

ELEMENTE DE REOLOGIE

NOȚIUNI GENERALE DESPRE FLUIDE

- o D.p.d.v. macroscopic, corpurile materiale:
 - corpuri solide;
 - corpuri fluide.
- o **Solidele** = corpuri cu dimensiuni și forme bine definite, a căror principală caracteristică este **rigiditatea**. Sunt obiect de studiu al **mecanicii corpurilor rigide**, modificată prin **legile elasticității** pentru corpurile care nu pot fi considerate perfect rigide.

NOȚIUNI GENERALE DESPRE FLUIDE

- o **Fluidele** = corpuri caracterizate prin:
 - mobilitate mare,
 - rezistență la rupere practic nulă
 - deformație ușoară (sunt lipsite de formă proprie).
- o Principala proprietate a acestor corpuri este **fluiditatea**.

NOȚIUNI GENERALE DESPRE FLUIDE

- o Sub acțiunea unei tensiuni tangențiale constante, fluidul se deformează. Dacă tensiunea nu este îndepărtată, deformația poate atinge orice valoare. Viteza de deformare este **constantă** și depinde de viscozitatea fluidului.
- o Deformarea continuă a unui fluid sub acțiunea unei tensiuni poartă denumirea de **curgere**.
- o Curgerea fluidelor prezintă o importanță deosebită pentru **procesele tehnologice** din industria alimentară și nu numai.

NOȚIUNI GENERALE DESPRE FLUIDE

o Clasificarea fluidelor:

- după modul lor de comportare la aplicarea unei presiuni exterioare,
- după efectele pe care le produce asupra lor acțiunea unei tensiuni tangențiale.

NOȚIUNI GENERALE DESPRE FLUIDE

o Lichidele

- fluide foarte puțin compresibile,
- au proprietatea de a forma o suprafață liberă în contact cu un gaz, sau o suprafață de separare în contact cu un alt lichid nemiscibil.

NOȚIUNI GENERALE DESPRE FLUIDE

o Gazele

- sunt fluide care ocupă întreg volumul în care se află și sunt foarte compresibile.
- gaze permanente (necondensabile): temperatura lor este superioară temperaturii critice.
- Vaporii: temperatura lor este inferioară temperaturii critice.

NOȚIUNI GENERALE DESPRE FLUIDE

- o Comportarea macroscopică diferită a gazelor și lichidelor = diferența dintre forțele de atracție intermoleculare și distanța medie dintre molecule.
- o Diferența lichid - gaz nu este foarte distinctă;
- o Modificând parametrii de stare (P , T) trecerea unui lichid în fază de vapori se poate face fără apariția unei suprafețe libere și fără a-l fierbe.
- o Acest fenomen are loc în **punctul critic**, caracterizat de parametrii critici (**P_{cr}** , **T_{cr}**), punct în care proprietățile lichidului și vaporilor sunt identice.

