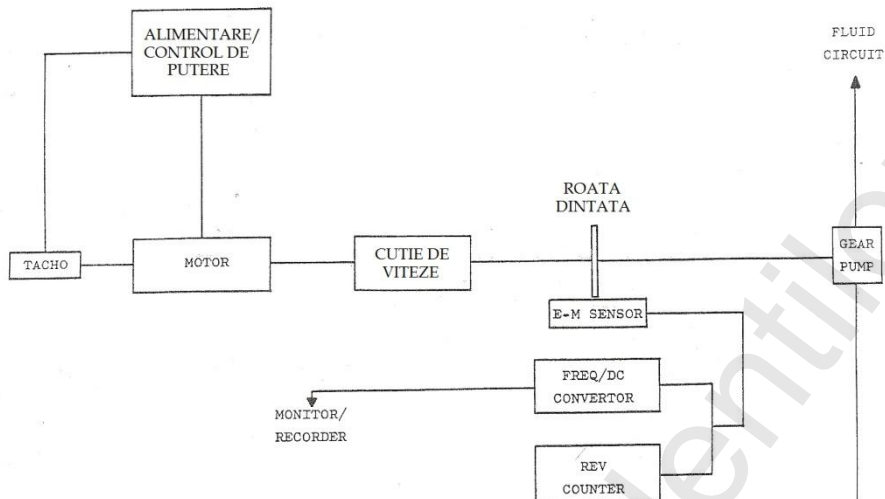


Fig.3.76 Sistemul de control al vitezei

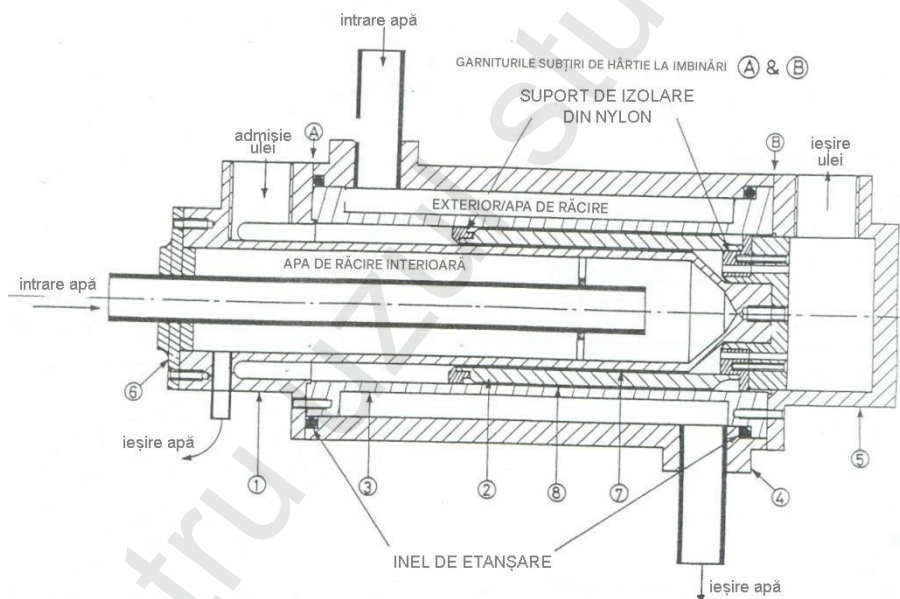


Fig.3.77 Supapă experimentală. Supapa A: $h=0.5$ mm, $l=100$ mm. Supapa B: 0.5×50 mm. Supapa C: 1×100 mm

Pentru a păstra intensitatea câmpului electric la valoarea de 2 kV/mm, tensiunea aplicată a fost de 1 kV în cazul spațiului inter-electrod $h = 0.5$ mm și de 2 kV pentru $h = 1$ mm. Într-o primă instanță s-a utilizat un fluid newtonian, sub forma unui ulei hidraulic, situație ilustrată în Fig.3.77. În timpul funcționării, supapa este răcită cu apă, atât la interior cât și la exterior.

Un exemplu tipic, prezentând variația scăderii de presiune, P , a turației pompei, N , a tensiunii dintre electrozi, V și intensității curentului, I , între momentul inițial și momentul aplicării unei tensiuni de 1 kV, este ilustrat în Fig.3.78.

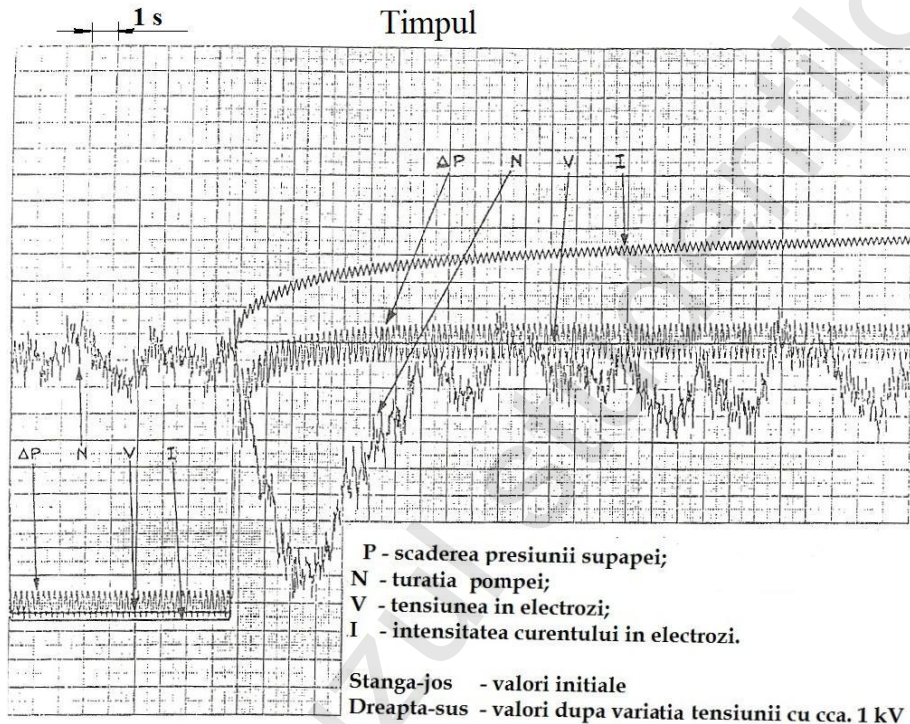


Fig.3.78 Exemplu tipic de înregistrare a presiunii cu definirea stării de echilibru

Valorile corespund configurației A a supapei. La aplicarea tensiunii de 1 kV, se poate observa cât de bruscă este scăderea de presiune și cum se stabilizează aceasta. Interferențele sunt datorate unui puls de presiune provenit de la angrenajul roții dințate din componența pompei. Se observă cum turația inițială, N , a pompei, scade de la 780 rot/min, cu aprox. 3%, pe parcursul a circa 7 secunde de la aplicarea tensiunii de 1 kV.

Cele trei configurații de supapă, obținute prin modificarea spațiului interelectrod și a lungimii de contact, precum și simbolurile corespunzătoare, sunt: A – $h = 0.5 \text{ mm} \times l = 100 \text{ mm}$, simbol o; B – $h = 0.5 \text{ mm} \times l = 50 \text{ mm}$,

simbol $\blacktriangle$ și $C - h = 1 \text{ mm} \times l = 100 \text{ mm}$, simbol $\square$.

Fig.3.79 prezintă variațiile în funcție de debitul Q , pentru cele trei configurații de supapă, (A , B și C) și pentru trei valori ale intensității câmpului electric, E/h (V/mm) ale raportului dintre lățimea „dopului de fluid”, δ și spațiul inter-electrod, h .

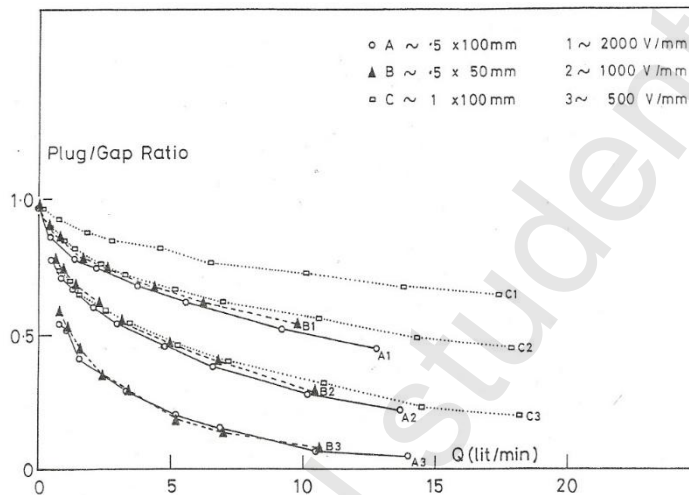


Fig.3.79 Variația δ/h , în funcție de Q , pentru cele trei variante de supapă, definite prin toate valorile lui $h \times l$ și prin E/h

Se observă că datele obținute cu configurațiile A și B sunt foarte apropiate, în timp ce valorile obținute cu configurația C sunt mai mari (ex.: curba $C2$, obținută la 1000 V/mm este superioară curbelor $A1$ și $B1$, obținute la 2000 V/mm).

3.5.3 Sisteme de suspensie cu amortizoare ER

Nivelul oscilațiilor produse de denivelările solului, într-un autovehicul de teren, se pot controla prin sisteme de suspensie activă și semi-activă. O suspensie activă este complexă și poate controla nivelul:

- de înălțime,
- de afundare,
- de îndesare al corpului vehiculului și din acest motiv consumă

foarte multă putere.

O suspensie semi-activă poate modula forța de amortizare în funcție de condițiile de operare. Utilizarea fluidelor *ER* permite obținerea unei viteze superioare de reacție, ceea ce a încurajat dezvoltarea unei clase noi de amortizoare pentru autovehicule.

Amortizoarele *ER* permit un control precis pentru *confortul călătoriei* (reacția la excitațiile produse de denivelări) și *ținuta la drum* (variația forței normale dintre pneu și sol sau a distanței dintre centrul roții și calea de rulare). Aceste două caracteristici s-au studiat cu instalația de suspensie semi-activă, **Fig.3.80**.

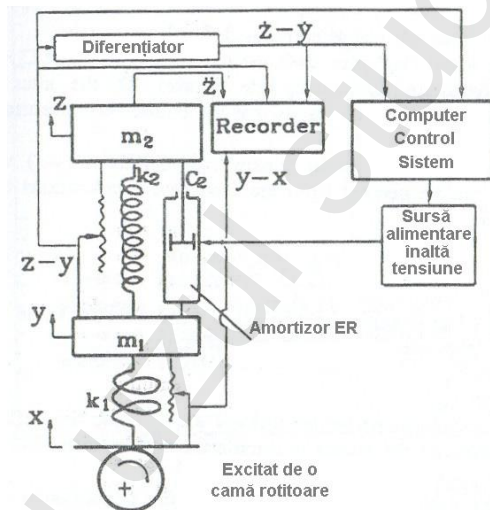


Fig.3.80 Modelul suspensiei auto semi-active

Pentru îmbunătățirea confortului călătoriei au fost dezvoltate 3 strategii de control:

- A. Forța de amortizare este maximă atunci când viteza relativă a masei mobile față de masa imobilă are același sens cu viteza masei mobile și minimă când cele două viteze au sensuri opuse (control on-off).
- B. Controlul continuu al forței de amortizare pentru a minimiza accelerația masei mobile.
- C. Forța de amortizare este aplicată la valoarea maximă sau minimă, în

funcție de condițiile de funcționare.

Pentru îmbunătățirea *ținutei la drum* au fost dezvoltate, în principiu, doar primele două strategii de mai sus:

- A. Este strategia de control on-off pentru modularea forței de amortizare pe baza sensurilor relative dintre vitezele maselor mobile și imobile.
- B. Minimizarea deformării penurilor prin reglarea continuă a forței de amortizare.

Deoarece strategiile de mai sus nu îmbunătățesc decât una sau alta dintre cele două condiții sus-menționate, impuse autovehiculelor, au fost dezvoltate trei strategii de *control combinat*:

A. Se bazează pe raportul dintre deformațiile dinamice și statice ale pneurilor, pe baza unui coeficient de amortizare dat de:

$$C_{rd} = \alpha C_d + (1 - \alpha) C_r \quad (3.38)$$

în care:

α este raportul dintre deformația dinamică și deformația statică a pneurilor,

C_d și C_r sunt coeficienții de amortizare pentru *ținuta la drum* și respectiv *confortul călătoriei*. Se observă că:

- dacă $\alpha = 0$, atunci $C_{rd} = C_r$, ceea ce înseamnă că strategia se axează pe îmbunătățirea *confortului călătoriei*;
- dacă $\alpha = 1$, atunci $C_{rd} = C_d$, ceea ce înseamnă că strategia se axează pe îmbunătățirea *ținutei la drum*.

B. Esența acestei strategii este egalarea coeficientului C_{rd} fie cu C_r sau cu C_d în funcție de valoarea lui α :

- $C_{rd} = C_r$, dacă $\alpha < \alpha_{th}$;
- $C_{rd} = C_d$, dacă $\alpha > \alpha_{th}$, unde α_{th} este valoarea de prag dintre deformațiile dinamică și cea statică a pneurilor. În general, se poate considera $\alpha_{th} = 0.5$. Cu alte cuvinte, dacă deformația pneurilor este

slabă, atunci preocuparea predominantă devine *confortul călătoriei* iar dacă dacă deformația pneurilor este prea mare, atunci preocuparea predominantă devine *ținuta la drum*.

C. Este descrisă prin: $C_{rd} = C_r$, dacă $\alpha < \alpha_{th}$ și $C_{rd} = \text{maxim}$, dacă $\alpha > \alpha_{th}$.

În continuare sunt analizate efectele diferitor strategii de control, atât din punct de vedere al simulării, cât și din punct de vedere experimental. În toate cazurile, denivelările terenului sunt considerate sub 10 mm.

În **Fig.3.81** este prezentată variația transmisibilității (raportul dintre rădăcina pătrată medie a accelerației masei mobile și cea a punctului de contact pneu-sol) în funcție de frecvența vibrațiilor, obținută prin simulare.

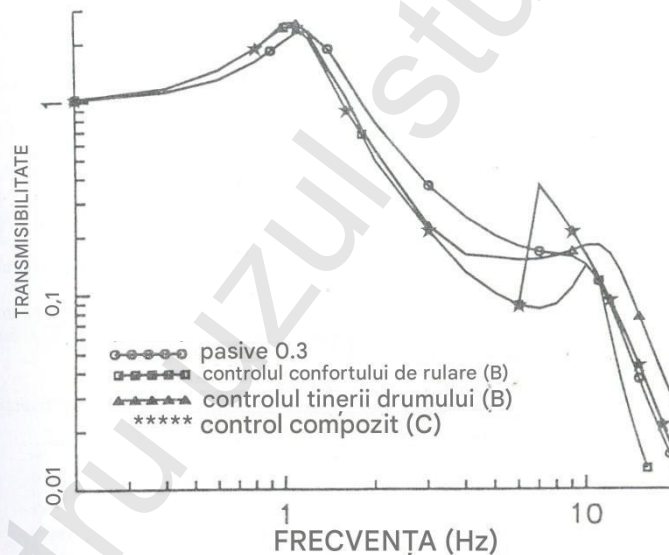


Fig.3.81 Compararea transmisibilităților pentru diferite strategii de control al vibrațiilor, pe baza rezultatelor simulării

S-a prezentat și variația transmisibilității unei suspensii pasive cu un raport de amortizare de 0.3. Se observă că strategiile C și B dau efecte similare însă diferența dintre acestea și suspensia pasivă nu este prea relevantă. Analizând variațiile simulate ale transmisibilității pentru strategia C de control combinat, se constată că prezintă un maxim la frecvența de circa 7 Hz.

Concluzia este că, din punct de vedere al izolării vibrațiilor, strategia *B* de control al confortului călătoriei este superioară față de celelalte strategii.

Fig.3.82 prezintă variația simulată a raportului de deformare dinamică a pneurilor (raportul dintre valorile rădăcinilor pătrate medii a deformăției pneurilor și a profilului drumului) în funcție de frecvență, pentru mai multe strategii de control.

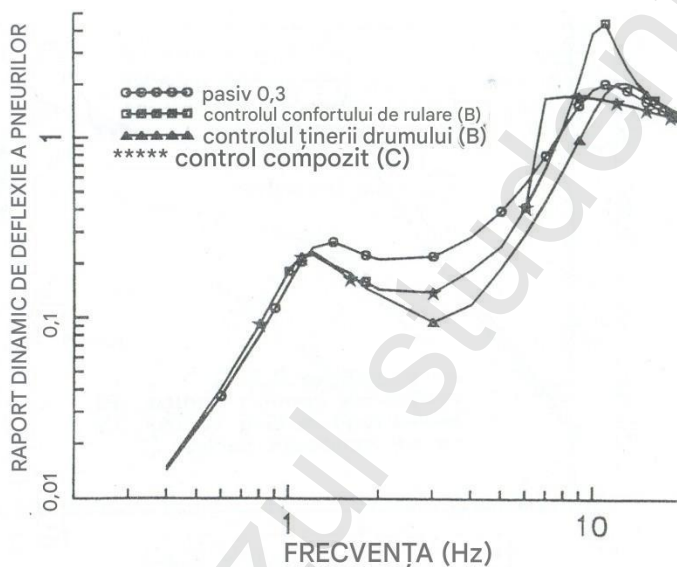


Fig.3.82 Comparația rapoartelor de deformare dinamică a pneurilor auto pentru diferite strategii de control bazate pe rezultatele simulării

Se observă că cea mai mică deformare simulată (cel mai bun comportament) corespunde strategiei *B* de control al *ținutei la drum*. Pe de altă parte, simularea obținută prin aplicarea strategiei *C* de *control combinat* prezintă o creștere bruscă a raportului de deformare dinamică la frecvența de 6 Hz, unde se obține un raport de amortizare de 1. Variațiile în funcție de frecvență, peste 6 Hz, ale raportului de deformare dinamică și ale transmisibilității, pentru strategia *C* de *control compozit* din Fig.3.81, sunt foarte asemănătoare.

Fig.3.83 prezintă variațiile în funcție de frecvență ale rapoartelor de transport ale suspensiei (raportul dintre rădăcina pătrată medie a deplasării

dintre masa mobilă și cea imobilă și cea a profilului solului) pentru diferite strategii de control.

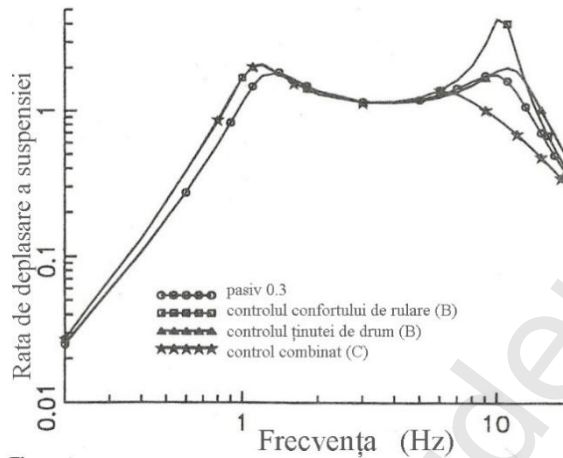


Fig.3.83 Comparația rapoartelor de deplasare a suspensiei auto pentru diferite strategii de control, bazate pe rezultatele simulării

Se observă că toate strategiile acționează în mod similar, pe un interval larg de frecvențe. Însă, de la o frecvență situată cu puțin sub frecvența naturală a masei imobile (cca. 6 Hz) și continuând cu frecvențe mai mari, strategia C de control combinat este superioară celorlalte strategii. Rezultatele simulării cu diverse strategii sunt prezentate în **Tab.3.2**.

Tab.3.2 Rezultate obținute cu diverse strategii de control

Parametrul de performanță	Strategia de control	Frecvența			
		1.2	7	10	15
Transmisibilitatea	Pasiv, 0,3	2.37	0.17	0.14	0.04
	Confortul călătoriei (B)	2.13	0.08	0.14	0.02
	Ținuta la drum (B)	2.29	0.15	0.18	0.08
	Compozit (C)	2.13	0.36	0.16	0.04
Raportul de deformare dinamică al pneurilor	Pasiv, 0,3	0.25	0.8	1.9	1.63
	Confortul călătoriei (B)	0.22	0.69	3.96	1.84
	Ținuta la drum (B)	0.23	0.45	1.4	1.81
	Compozit (C)	0.22	1.68	1.73	1.46
Raportul de transport al suspensiei	Pasiv, 0,3	1.76	1.44	1.8	0.71
	Confortul călătoriei (B)	2.13	1.65	4.36	0.86
	Ținuta la drum (B)	2.1	1.37	1.92	1.04
	Compozit (C)	2.13	1.32	0.9	0.48

Studiul experimental al diverselor strategii de control al suspensiilor

semi-active s-a efectuat cu ajutorul amortizorului *ER* din **Fig.3.84**. Masa mobilă este de 44.2 kg iar cea imobilă de 6.2 kg. Constanta de elasticitate a suspensiei este de 2.846 kN/m iar cea a pneului este de 24.5 kN/m. Amortizorul este activat cu o amplitudine de 7.5 mm, prin intermediul unei came excentrice, acționată de un motor cu turație variabilă.

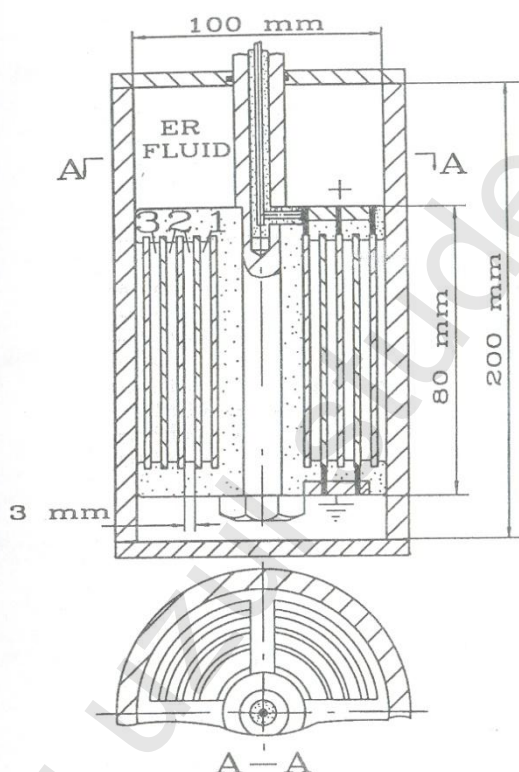


Fig.3.84 Schema amortizorului cu fluid *ER* utilizat în experimente

Fluidul *ER* utilizat este un amestec de ulei siliconic și amidon, în proporție de 5:1. Proprietățile fluidului *ER* au fost măsurate cu un reometru Couette (cu cilindri concențrici) având ca sator un cilindru interior de diametru 0.145 m și ca rotor un cilindru cu diametru exterior de 0.139 m. Rotorul este condus de un motor cu turație variabilă iar satorul este controlat printr-un traductor de cuplu care permite determinarea tensiunii de forfecare a fluidului *ER*.

Fig.3.85 prezintă variațiile, în funcție de viteza de forfecare, a tensiunii de forfecare la intensitatea zero a câmpului electric aplicat, precum și a raportului dintre tensiunile de forfecare a fluidului la diverse câmpuri aplicate (1, 2 și 3 kV/mm) și la câmp electric zero.

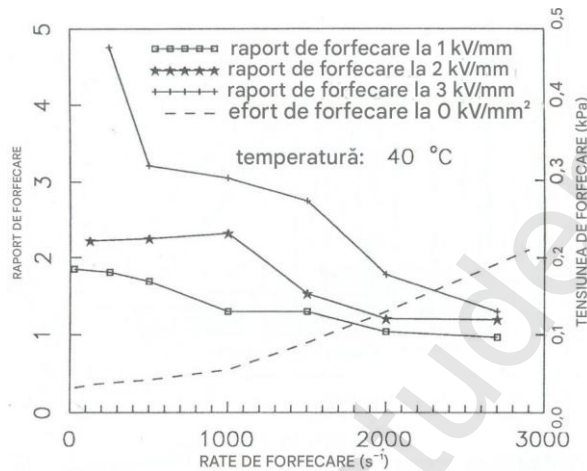


Fig.3.85 Variația raportului de forfecare în funcție de viteza de forfecare, pentru fluidul ER utilizat în experimente

Se observă că pe măsură ce viteza de forfecare a fluidului crește, raportul de forfecare scade. Principalii parametri de control al suspensiilor semi-active sunt rapoartele dintre deplasarea relativă a meselor mobilă și imobilă și respectiv dintre deplasarea masei imobile și denivelarea solului.

Aceste deplasări au fost monitorizate cu ajutorul unor potențiometre liniare. Utilizând traductoare diferențiale analogice a putut fi luat în calcul și raportul dintre viteza de deplasare relativă a masei mobile și viteza masei imobile.

S-a constatat că, la o tensiune constantă a curentului aplicat, raportul echivalent de amortizare vâscoasă, al întregului amortizor ER, variază în funcție de frecvență. Efectele frecvenței sunt vizibile mai ales peste 10 Hz. Astfel, probleme legate de variația vitezei și a accelerației, în momentul trecerii de la starea pasivă, la cea activă, sub efectul unei frecvențe a curentului electric aplicat, de 12 Hz, sunt ilustrate în **Fig.3.86**.

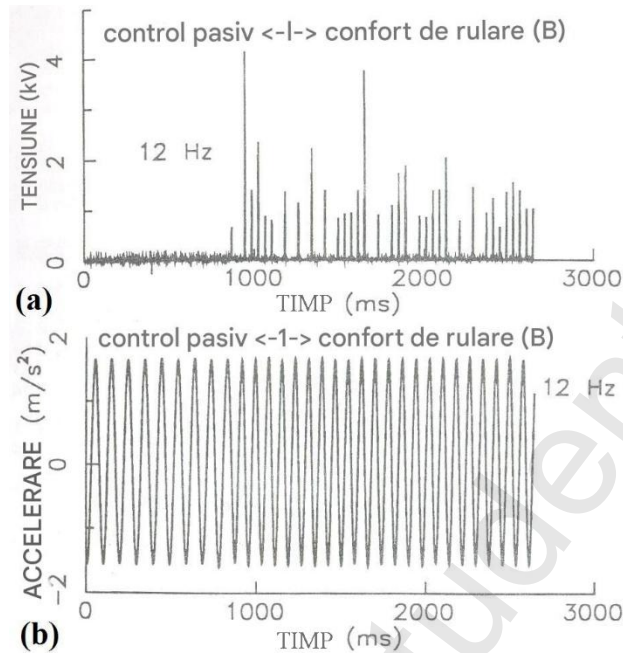


Fig.3.86 Efectele trecerii de la starea pasivă la activarea controlului suspensiei unui amortizor *ER*, conform strategiei *B* de control al confortului călătoriei, la frecvența de 12 Hz: (a) variațiile tensiunii; (b) variațiile accelerației

Din Fig.3.86(a) se observă că timpul de aplicare al curentului electric la fluidul *ER* este foarte scurt. Din acest motiv, proprietățile mecanice ale fluidului *ER* nu pot varia suficient de rapid și nu se observă diferențe mari între starea activă și cea pasivă, după cum arată Fig.3.86(b), unde accelerația nu prezintă diferențe notabile la trecerea de la o stare la alta.

Cu totul altfel se prezintă variațiile vitezei și accelerației la trecerea de la starea pasivă la cea activă, în conformitate cu strategia *B* de control al confortului călătoriei, în cazul aplicării unui curent electric cu frecvența de 1.2 Hz, după cum se poate observa în **Fig.3.87**.