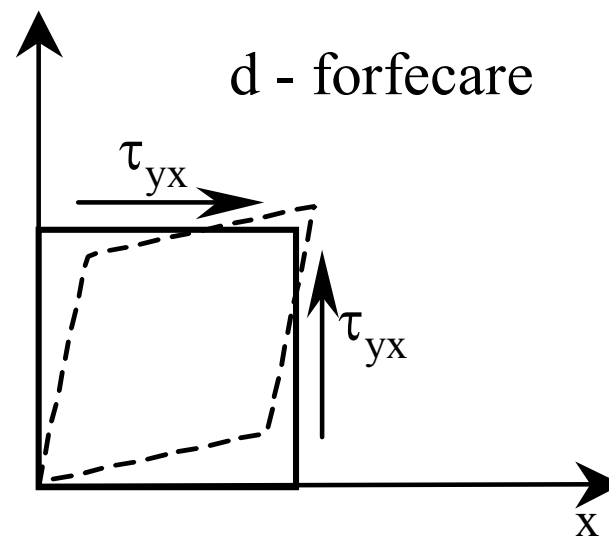
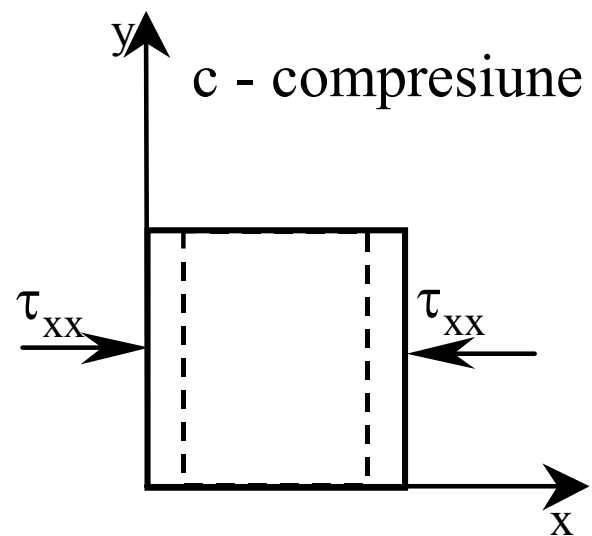
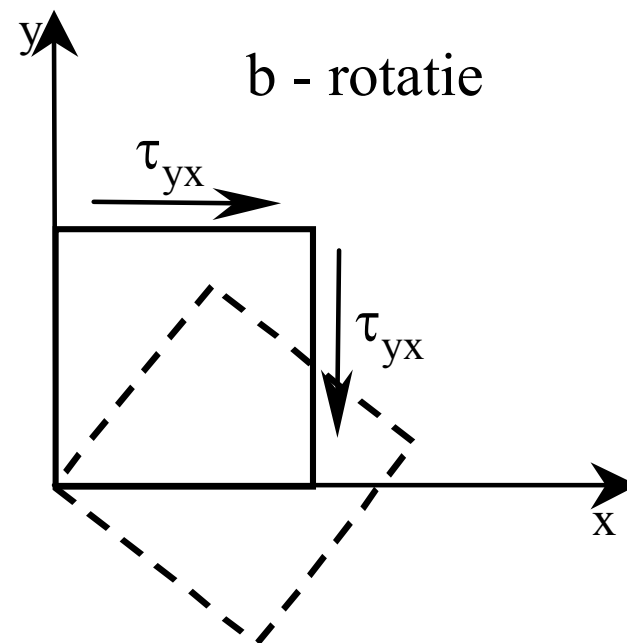
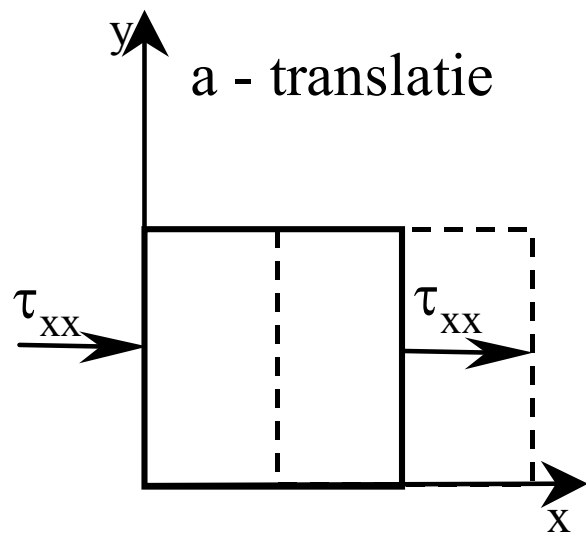
Proprietăți reologice fundamentale

o Reologia:

- se ocupă cu studiul solicitărilor și a răspunsului corpurilor la solicitări,
- stabilește modelele matematice care formează funcția de răspuns a unui corp supus la solicitări.

Proprietăți reologice fundamentale

- o Aplicând asupra unui corp o forță sau un sistem de forțe corpul va fi pus în mișcare;
- o Mișcarea:
 - Deplasări
 - Deformări
 - Deplasări și deformări



Proprietăți reologice fundamentale

- o În cazul **solidelor**, deformarea are loc până la echilibrarea forțelor interne cu cele externe;
- o După îndepărtarea solicitărilor deformația se recuperează.
- o Proprietatea de recuperare a deformației după îndepărtarea solicitării care a produs-o poartă denumirea de **elasticitate**.

Proprietăți reologice fundamentale

- o **Fluidele** opun rezistență redusă la deformare,
- o Deformarea nu ajunge la echilibru, ea crește continuu și nu se mai recuperează după îndepărtarea sollicitării: apare fenomenul de **curgere**.
- o Proprietatea fluidelor de a opune rezistență la schimbarea ireversibilă a poziției elementelor de volum constituente, disipând energia mecanică sub formă de căldură, poartă denumirea de **viscozitate**.