Principala diferență constă în creșterea duratei de aplicarea a tensiunii, ilustrată în Fig.3.87(a), ceea ce permite obținerea unor modificări notabile ale proprietăților mecanice. Astfel, Fig.3.87(b) ilustrează o modificare evidentă a variației accelerației odată cu trecerea la starea activă. Acesta este principalul beneficiu al strategiei *B* de control al confortului călătoriei.

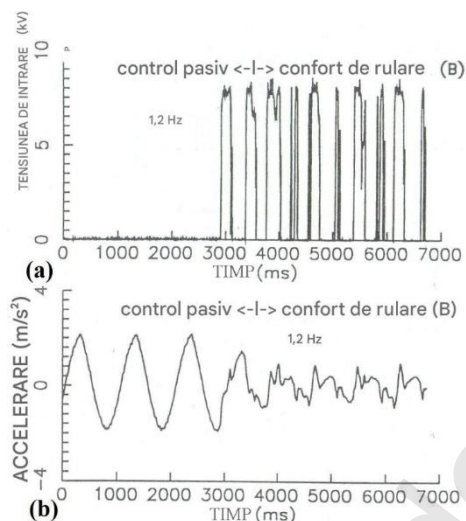


Fig.3.87 Efectele trecerii de la starea pasivă la activarea controlului suspensiei unui amortizor ER, conform strategiei B de control al confortului călătoriei, la frecvența de 1.2 Hz: (a) variațiile tensiunii; (b) variațiile accelerației

4. SUSPENSII MAGNETOREOLOGICE

4.1 Noțiuni generale despre fluidele magnetoreologice

Magnetoreologia este ramura reologiei care se ocupă de curgerea și deformarea sub efectul unui câmp magnetic aplicat. Descoperirea fluidelor magnetoreologice, *MR*, este atribuită lui Jacob Rabinow, în 1949.

Fluidele *MR* sunt suspensii de particule:

- moi, din punct de vedere magnetic (remagnetizabile),
- multidomeniale, cu nivele scăzute ale coercitivității magnetice,
- necoloidale ($0.05\text{-}10\ \mu\text{m}$).

Cele mai importante caracteristici ale particulelor (fazei dispersate):

- mărimea,
- forma,
- densitatea,
- distribuția,
- saturația magnetică,
- câmpul coercitiv.

Alți factori importanți, care afectează proprietățile reologice, stabilitatea și redispersibilitatea fluidului *MR* sunt surfactanții și aditivii anticorozivi [10].

Atunci când nu sunt activate, fluidele *MR*:

- arată ca niște vopsele lichide,
- prezintă nivele de vâscozitate aparentă comparabile cu acestea (0.1 până la $1\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ la viteze de forfecare scăzute),
- forțele dintre particulele inerte, care provin din interacțiunile magnetice, conduc la obținerea unui material cu vâscozitate aparentă mai mare.

Atunci când se aplică un câmp magnetic:

- vâscozitatea lor aparentă crește puternic (de 105-106 ori) în câteva milisecunde,
- variația vâscozității este complet reversibilă, atunci când câmpul magnetic este îndepărtat.

Această interacțiune dipolară este responsabilă pentru formarea unor *lanțuri de particule*, pe direcția câmpului magnetic aplicat, conform **Fig.4.1**.

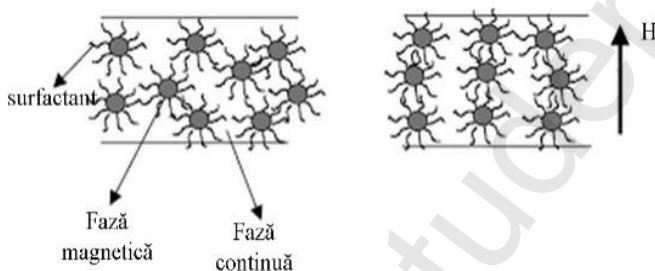


Fig.4.1 Schema formării lanțurilor de particule în fluidele MR: (a) în absența câmpului magnetic; (b) după aplicarea unui câmp magnetic de intensitate H [11]

La constituirea formațiunilor de particule participă:

- câmpul magnetic aplicat,
- vâscozitatea aparentă a fluidului purtător.

Lanțurile de particule astfel constituite:

- pot suporta un anumit nivel al tensiunii de forfecare fără să se rupă,
- se comportă, într-o anumită măsură, ca un solid.

Când tensiunea de forfecare depășește o anumită valoare critică, lanțurile de particule se rup și materialul începe să curgă. Efectul MR este în general caracterizat prin modelul plastic Bingham, descris prin ecuația (3.1). σ_y este valoarea critică a tensiunii „de curgere aparentă”, peste care începe curgerea, în urma ruperii formațiunilor de particule. Tensiunea de curgere crește cu intensitatea câmpului magnetic, ca în **Fig.4.2**. De exemplu, la fluidele MR cu 40 % particule de Fe, sub un câmp magnetic de 1T s-a obținut

$\sigma_y = 100 \text{ kPa}$ [10].

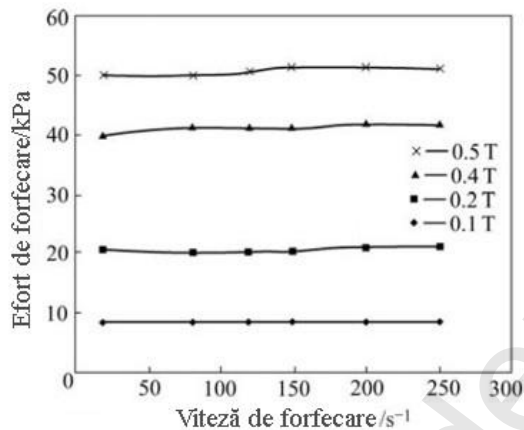


Fig.4.2 Relația dintre tensiunea și viteza de forfecare

4.1.1 Structura suspensiilor magnetoreologice

Se consideră că suspensiile *MR* au un potențial aplicativ mai ridicat decât fluidele *ER* (descoperite de Winslow în 1948), datorită următoarelor avantaje:

- rezistența la curgere mai ridicată, atribuită densității mai ridicate a energiei magnetostatice, $\mu_0 H_0^2$, comparativ cu densitatea electrostatică, $\epsilon_0 E_0^2$, a fluidelor *ER*,
- necesită surse de alimentare de tensiune scăzută,
- sunt relativ stabile între -40 și 150 °C.

Spre deosebire de fluidele *MR*, ferofluidele sunt coloidale, din cauza diametrelor mult mai mici ale particulelor, ceea ce le conferă o stabilitate superioară.

Condiții impuse particulelor din fluidele *MR*:

- forță coercitivă cât mai redusă;
- magnetizație de saturație cât mai mare;
- imediat ce câmpul magnetic este îndepărtat, fluidul *MR* trebuie

să revină la starea demagnetizată în câteva milisecunde [10].

Pulberea de carbonil de fier îndeplinește condițiile de mai sus și din acest motiv este utilizată la majoritatea fludelor *MR* comerciale.

Pentacarbonilul de fier, $\text{Fe}(\text{CO})_5$, se poate obține mai ales prin depunere chimică de vapori (*CVD*) care este preferată față de procesele de atomizare electrolytică sau de pulverizare. Proprietățile carbonilului de fier obținut prin *CVD*:

- este pur din punct de vedere chimic, (peste 99.7 %, impuritățile pot bloca deplasarea dislocațiilor, cauzând creșteri de duritate și apariția unor efecte de abraziune ale particulelor),
- moale din punct de vedere magnetic,
- are magnetizația de saturație de 2.1 T,
- rezultă sub formă de particule sferice cu dimensiuni la nivel de meso-scală (forma sferică contribuie la reducerea frecării și a anizotropiei magnetice de formă).

Alte materiale magnetice moi:

- aliajele Fe-50%Co cu magnetizația de saturație de 2.43 T.

Principalele inconveniente:

- ✓ densitatea lor mai ridicată (8.1 g/cm^3 , față de 7.8 g/cm^3 pentru Fe)
- ✓ costul mai ridicat.
- aliajele Fe-(1-10)%Ni care au permis obținerea unor tensiuni de curgere relativ ridicate.
- feritele pe bază de Mn-Zn și de Ni-Zn, cu o granulație medie de 2 μm . Principalul inconvenient:
 - ✓ magnetizația de saturație destul de scăzută (0.4-0.6 T).

Fig.4.3 prezintă curbele inducție magnetică-intensitate de magnetizare (*B-H*) a patru fluide *MR* comerciale, aranjate ascendent în ordinea creșterii

procentului de fier: 26, 36, 40 și 46 Fe%, având caracteristicile în **Tab. 4.1**.

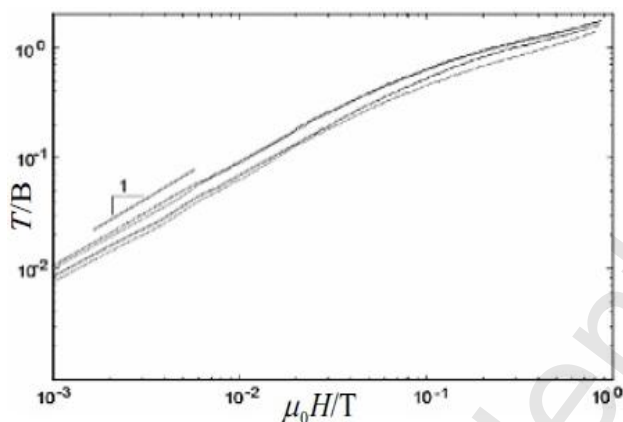


Fig.4.3 Variația densității de flux magnetic în cadrul fluidelor *MR* în funcție câmpul magnetic aplicat

Tab.4.1 Compoziții chimice de bază și densitățile a patru fluide *MR* comerciale produse de compania Lord

Commercial MR fluid	Percent iron by volume	Carrier fluid	Density / g·mL ⁻¹
MRX-126PD	26	Hydrocarbon oil	2.66
MRX-140ND	40	Hydrocarbon oil	3.64
MRX-242AS	42	Water	3.88
MRX-336AG	36	Silicone oil	3.47

Proprietățile reologice ale fluidelor *MR* depind de particule prin:

- concentrația,
- densitatea,
- mărimea,
- forma particulelor.
- ✓ proprietățile fluidului purtător,
- ✓ aditivii utilizați,
- ✓ câmpul magnetic aplicat,
- ✓ temperatură.

La fracțiuni de volum mari, particulele sunt suficient de apropiate încât

câmpul de curgere al unei particule să poată fi afectat de particulele vecine, din cauza interacțiunilor hidrodinamice. **Fig.4.4** prezintă o creștere puternică a vâscozității la o concentrație volumică de cca. 50 %.

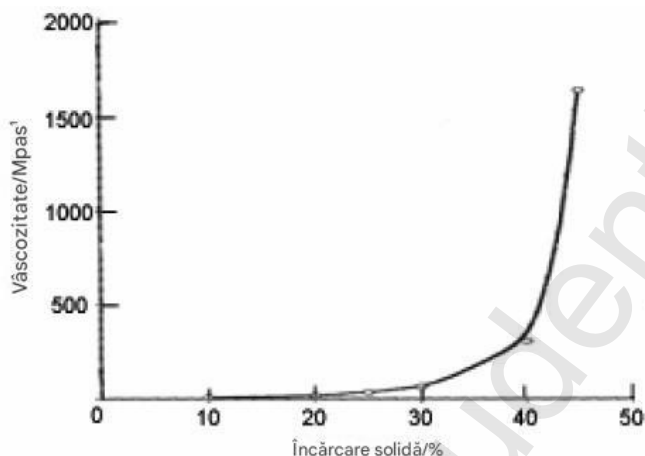


Fig.4.4 Dependența vâscozității de densitate (*încărcarea solidă*) a particulelor de alumina cu granulație medie de 0.7 μm

Considerând împachetarea particulelor sferice după o celulă elementară cubică, se constată că la 52 % vol. este atinsă vâscozitatea maximă din cauza contribuției frecării produsă de interacțiunea particulelor.

Vâscozitatea liniară este dependentă de timp și caracterizează reacția mecanică a materialului la o tensiunea aplicată. La deformare constantă:

- solidul vâscoelastic înmagazinează o parte din energia primită și disipă restul
- lichidul vâscoelastic disipă toată energia.

Această particularitate reprezintă o caracteristică esențială pentru fenomenele tranzitorii de repartizare a energiei, cum ar fi *fluajul* (tensiunea este aplicată brusc până la o valoare menținută constantă și este măsurată evoluția deformăției în timp) sau *relaxarea tensiunilor* (deformația este aplicată brusc până la o valoare menținută apoi constantă și este măsurată evoluția în timp a tensiunii).

Un material este considerat *liniar vâscoelastic* dacă în timpul fluajului

stabilizat deformația este proporțională cu tensiunea aplicată și dacă, la forfecare simplă, istoria (evoluția) tensiunii corespunde cu cea a deformației [10].

Modelele dezvoltate pentru fluidele *ER* pot fi adoptate suspensiilor *MR* doar la câmpuri magnetice slabe din cauză că la câmpuri puternice intervin vâscozitatea neliniară și saturația magnetică. În modelele formulate prin *FEM*, tensiunea de curgere statică este considerată drept tensiunea maximă de forfecare definită prin componenta de întindere, pe direcția de forfecare, a unui lanț infinit, unic și liniar de particule. Reologia suspensiilor *MR* este analizată în două etape: 1-pre-curgere și 2-post-curgere, ilustrate în **Fig.4.5**.

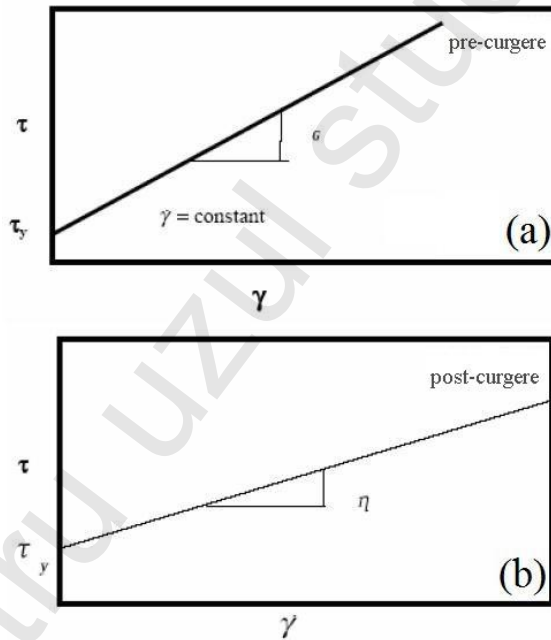


Fig.4.5 Modelul de curgere plastică Bingham: (a) regim pre-curgere, (b) regim post-curgere

Regim pre-curgere, Fig.4.5(a):

$$\sigma = G'\gamma; \dot{\gamma} = 0; \sigma < \sigma_y \quad (4.1)$$

Regim post-curgere, Fig.4.5(b):

$$\sigma = \eta\dot{\gamma} + \sigma_y; \sigma \geq \sigma_y \quad (4.2)$$

unde: η este vâscozitatea plastică

γ deformația prin forfecare

$\dot{\gamma}$ viteza de forfecare

σ_y este tensiunea de curgere dinamică,

G' este modulul de înmagazinare a energiei.

În regiunea de pre-curgere, fluidele *MR* prezintă proprietăți vâscoelastice, utile mai ales în aplicațiile de amortizare a vibrațiilor. Suspensiile *MR* curg la tensiuni $\tau > \tau_y$.

Principalele geometrii de curgere, cu ecuațiile corespunzătoare, sunt date în **Fig.4.6** iar geometriile reometrelor care funcționează conform acestor configurații sunt prezentate în **Fig.4.7**.

Notațiile din cele două figuri reprezintă:

M - momentul,

h - înălțimea,

R - raza,

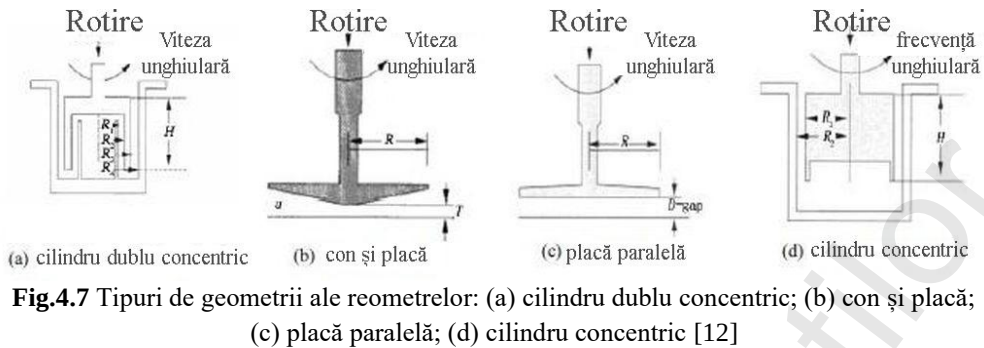
Ω - viteza unghiulară,

θ - deplasarea unghiulară,

α - unghiul conului.

Geometrie	Tensiunea de forfecare	Rata de forfecare	Deplasare	Vâscozitate
Cilindru concentric 	$\frac{M}{(2\pi R_{ave}^2 h)}$	$\frac{2\Omega R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)}$	$\frac{\theta R_{ave}}{R_2 - R_1}$	$\frac{M(R_2^2 - R_1^2)}{4\pi h \Omega R_1^2 R_2^2}$
Plane paralele 	$\frac{M}{2\pi R^3}$	$\frac{\Omega R}{h}$	$\frac{R\theta}{h}$	$\frac{\pi \Omega M R^4}{2h}$
Con și plan 	$\frac{3M}{2\pi R^3}$	$\frac{\Omega}{\alpha}$	$\frac{\theta}{\alpha}$	$\frac{3\alpha M}{2\pi R^3 \Omega}$
Dublu concentric 	$\frac{M}{2\pi h (R_1^2 + R_4^2)}$	$\frac{\Omega R_4^2}{(R_4^2 - R_3^2)} + \frac{\Omega R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)}$	$\frac{\theta R_4^2}{(R_4^2 - R_3^2)} + \frac{\theta R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)}$	$\frac{M(R_4^2 - R_3^2)(R_2^2 - R_1^2)}{2\pi h}$

Fig.4.6 Ecuațiile proprietăților reologice ale diferitor geometrii de activare a suspensiilor *ER* și configurația acestora



Cele mai mari neajunsuri ale suspensiilor *MR*:

- stabilizarea,
- redispersibilitatea.

Stabilitatea fluidelor *MR* presupune lipsa sedimentării. La sistemele diluate, viteza de sedimentare a particulelor sferice poate fi determinată cu legea lui Stokes:

$$v = \frac{2R_s^2 (\Delta\rho)g}{9\eta} \quad (4.3)$$

în care:

R_s este raza particulelor,

$\Delta\rho$ - diferența de densitate între faza magnetică și fluidul purtător,

η - vâscozitatea fluidului purtător,

g – accelerația gravitațională (9.8 m/s^2).

Pentru prevenirea sedimentării s-a utilizat o fază vâscoplatică continuă (ex.: *unsoare*). Condiția de formare a suspensiei este ca tensiunea de curgere a mediului vâscoplatic să fie mai mare decât cea a suspensiei *MR*.

La majoritatea aplicațiilor, suspensiile *MR* trebuie să aibe o vâscozitate cât mai mică posibil, în stare neexcitată. La aplicațiile antiseimice, sunt preferate suspensiile *MR* sub formă de pastă, pentru a evita sedimentarea gravitațională în lungile perioade de timp când amortizorul este inactiv.

Solicitările oscilatorii, aplicate între -20 și 50°C , au arătat creșteri ale modulelor de înmagazinare și de pierdere odată cu creșterea frecvenței de la 5

la 50 Hz și cu scăderea temperaturii (în concordanță cu comportamentul polimerilor vâscoși). Sintetizând datele dependente de temperatură cu cele dependente de frecvență s-au obținut curbe etalon ale modulului complex [10].

Aplicarea câmpului magnetic la fluidele *MR*, ca și câmpul electric la fluidele *ER*, produce formarea unor *lanțuri individuale* care se transformă în clustere și în final într-o structură *tvc*, cu împachetare compactă. Formarea structurilor compacte contribuie la creșterea limitei de curgere dar necesită timp îndelungat. Din acest motiv s-au căutat metode suplimentare de accelerare a creșterii limitei de curgere.

Una dintre acestea presupune aplicarea unei forțe de comprimare, asupra fluidului *MR*, imediat după activarea câmpului magnetic. Sub efectul forței de comprimare, lanțurile sunt presate astfel încât formează structuri compacte într-un timp mult mai scurt. Pentru experimente, s-a preparat o suspensie de 46 % vol. particule de carbonil de fier, cu diametrul mediu de 5 μm , conform **Fig.4.8**, în ulei siliconic.

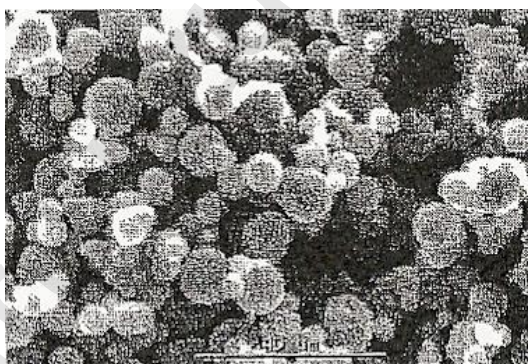


Fig.4.8 Micrografie SEM a particulelor de Fe(CO)_5

S-a adăugat surfactant pentru a împiedica sedimentarea particulelor pe durata a cel puțin 24 de ore. Schema instalației experimentale, din **Fig.4.9**, include un electromagnet și un container de *Al* cu fluidul *MR*.

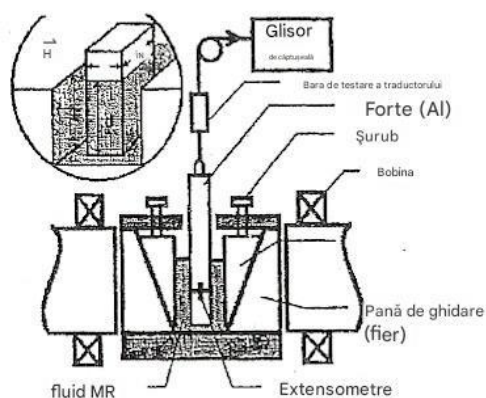


Fig.4.9 Instalație experimentală pentru determinarea comportării la forfecare a unui fluid MR, cu particule de carbonil de fier

Containerul de Al, cu dimensiuni 115 x 89 x 89 mm și un volum de 200 ml, are capete din oțel, unul fix, celălalt mobil, pentru a permite comprimarea fluidului. În fluidul MR, care are un volum de 120 ml, s-a introdus vertical o bară de Al. După aplicarea câmpului magnetic și comprimarea fluidului MR din container, s-a determinat tensiunea de curgere, la extragerea barei de Al, măsurătorile efectuându-se cu ajutorul unui traductor de forță și al unei mărci tensometrice. Efectele cumulate ale aplicării câmpului magnetic și a forței de comprimare sunt prezentate în **Fig.4.10**.

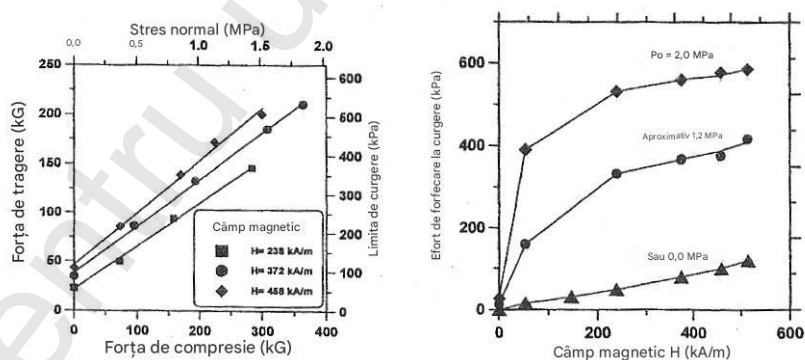


Fig.4.10 Efectele câmpului magnetic și ale forței de comprimare asupra comportării la forfecare a unui fluid MR cu particule de carbonil de fier: (a) variația forței de extragere în funcție de forța de comprimare, la diverse câmpuri magnetice aplicate; (b) variația rezistenței la curgere prin forfecare în funcție de câmpul magnetic aplicat, pentru fluid necomprimat sau comprimat cu două presiuni aplicate

Fig.4.10(a) conține variația forței de extragere a unei bare de *Al* cu secțiunea 12.7 x 25.4 mm, în funcție de forța de comprimare, la trei valori diferite ale câmpului magnetic aplicat. Se observă ușor că forța de extragere crește linear cu presiunea de comprimare [13].

Fig.4.10(b) prezintă variația tensiunii de curgere în funcție de câmpul magnetic aplicat, în stare relaxată și sub 2 presiuni de comprimare. Se constată ușor variația liniară a rezistenței statice la curgere, în funcție de intensitatea câmpului magnetic aplicat. Pe de altă parte, se observă că rezistența la curgere crește, în mod evident, odată cu aplicarea presiunii de comprimare.

Pentru o mai bună înțelegere a mecanismului fizic care stă la baza acestei creșteri a rezistenței la curgere, a fost studiată microstructura fluidului *MR* înainte și după aplicarea presiunii de comprimare. În acest scop s-a folosit o emulsie de rășină polimerică (epoxidică) care s-a turnat peste cu 45 % particule de carbonil. Într-o primă etapă s-a aplicat în câmp magnetic de 372 kA/m, înainte de reticularea rășinii. În cea de-a doua etapă, s-a aplicat și o presiune de 1.2 MPa, înainte să se producă reticularea rășinii. Cele două probe au fost secționate și supuse analizei SEM, conform **Fig.4.11**.

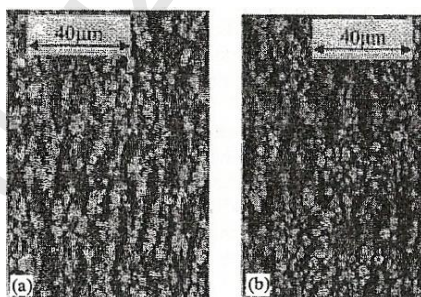


Fig.4.11 Micrografii SEM ale unui amestec fier-rășină epoxidică reticulat într-un câmp magnetic de 372 kA/m. Direcția câmpului este în sus. (a) fără comprimare; (b) cu comprimare

Fig.4.11(a) arată formarea lanțurilor unice de particule, care predomină în microstructură. Fig.4.11(b) arată că, în urma compresiei, microstructura este predominantă de coloane de particule. Grosimea medie a unei coloane a fost de 50 μm , ceea ce corespunde la circa 100 de particule [13].

4.1.2 Fenomene magnetoreologice

Pentru simularea reologiei fluidelor *MR*, induse de câmpurile magnetice uni- și biaxiale, au fost luate în considerație interacțiunile dipolare, mișcarea browniană tridimensională și curgerea staționară prin forfecare *Stokes* între particule, considerate drept sfere rigide și fluidul purtător. Simulările s-au făcut în mod diferențiat, pentru forfecare staționară și oscilatorie.

A. Forfecarea staționară a fost inițial simulată în câmp *uniaxial* pentru un fluid *MR*, cu o fracțiune de 30 % vol. particule. **Fig.4.12** prezintă variațiile simulate ale tensiunii de forfecare în câmp uniaxial, în funcție de numărul lui *Mason*, (ecuația 3.22), pentru trei valori ale parametrului adimensional $\lambda = (2/3)af_c/(k_B T)$, unde:

a - raza particulei,

f_c - forța de interacțiune dintre 2 particule,

k_B - constanta lui Boltzman,

T - temperatura.

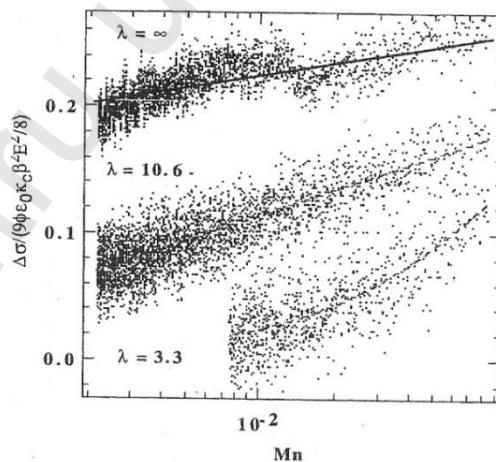


Fig.4.12 Simulările tensiunii de forfecare în câmp uniaxial, a unui fluid cu $\Phi=30\%$. Tensiunea este aproape independentă de numărul lui *Mason* (Mn) în absența mișcării browniene ($k_B T \approx 0 \rightarrow \lambda = \infty$), indicând o vâscozitate cu subțiere prin forfecare. La Mn mici, mișcarea browniană reduce tensiunea în mod semnificativ

În absența mișcării browniene, ($k_B T \rightarrow 0 \Rightarrow \lambda = \infty$) tensiunea de forfecare este foarte puțin influențată de Mn . Amplificarea mișcării browniene (λ mic) reduce tensiunea la Mn mici [14].

În continuare este prezentat un model al fluctuațiilor termice bazat pe dinamica lanțurilor de particule și caracterizat prin formarea fazelor cu structură în benzi, la valori mari ale parametrului adimensional λ și la concentrații de până la 40 % vol, ca în exemplul ilustrat în **Fig.4.13**.

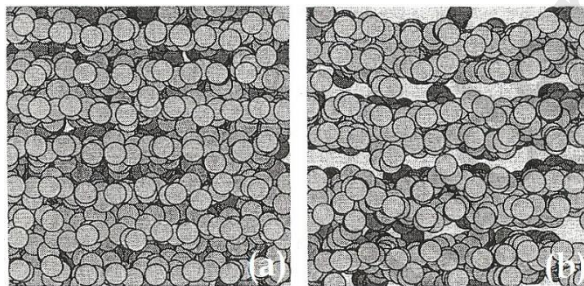


Fig.4.13 La valori mari ale lui λ se formează o fază cu structură în benzi, care nu este vizibilă la valori mici. Aceste structuri se obțin la valoarea marginală $\lambda=16.7$. Imaginile sunt pe direcția câmpului (axa z) și corespund valorilor (a) $Mn=0.08$ și (b) $Mn=0.002$ (dreapta)

Aceste structuri laminare sunt conținute în planul câmpului și a direcției de curgere, adică perpendicular pe axa vorticității fluidului (intensitatea circulației sau rotației dintr-un lichid, reprezentată prin viteza unghiulară de rotație).

Faza cu structura în benzi nu apare valori mici ale parametrului adimensional λ , chiar dacă valoarea tensiunii fluidului este destul de ridicată. Neglijând efectele structurale și termice deosebit de complexe pe care le pot avea aceste structuri în benzi, se poate considera, cu o bună aproximație, că aceste structuri sunt formate din straturi de lanțuri dense de particule [14].

Concluzionând rezultatele simulării în câmp uniaxial se poate afirma că, în faza cu structură în benzi formată din lanțuri dense de particule, cele mai importante efecte termice apar ca urmare a intensificării amplitudinii mișcării browniene, care reduc semnificativ valoarea tensiunii de forfecare staționară, atunci când sunt atinse cele mai mici valori ale numărului lui *Mason* (Mn).

Rezultatele simulărilor efectuate în *câmp biaxial* diferă de cele din câmp uniaxial prin valoarea mai ridicată a tensiunii și prin tendința opusă de variație a acesteia (scădere) odată cu creșterea lui Mn , conform **Fig.4.14**. Câmpul biaxial forțează formarea fazelor cu structură în benzi care se dezvoltă în planul y - z , diferit de planul de formare a benzilor în câmp uniaxial [14].

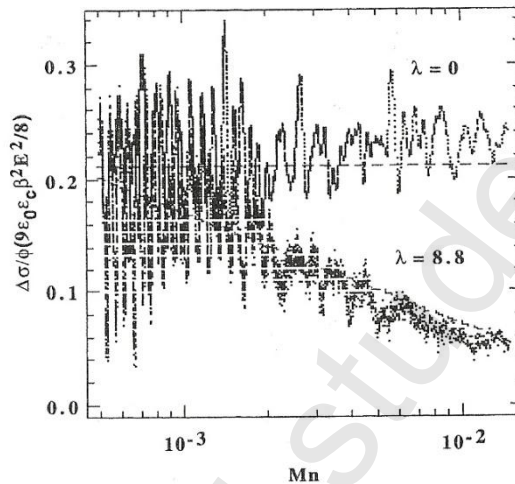


Fig.4.14 Tensiunea într-un câmp biaxial este similară cu cea dintr-un câmp uniaxial, însă dependența de temperatură este opusă, prezentând o scădere semnificativă a tensiunii la valori mari ale Mn

Imagini de-a lungul axei y ilustrează organizarea particulelor în câmp biaxial, conform **Fig.4.15**. Fig.4.15(b) prezintă formarea acestor structuri în benzi atunci când sunt atinse valori mici ale lui Mn , $Mn=0.002$, în cazul de față. Atunci când Mn are valori ridicate, structurile în benzi dispar, ca în exemplul din Fig.4.15(a) unde $Mn=0.08$.

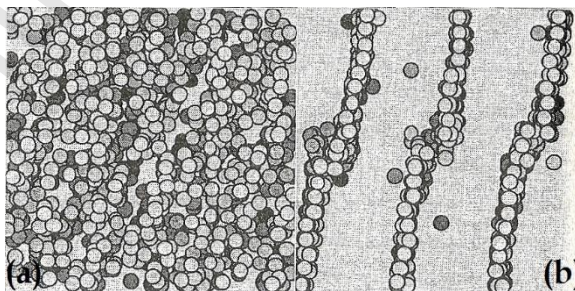


Fig.4.15 Vederi de-a lungul axei fluidului, (axa y) ilustrând formarea structurilor biaxiale, de tip foaie, în planul y - z corespunzătoare lui $\lambda=8.8$: (a) $Mn = 0.08$ și (b) $Mn = 0.002$

B. Forfecarea oscilatorie a fost simulată prin aplicarea unui câmp timp de 25 ms urmată de forfecarea fluidului *MR* (particulelor), cu valori fixate ale frecvenței și amplitudinii de deformare. În general, după câteva cicluri, este atinsă o comportare de stare staționară, însă pentru obținerea unor rezultate statistice corecte, s-au aplicat 200 de cicluri de forfecare.

Simulările de forfecare oscilatorie în câmp uniaxial au luat în considerație 10.000 de particule. În aceste cazuri, s-a observat apariția fazei cu structură în benzi, în situațiile în care amplitudinea deformației depășește ~ 0.15 . Faza cu structură în benzi este caracterizată printr-o instabilitate în zona de alunecare prin forfecare, ceea ce dă naștere unor puternice deformații efective. Evidențierea acestor deformații este prezentată în **Fig.4.16** prin variația tensiunii normalizate în funcție de deformația efectivă, $\gamma \times (L/d)$, unde L/d este raportul dintre dimensiunea volumului de simulare pe direcția z și diametrul particulelor.

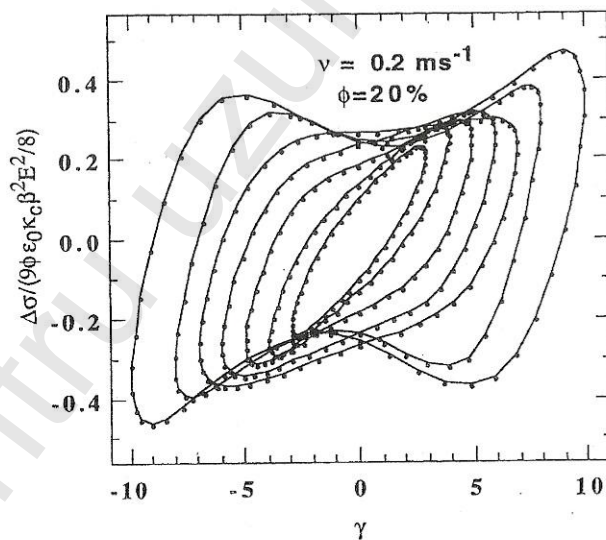


Fig.4.16 Forfecarea oscilatorie în câmp uniaxial arată că parametrul predominant este amplitudinea deformației. Neliniaritățile se accentuează pe măsură ce se formează faza în benzi, producând creșterea tensiunii efective

Observațiile au arătat că variația dinamică a tensiunii normalizate devine din ce în ce mai neliniară pe măsură ce faza cu structură în benzi

evoluează pe parcursul a mai multor cicluri, din cauză că forfecarea efectivă (defomarea) din zona de alunecare se accentuează. **Fig.4.17** ilustrează rezultatele modelării după modelul lanțului cinetic.

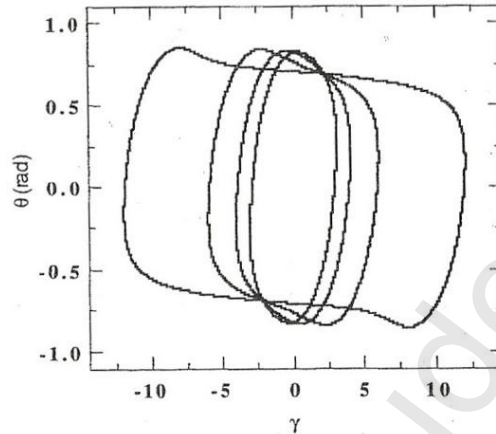


Fig.4.17 Simularea după modelul lanțului cinetic permite obținerea unor bucle tensiune-deformație similare celor experimentale, după după 4 cicluri

Spre deosebire de câmpul uniaxial, aplicarea unui câmp magnetic biaxial nu duce la apariția fazei cu structură în benzi iar buclele tensiune-deformație se stabilizează rapid, deoarece nu se produc zone cu alunecare prin forfecare. Curbele simulate în **Fig.4.18** și cele obținute după modelul lanțului cinetic, în Fig.4.17, sunt similare.

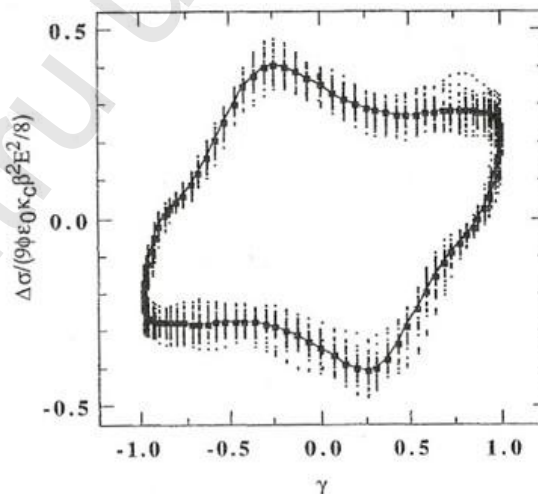


Fig.4.18 La simularea în câmp biaxial, buclele tensiune-deformație se stabilizează foarte rapid

4.1.3 Geluri magnetoreologice

Gelurile polimerice joacă un rol important în multe domenii, cum ar fi:

- biotehnologia,
- tehnologia de separație
- industriile farmaceutice.

Gelurile sensibile la stimuli se bucură de mare interes datorită capacității lor de a dezvolta grade mari de dilatare, ca reacție a unor variații reduse ale unor parametri legați de condițiile înconjurătoare, cum ar fi:

- temperatura
- pH
- compoziția solventului

Aceste calități recomandă gelurile sensibile la stimuli pentru următoarele aplicații:

- distribuirea controlată a medicamentelor
- actuatori moi
- micromanipulatoare
- mușchi artificiali

Utilizarea gelurilor sensibile la stimuli este limitată de un mare dezavantaj:

- modificările de formă și volum sunt restricționate, d.p.d.v. cinetic, de către procesele de umflare-dezumflare, relativ lente

Pentru accelerarea reacției gelurilor s-au dezvoltat gelurile polimerice sensibile la câmp magnetic: ferogeluri [15].

Ferogelul:

- mediu elastic magnetocontrolat, format dintr-o rețea polimerică ramificată, înglobată într-un ferrofluid,
- ansamblu diluat de nanoparticule, care nu interacționează

reciproc, omogen distribuite în rețeaua polimerică.

Ferofluidul:

- ✓ dispersie coloidală de particule magnetice monodomeniale,
- ✓ mărimi tipice de 10 nm.

La ferogeluri:

- ❖ proprietățile magnetice și elastice sunt cuplate,
- ❖ variațiile de formă se produc instantaneu, la aplicarea câmpului magnetic,
- ❖ variațiile de formă pot fi continue sau bruște.

Prepararea ferogelurilor:

- precipitarea particulelor magnetice se poate produce “*in situ*”, înainte, în timpul sau după reacția de reticulare.

Prepararea unui hidrogel de polivinil alcool cu particule magnetice încorporate:

- prepararea coloidului de magnetită (Fe_3O_4) din soluții apoase de FeCl_2 (clorură feroasă) și FeCl_3 (clorură ferică) duce la obținerea a 10 % particule magnetice cu diametre de 10 nm;
- stabilizarea particulelor coloidale cu HClO_4 ;
- reticularea chimică a polivinil alcoolului cu glutaraldehidă;
- pentru a permite interacțiunii magnetice să deformeze ferogelul, densitatea a fost menținută la valori scăzute, raportul dintre numărul unităților de vinil alcool (VA) și numărul moleculelor de glutaraldehidă (GDA) variind între 100 și 400;
- probele s-au obținut de formă cilindrică cu diametrul de 1-2 cm și lungimea de 10-20 cm;
- s-au controlat, în compoziția chimică a ferogelului:
 - ✓ concentrația de polimer (ex.: 6,3 % PVA);
 - ✓ raportul nr. unit. VA/ nr. molecule GDA (ex.: 300);

✓ conținutul de magnetită (ex.: 4,25 %)

S-au determinat curbele de magnetizare ale ferogelurilor, cu diverse compoziții chimice, la temperaturi între 4 și 300 K, utilizând un magnetometru cu probă vibrantă.

O mică cantitate de ferogel a fost făcută să vibreze uniform în întrefierul unei bobine (8000 spire, 1 cm), plasată într-un criostat de *He*, cu temperatura controlabilă între 4 și 300 K. Întreg ansamblul este plasat în interiorul unui electromagnet superconductor, care generează un câmp de până la 14 T, cu omogenitate de 0.1 mT/cm. Se măsoară tensiunea indusă în bobina de măsurare, sub efectul diferitor câmpuri magnetizante, care este proporțională cu magnetizația probei.

Studiul ferogelurilor în câmp magnetic s-a efectuat prin suspendarea în apă, a tuburilor cilindrice de cupru cu ferogel, între polii unui electromagnet. Poziția superioară a ferogelului este fixată cu un fir de *Cu*, legat la un dispozitiv de măsurare a forței, la valoarea z_m , conform **Fig.4.19**.

Capătul inferior al tubului este caracterizat prin poziția z_0 , față de axa orizontală a electromagnetului. Când prin electromagnet trece un curent constant, se consideră câmpul magnetic drept variabil de-a lungul axei z . Curentul a variat între 0 și 10 A iar tensiunea s-a păstrat la 40 V. Inducția magnetică (B) variază cu intensitatea câmpului magnetic (H) prin permeabilitatea magnetică (μ_0): $B = \mu_0 H$.

B variază de-a lungul axei z ($B_{\max} = 0.84\text{T}$, la $z = 0$), conform **Fig.4.20**:

$$B(z) = B_{\max} f(z) \quad (4.4)$$

unde:

$$f(z) = 1 - kz^2, \text{ dacă } |z| < \delta, \quad (4.5)$$

$$f(z) = (1 - kz^2)e^{-\gamma/(|z|-\delta)}, \text{ dacă } |z| \geq \delta \quad (4.6)$$

γ – ct. ce descrie scăderea exponențială a intensității la distanțe mari;

δ – raza polilor electromagnetului;

$k = \gamma / (2\delta + \gamma\delta^2)$, constantă

$$B_{\max} = k_1 I, \quad (4.7)$$

k_1 – ct.,. depinde de intensitatea curentului electric, I din electromagnet.

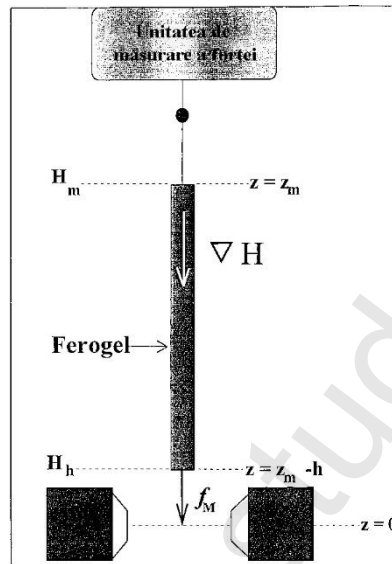


Fig.4.19 Diagramă schematică a unui ferogel în câmp magnetic neuniform

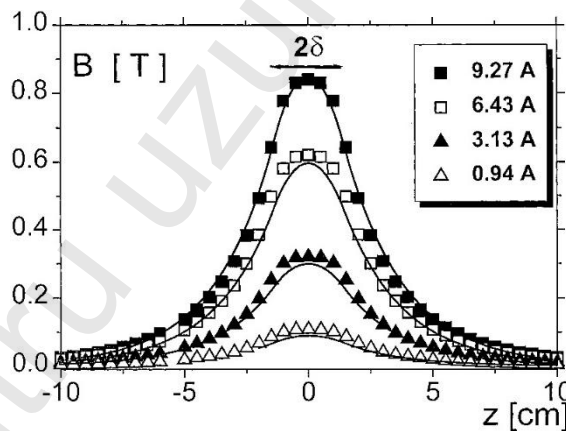


Fig.4.20 Variații măsurate ale inducției magnetice de-a lungul axei z a probei, la patru valori constante ale curentului. Linia continuă corespunde ecuațiilor (4.4 - 4.7) [15]

Pentru a determina dependența alungire-tensiune de întindere, s-a introdus un sistem digital de monitorizare, conform **Fig.4.21**. Camera înregistrează deplasarea capătului cilindrului de ferogel, printr-un program care digitalizează imaginea, permițând înregistrarea celor mai mici mișcări (circa

10 μm). Gelul a fost deformat cu ajutorul unui gradient de câmp magnetic, la temperatura camerei.

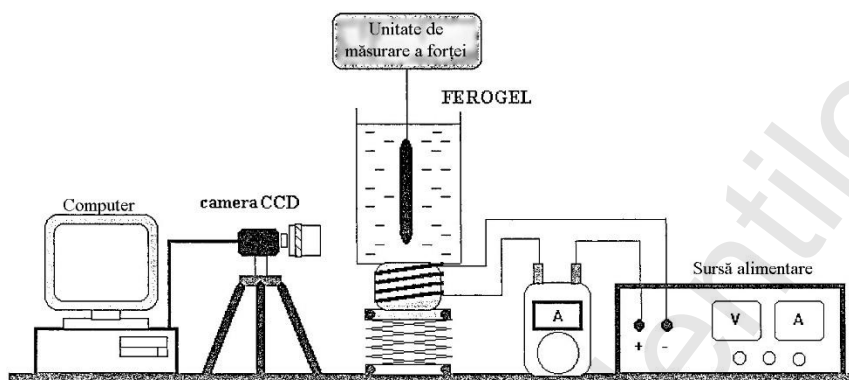


Fig.4.21 Schema instalației experimentale pentru studiul proprietăților magnetoelastice ale ferogelului

Fig.4.22 prezintă o curbă tipică de magnetizare a ferogelului, determinată și măsurată la temperatura camerei. Deoarece ferogelul este superparamagnetic la peste 50 K, nanoparticulele distribuite în matricea polimerică au și ele un comportament paramagnetic (momentul magnetic se poate roti în interiorul particulei, fără a o roti pe aceasta). Deci ferogelul devine magnetizat, sub efectul unui câmp extern, fără a fi deformat local.

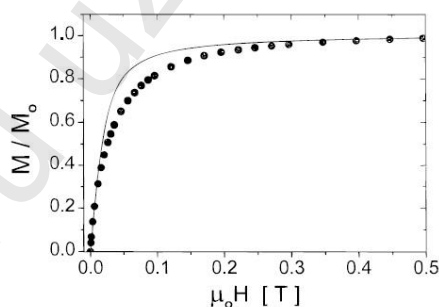


Fig.4.22 Curbă de magnetizație a ferogelului în funcție de intensitatea de magnetizare. Linia continuă este variația calculată iar punctele sunt valorile măsurate. Decalajul provine de la distribuția de mărime a particulelor încorporate în rețeaua ferogelului [15]

Datele experimentale nu au relevat prezența unui histerezis magnetic, deci ferogelul nu prezintă magnetizație remanentă. Deci, sub efectul unor câmpuri magnetice aplicate, cu frecvențe relativ reduse, ($\sim\text{Hz}$), pierderile

ireversibile prin căldură sunt destul de reduse. Pe aceste considerente, dispozitivele acționate cu ferogel au pierderi energetice foarte reduse.

Sensibilitatea ferogelului depinde de densitatea de înglobare a particulelor magnetice. Susceptibilitate magnetică variază liniar cu cantitatea de particule magnetice, exprimată în %m. Factorul de proporționalitate este de 0.34.

Fig.4.23 prezintă variația deplasării relative, măsurată la capătul de jos al ferogelului, în funcție de intensitatea curentului prin electromagnet. Se observă o alungire puternică, de circa 40 %, care se produce la cca. 6 A, la aplicarea câmpului și o contracție similară la aproximativ 2.5 A la îndepărtarea lui. Variațiile dimensionale s-au produs într-o zecime de secundă, indiferent de caracteristicile ferogelului. Histerezisul observat la alungire-contracție este independent de timp și nu este de natură magnetică (ferogelul nu prezintă histerezis magnetic).

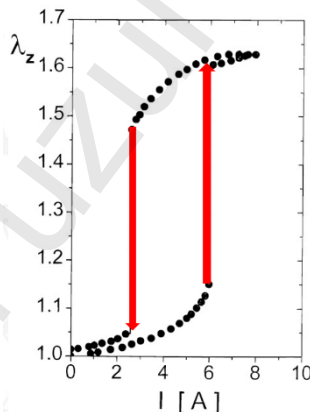


Fig.4.23 Deformație discontinuă a ferogelului în câmp magnetic obișnuit. S-a trasat variația raportului de deformare în funcție de intensitatea curentului aplicat electromagnetului

Variația deformației ferogelului este influențată de o serie de factori, cum ar fi:

- ✓ distribuția câmpului magnetic, exprimată prin γ , Fig.4.24(a): deformația crește odată cu scăderea exponențială a intensității câmpului magnetic;

- ✓ distanța față de electromagnet, Fig.4.24(b): deformarea scade odată cu distanța z_0 ;
- ✓ concentrația de particule magnetice, $\Phi_m < 8 \text{ \%vol.}$, Fig.4.24(c): intensitatea curentului la care se produce deformarea bruscă scade, la creșterea Φ_m ;
- ✓ modulul de elasticitate al matricei polimerice, G_0 , controlat prin densitatea de reticulare, Fig.4.24(d): creșterea gradului de reticulare, mărește intensitatea curentului la care se produce deformarea bruscă.

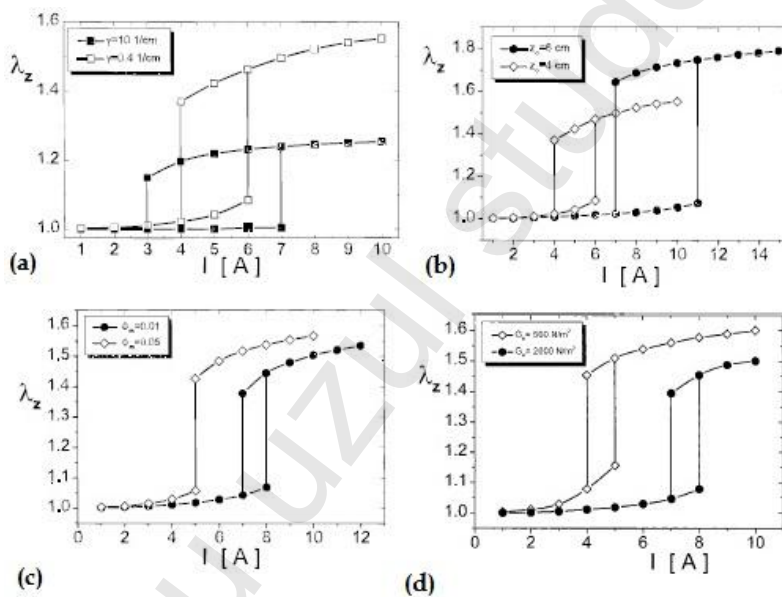
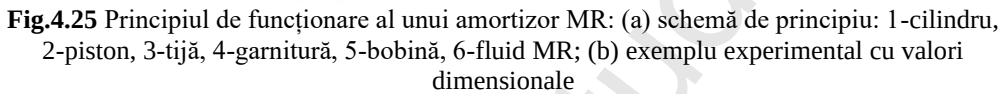


Fig.4.24 Dependența variației deformăției ferogelului, în funcție de intensitatea curentului electric, de: (a) distribuția câmpului magnetic, γ ; (b) poziția inițială a capătului ferogelului, z_0 ; (c) densitatea de particule magnetice, Φ_m ; (d) densitatea de reticulare a matricei polimerice, exprimată prin modulul de elasticitate, G_0

4.1.4 Principiul amortizării magnetoreologice

Amortizarea magnetoreologică se bazează pe tensiunea de forfecare a fluidului MR. Amortizoarele MR își pot modifica rapid capacitatea de amortizare sub comanda unui câmp magnetic extern. **Fig.4.25** prezintă principiul de funcționare al unui amortizor MR. La aplicarea câmpului



Pentru studiul principiului amortizării magnetoreologice s-a întocmit montajul din **Fig.4.26**. Atunci când solenoidul (5) eliberează compresorul (3), acesta solicită brusc amortizorul (1). Acesta dezvoltă forță, măsurată cu celula de forță (8) și deplasare, măsurată cu senzorul cu laser (10).

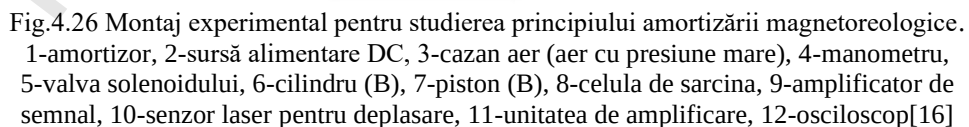


Fig.4.27 prezintă detalii despre materialele și condițiile experimentale.

Tabel Componentă a fluidelor funcționale magnetice			
	Particule magnetice [% vol.]		Solvent
	dimensiunea μm	de dimensiune nm	
Fluid-1	27.2	2.8	Poli- a - Olefină
Fluid-2	24.4	5.6	

Tabelul 2 Condiții experimentale	
Presiunea aerului [MPa] (sarcină)	0,4, 0,6, 0,8
Curent electric [A] (câmp magnetic)	0, 3, 6

Fig.4.27 Detalii ale particulelor magnetice, lichidului purtător și parametrilor experimentali

Cum ambele fluide, 1 și 2, conțin aceeași fracțiune volumică de particule magnetice (30 %), rezultă că *fluidul 1* (care are mai puține particule cu dimensiuni nanometrice) conține mai puține particule decât *fluidul 2*. Parametrii de funcționare a amortizorului sunt prezentați în **Fig.4.28**.