Proprietăți reologice fundamentale

- o **Elasticitatea** și **viscozitatea** sunt proprietăți intrinseci, fundamentale ale corpurilor.
- o Extrem de puține corpuri reale manifestă o singură proprietate.
- o Majoritatea materialelor prezintă atât
 - **elasticitate** (specifică solidelor), cât și
 - **viscozitate** (specifică fluidelor).

Proprietăți reologice fundamentale

- o Dacă viscozitatea și elasticitatea se manifestă concomitent, corpul se numește **viscoelastic** sau **elastoviscos**, (după cum preponderentă este viscozitatea, respectiv elasticitatea).
- o Dacă viscozitatea și elasticitatea se manifestă succesiv la o sollicitare continuu crescătoare, corpul se numește **plastic**.

Proprietăți reologice fundamentale

- o Un **corp plastic** se comportă:
 - la solicitări reduse ca un solid (rigid sau elastic)
 - peste o anumită valoare a solicitării (solicitare critică, prag de curgere) ca un fluid (curge), deformându-se ireversibil.
- o **Plasticitatea nu este o proprietate intrinsecă a corpurilor**, ci doar un mod de comportare a acestora, ea este considerată practic a **treia proprietate reologică** (alături de elasticitate și viscozitate) a corpurilor deformabile.

Proprietăți reologice fundamentale

- o D.p.d.v. vedere reologic nu există o delimitare netă între starea solidă, lichidă și gazoasă.
- o Indiferent de starea de agregare, toate corpurile "**curg**", trecerea de la o stare la alta presupunând doar o schimbare cantitativă a raportului dintre componenta elastică și cea viscoasă.


Proprietăți reologice fundamentale

- o Stările de agregare solidă, lichidă și gazoasă pot fi considerate drept cazuri particulare ale unei stări fluide generalizate.
- o Generalizarea are la bază faptul că atributul esențial al stării lichide - **viscozitatea** - există și la starea gazoasă și, nedemonstrat, la starea solidă.

TIPURI DE SOLICITĂRI. PARAMETRII SOLICITĂRII

- o Dacă o forță sau un sistem de forțe acționează asupra unui corp → corpul este solicitat.
- o Forțele care acționează asupra corpului:
 - forțe exterioare, concentrate sau repartizate,
 - forțe sau momente volumice,
 - forțe de inerție,
 - forțe centrifugale,
 - sarcini produse de un câmp termic, electromagnetic etc.

TIPURI DE SOLICITĂRI. PARAMETRII SOLICITĂRII

- o Forțele care acționează asupra corpului se numesc **solicitări**,
- o Totalitatea acestora formează **starea de solicitare** sau **starea de tensiune** a corpului.
- o Ansamblul forțelor aplicate unui corp îl pot solicita la:
 - tracțiune,
 - compresiune,
 - forfecare,  sta la baza curgerii fluidelor
 - torsiune,
 - incovoiere.

TIPURI DE SOLICITĂRI. PARAMETRII SOLICITĂRII

Pentru deformarea unui corp (incluzând și curgerea) este necesară acțiunea unei

- o Tensiuni (efort unitar), care produce o
- o deformație specifică cu o anumită
- o viteză de deformare.