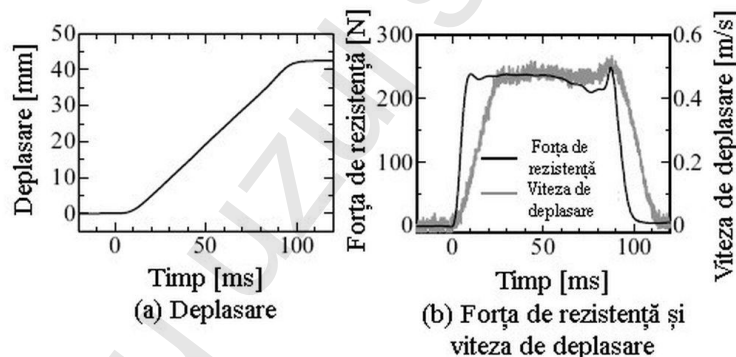


Fig.4.28 Sinteza parametrilor amortizorului: (a) variația deplasării; (b) variațiile rezistenței și vitezei de deplasare

Fig.4.28(a) ilustrează dependența de timp a deplasării amortizorului. Se constată că, după cca. 0.1 s, viteza de deplasare a amortizorului devine constantă. În **Fig.4.28(b)** se poate observa cum rezistența amortizorului *MR* (dată de vâscozitate și de frecarea uscată dintre particule și suprafața solidă) crește foarte rapid, atinge o valoare constantă și apoi scade complet, după același interval de timp de 0.1 s. Această succesiune de mișcări se repetă în toate condițiile experimentale, ceea ce diferă fiind: (1) momentul la care

deplasarea devine constantă și (2) viteza de deplasare.

Forța de rezistență și viteza de deplasare a amortizorului cresc imediat după creșterea forței și ulterior ating valori constante. Fiindcă atât deplasarea cât și forța de rezistență variază în timp la fel, rezultă că rezistența amortizorului depinde de vâscozitate care, la rândul ei, depinde de viteza de deplasare.

A. Efectele condițiilor experimentale au fost studiate din punct de vedere al intensității curentului electric și al presiunii aerului din compresor. Rezultatele sunt prezentate în Fig.4.29 și 4.30.

În **Fig.4.29** se consideră raportul dintre gradientul forței de rezistență (G_f) și gradientul vitezei de deformare (G_s), G_f/G_s : G_f/G_s ridicat $\rightarrow$ predomină influența frecării.

La presiunea de 0.6 MPa:

- La 3A (G_f/G_s)_{fluid 2} > (G_f/G_s)_{fluid 1}.
- La 6A (G_f/G_s)_{fluid 1} < (G_f/G_s)_{fluid 2}.

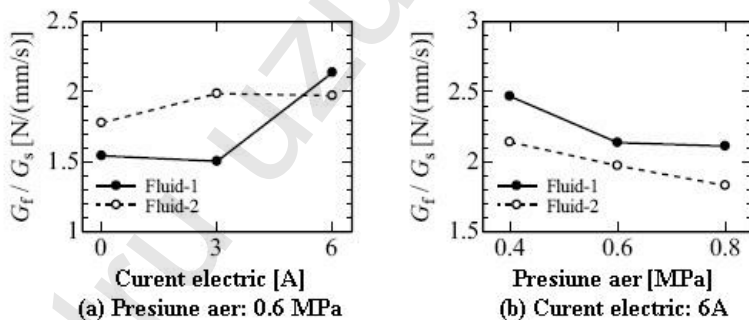


Fig.4.29 Efectele condițiilor experimentale asupra raportului dintre gradientul forței de rezistență și gradientul vitezei de deplasare: (a) efectul intensității curentului electric; (b) efectul presiunii aerului din compresor

Această evoluție se datorează numărului mai mare de particule magnetice, din *fluidul 1* care conține un număr mai mare de particule de dimensiuni nanometrice, care la creșterea curentului sunt activate și contribuie la o creștere mai puternică a forței de frecare. Creșterea presiunii contribuie la reducerea frecării $\rightarrow G_f/G_s$ scade, deoarece se reduce numărul punctelor de

contact dintre particulele magnetice [16].

În **Fig.4.30** se analizează variațiile forței de rezistență în funcție de deplasarea amortizorului. La curent redus, Fig.4.30(a) arată că sunt necesare deplasări mai mari pentru ca forța de rezistență să atingă o anumită valoare.

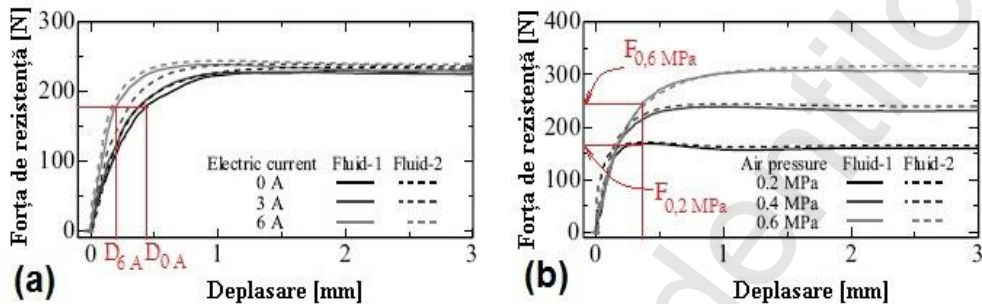


Fig.4.30 Efectele condițiilor experimentale asupra variației forței de rezistență cu deplasarea amortizorului: (a) efectul intensității curentului electric; (b) efectul presiunii aerului din compresor

La câmp magnetic constant, Fig.4.30(b) arată că, la aceeași deplasare, se obține o valoare mai mare a forței de rezistență atunci când presiunea aerului este mai mare, deoarece creșterea presiunii produce scăderea frecării și creșterea vitezei de deplasare a particulelor, ceea ce duce la mărirea vâscozității fluidului MR.

B. Efectele formei, mărimii, cantității și tipului de particule magnetice, din componența fluidelor MR, au fost studiate cu ajutorul instalației experimentale din **Fig.4.31**. S-a utilizat un reometru cu plăci paralele atașat de o bobină cu 2500 de spire. Fluidul MR a fost plasat între 2 plăci paralele din oțel inoxidabil, distanțate la 0.5 mm și localizate în mijlocul bobinei (solenoid).

La aplicarea unui curent de 1 A în solenoid, acesta dezvoltă un câmp magnetic de 0.64 kOe. Placa inferioară de oțel inoxidabil se poate roti sau oscila prin mărirea vitezei de forfecare sau a frecvenței de excitație [17]. Placa superioară de oțel inoxidabil a fost conectată cu un traductor de forță. Ca particule magnetice, s-au folosit:

- magnetita (oxid), Fe_3O_4 , cu diametre sub $5 \mu\text{m}$ și densitatea 5.18 g/cm^3 ;
- fierul carbonilic, $\text{Fe}(\text{CO})_5$, cu diametre de $4.5 - 5.2 \mu\text{m}$ și densitatea 4.4 g/cm^3 ;

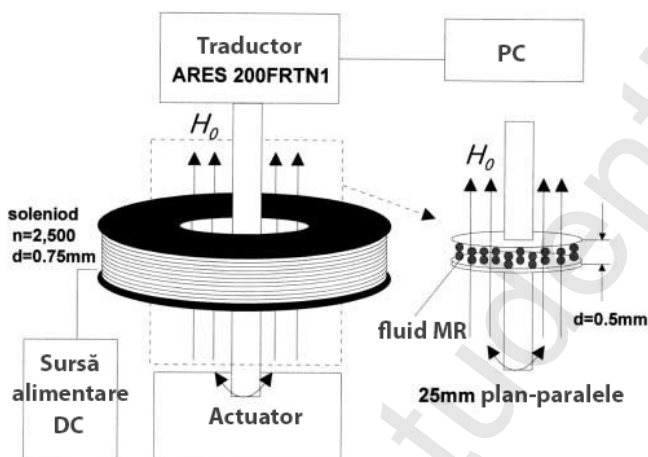


Fig.4.31 Diagramă schematică a montajului utilizat pentru măsurătorile reologice ale fluidelor MR, cu diverse tipuri de particule magnetice [17]

Pentru stabilizare, în fluidul purtător compus din ulei siliconic cu 10 % polidimetilsiloxan, s-au introdus aditivi de nanoparticule feromagnetice:

- $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$;
- CrO_2

Fig.4.32 prezintă micrografiile SEM ale celor patru tipuri de particule magnetice. Se observă că magnetita nu are formă regulată, în timp ce pentacarbonilul de fier este sferic. Nanoparticulele de $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ și CrO_2 au morfologii aciculare. **Fig.4.33** redă variația momentului magnetic în funcție de intensitatea de magnetizare. Momentul magnetic (*magnetizația*) crește brusc, la creșterea intensității de magnetizare, stabilizându-se peste circa 6 kOe.

Măsurătorile reologice s-au efectuat în stare de curgere staționară, în câmp magnetic stabilizat, determinându-se variațiile tensiunii stabilizate de forfecare, τ , în funcție de viteza de forfecare $\dot{\gamma}$, conform **Fig.4.34**.

Fig.4.34(a) prezintă variațiile lui τ cu și fără câmp magnetic aplicat,

pentru particulele de magnetită cu fracțiunea de volum de 0.2 iar Fig.4.34(b) aceleași caracteristici pentru particulelor de pentacarbonil de fier, cu fracțiunea de volum de 0.4.

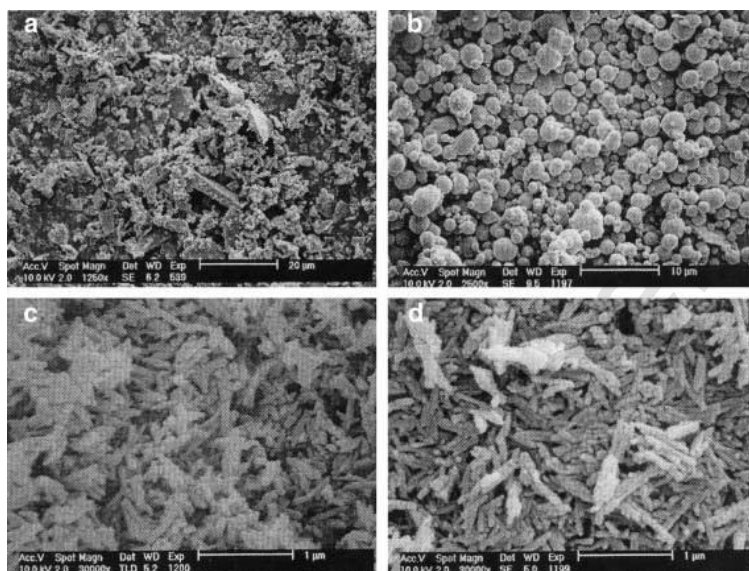


Fig.4.32 Micrografii SEM ale particulelor magnetice: (a) magnetita, Fe_3O_4 ; (b) pentacarbonilul de fier, $\text{Fe}(\text{CO})_5$; (c) nanoparticulele de $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$; (d) nanoparticulele de CrO_2

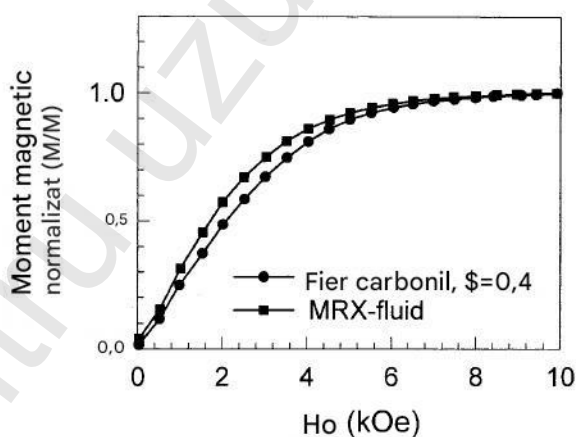


Fig.4.33 Variația momentului magnetic în funcție de intensitatea de magnetizare pentru două tipuri de particule magnetice

Se observă că cele două variații sunt asemănătoare, la aplicarea câmpului magnetic, dar la fierul carbonilic variațiile sunt mai semnificative. În plus, magnetita dezvoltă tensiuni de forfecare mai mari în absența câmpului

magnetic, unde nu s-a observat proporționalitatea dintre tensiune și viteza de deformare, din cauza magnetizației remanente a particulelor.

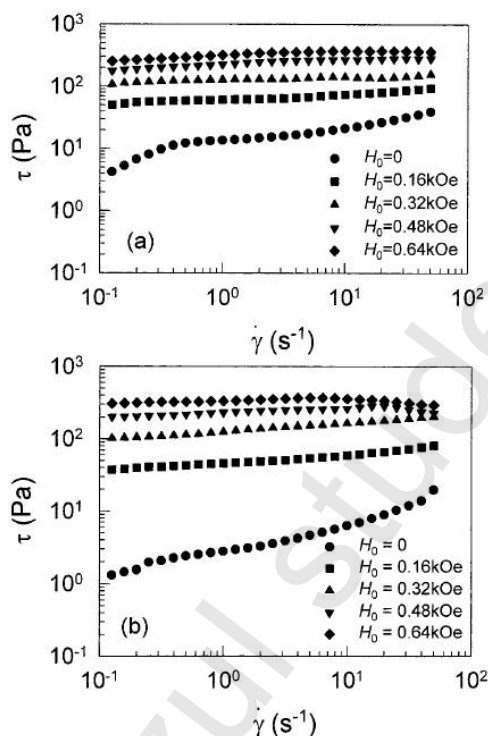


Fig.4.34 Variația tensiunii de forfecare stabilizată în funcție de viteza de forfecare a două tipuri de particule în ulei siliconic: (a) Fe_3O_4 cu fracțiunea de volum 0.2; (b) fier carbonilic, cu fracțiunea de volum 0.4

Cu ajutorul curbelor de variație a tensiunii de forfecare în funcție de viteză, s-au determinat tensiunile de curgere dinamică, τ_y , prin extrapolarea la zero a vitezei de forfecare. Rezultatele sunt sistematizate în **Fig.4.35** pentru diverse valori ale câmpului magnetic aplicat, H_0 , și ale fracțiunii volumice (ϕ) a celor două tipuri de particule. Din **Fig.4.35(a)** se poate observa că τ_y a magnetitei nu crește în mod liniar în funcție de câmpul magnetic aplicat.

În coordonate logaritmice s-a observat, la pentacarbonilul de fier, o dependență $\tau_y \sim H_0^{3/2}$, indiferent de fracțiunea de volum, Φ , ocupată de particule. Variațiile $\tau_y = f(\Phi)$, din **Fig.4.36**, arată o dependență cvasi-liniară la fracțiuni de volum foarte mici, în jur de 0.1 [17]

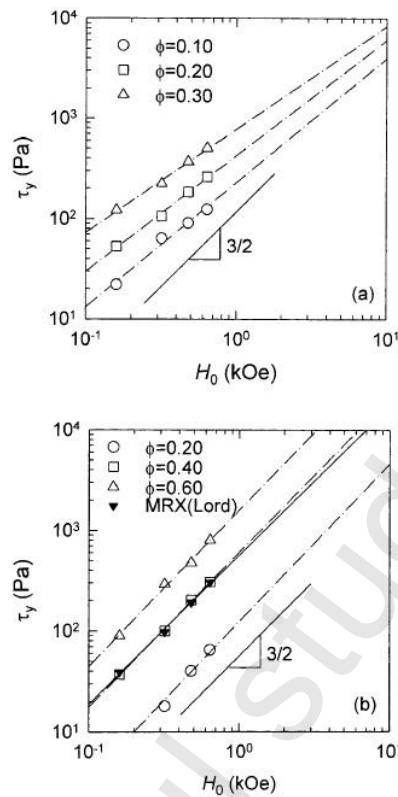


Fig.4.35 Dependența tensiunii de curgere dinamică de intensitatea câmpului magnetic aplicat, la două tipuri de particule în ulei siliconic : (a) Fe_3O_4 ; (b) fier carbonilic

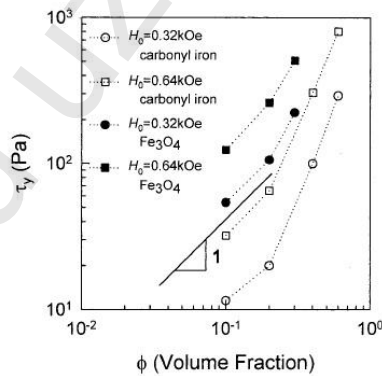


Fig.4.36 Dependența tensiunii de curgere dinamică de fracțiunea volumică de particule de Fe_3O_4 și de fier carbonilic

Fig.4.37 prezintă variațiile raportului de sedimentare în funcție de timp și de nanoparticulele stabilizatoare adăugate la particulele de pentacarbonil de fier. Raportul de sedimentare este definit ca $1 - V_{\text{super}} / V_{\text{susp}}$, unde V_{super} este

volumul lichidului „supernatant” (care conține particulele sedimentate) iar V_{susp} este volumul întregii suspensii.

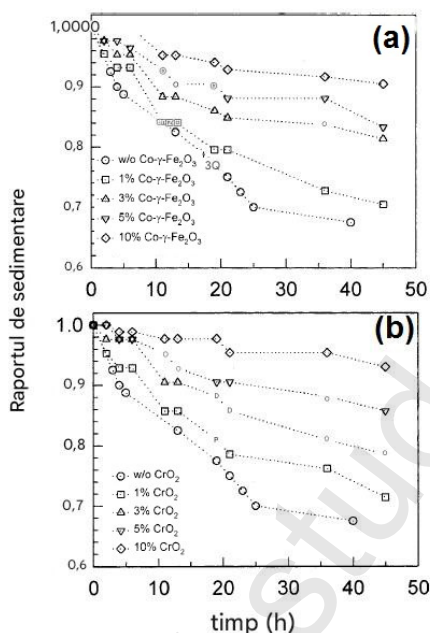


Fig.4.37 Variațiile raportului de sedimentare în funcție de timp la două tipuri de nanoparticule adăugate la pentacarbonilul de fier: (a) $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$; (b) CrO_2

În Fig.4.37, cu cercuri goale s-a reprezentat variația raportului de sedimentare în timp, pentru pentacarbonilul de fier neaditivat. Se observă că adăugarea celor două tipuri de nanoparticule mărește raportul de sedimentare, reducând volumul de lichid „supernatant”. Se consideră că nanoparticulele de CrO_2 au fost puțin mai eficiente decât cele de $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, în mărirea stabilității în timp a suspensiei MR, fiindcă au cauzat rapoarte de sedimentare mai mari.

C. Efectele fluidului purtător au fost analizate cu ajutorul aparatului experimental prezentat în **Fig.4.38**. S-au utilizat particule de pentacarbonil de fier, cu diametre medii de 2.3; 2.73 și 4.02 μm , tratate cu diverși aditivi, conform **Tab.4.2**.

Viteza de sedimentare s-a determinat prin plasarea fluidului MR într-un cilindru vertical, la temperatura camerei: $R = \Delta h/h$, unde: Δh este înălțimea coloanei de fluid cu sedimente,

h este înălțimea totală a coloanei de fluid la momentul inițial [18].

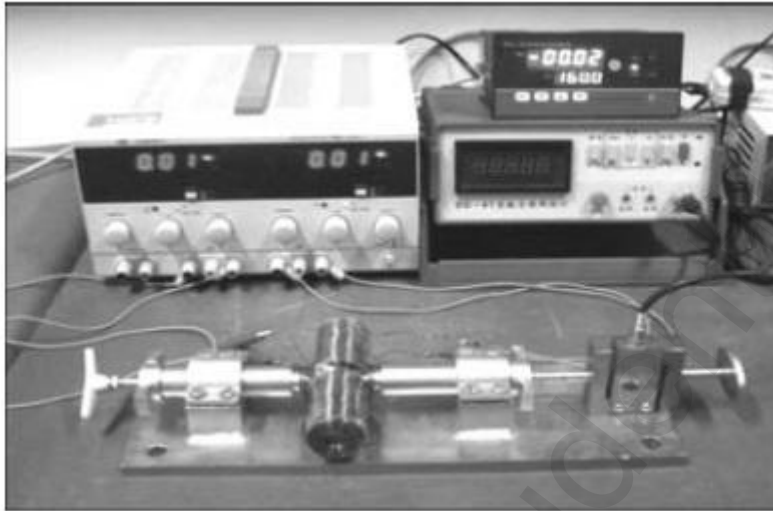


Fig.4.38 Aparat experimental pentru testarea tensiunii de forfecare la curgere

Tab.4.2 Detalii experimentale despre fluidele magnetoreologice analizate

Componente			
MRF	$d/\mu\text{m}$	Carrier	Additives
MRF21	2.30	Shock absorption fluid	Tween-80 Span-80
MRF22	2.73	Shock absorption fluid	Tween-80 Span-80
MRF23	4.02	Shock absorption fluid	Tween-80 Span-80
MRF24	2.30	45° transformer oil	Tween-80 Span-80
MRF25	2.30	Shock absorption fluid	Stearic acid Tween-80 Span-80
Viteza de sedimentare			
MRF	$d/\mu\text{m}$	$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$V/(10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
MRF21	2.30	1.309	1.8072
MRF22	2.73	3.360	0.8625
MRF23	4.02	4.340	1.4480

Din punct de vedere al stabilității la sedimentare, **Fig.4.39** arată că aditivii *Tween-80* & *Span 80* au dat rezultate mai bune decât celelalte tipuri de aditivi. **Fig.4.40** compară stabilitățile de sedimentare ale diferitelor tipuri de fluide *MR* analizate. Se constată că fluidul *MRF22*, cu particule având

diametrul mediu de $2.73 \mu\text{m}$, au cea mai buna stabilitate.

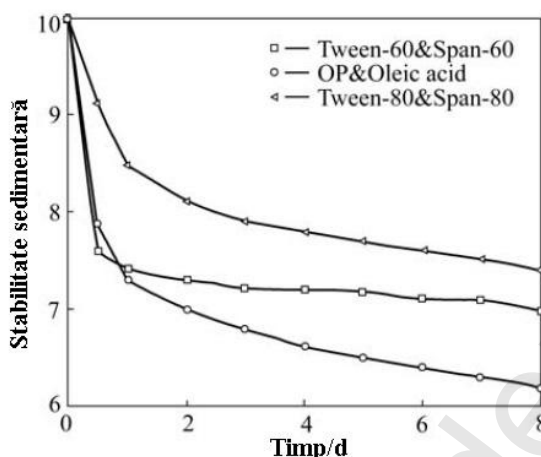


Fig.4.39 Relația dintre variația stabilității la sedimentare în timp și tipul aditivului

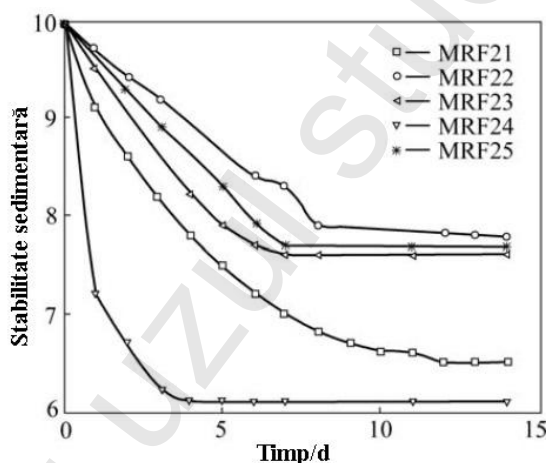


Fig.4.40 Efectele fluidului purtător asupra variației stabilității la sedimentare în timp

Conform Tab.4.2, fluidul *MRF 22*, cu particule de $2.73 \mu\text{m}$, are cea mai mică viteză de sedimentare: $0.8625 \cdot 10^{-8} \text{s}^{-1}$. Fluidul *MRF 24* care are ulei de transformator, drept lichid purtător, are cea mai mare viteză de sedimentare, din cauză vâscozității mult mai scăzute a uleiului.

Fig.4.41 prezintă rezultatele măsurătorilor de vâscozitate efectuate la 22.3°C . Toate vâscozitățile prezintă un comportament de subțiere la forfecare. Fluidul *MRF 24*, bazat pe ulei de transformator, are cea mai mică vâscozitate. Se poate constata că diametrul particulelor de pentacarbonil de fier are o mare

influență asupra valorilor vâscozității, care crește aproape proporțional cu diametrul particulelor. *MRF23*, cu particule de $4.02\ \mu\text{m}$, are cea mai mare vâscozitate.

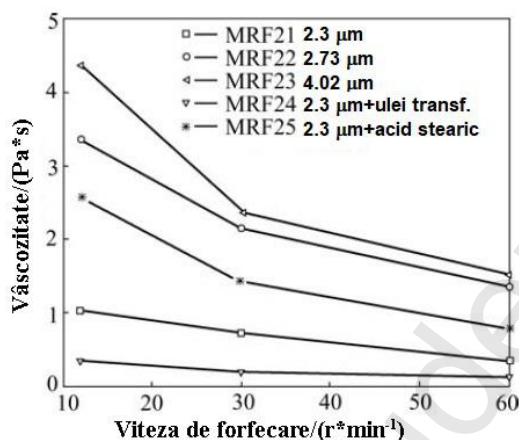


Fig.4.41 Efectele fluidului purtător asupra variației vâscozității cu viteza de forfecare

Adăugarea acidului stearic, în *MRF25*, face ca acesta să aibă o vâscozitate mai mare decât *MRF21*, deși ambele au particule de aceeași dimensiuni și același fluid purtător. **Fig.4.42** prezintă variația tensiunii de curgere la forfecare în funcție de intensitatea câmpului magnetic.

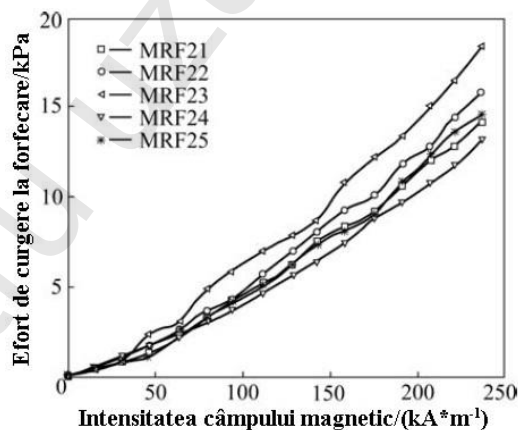


Fig.4.42 Efectele fluidului purtător asupra variației tensiunii de curgere la forfecare cu intensitatea câmpului magnetic

Se observă că, în toate cazurile, creșterea intensității câmpului magnetic a produs o creștere asemănătoare a tensiunii de curgere la forfecare, la toate fluidele magnetoreologice analizate. Se consideră că la creșterea

intensității câmpului magnetic crește și forța de atracție dintre particulele magnetice și din acest motiv forța necesară forfecării aranjamentelor ordonate, ale particulelor, crește. Creșterea diametrului particulelor, de la *MRF21* (2.3 μm) la *MRF22* (2.73 μm) și în final la *MRF23* (4.02 μm), este însoțită de creșterea tensiunii de forfecare. Comparând curbele caracteristice fluidelor *MRF21* și *MRF25*, se observă că sunt similare, deci adiția de acid stearic nu a modificat tensiunea de curgere la forfecare.

Tensiunea de curgere a fluidului *MRF24* este mai mică decât cea a fluidului *MRF21*, din cauza uleiului de transformator, folosit ca fluid purtător, care produce reducerea vâscozității, deși ambele au particule de aceeași dimensiune.

4.2 Aplicațiile suspensiilor magnetoreologice

Principalele aplicații ale fluidelor *MR* includ:

- industria automobilelor;
- finisarea de precizie;
- controlul vibrațiilor în motoarele Diesel la bordul navelor;
- sistemele de amortizare ale trenurilor de aterizare;
- protecția antiseismică a clădirilor;
- alte aplicații potențiale, cum ar fi:
 - a) sistemele de frânare,
 - b) dispozitivele biomedicale tactile,
 - c) materialele cu rigiditate controlabilă, etc.

4.2.1 Industria automobilelor

Principalele aplicații ale fluidelor *MR*, în domeniul industriei automobilelor sunt amortizoarele controlabile, utilizate pentru dezvoltarea unor sisteme de amortizare semi-activă, conform **Fig.4.43**. Se observă cum

amortizorul *MR* lucrează în paralel cu arc. Pentru simulări s-a folosit modelul mașinii „*pe sfert*” (o roată din patru).

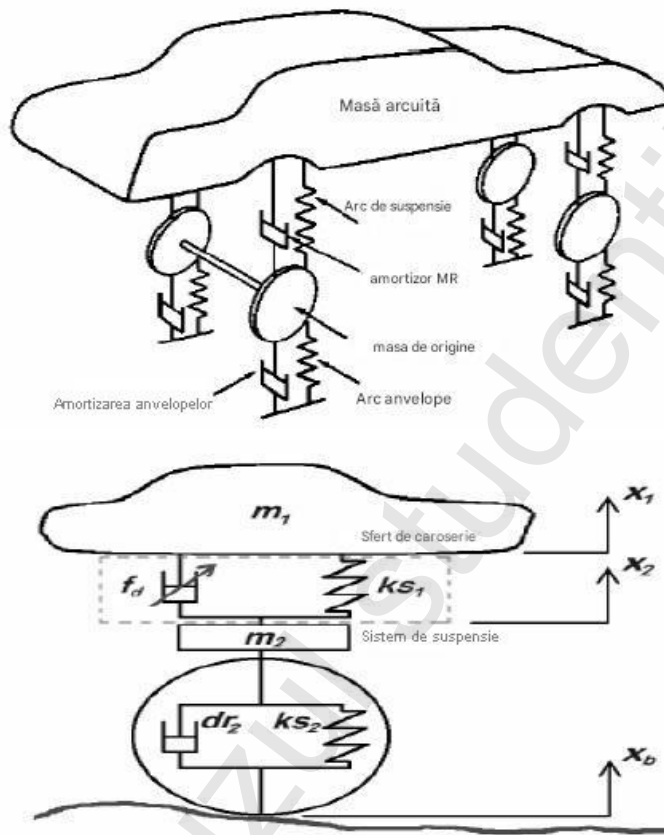


Fig.4.43 Principiul amortizării semi-active: (a) schema unei suspensii auto; (b) ilustrarea modelului „pe sfert de mașină”

O alternativă la modelul „*pe sfert*” este metoda „*hardware-in-the-loop-simulation (HILS)*” care permite constituirea unui model matematic al amortizării semi-active a automobilelor, pe baza modelului mecanic din **Fig.4.44**. Corpul mașinii se consideră rigid, de masă M și având trei grade de libertate:

- translația după direcția verticală (z)
- rotațiile după direcția de tangaj (θ)
- de ruliu (ϕ).

În cele ce urmează se consideră ($i = 1, 2, 3, 4$) pentru fiecare dintre cele

4 roți, cu masele m_i .

k_{si} = coeficientul total de rigiditate al suspensiei;

c_{si} = coeficientul de amortizare al suspensiei;

k_{ti} = coeficientul de rigiditate al pneurilor;

z_g, z_{usi}, z_i = deplasările verticale ale masei amortizate și neamortizate și respectiv cea a solului;

F_{MRi} = forțele de amortizare ale celor 4 amortizoare MR [19].

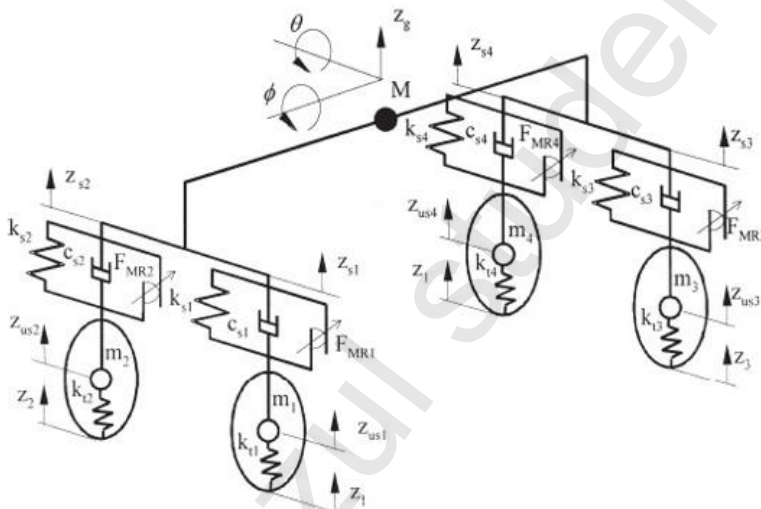


Fig.4.44 Schema modelului mecanic al suspensiei magnetoreologice semi-active a automobilelor

Metoda de modelare *HILS* este ilustrată în **Fig.4.45**. Această metodă permite o modificare ușoară a parametrilor sistemului și condiții largite de operare, pentru a simula situații practice. Metoda conține trei secțiuni:

- interfața,
- implementarea hardware,
- simularea software.

Interfața include un computer cu placă de achiziție (En.: *digital signal processing* = *DSP*) și transformatoare din curent alternativ în curent continuu și invers (din *CC* în *CA*) .

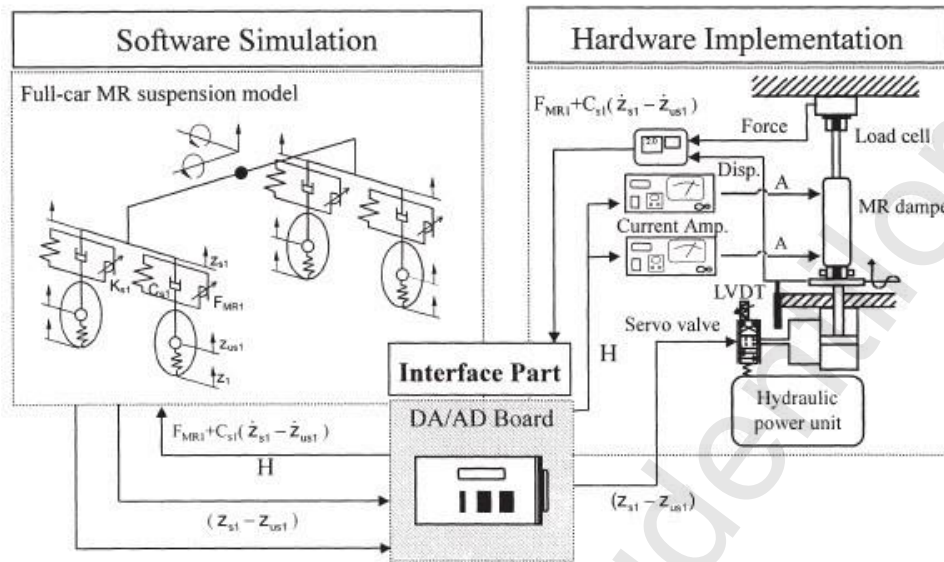


Fig.4.45 Diagramă schematică a metodei „hardware-in-the-loop-simulation” (HILS) de modelare a sistemului MR de suspensie a automobilelor

Implementarea hardware constă din amortizorul MR, amplificatorul de curent și testerul pentru amortizorul hidrolic (forță-deplasare).

Simulatorul software constă din modelul mecanic și algoritmul de control al amplitudinii constante (En.: skyhook). Forța de amortizare MR este determinată cu ajutorul amplificatorului hidrolic iar semnalul este reintrodus (En.: feed-back) în simulare.

Pe baza semnalului primit de la testerul hidrolic, computerul comandă amplificatorul de curent și bucla de simulare se închide. Datorită particularităților sale, metoda HILS este superioară modelului de simulare „pe sferă”. Fig.4.46 prezintă o perspectivă a componentelor modelului de simulare HILS.

Prin HILS s-au efectuat două tipuri de modelări considerând variațiile:

1. unei singure denivelări a drumului, de 8 cm, trecută încet, cu viteza de 3.08 km/h;
2. mai multor denivelări, ale unui drum pavat, care produc vibrații ale mașinii, la viteza de 72 km/h.

Parametrii sistemului suspensiei *MR* sunt aleși pe baza valorilor convenționale, **Fig.4.47**.

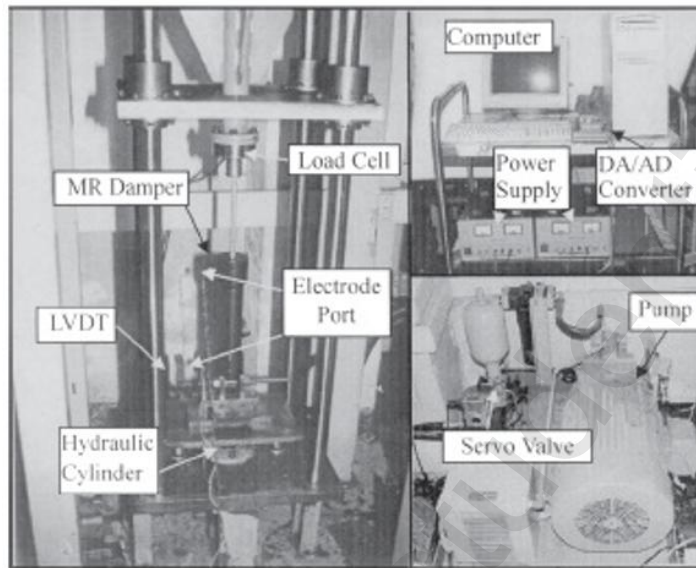


Fig.4.46 Componentele sistemului de simulare prin metoda *HILS* a suspensiei *MR* totale

Parameter	Value	Parameter	Value
M	1330 Kg	K_{s3}	19600 N/m
m_1	47 Kg	K_{s4}	19600 N/m
m_2	47 Kg	K_{r1}	200000 N/m
m_3	40 Kg	K_{r2}	200000 N/m
m_4	40 Kg	K_{r3}	200000 N/m
c_{s1}	1695 Nm/s	K_{r4}	200000 N/m
c_{s2}	1695 Nm/s	A_p	0.000707 m ²
c_{s3}	1695 Nm/s	A_r	0.000254 m ²
c_{s4}	1695 Nm/s	L_m	0.04 m
k_{s1}	37240 N/m	H_m	0.001 m
k_{s2}	37240 N/m	B_m	0.000453 m ²

Fig.4.47 Parametrii sistemului de amortizare *MR*, completă

Fig.4.48 prezintă variațiile în timp ale sistemului de suspensie *MR* pentru excitația produsă de o denivelare. Se observă modul în care deplasarea și accelerația sunt amortizate:

- pe verticală, Fig.4.48(a, b);
- la nivel de tangaj, Fig.4.48(c, d);
- la nivelul pneurilor, Fig.4.48(e)

Fig.4.49 prezintă reacțiile simulate prin *HILS*, determinate prin

densitatea spectrală de putere (*En.*: *power spectral density, PSD*) la frecvența vibrațiilor produse de denivelările drumului. Se observă, și pentru acest tip de modelare, că accelerațiile și deplasările sunt substanțial reduse în vecinătatea frecvenței de rezonanță, de (1–2Hz).

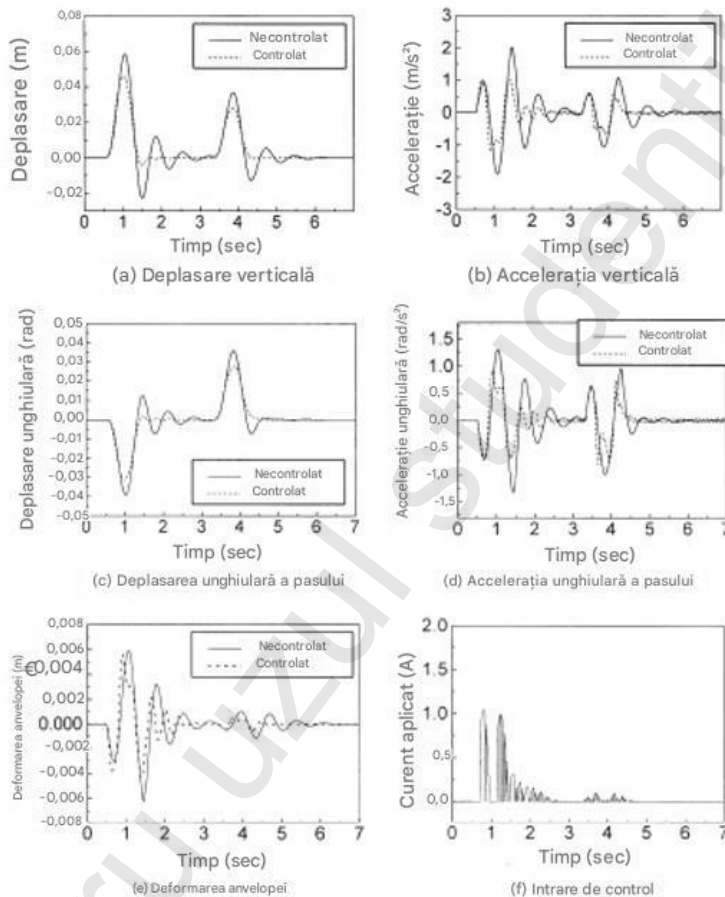


Fig.4.48 Reacțiile la denivelare, simulate prin intermediul *HILS*

Simulările prezentate în Fig.4.48 și 4.49 demonstrează că ambele strategii sunt eficiente pentru a controla atât confortul călătoriei cât și ținuta la drum. Din Fig.4.49(c) se observă că reacția controlată a deformației pneurilor este mai proastă decât reacția necontrolată, pentru frecvența roții (10 Hz). Acest lucru se datorează controler-ului de altitudine care asigură doar incrementul de disipare a energiei, la mișcare dinamică a suspensiei. Există riscul deteriorării controlului la frecvențe mai mari decât cea naturală a

corpului. Pentru compensarea acestei erori se recurge la controlul constanței gârzii la sol.

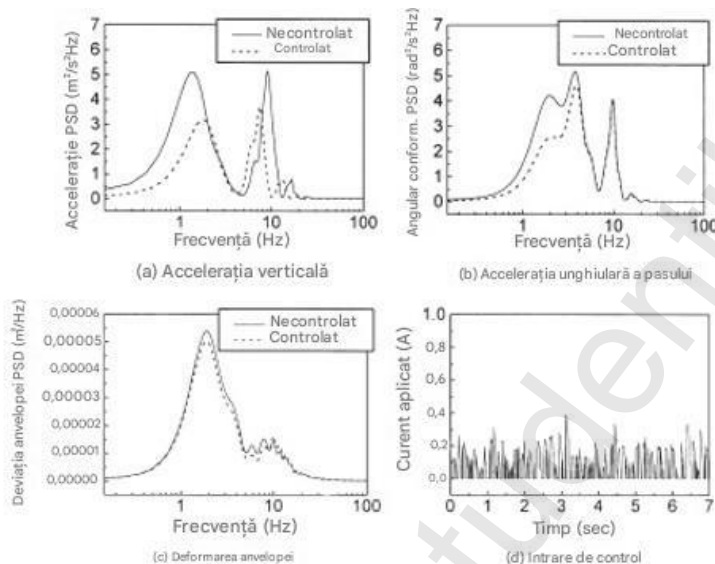


Fig.4.49 Reacțiile la vibrații, simulate prin intermediul HILS

Una dintre aplicațiile extreme ale fluidelor *MR* în industria automobilelor se regăsește în cadrul suspensiilor semi-active ale vehiculelor militare multifuncționale, cu roți și cu mobilitate ridicată (*En.: high mobility multi-purpose wheeled vehicles, HMMWVs*).

Din punct de vedere al deplasării pe teren accidentat, sistemele de suspensie convențională au atins limitele de performanță, soluția alternativă fiind oferită de amortizoarele variabile.

Amortizoarele variabile asigură o forță de amortizare controlabilă. Suspensiile semi-active pot oferi performanțe similare suspensiilor active (care includ actuatori de putere) fără a mări consumul energetic. Sunt necesare doar mici modificări constructive față de design-ul sistemelor pasive convenționale. Aceste amortizoare au fost testate și pentru bicicletele și motocicletele de teren, la Universitatea din Nevada, Reno (*UNR*), USA.

Principalele avantaje ale sistemelor de amortizare semi-activă pe baza amortizoarelor *MR* sunt: vitezele mai mari de deplasare și izolarea mai bună la

vibrații [20].

La UNR s-a construit platforma vibratoare prezentată în **Fig.4.50**.

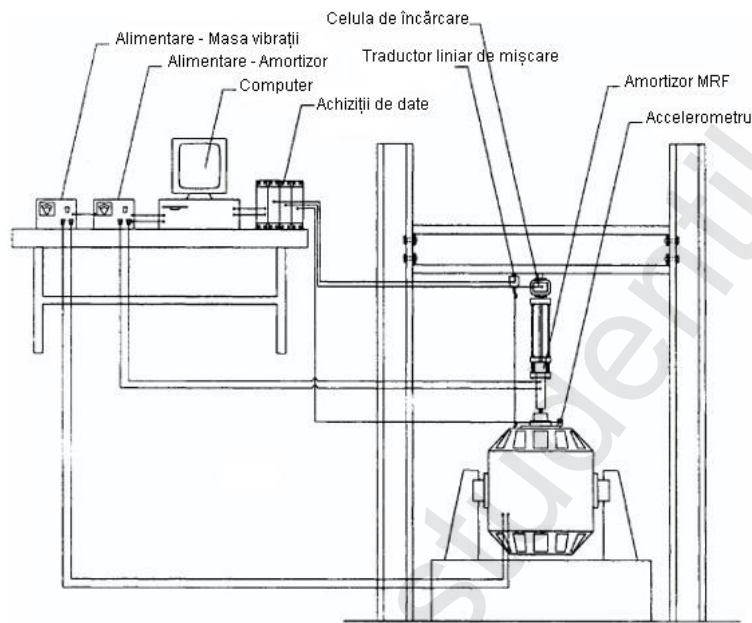


Fig.4.50 Ilustrație a ansamblului experimental al masei vibratorii de la UNR [20]

Deplasarea și viteza sunt măsurate cu un traductor de deplasare liniară (En.: *linear motion transducer, LMT*). Semnalele electronice, generate de marca tensiometrică (En.: *load cell*) și de *LMT* sunt expediate la placa de achiziție. Unul dintre capetele amortizorului *MR* este fixat de masa vibratorie iar celălalt la marca tensiometrică [20].

Fig.4.51 prezintă cele două configurații ale amortizorului clasic și *MR*. Condițiile geometrice ale amortizoarelor se referă la:

- lungimea cursei,
- modul de montare,
- diametrul exterior.

Amortizorul *MR* fiind construit pentru scopuri experimentale, nu are toate elementele unui amortizor comercial:

- lagărele amortizoarelor clasice sunt încorporate în carcasa

semirigidă a amortizorului clasic pentru a putea compensa dezaxările minore ce pot apărea în mediile pivotante de solicitare a vehiculelor;

- amortizorul *MR* are carcasă rigidă, fiind conceput doar în scopuri de testare.

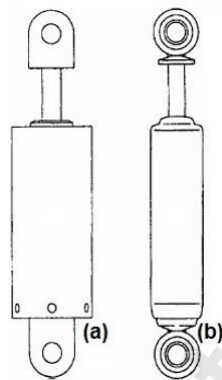


Fig.4.51 Ilustrații ale amortizoarelor experimentale de la UNR, la aceeași scară:
(a) amortizor *MR*; (b) amortizor clasic

În **Fig.4.52** sunt prezentate, comparativ, variațiile forței în funcție de deplasare și de viteza de deplasare, pentru un amortizor clasic și unul *MR*.

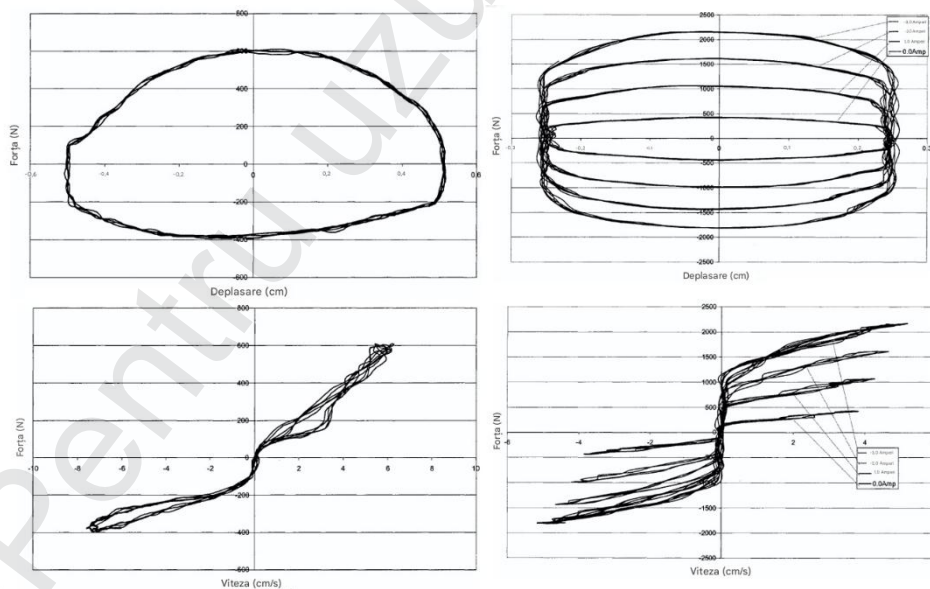


Fig.4.52 Comparație între caracteristicile funcționale ale amortizoarelor clasice (stânga) și cele *MR* (dreapta) de la UNR la frecvența de 2 Hz: variațiile forță-deplasare (sus) și variațiile forță-viteză de deplasare (jos)

Se poate constata că amortizorul clasic poate dezvolta o forță maximă de 600 N în timp ce amortizorul *MR* poate dezvolta o forță de până la 2200 N.

Din punct de vedere al variației forței cu viteza de deplasare, amortizorul *MR* poate dezvolta brusc forțe de până la ± 1000 N, la aplicarea unui curent de 3 A.

Coeficientul de amortizare se determină cu relația:

$$C_{eq} = \frac{W}{\pi X^2 \omega} \quad (4.8)$$

în care:

W - lucrul mecanic dezvoltat de amortizor într-o cursă completă, (se calculează prin aria buclei forță-deformație),

X - amplitudinea deplasării,

ω - frecvența.

Fig.4.53 prezintă efectele curentului utilizat pentru controlul amortizorului *MR*, la trei frecvențe diferite, asupra variațiilor coeficientului de amortizare și a forței dezvoltate de amortizor.

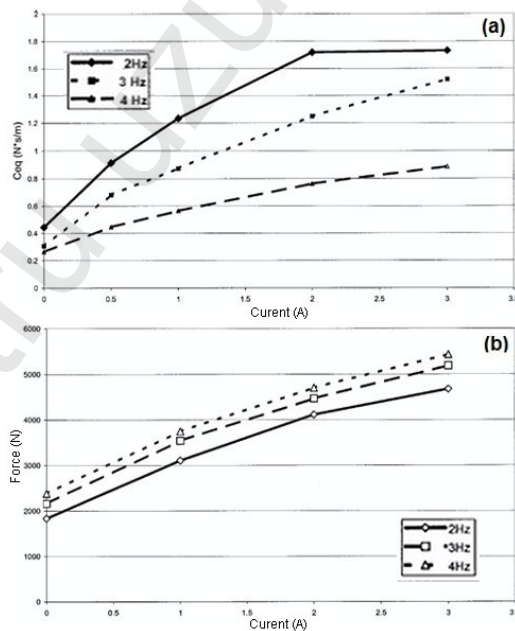


Fig.4.53 Efectele intensității curentului de control a amortizorului *MR* de la *UNR*, la trei valori ale frecvenței: (a) variația coeficientului de amortizare; (b) variația forței de amortizare

La creșterea intensității și frecvenței curentului de acționare a amortizorului se produc creșteri ale lucrului mecanic dezvoltat. Creșterea curentului produce creșterea:

- coeficientului de amortizare, Fig.4.53(a)
- forței dezvoltate de amortizorul *MR*, Fig.4.53(b).

Creșterea frecvenței produce:

- scăderea coeficientului de amortizare
- creșterea forței dezvoltate

Se poate constata că ambii parametri se modifică suplimentar, odată cu creșterea frecvenței, de la 2 la 4 Hz [20]. **Fig.4.54** prezintă efectele frecvenței asupra variației domeniului de forțe dezvoltate de un amortizor clasic (*En.: original equipment manufacture = OEM*) și un amortizor *MR*, pornind de la starea neactivată (0 A) și până la starea activată cu un curent electric cu intensitatea de 3 A. S-au analizat două situații ale cursei maxime dezvoltate: 1 cm (sus) și 1.5 cm (jos).

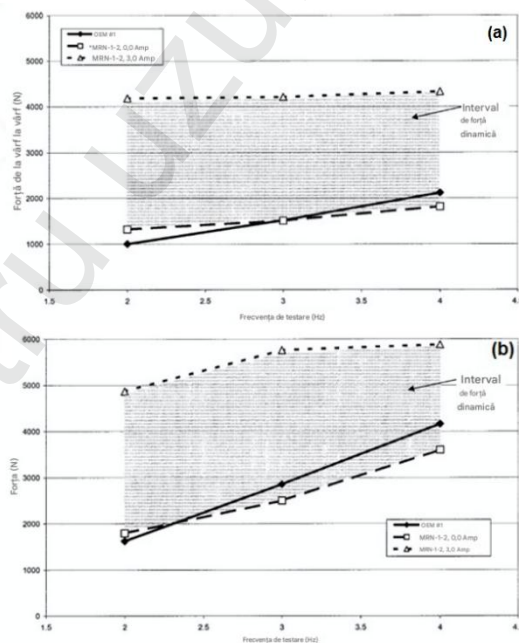


Fig.4.54 Efectele frecvenței asupra variației forței dezvoltate de un amortizor clasic (*OEM*) și de un amortizor *MR* de la *UNR*, din starea inactivă (0 A) și până la un curent cu intensitatea maximă de 3 A: (a) la o cursă maximă de 1 cm; (b) la o cursă maximă de 1.5 cm

Amortizorul clasic poate dezvolta forțe mai mari decât cel *MR* neactivat, la frecvențe ridicate. După activare, amortizorul *MR* dezvoltă forțe mult mai mari decât cel clasic și deci poate absorbi energii mult mai mari, corespunzătoare unui teren mai accidentat.

Fig.4.55 prezintă o comparație între variațiile experimentale și teoretice ale forței în funcție de deplasare, pentru amortizorul *MR* care dezvoltă o cursă de 1 cm, cu frecvența de 2 Hz. Experimentele au fost efectuate pentru curenți cu intensitățile de 1 A și de 3 A. Se remarcă variația bruscă a forțelor experimentale, la capătul cursei, în special pentru intensitatea de 3 A a curentului.

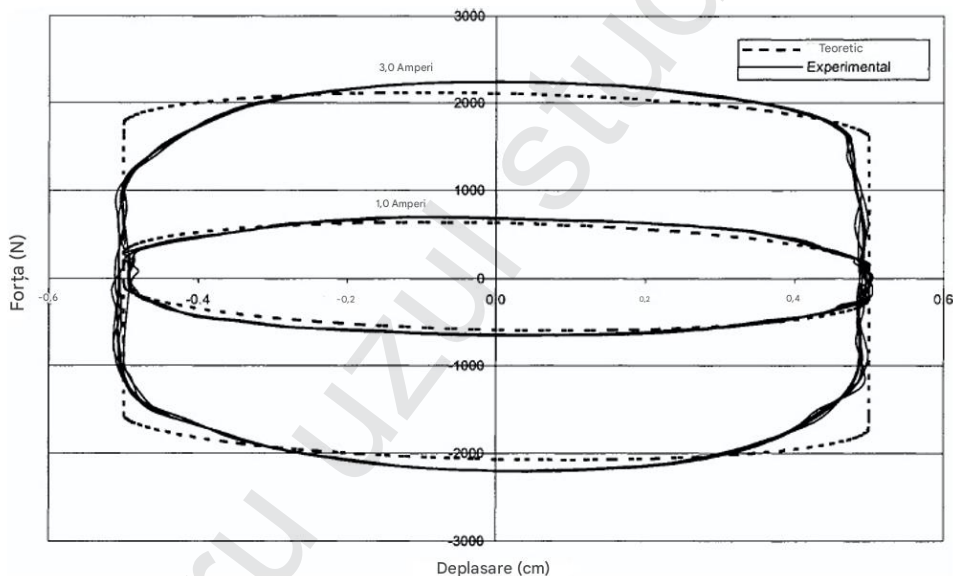


Fig.4.55 Comparație între valorile teoretice și experimentale ale forței, în funcție de deplasarea amortizorului *MR* de la *UNR* pentru stările activate de curenți de 1 A și de 3A, la frecvența de 2 Hz

Fig.4.56 prezintă aceeași comparație, din punct de vedere al variației forței cu viteza de deplasare. Se observă că valorile experimentale ale forței le egalează pe cele teoretice la intensitatea curentului de 1 A. La 3 A valorile coincid doar la viteze de deplasare mari, de peste 5 cm/s.

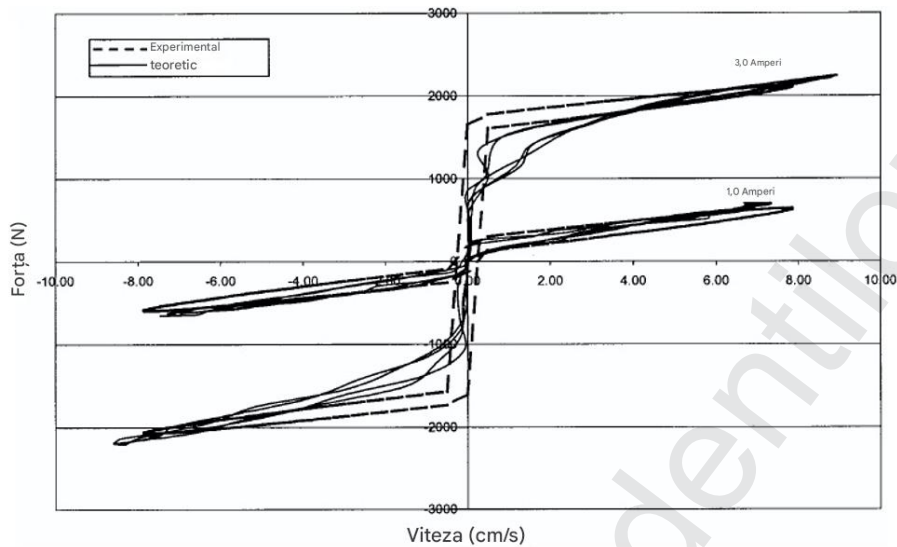


Fig.4.56 Comparație între variațiile teoretice și experimentale ale forței în funcție de viteza de deplasare a amortizorului *MR* de la *UNR*, în stările neactivată și activată de un curent cu intensitatea de 1 A și 3A

Amortizorul *MR* de la *UNR* are capacitatea de a utiliza tehnologia de control a gârzii la sol prin intermediul supapelor de retur. **Fig.4.57** prezintă variațiile teoretice ale forței pentru starea neactivată și pentru starea activată de un curent de 3 A, cu supapele de retur închise.

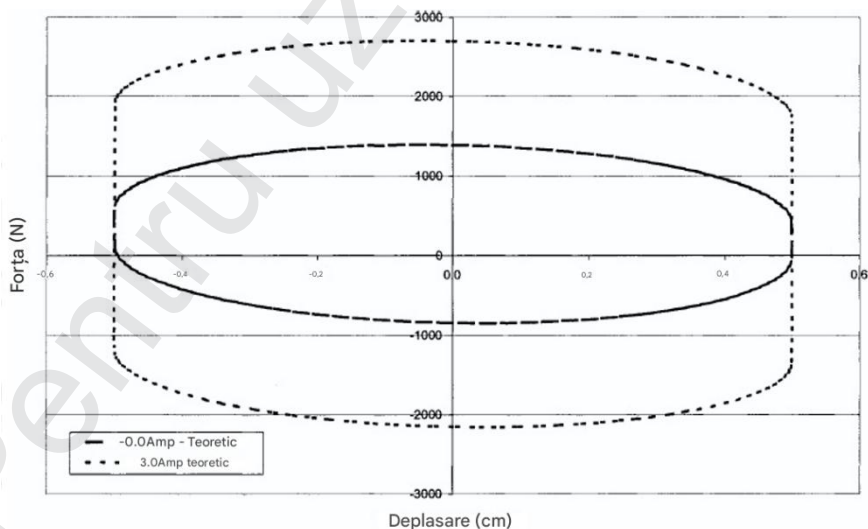


Fig.4.57 Modelarea variației forță-deplasare a amortizorului *MR* de la *UNR*, cu supapele de retur închise, pe cursa de compresie, de 1 cm, în stare neactivată și activată cu un curent cu intensitatea de 3 A

Fig.4.58 arată că, odată cu deschiderea supapelor de retur, (chiar și cu doar 25 %) variația forței cu deplasarea devine asimetrică.

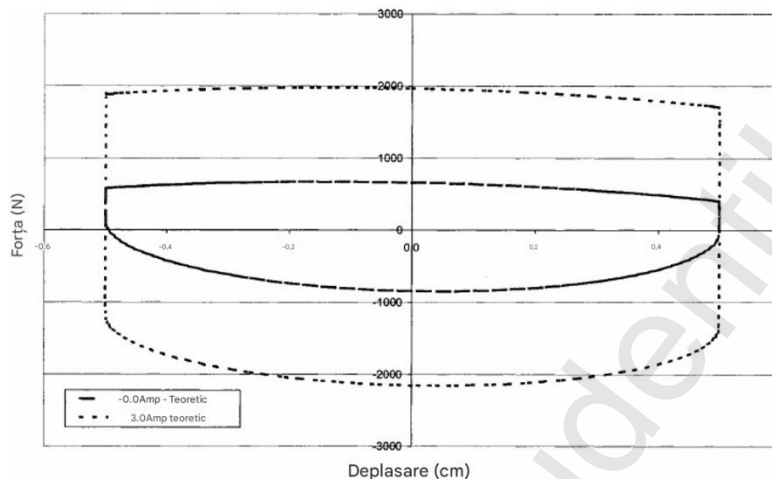


Fig.4.58 Modelarea variației forță-deplasare a amortizorului *MR* de la *UNR*, cu supapele de retur deschise 25 % pe cursa de compresie, de 1 cm, în stare neactivată și activată cu un curent cu intensitatea de 3 A

Concluzile utilizării amortizoarelor *MR* pentru suspensiile automobilelor:

- Amortizoarele *MR* sunt capabile să dezvolte forțe de amortizare mult mai mari decât amortizoarele hidraulice, ceea ce permite utilizarea vehiculelor pe terenuri accidentate la viteze mai mari;
- Forța dezvoltată de amortizoarele *MR* crește odată cu intensitatea și cu frecvența curentului aplicat;
- Sistemul de control al suspensiei semi-active, în buclă închisă, are potențialul de a mări domeniul de utilizare a autovehiculelor de teren [20].

4.2.2 Finisarea cu fluide *MR*

În lumea tehnologică actuală, produsele trebuie să aibă rugozități cu grad de finisare până la ordinul nanometrilor, care trebuie obținute în funcție de timp, prin procese automatizate. Din acest motiv au fost dezvoltate procedee

de finisare avansată:

- lustruire prin flotație magnetică, (*En.: magnetic float polishing = MFP*),
- finisare abrazivă magnetică (*En.: magnetic abrasive finishing = MAF*),
- finisare magnetoreologică (*En.: magnetorheological finishing = MRF*),
- prelucrare prin flotație abrazivă (*En.: abrasive flow machining = AFM*).

AFM poate finisa orice geometrie complicată prin extrudarea unui mediu polimeric încărcat cu particule abrazive prin interstițiul creat între piesă și ansamblul de prelucrare. Însă proprietățile reologice ale mediului polimeric, care sunt responsabile pentru transferarea forțelor de abraziune la particulele abrazive, nu poate fi controlat prin mijloace externe.

MRF este folosită pentru finisarea externă, la nivel nanometric, a lentilelor optice, prin controlarea externă a câmpului magnetic. Prin combinarea celor două procedee, s-a dezvoltat finisarea prin curgere abrazivă magnetoreologică (*En.: magnetorheological abrasive flow finishing = MRAFF*) utilizată chiar și la nanofinisarea pieselor cu geometrie complicată [21].

MRAFF are următoarele avantaje:

- fluidul de lustruire magnetoreologică (*En.: magnetorheological polishing = MRP*) are capacitatea de a-și modifica proprietățile de curgere, prin câmp magnetic;
- prin proiectarea corespunzătoare a ansamblului de prelucrare, este permisă finisarea pieselor cu suprafețe oricât de complexe, inaccesibile proceselor de finisare actuale.

MRPF - Fluidul de lustruire magnetoreologică = amestec omogen de

particule de carbonil de Fe (*En.: carbonyl iron particles = CIPs*) și particule abrazive de SiC într-un mediu pe bază de parafină și unsoare. La aplicarea câmpului magnetic, *CIPs* formează lanțuri între polii electromagnetului, creând legături cu particulele abrazive încorporate.

Când *MRPF* este extrudat prin interstițiul dintre ansamblul de prelucrare și piesă, particulele abrazive încorporate în lanțurile de *CIPs* și aflate în contact cu suprafața piesei, foarfecă asperitățile de pe aceasta, conform mecanismului din **Fig.4.59**.

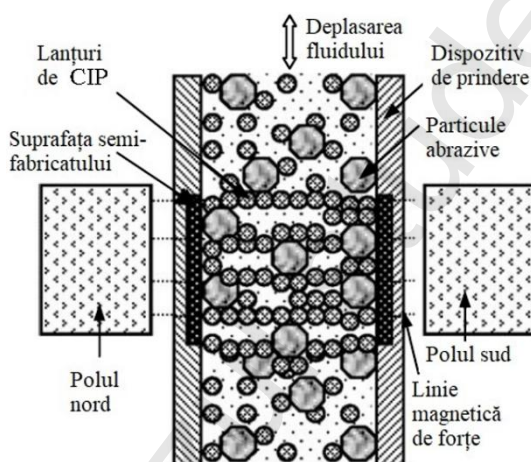


Fig.4.59 Mecanismul procesului de finisare prin curgere abrazivă magnetoreologică

Intensitatea forței magnetice dintre două particule de fier depinde de concentrația de *Fe*, de intensitatea câmpului magnetic aplicat și de mărimea particulelor. Atunci când lanțurile de particule se deplasează relativ față de suprafața piesei de prelucrat, se produce erodarea rugozității acesteia.

Când suprafața piesei este forfecată de lanțurile de particule, asperitățile suprafeței sunt îndepărtate. **Fig.4.60** prezintă profilul unei probe parțial lustruite măsurată cu un interferometru optic.

Suprafața din stânga este nelustruită, fiind acoperită de bandă adezivă în timpul procesului MRAFF iar cea din dreapta a fost lustruită.

Tensiunea de forfecare a fluidului *MR* este cauzată de câmpul magnetic extern și de deformăția geometrică a fluidului. Au fost concepute modele teoretice pentru a explica comportamentul tribologic și reologic al fluidului prin interdependența dintre acești doi factori [22].

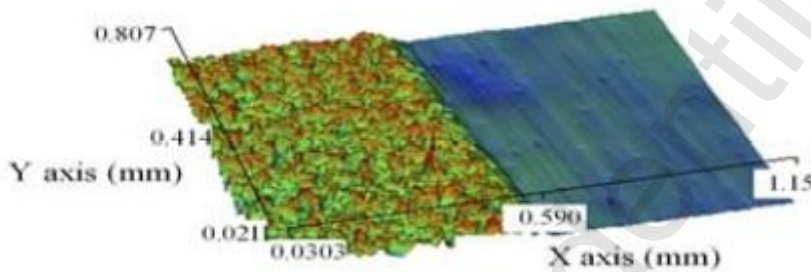


Fig.4.60 Porțiune șlefuită (dreapta) și neșlefuită (stânga) a suprafeței unei piese prelucrate prin finisare prin curgere abrazivă magnetoreologică (*MRAFF*) [22]

La dezvoltarea acestor modele se pornește de la energia de interacțiune magnetică (E_p) dintre două particule, aflate la distanța r :

$$E_p = \frac{|J_p \times V_p|^2 (1 - \cos^3 \theta)}{8\pi \mu_r \mu_0 |r|^3} \quad (4.9)$$

unde: J_p – densitatea de magnetizație;

μ_r – permeabilitatea relativă a apei;

μ_0 – permeabilitatea vidului;

r – vectorul poziției relative;

θ – unghiul dintre câmpul magnetic și vectorul poziției relative.

Pentru stabilirea unui model se pornește de la următoarele ipoteze:

- fiecare *CIP* interacționează cu 26 de particule vecine;
- particulele sunt aliniate după liniile de flux ale câmpului magnetic extern și formează structuri de tip lanțuri continue;
- prin impunerea deformăției de forfecare, formațiunile cu structuri de tip lanțuri se deformează uniform și sub efectul câmpului magnetic extern.

Fig.4.61 descrie modificarea structurilor ideale de tip lanț, prin

forfecarea produsă în ipotezele stabilite mai sus [22].

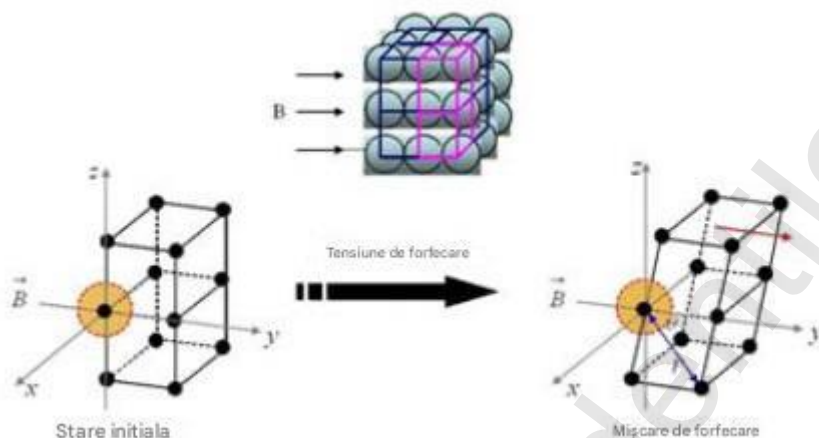


Fig.4.61 Deformația unui grup elementar de particule

Se poate constata că toate particulele, din jurul unei particule date, se deplasează uniform, cu deformația de forfecare. Pe măsură ce particulele înconjurătoare își modifică poziția, se modifică și energia de interacțiune magnetică totală a particulei individuale asociată cu aceasta.

Pentru calcularea parametrilor modelului teoretic propus, sunt folosite curbele intensitate de magnetizare - intensitate de câmp magnetic, $B - H$ ale *CIPs*, precum și fracțiunea de volum și distribuția de mărime a acestora. Fluidul pe bază de apă *MRF-241ES* (Lord), utilizat de obicei pentru finisarea *MR*, are parametri:

- ✓ curba $B - H$ a *CIPs*, dată în **Fig.4.62**, arată că particulele se magnetizează și ating saturația foarte rapid, la cca. 2.23 T;
- ✓ distribuția de mărime a *CIPs* a fost măsurată cu un *SEM*, încadrându-se în intervalul 1–5 μm cu o valoare medie de aprox. 2.21 μm ;
- ✓ distanța ideală dintre două lanțuri a fost estimată pe baza mărimii și a fracțiunii ocupate de *CIPs*, atunci când lanțurile se

formează în câmp magnetic uniform.

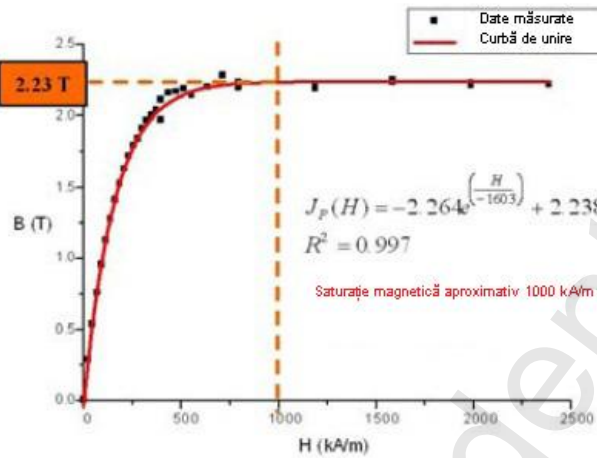


Fig.4.62 Curbă de magnetizație a CIPs a unui fluid MR MRF-241ES

Fig.4.63 prezintă o structură schematică de tip lanț, la care fracțiunea de volum a fluidului MR este în jur de 0.43 iar distanța medie dintre două lanțuri aproximativ 2.4386 μm .

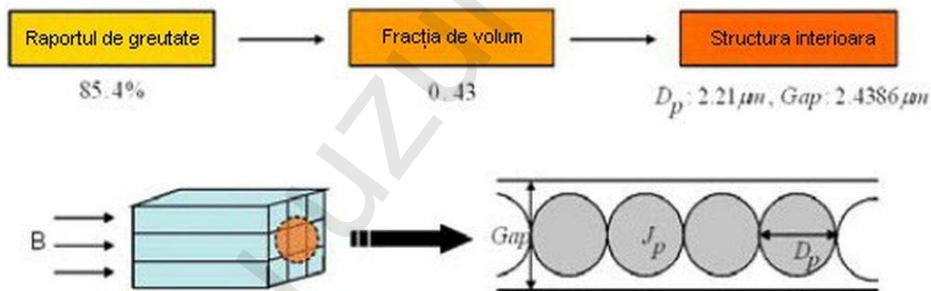


Fig.4.63 Structură schematică de tip lanț a unui fluid MR

Densitatea de energie a particulei este definită ca energia totală pe unitatea de volum. Energia totală a unei singure particule poate fi exprimată ca suma energiilor particulelor care interacționează cu 26 de particule vecine. Densitatea de energie a particulei este separată în două funcții:

- (i) deformația de forfecare,
- (ii) magnetizația în masă, astfel încât:

$$U = \frac{E_{total}}{V_{total}} = E_p \times \phi \times \frac{1}{V_p} \quad (4.10)$$

unde: U densitatea de energie a particulei,
 E_{total} energia totală a unei sigure particule,
 V_{total} fracțiunea de volum a particulei [22].

Energia totală a unei particule este suma energiilor individuale generate de interacțiunea acesteia cu 26 de particule vecine:

$$U = \sum_{i=1}^{26} \left[\frac{|J_P - V_P|(1-3\cos\theta)}{8\pi\mu_r\mu_0|r|^3} \right] \times \phi \times \frac{1}{V_P} \quad (4.11)$$

(4.11) poate fi separată în funcții ale intensității câmpului magnetic (H) și deformației de forfecare, ε , pentru a ilustra mai bine caracteristicile de densitate a energiei particulelor.

$$U = |J_P|^2 \times \sum_{i=1}^{26} \left[\frac{V_P\phi(1-3\cos\theta)}{8\pi\mu_r\mu_0|r|^3} \right] = f(H) \times g(\varepsilon) \quad (4.12)$$

Tensiunea de forfecare se poate obține prin derivarea parțială a densității de energie totală în raport cu ε :

$$\tau(H, \varepsilon) = \frac{\partial U(H, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} = f(H) \times g(\varepsilon)' \quad (4.13)$$

Tensiunea de curgere apare la $g''(\varepsilon) = 0$, ceea ce înseamnă că curgerea fluidului *MR* poate fi determinată de o deformație impusă. În plus, intensitatea câmpului magnetic afectează doar mărimea tensiunii de curgere:

$$\tau(H, \varepsilon) \Big|_{g''(\varepsilon)=0} = \tau(H) \quad (4.14)$$

În final, modulul de forfecare efectivă poate fi determinat din următoarea relație dintre tensiunea și deformația de forfecare:

$$G(H, \varepsilon) = \frac{\tau(H, \varepsilon)}{\varepsilon} \quad (4.15)$$

Pe baza minimizării energiei, se consideră că celula *tvc* (*tetragonală cu volum compact*) este cea mai stabilă configurație a fluidului *MR* (constând doar din *CIPs*, fără particule abrazive) care se formează sub câmp magnetic puternic. Însă, structurile de tip lanț conțin și particule abrazive.

În mod experimental, s-a observat prin microscopie optică că, în

absența câmpului magnetic, *CIPs* sunt distribuite întâmplător în fluidul *MRPF*, conform **Fig.4.64(a)**. După aplicarea câmpului magnetic, *CIPs* formează structuri de tip lanț împreună cu particulele abrazive, care sunt prinse în și între lanțuri, conform **Fig.4.64(b)** [22].

Datorită prezenței particulelor abrazive nemagnetice în *MRPF*, lanțurile nu sunt continue în general și se termină în aceste particulele. Datorită prezenței acestor particule între lanțuri, între polii magnetici se formează structuri complexe, ca în **Fig.4.64(b)**. Pentru modelarea acțiunii abrazive, aplicată de structura de lanțuri, se presupune că particulele abrazive care contribuie la îndepărtarea materialului formează o jumătate de celulă elementară *cvc* (*cubică cu volum centrat*), conform **Fig.4.65**, adiacentă semifabricatului.

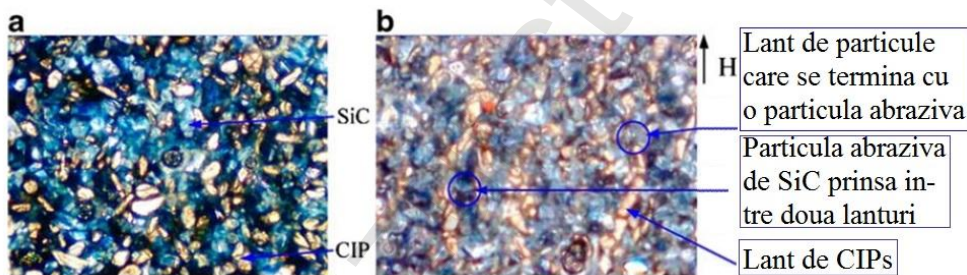


Fig.4.64 Micrografie optică ilustrând: (a) distribuția întâmplătoare a *CIPs* și a particulelor abrazive, în fluidul *MRPF*, la câmp magnetic nul; (b) formarea structurii de tip lanțuri ale *CIPs*, odată cu aplicarea câmpului magnetic extern și terminarea lanțurilor de *CIPs* cu particule abrazive de SiC

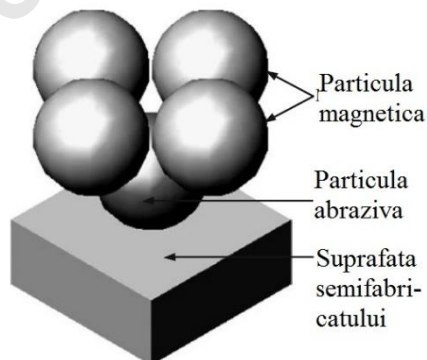


Fig.4.65 Model de dispunere a particulelor magnetice și abrazive, de dimensiuni apropiate, în vecinătatea semifabricatului

În timpul prelucrării, lanțurile de *CIPs* se rearanjează în jurul particulelor de SiC, formând o celulă *cvc* completă, pe direcția câmpului magnetic, cu o particulă de SiC în centru și opt *CIPs* în colțuri, conform **Fig.4.66**. Celulele elementare *cvc* se vor repeta în tot volumul ansamblului de prelucrare, la nivelul polilor electromagnetului.

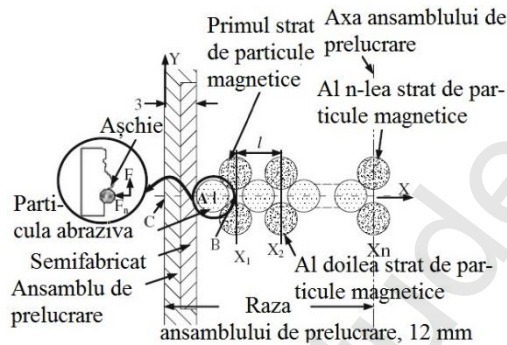


Fig.4.66 Aranjament schematic al particulelor magnetice în timpul prelucrării

După dezvoltarea lanțurilor individuale, care umple golul dintre laturile opuse ale ansamblului de prelucrare, lanțurile individuale vor agrega, formând o structură columnară mai groasă și mai uniformă. Forța abrazivă a fiecărui strat de particule magnetice, este transferată spre particulele abrazive. Efectul de lustruire este rezultatul intensității curentului din electromagnet și al numărului de cicluri de lustruire. Acest efect, exprimat sub forma reducerii rugozității, este ilustrat grafic în **Fig.4.67**.

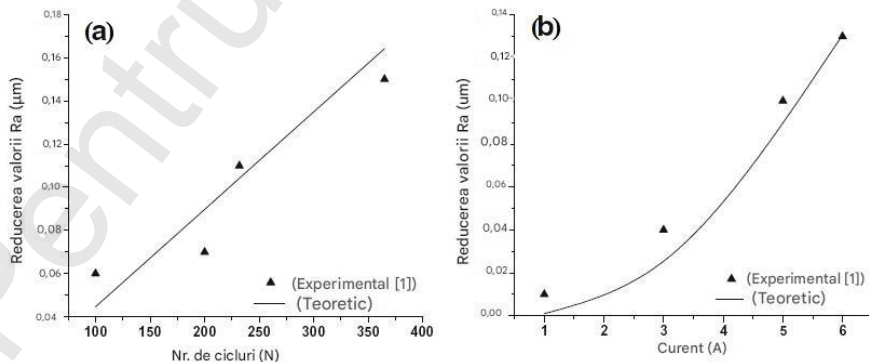


Fig.4.67 Efecte pe care le au asupra reducerii rugozității aparente, R_a la lustruirea magnetoreologică: (a) numărul de cicluri de prelucrare, la o intensitate de 5 A; (b) intensitatea curentului aplicat electromagnetului, după 200 de cicluri de prelucrare

S-au calculat teoretic valorile reducerii R_a după 100, 200, 232 și 365 de cicluri de lustruire *MR*, la presiunea de extrudare de 37.5 bar și intensitatea de 5 A în electromagnet, marcate cu triunghiuri negre în Fig.4.67(a). Analog, în Fig.4.67(b) s-au calculat valorile reducerii R_a după lustruirea *MR* cu curent de 1, 3, 5 și respectiv 6 A.

Se observă că reducerea de R_a de lustruire *MR*, este mai mare la creșterea curentului de la 1 la 6 A (0.12 μm , după 200 de cicluri), decât la creșterea numărului de cicluri de la 100 la 365 (0.11 μm , la 5 A) [21].

La creșterea curentului, crește și intensitatea câmpului magnetic, ducând la îngroșarea lanțurilor de *CIPs*. Particulele abrazive sunt ținute mai strâns de lanțurile de *CIPs* înconjurătoare. **Fig4.68** prezintă micrografii *SEM* ale suprafețelor pieselor finisate *MR*. Este vizibilă finisarea suprafeței odată cu creșterea intensității câmpului magnetic aplicat. În absența câmpului magnetic, nu se observă schimbări ale calității suprafeței și materialul așchiat, rămas în urma șlefuirii, nu este îndepărtat, conform Fig.4.68(a).

La curent de 1A, se formează lanțuri subțiri de *CIPs*, ceea ce, după finisarea *MR*, duce la îndepărtarea materialului așchiat, rămas după șlefuire și nefixat, o parte din el, rămânând în șanțurile produse de șlefuire, după cum se observă în Fig.4.68(b).

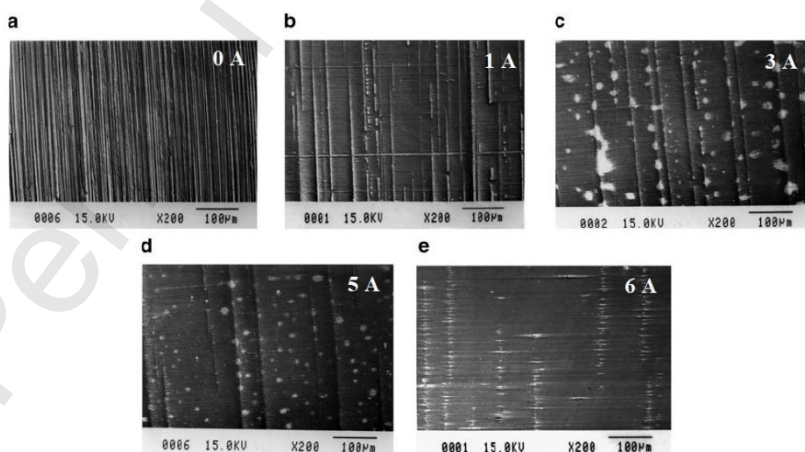


Fig.4.68 Micrografii *SEM* ale suprafeței probelor finisate, pentru diferite intensități ale curentului electric în electromagnet: (a) 0A, (b) 1A, (c) 3A, (d) 5A, (e) 6A

La curent de 3A, se formează o forță magnetică mai puternică și particulele abrazive devin capabile să foarfece vârfurile, producând aşchii mai mari, prin îndepărtarea urmelor şlefuirii și a resturilor de material aşchiat. Prin îndepărtarea unor urme de şlefuire mai superficiale, între cele mai adânci, se mărește spațiul dintre canalele de şlefuire, conform Fig.4.68(c).

La curenți de 5A & 6A, vârfurile devin netezite iar urmele de şlefuire sunt foarte superficiale și discontinue, rămânând vizibile doar cele mai adânci dintre ele, ca în Fig. 4.68(d) & (e).

În continuare, sunt analizate efectele materialului aşchiat, rămas după şlefuire și nefixat, pentru calitatea suprafeței pieselor lustruite prin *MRP*. **Fig.4.69** descrie efectul magnetoreologic [23].

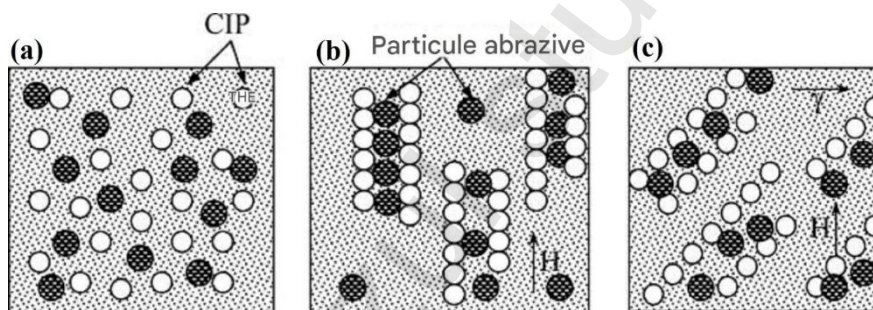


Fig.4.69 Efectul magnetoreologic: (a) fără câmp magnetic; (b) aplicarea unui câmp magnetic de intensitate H ; (c) aplicarea simultană a câmpului magnetic de intensitate H și a deformației de forfecare γ

La aplicarea câmpului magnetic, particulele se aliniază, formând lanțuri care încorporează particule abrazive, nemagnetice, conform Fig.4.69(b). Deoarece este necesară energie pentru deformarea și ruperea lanțurilor, aceste rearanjări de particule sunt declanșate de tensiuni de curgere, controlabile, mari. Atunci când fluidul este solicitat, lanțurile se deformează pe direcția forfecării, conform Fig.4.69(c).

Forța magnetică care asigură fixarea particulelor abrazive în *CIPs* poate fi controlată prin:

- (i) concentrația fierului,

- (ii) intensitatea câmpului magnetic,
- (iii) permeabilitatea magnetică,
- (iv) mărimea particulelor.

Muchiile abrazive ale particulelor fixate de lanțurile de *CIPs* foarfecă vârfurile rizurilor de pe suprafețele semifabricatului. Cantitatea de material polizat depinde de rezistența legăturii dintre particulelor abrazive și structurile induse de câmpul magnetic în fluidul *MR*. Finisarea suprafeței prin abraziune poate fi: în două corpuri, **Fig.4.70(a)** sau în trei corpuri, **Fig.4.70(b)** când se produce forfecarea unui miez de fluid *MR*.

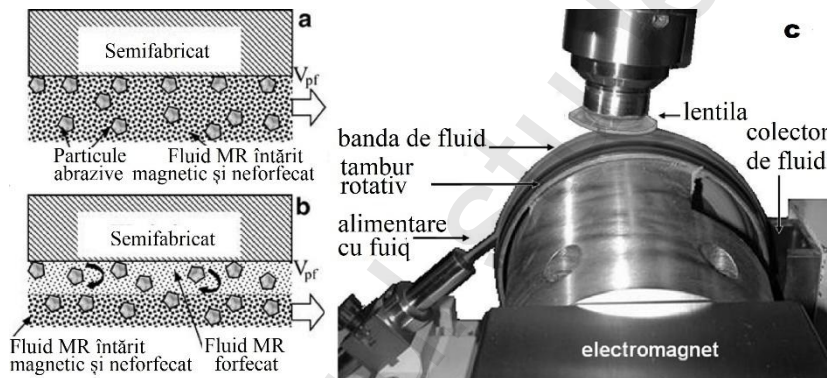


Fig.4.70 Moduri de uzură abrazivă la finisarea cu fluide *MR*: (a) abraziune cu două corpuri; (b) abraziune cu trei corpuri; (c) sistem de lustruire magnetoreologică

Sistemele de lustruire *MR* din **Fig.4.70(c)** folosesc particule de SiC sau CeO iar fluidul *MR* formează o banda continuă.

4.2.3 Controlul vibrațiilor la motoarele Diesel la bordul navelor

La bordul navelor, vibrațiile produse de motoarele Diesel pot facilita detectarea de către senzorii montați pe ambarcațiuni ostile, în special în cazul submarinelor. Pentru a testa capacitatea amortizoarelor *MR* de a atenua aceste vibrații, s-a conceput o fundație inteligentă compusă dintr-un suport pentru navă, pentru a simula cala acesteia și un suport pentru motor. Suportul pentru motor este legat de cel pentru navă prin:

- ✓ 6 amortizoare pasive de sârmă de arcuri, câte trei de fiecare

parte, având constanta elastică $k = 1.01 \times 10^6$;

- ✓ 4 amortizoare *MR* cu o capacitate de 10 kN, două de fiecare parte, care pot reacționa la stimuli externi.

Curentul a fost variat în trepte pentru a verifica reacția structurii la diverse forțe de amortizare. **Fig.4.71** prezintă dimensiunile detaliate ale fundației. Suprastructura fundației este legată la suportul navei prin cele 6 resorturi și 4 amortizoare *MR*, dispuse simetric, câte 3 și respectiv 2 de fiecare parte [24].

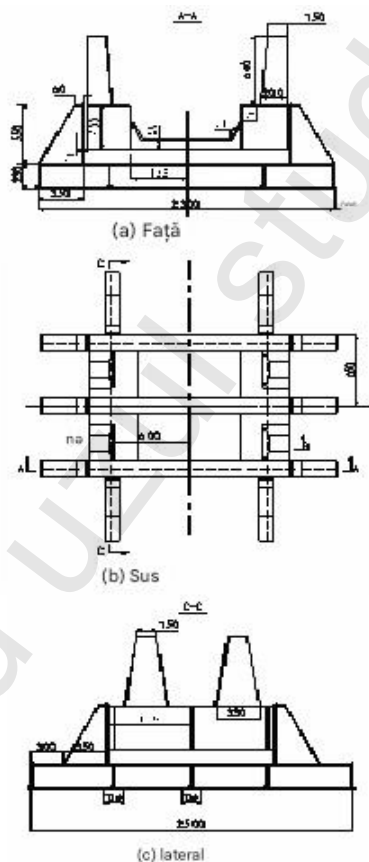


Fig.4.71 Dimensiunile fundației [24]

În timpul experimentelor, în diferite puncte ale fundației, datele au fost culese ca valori ale deplasării, accelerației și forței, pe trei direcții, cu mai mulți senzori:

- 11 accelerometre;
- 2 senzori de viteză;
- 5 senzori de deplasare.

Semnalul a fost amplificat cu un analizor *FFT* (de spectru, prin transformata Fourier rapidă) care calculează funcția de răspuns al frecvenței. Amplificatoarele preiau și forța de reacție a amortizoarelor *MR*, care sunt alimentate printr-un regulator de curent, între 0 și 2 A, cu trepte de 0.25 A. Forța de excitație este aplicată prin *PC*, printr-un simulator de forță, la frecvențe între 1 și 15 Hz, în trepte de 400 Kgf, până la max. 2400 kgf.

În timpul testelor, platforma din **Fig.4.72** se deplasează în jos și în sus, cu anumită amplitudine și frecvență. **Fig.4.73** redă modelul fundației construit în *ANSYS*.



Fig.4.72 Dispozitiv experimental pentru controlul vibrației motorului Diesel

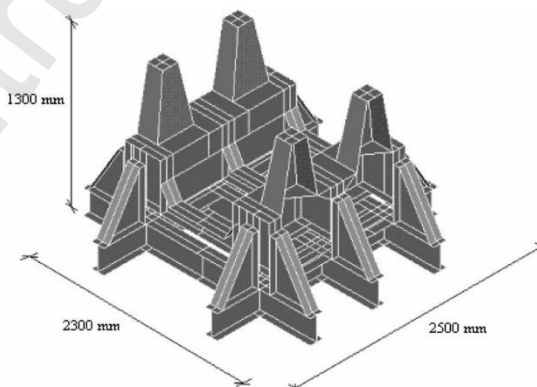


Fig.4.73 Model inteligent de fundație, construit în *ANSYS*

Fig.4.72 și Fig.4.73 prezintă variațiile rapoartelor de transmisie a deplasării (β) și a forței (η) în funcție de frecvență, la diverse stări de amortizare obținute pe un model cu masa de 2t, o forță de excitare de 2400 kgf și o masă a fundației de 500 kg. Se observă clar cum creșterea amortizării, odată cu intensitatea curentului, reduce cele două rapoarte, demonstrând fezabilitatea controlului vibrațiilor motoarelor Diesel cu amortizoare MR.

Frecvența naturală calculată cu ANSYS a fost de circa 8 Hz iar cea măsurată în jur de 9 Hz. Din **Fig.4.74** se observă că β se reduce cu 310.9 % iar din **Fig.4.75** se observă că η se reduce cu 188.6%.

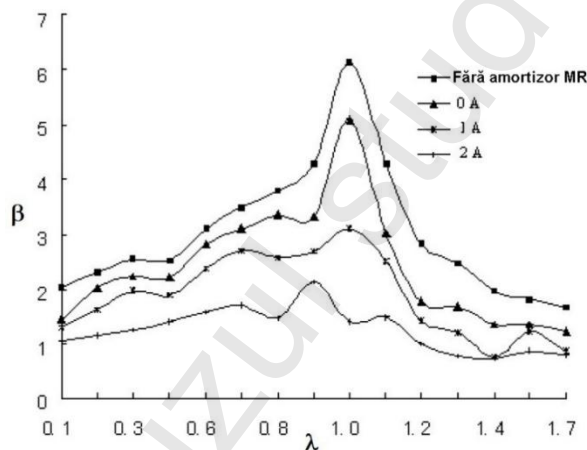


Fig.4.74 Relația dintre raportul de transmisie a deplasării (β) și raportul frecvenței (λ), la o forță de excitație de 2400 Kg

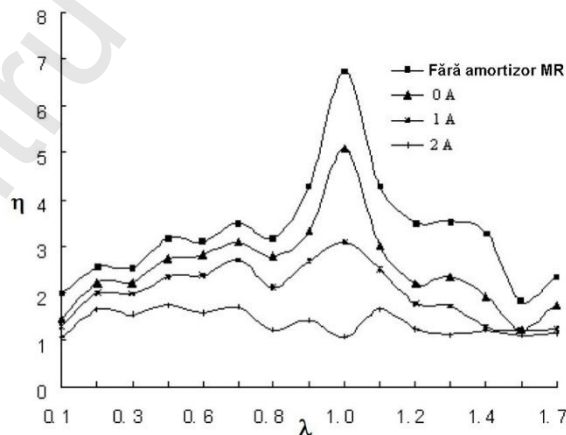


Fig.4.75 Relația dintre raportul de transmisie a forței (η) și raportul frecvenței (λ), la o forță de excitație de 2400 Kg

Pentru controlul vibrației s-au utilizat strategiile de control al feedback-ului deplasării și vitezei. Rezultatele experimentelor de control, efectuate pe modelul cu masa de 1 tonă, forța de excitație de 15 kN și frecvența de excitație de 1Hz, sunt prezentate în **Fig.4.76** și în **Fig.4.77**.

Fig.4.76 prezintă istoria vibrațiilor la nivelul fundației motorului Diesel, înainte și după amortizare iar Fig.4.77 prezintă istoria de variație a forței amortizorului *MR*, în timpul controlului vibrației fundației motorului Diesel. Obiectivul controlului vibrației este reducerea deplasării sub valoare de 1 mm.

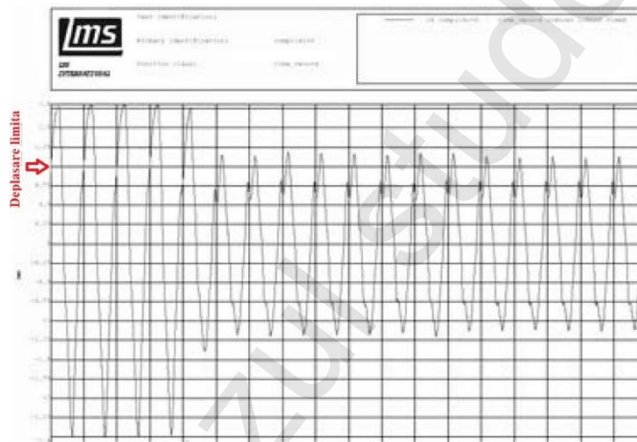


Fig.4.76 Curba istoriei de variație a deplasării cu timpul, folosită pentru controlul vibrației la fundația motorului Diesel

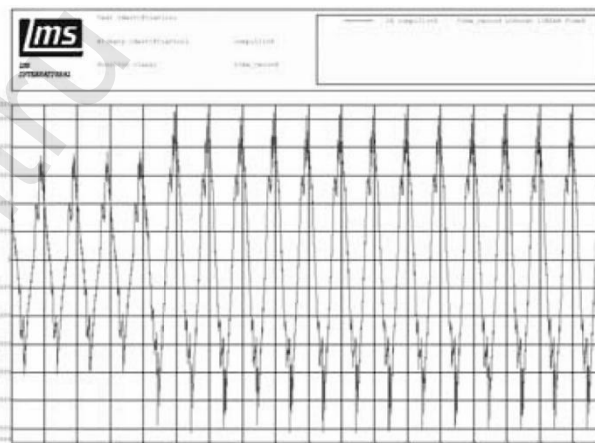


Fig.4.77 Curba istoriei de variație a forței amortizorului *MR* cu timpul, folosită pentru controlul vibrației la fundația motorului Diesel

Din Fig.4.76 și 4.77 se observă că la începutul aplicării vibrațiilor, amplitudinea oscilațiilor este mare în stare necontrolată și depășește limita permisă, pre-stabilită. Când se aplică semnalul de control, deplasarea scade și forța din amortizor crește, coborând nivelul vibrațiilor sub limita pre-stabilită.

Atunci când amortizoare *MR* sunt folosite în paralel cu resorturile de sârmă, se obține un control mai bun la frecvență scăzută și o reducere a vitezei de transmitere a puterii și a raportului de transmitere a deplasării. În urma atenuării vibrațiilor cu amortizoarele *MR*, frecvența scade cu 15.1 dB mai mult decât în cazul când sunt utilizare amortizoarele sub formă de arcuri din sârmă [24].

4.2.4 Sistemul de amortizare al trenurilor de aterizare

Proprietățile fluidelor *MR* permit utilizarea acestora în aplicații de dispozitive de disipare a energiei, controlate activ, care includ:

- (i) sisteme de suspensie a autovehiculelor;
- (ii) sisteme pneumatice de control al vitezei și poziției;
- (iii) amortizarea vibrațiilor și scaune de autovehicule cu rigiditate variabilă;
- (iv) dispozitive de atenuare a efectelor produse de vânturi și cutremure puternice;
- (v) membre artificiale pentru îmbunătățirea confortului;
- (vi) dispozitive de absorbție a șocurilor la aterizare.

Sistemele de amortizare a trenurilor de aterizare trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- să absoarbă energia cinetică a vitezei verticale;
- să asigure suspensie elastică în timpul parcurii și a manevrelor la sol;
- să asigure siguranța și confortul pasagerilor și a bunurilor

transportate în timpul manevrelor la sol, a decolării și aterizării aeronavei.

Aceste condiții sunt îndeplinite de către sistemul de amortizare prin proiectarea corespunzătoare a dispozitivelor de absorbție a șocurilor și alegerea corespunzătoare a roților, cu o parte pneumatică care să contribuie la procesul de disipare a energiei [24].

Există mai multe soluții constructive de sisteme de aterizare care îndeplinesc criteriile de mai sus. La aeroplanele ușoare, disiparea energiei se poate realiza în diverse moduri:

- sistem de aterizare cu elemente elastice care joacă atât rol de amortizor cât și rol de suport de aterizare, conform **Fig.4.78**;
- elemente flexibile din cauciuc sau diferiți elastomeri încorporați în structura sistemelor de aterizare;
- resorturi tip inele de oțel;
- sisteme oleo-pneumatice de absorbție a șocurilor, conform **Fig.4.79**, au cel mai mare randament de disipare a energiei la avioanele militare și comerciale, unde criteriul principal e costul.

Energia este absorbită prin comprimarea unui volum de gaz (azot sau aer uscat) de către un volum de fluid hidraulic.

Sistemele oleo-pneumatice de absorbție trebuie să efectueze două funcții:

- o funcție de elasticitate sau rigiditate, care asigură suspensia elastică prin compresia unui volum de gaz;
- o funcție de amortizare, care disipează energia prin forțarea trecerii fluidului hidraulic printr-unul sau mai multe orificii.



Fig.4.78 Brațe elastice ale sistemului de aterizare la avioanele ușoare *Cessna 195*



Fig.4.79 Sistem oleo-pneumatic *M-28 „Skytruck”* de absorbție a șocurilor

Utilizarea amortizoarelor *MR* pentru absorbția șocurilor necesită următoarele modificări:

- prezența particulelor magnetice solide poate distruge etanșările;
- trebuie adăugate bobine, pentru controlul fluidului *MR*.

Principalul scop al utilizării fluidelor *MR* la trenurile de aterizare este posibilitatea de a corecta caracteristicile sistemelor de absorbție a șocurilor pentru disiparea optimă a energiei, în orice condiție de aterizare. Din cauza limitelor de proiectare ale amortizoarelor *MR*, nu se poate obține un profil ideal, pentru fiecare aterizare, mai ales dacă, din condiții de siguranță se

impune ca aterizarea trebuie să fie posibilă chiar și fără motor.

La Departamentul de Trenuri de Aterizare, de la Institutul de Aviație din Varșovia, a fost proiectat un dispozitiv de aterizare pe bază de fluid *MR*. Prin *FEM* s-au proiectat bobinele de control al fluidului *MR* și a fost conceput modelul 3D al amortizorului, cu ajutorul software-urii *SolidEdge*, conform **Fig.4.80**.

Ca fluid *MR* s-a ales *LORD MRF-336AG*, pe baza fracțiunii de particule solide și de ulei siliconic, care îndeplinește condițiile de mestecare ușoară, după sedimentare.

Amortizorul *MR* al trenurilor de aterizare a fost supus testelor statice și dinamice de funcționare în condiții de utilizare. Testele statice au fost efectuate pentru determinarea caracteristicilor statice ale amortizorului.

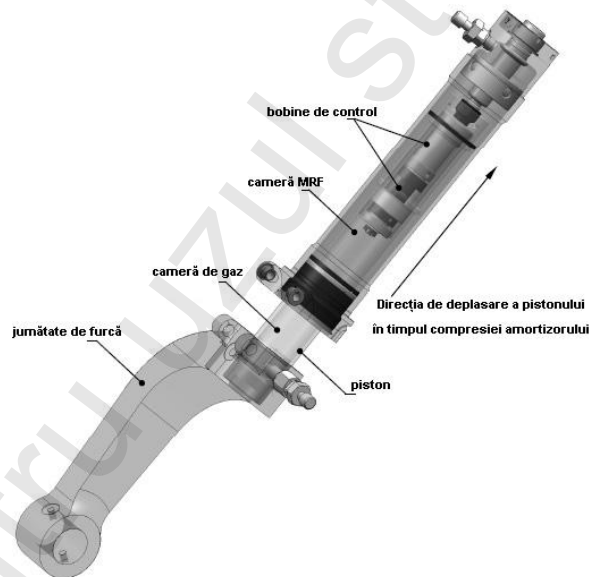


Fig.4.80 Model 3D al amortizorului *MR* pentru trenul de aerizare

Testele dinamice au fost făcute pentru verificarea comportamentului amortizorului în condiții de funcționare. Pentru testele statice și dinamice s-a folosit o presă hidraulică de 40 tone și o mașină de lovire prin cădere a unei sarcini de 10 tone, conform **Fig. 4.81**.

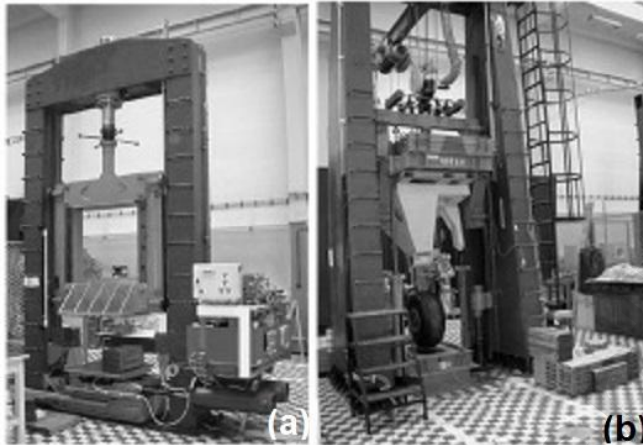


Fig.4.81 Echipamente de testare a sistemelor de aterizare: (a) presă de 40 tone, pentru teste statice; (b) mașină de 10 tone, pentru testarea dinamică

Testele dinamice ale amortizorului *MR* au fost efectuate pe un obiect al cărui profil static este prezentat în **Fig.4.82**. Încercarea dinamică a trenului de aterizare constă dintr-o cădere liberă a unei sarcini de 10 tone de la o înălțime de aterizare fixă [25].

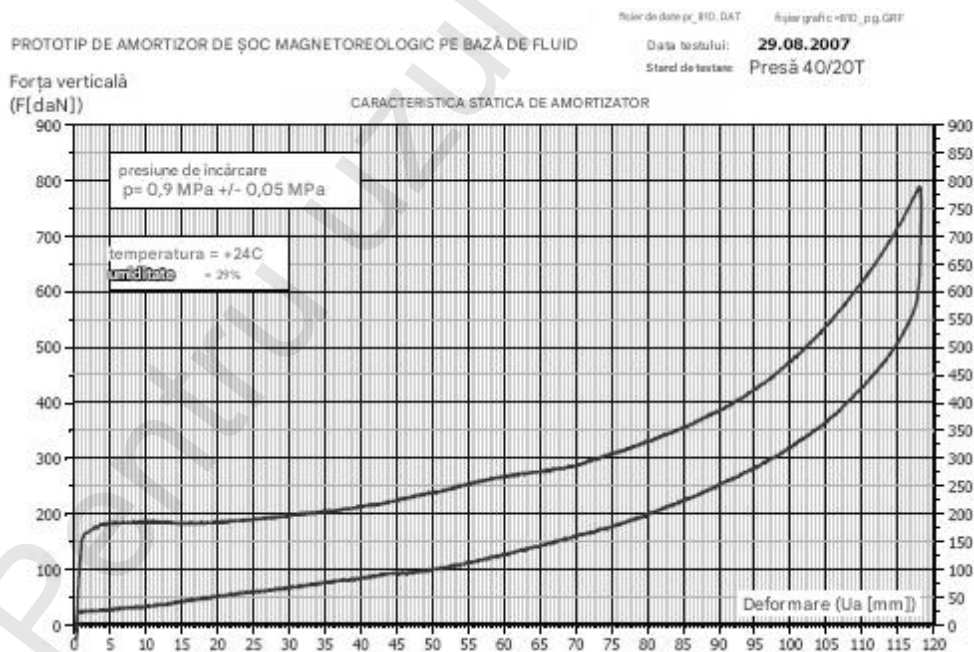


Fig.4.82 Caracteristica statică a amortizorului *MR*

În timpul primului test dinamic, bobinele nu au fost alimentate ($I=0$ A) și din acest motiv forța de amortizare a fost realizată numai prin pomparea fluidului *MR*, conform **Fig.4.83**. La cel de-al doilea test dinamic, în bobine s-a aplicat un curent cu intensitatea $I=2$ A.

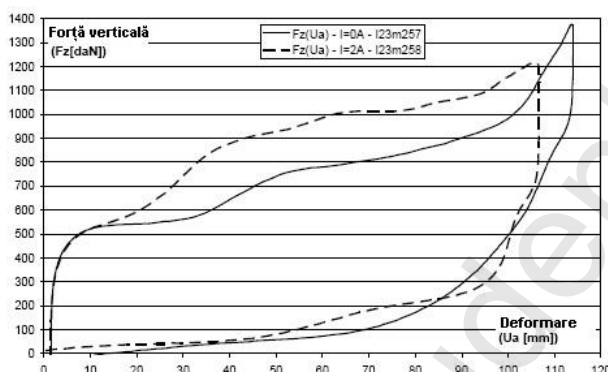


Fig.4.83 Variația forței verticale în funcție de deformare, la două valori ale curentului de alimentare a bobinelor de control a fluidului *MR*

Sarcina maximă din trenul de aterizare a scăzut de la 1376 daN, în absența curentului, la 1218 daN, în cazul alimentării bobinei cu un curent de 2 A, reducerea sarcinii fiind de circa 11.5 % [25].

4.2.5 Protecția antiseismică a clădirilor

S-a efectuat un studiu experimental al comportării la vibrații a unei mase de 12 tone, **Fig.4.84**, solicitată prin intermediul unui sistem hibrid de izolare care include un pendul de rostogolire și un amortizor *MR* de 20 kN.

Sistemul este testat pe o platformă antiseismică, la care deplasarea este monitorizată prin numeroase traductoare care retransmit datele (*En.: feed-back*) la un controler.

Sistemul de control este aplicat prin intermediul controlerului semi-activ, care modulează tensiunea în amortizorul *MR*. Scopul sistemului este de a atenua reacția masei de 12 tone, cu ajutorul unui sistem nelinier de protecție anti-seismică. În fiecare caz s-au utilizat diferite strategii de control pasiv și

semi-activ pentru testarea eficacității protecției anti-seismice [24-25].

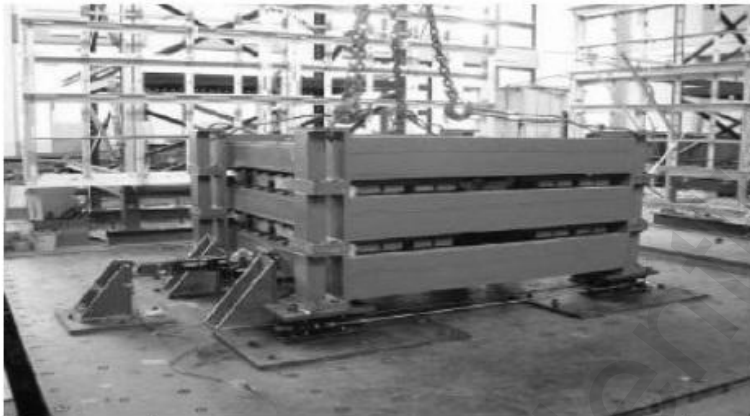


Fig.4.84 Sistem de testare antiseismică de 12 tf, cuplat cu un sistem de izolare cu bază hibridă

S-a efectuat un studiu comparativ referitor la două tipuri posibile de sisteme de izolare anti-seismică inteligentă:

- (i) complet activă și
- (ii) semi-activă, prin intermediul unui amortizor *MR*.

Pe baza prelucrării mai multor semnale produse de diferite cutremure, s-a tras concluzia că amortizoarele anti-seismice *MR* prezintă un potențial semnificativ pentru aplicațiile de protecție la cutremur, cu consum energetic redus.

În cadrul studiilor de optimizare a unui sistem complex de control al structurilor spațiale, cu ajutorul amortizoarelor *MR*, s-a utilizat strategia cu accelerație maximă a solului (*En.: peak ground acceleration, PGA*) care este adaptat atât sistemelor de mari dimensiuni cât și celor cu forțe controlabile. În aceste cazuri, forța de control reprezintă feed-back-ul complex, neliniar, al variabilelor de stare. Pentru obținerea unei soluții aproximative, sistemul neliniar trebuie mai întâi liniarizat. **Fig.4.85** arată reducerea deplasării de către amortizoarele *MR*.

La analiza unui caz computațional real, s-a arătat că metoda de control propusă este eficace pentru reducerea vibrațiilor structurale, prin utilizarea

amortizoarelor *MR*, pe baza *PGA* (En.: *peak ground acceleration*) propus.

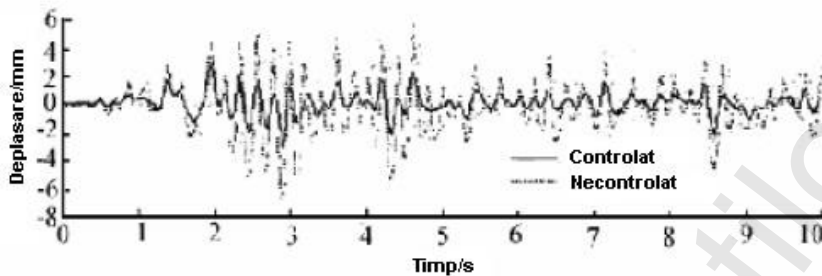


Fig.4.85 Variații comparative, în timp, ale eficacității de reducere a amplitudinii de vibrație a clădirilor pe direcția *Y*

În **Fig.4.86** se prezintă schema unui sistem de izolare inteligentă pe baza unui model structural cu două grade de libertate. Eficacitatea acestui sistem de izolare inteligentă, pentru reducerea reacțiilor structurale, într-un interval larg de condiții de încărcare, a fost demonstrată prin intermediul unei serii de experimente efectuate la *Structural Dynamics and Control/Earthquake Engineering Laboratory*, de la *University of Notre Dame*.

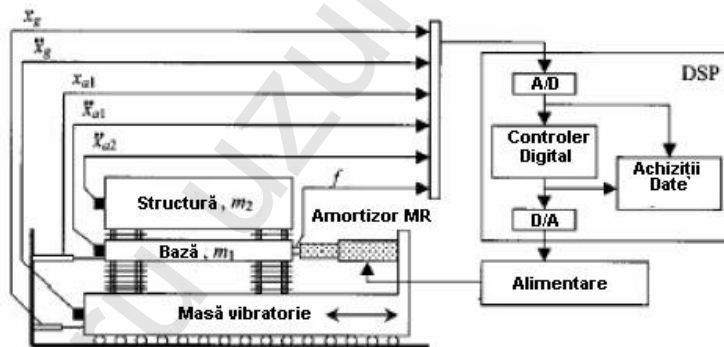


Fig.4.86 Instalație experimentală schematică pentru un model de izolare inteligentă

Aplicând un prag pentru tensiunea electrică de control a amortizorului *MR*, controller-ul devine robust (insensibil) la vibrațiile ambientale. Comportarea dinamică a acestui sistem s-a dovedit a fi perfect predictibilă [24].

Pentru modelarea matematică a amortizoarelor *MR* se pleacă de la schema de principiu și modelul matematic al unui amortizor *MR*, din **Fig.4.87**.

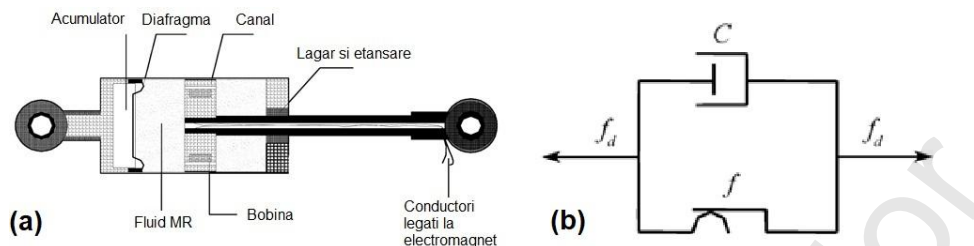


Fig.4.87 Modelarea matematică a unui amortizor *MR*: (a) schema de principiu; (b) modelul *Bingham*

În câmp magnetic puternic, particulele se aliniază și crește rezistența la curgere. Deoarece fluidul *MR* se poate transforma dintr-un fluid vâcos într-o emulsie fluidă, în câteva milisecunde iar forța de control, care rezultă, poate fi destul de mare cu un consum redus de putere, amortizoarele *MR* sunt aplicabile pentru izolarea la vibrații a structurilor mari de inginerie civilă [26].

Modelul *Bingham* al unui amortizor *MR*, din Fig.4.87(b), consideră un component de frecare (f) secondat de un component de vâscozitate Newtoniană (C) iar relația dintre tensiune și deformație este:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y \text{sgn}(\dot{\gamma}) \quad (4.16)$$

unde:

- τ - tensiunea de forfecare a fluidului,
- η - vâscozitatea Newtoniană, independentă de câmpul magnetic aplicat,
- $\dot{\gamma}$ - viteza de forfecare,
- τ_y - tensiunea de forfecare a curgerii dinamice, controlată de către câmpul magnetic aplicat.

S-a determinat relația forță-deplasare pentru amortizorul *MR*, sub forma:

$$f_d = \frac{12\eta LA_p^2}{\pi D D_h^3} \dot{u}(t) + \frac{3L\tau_y}{D_h} A_p \text{sgn}[\dot{u}(t)] \quad (4.17)$$

unde:

- L – lungimea pistonului;
- A_p – aria secțiunii transversale a pistonului,
- D – diametrul interior al cuvei,

D_h – diametrul golului din piston,

$U(t)$ – deplasarea relativă dintre piston și cuvă.

Tensiunea de forfecare a curgerii dinamice τ_y depinde de intensitatea curentului de control, I , după o funcție care se determină prin experimente, pentru fiecare fluid MR în parte:

$$\tau_y = A_1 e^{-I} + A_2 \ln(I + e) + A_3 I \quad (4.18)$$

unde:

A_1 , A_2 și A_3 sunt coeficienți referitori la proprietatea fluidului MR , din amortizor și sunt determinați prin rezultate experimentale.

În structurile pe cadre, amortizoarele MR sunt plasate, în general, între grinzile de sprijin, conform **Fig.4.88**.

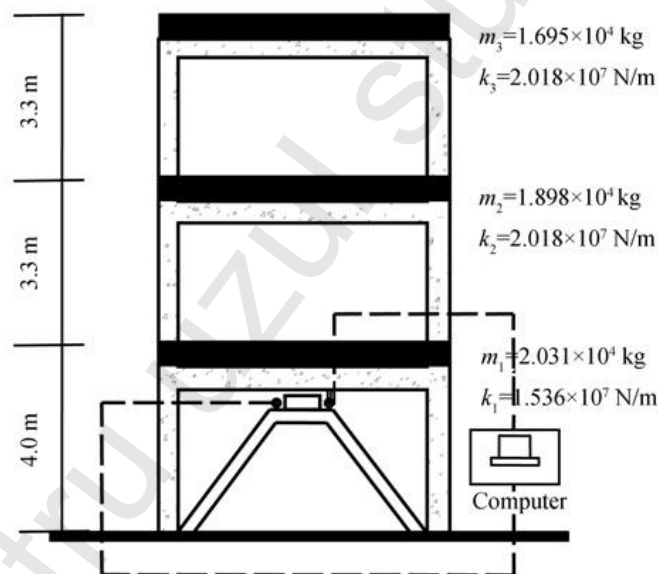


Fig.4.88 Schema structurii inteligente

Luând în considerație rigiditatea grinzilor de sprijin, s-a elaborat un model matematic al sistemului *amortizor inteligent - grinzi de sprijin*, care este considerat drept un amortizor și un resort de foarte mare rigiditate, legate în serie. Amortizoarele MR sunt funcționale atunci când grinzile de sprijin sunt foarte puternice și din acest motiv rigiditatea grinzilor este neglijată în ecuațiile

de mișcare a structurii, care au forma:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\Gamma\ddot{x}_g - Bf_d \quad (4.19)$$

unde:

M - matricea masei,

C - matricea amortizării,

K - matricea rigidității,

x este vectorul deplasării relative a etajelor structurii,

Γ este vectorul-coloană de 1,

$\ddot{x}_g$ este excitația accelerației cutremurului,

B este matricea determinată de poziția amortizorului MR în cadrul structurii,

$f_d = [f_{d1}, f_{d2}, \dots, f_{dn}]^T$ este vectorul forțelor de control produse de amortizoarele MR ,

f_{di} este forța de control la etajul i , $i = 1, \dots, n$.

Principiul strategiei de control inteligent integrat constă din furnizarea curentului pentru amortizorul MR de către un controller *fuzzy*, ale cărui intrări sunt:

(i) accelerația măsurată a cutremurului,

(ii) reacția de deplasare a etajului, prognozată de rețeaua neurală.

Arhitectura acestei strategii este ilustrată în **Fig.4.89** și constă din patru părți cu sarcini distincte:

1. Rețeaua neurală este cea care trebuie educată on-line. Atunci când numărul perechilor de date de măsurare este sub 200, numărul perechilor de date de educare va crește pas-cu-pas, în timpul cutremurului. Când numărul perechilor de date de măsurare este peste 200, cea mai veche pereche va fi abandonată, la fiecare etapă de educare pentru ca numărul total să fie de 200.

Rețeaua neurală este educată pentru a genera, cu un pas înainte, o prognoză a deplasării $\hat{x}_{k+1}$. Intrările din această rețea sunt:

- (i) ieșirile întârziate (x_{k-2}, x_{k-1}, x_k);
- (ii) forțele de control întârziate (f_{dk-1}, f_{dk});
- (iii) intrările întârziate ale cutremurului ($\ddot{x}_{gk-1}, \ddot{x}_{gk}$).

În momentul inițial, intrările întârziate ale rețelei sunt considerate nule, conform circumstanței inițiale reale.

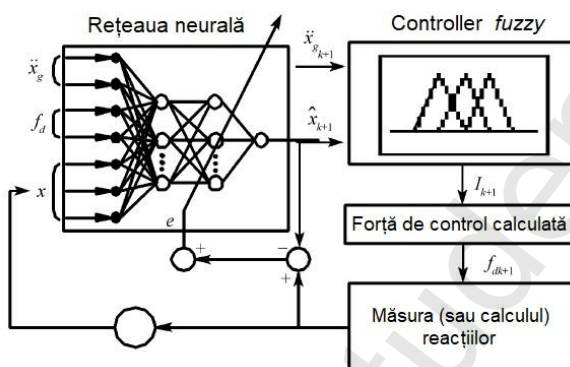


Fig.4.89 Arhitectura strategiei de control inteligent

2. Controller-ul fuzzy este cea de-a doua parte a arhitecturii de control inteligent. Intrările sale sunt:

- (i) accelerația măsurată a cutremurului, $\ddot{x}_{gk+1}$, care poate fi măsurată de accelerometrul seismic instalat în fundația clădirii,
- (ii) deplasarea prognozată $\hat{x}_{k+1}$.

Ieșirea din controller-ul fuzzy este curentul de control al amortizoarelor MR, curent care trebuie determinat rapid, în conformitate cu accelerația măsurată a cutremurului, $\ddot{x}_{gk+1}$, și cu deplasarea prognozată $\hat{x}_{k+1}$.

3. Rolul celei de-a treia părți este de a calcula **forța de control conform curentului de control determinat de către controller-ul fuzzy**. În acest scop, se calculează tensiunea de forfecare a curgerii dinamice, cu ecuația (4.18) și forța de control a amortizoarelor MR, cu ecuația (4.17), în care viteza relativă de deplasare a pistonului, $\dot{u}(t)$, este viteza de deplasare relativă a etajelor clădirii.

4. Cea de-a patra componentă a arhitecturii de control inteligent are

funcția de a măsura **reacția reală a structurilor cu amortizoare MR**. Atunci când se produce excitația cutremurului din etapa de timp $k+1$ și nu produce nici un fel de reacție a structurilor, este de dorit ca curentul optim de control al amortizoarelor *MR* să fie determinat în mod simultan și operativ. Pentru a îndeplini acest rol, este de dorit să se prevadă reacțiile viitoare ale structurilor în conformitate cu reacțiile reale ale etapei de timp k . În același timp reacțiile reale vor fi furnizate de către rețeaua neurală iar ponderile și tendințele vor fi verificate în timp real.

Rețeaua neurală este un model simplificat compus din unități de procesare elementare (*neuroni*). Între neuroni există un număr mare de interconectări. Neuronii au capacitatea de învățare, prin acumularea de date, ceea ce face ca rețeaua neurală să devină un mijloc puternic de predicție și clasificare.

Studiile s-au efectuat pe o rețea neurală cu patru straturi: unul de intrare, două ascunse și unul de ieșire, conform Fig.4.89. Rețeaua a fost solicitată să prevadă reacțiile seismice ale structurilor cu amortizoare *MR*.

Primele simulări au utilizat semnalul înregistrat la cutremurul din *El Centro*, (1940, S-E *Californiei*, lângă granița internațională a *SUA* și *Mexic*, magnitudine 6.9) **Fig.4.90**. Se compară variațiile deplasării și accelerației, în timp, pentru structura controlată inteligent (cu linie continuă) și structuri necontrolate sau controlate prin alte metode de control pasiv.

Se observă, în Fig.4.90(b), că deplasările structurii controlate inteligent sunt mai mari decât cele ale structurii controlate pasiv, însă accelerațiile sunt mai mici.

Efectele controlului inteligent, ale controlului pasiv (pornit/ oprit) și a lipsei controlului, se prezintă, în **Fig.4.91** prin valorile maxime ale deplasării și accelerației, pentru primele trei niveluri, în cazul cutremurului *El Centro*, a celui din *Taft (Kern Country, California, 1952, magnitudine 7.3)* și a unui

cutremur artificial.

Pentru evaluarea globală a reducerii reacțiilor dinamice ale celor patru strategii, s-a analizat spectrul reacției domeniului de frecvență a accelerației.

Fig.4.92 prezintă o comparație între domeniile de frecvență ale ultimului etaj.

Reacțiile la domeniile de frecvență ale ultimului etaj din analiza cutremurului simulat sunt 432.5, 160.4, 165.0 și 168.1 pentru structura necontrolată, controlată inteligent, controlată pasiv (control pornit) și respectiv controlată pasiv (control oprit), în vecinătatea frecvenței naturale a structurii, de 2.20 Hz.

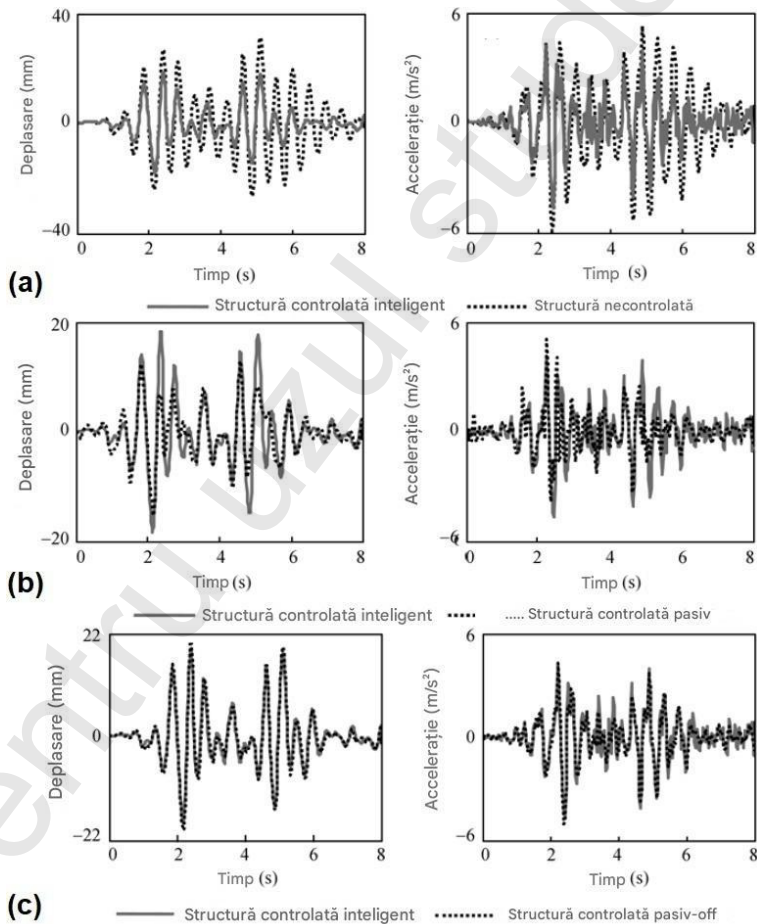


Fig.4.90 Comparație între variațiile deplasării și accelerației obținute la structurile cu control inteligent (linie continuă) și la alte strategii de control, folosind semnalul înregistrat la cutremurul El Centro: (a) control inteligent vs. structură necontrolată; (b) control inteligent vs. structură cu control pasiv pornit; (c) control inteligent vs. structură control pasiv oprit

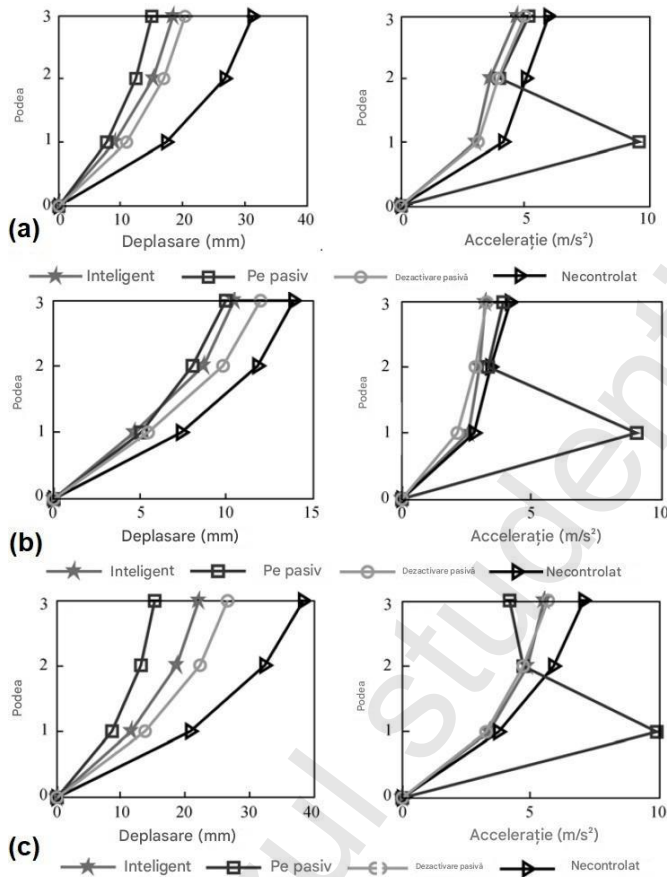


Fig.4.91 Variațiile deplasării (stânga) și ale accelerației (dreapta) pentru: (a) semnalul înregistrat la cutremurul din El Centro; (b) semnalul înregistrat la cutremurul din Taft și (c) un cutremur artificial

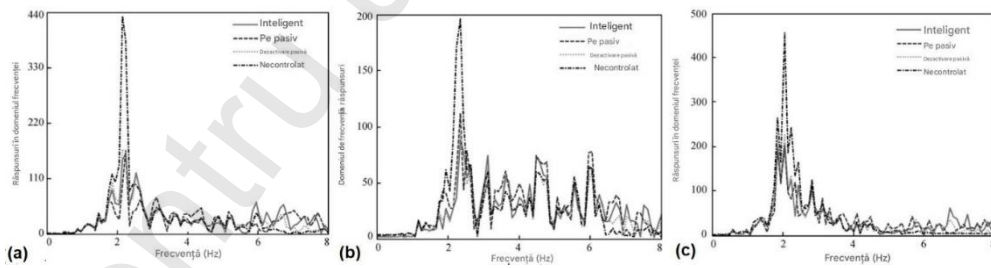


Fig.4.92 Reacțiile la domeniile de frecvență ale ultimului etaj pentru cutremurul: (a) El Centro; (b) Taft; (c) artificial

Se observă că reacțiile domeniilor de frecvență sunt efectiv reduse prin adăugarea amortizorului la structura controlată inteligent care are cea mai bună amortizare la cutremur, în apropiere frecvenței naturale a clădirii [26].

Bibliografie

- [1] Bulat N. Galimzyanov, Anatolii V. Mokshin, A novel view on classification of glass-forming liquids and empirical viscosity model, *Journal of Non-Crystalline Solids* 570 (2021) 121009
- [2] Johanna Aho, Johan P. Boetker, Stefania Baldursdottir, Jukka Rantanen, Rheology as a tool for evaluation of melt processability of innovative dosage forms, *International Journal of Pharmaceutics*, Volume 494, Issue 2, 2015, Pages 623-642, ISSN 0378-5173, <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2015.02.009>.
- [3] Kampmann, Tobias A. et al. "Monte Carlo simulation of dense polymer melts using event chain algorithms." *The Journal of chemical physics* 143 4 (2015): 044105.
- [4] Joshua J. Cardiel, Alice C. Dohnalkova, Neville Dubash, Ya Zhao, Perry Cheung, Amy Q. Shen, Microstructure and rheology of a flow-induced structured phase in wormlike micellar solutions, *Mechanical Engineering Department, University of Washington, Seattle, WA 98195*; and *Pacific Northwest National Laboratory, Environmental Molecular Sciences Laboratory, Richland, WA 99352*, 110 (18) E1653-E1660, <https://doi.org/10.1073/pnas.1215353110>.
- [5] Kamal I Aly, Nayef S Al-Muaikel, Mahmoud A Hussein, Mona A Abdel-Rahman, Amal H Tolba, *Liquid crystalline behavior of polymers: fundamentals, synthesis and characterizations*, ISBN: 978-0-9967956-7-8, Published By: MedCrave Group LLC January 03, 2018
- [6] Dr. Paweł W. Majewski, Department of Chemistry University of Warsaw, ATTACHMENT 4 INDICATION OF THE SCIENTIFIC ACHIEVEMENT
- [7] Pricop Bogdan, Söyler Ahmet, Ozkal Burak, Bujoreanu Leandru, (2020), Powder Metallurgy: An Alternative for FeMnSiCrNi Shape Memory Alloys Processing. *Frontiers in Materials*. 7. 247. [10.3389/fmats.2020.00247](https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00247).
- [8] Sizhe Liu, Kenta Watanabe, Eiji Miwa, Mitsuo Hara, Takahiro Seki, Koichi Mayumi, Kohzo Ito, Yukikazu Takeoka, Mechanical properties of polymer networks with polyrotaxane crosslinkers with different molecular structures based on polyethylene glycol and α -cyclodextrin, *Giant*, Volume 17, 2024, 100224, ISSN 2666-5425, <https://doi.org/10.1016/j.giant.2023.100224>.
- [9] Yung-Hui Shih and Hans Conrad, Influence of particle size on the dynamic strength of electrorheological fluids, In: *Electrorheological Fluids*.

Mechanisms, Properties, Technology and Applications, Eds: R. Tao and G.D. Roy, World Scientific, 1994, pp. 294-313.

[10] M. Ashtiani, S. H. Hashemabadi, A. Ghaffari, A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374 (2015) 716–730.

[11] Jinaga, R., Kolekar, S., Jagadeesha, T. (2020). Tribology of Intelligent Magnetorheological Materials. In: Katiyar, J., Ramkumar, P., Rao, T., Davim, J. (eds) *Tribology in Materials and Applications. Materials Forming, Machining and Tribology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47451-5_7

[12] Dave, P.N., Khosla, E. (2022). Rheological Characterization Tools: A Review. In: Thomas, S., Rezazadeh Nochehdehi, A. (eds) *Handbook of Magnetic Hybrid Nanoalloys and their Nanocomposites*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90948-2_21

[13] X. Tang et al., *Int J Modern Phys B*, 15(6 & 7) (2001) 549–556.

[14] J. E. Martin, Field-induced rheology in uniaxial and biaxial fields, *International Journal of Modern Physics B*, 15(6 & 7) (2001) 574–595

[15] D. Szabo, G. Szeghy, M. Zrinyi, Shape Transition of Magnetic Field Sensitive Polymer Gels, *Macromolecules*, 31 (1998) 6541-6548

[16] K. Hayashi, T. Yamada, Y. Ido, Resistance Force of a Shock Absorber Using Magnetic Functional Fluids Containing both Micrometer-sized and Nanometer-sized Magnetic Particles, *Physics Procedia* 9 (2010) 243–247

[17] Chin, B. D., Park, J. H., Kwin, M. H., Park, O.O., Rheological properties and dispersion stability of magnetorheological (MR) suspensions, *Rheologica Acta* 40 (2001) 211–219

[18] J. Zhang., J. Zhang., J. Jia, Characteristic analysis of magnetorheological fluid based on different carriers, *J. Cent. South Univ. Technol.* (2008)15s1–0252–255

[19] HWAN-SOO LEE, SEUNG-BOK CHOI, Control and Response Characteristics of a Magneto-Rheological Fluid Damper for Passenger Vehicles, *J Intell Mater Syst Struct*, 11, 2000 , 80-87.

[20] FARAMARZ GORDANINEJAD, SHAWN P. KELSO, Fail-Safe Magneto-Rheological Fluid Dampers for Off-Highway, High-Payload Vehicles, *J Intell Mater Syst Struct*, 11, 2000, 395-406.

[21] M. Das et al., Analysis of magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process, *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 38:613–621

- [22] Kyung-In Jang et al., A 3D Model for Magnetorheological Fluid that Considers Neighboring Particle Interactions in 2D Skewed Magnetic Fields, *Int J Prec Eng Manuf* (2009) 10(1), 115-118
- [23] S. Jha, et al., Effect of extrusion pressure and number of finishing cycles on surface roughness in magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process, *Int J Adv Manuf Technol* (2007) 33: 725–729
- [24] M. Aslam et al., Review of magnetorheological (MR) fluids and its applications in vibration control, *J Marine Sci Appl* (2006) 5(3) 17-29
- [25] Z. Skorupka, R. Kaj ka, R. Harla, W. Kowalski, M. Parafiniak, M. Kacprzak, G. Balcerkiewicz, J. Pacholski, W. Lechniak, Active control of landing gear shock absorber characteristic using magnetoreological fluids, *Solid State Phenomena*, 154 (2009) 195-201
- [26] Z.D. Xu, Y. Q. Guo, Integrated intelligent control analysis on semi-active structures by using magnetorheological dampers, *Sci China Ser E-Tech Sci*, 51(12) 2008 2280-2294