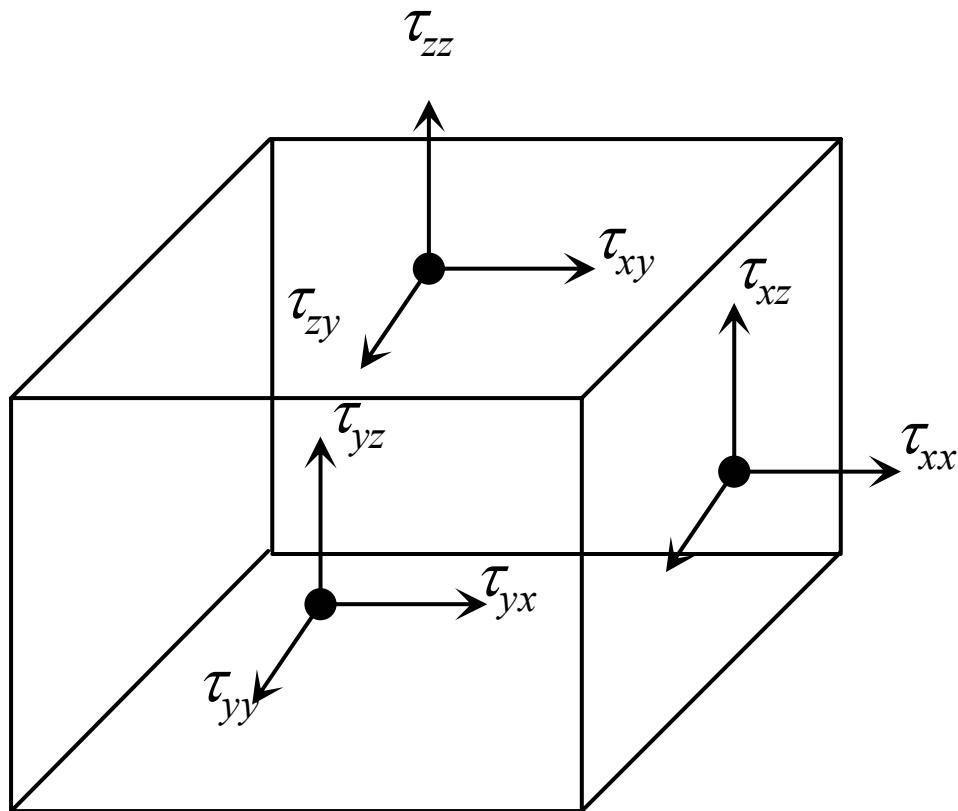
PRINCIPALII PARAMETRII AI SOLICITĂRII

TENSIUNEA (EFORTUL UNITAR)

o limita raportului dintre forța aplicată și suprafața pe care este aplicată când aria suprafeței tinde la zero:

$$\vec{\tau} = \lim \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta A} = \frac{d\vec{F}}{dA}$$

TENSIUNEA (EFORTUL UNITAR)



o Tensiuni normale și tangențiale care acționează asupra unui element de volum

TENSIUNEA (EFORTUL UNITAR)

- o Pe cele șase fețe ale paralelipipedului acționează câte trei tensiuni după direcțiile axelor de coordonate:
 - 2 sunt tangențiale (solicitând corpul la forfecare)
 - 1 este normală (solicitând corpul la întindere sau compresiune).
 - Din considerente de simetrie (tensiunile care acționează pe fețele opuse ale paralelipipedului sunt identice), starea de tensiune este definită de 9 componente, componente care formează tensorul simetric al tensiunilor:

TENSIUNEA (EFORTUL UNITAR)

o Tensorul simetric al tensiunilor:

$$\tau = \tau_{ij} = \begin{vmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{vmatrix}$$

$i = j$ tensiuni normale

$i \neq j$ tensiuni tangentiale

DEFORMAȚIA

- o Deformația este rezultatul acțiunii unei tensiuni.
- o Tensiunile normale acționează asupra volumului corpurilor, provocând comprimarea sau dilatarea lor;
- o Tensiunile tangențiale acționează asupra forme corpurilor.

DEFORMAȚIA

o Deformația, ca și tensiunea, este o mărime tensorială definită prin relații de forma:

$$\gamma_{xx} = \frac{\partial X_x}{\partial x} \quad \gamma_{yy} = \frac{\partial X_y}{\partial y} \quad \gamma_{zz} = \frac{\partial X_z}{\partial z}$$

DEFORMAȚIA

o Sau:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial X_x}{\partial y} + \frac{\partial X_y}{\partial x} \right)$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial X_x}{\partial z} + \frac{\partial X_z}{\partial x} \right)$$

$$\gamma_{zy} = \gamma_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial X_y}{\partial z} + \frac{\partial X_z}{\partial y} \right)$$

DEFORMAȚIA

- o in care X_I este o mărime vectorială ce caracterizează deplasarea relativă a unui punct din corpul considerat, în urma sollicitării.
- o Starea de deformare este definită de nouă componente.
- o Datorită simetriei deformațiilor specifice de forfecare, starea de deformare este dată de numai șase componente: γ_{xx} ; γ_{yy} ; γ_{zz} ; γ_{xy} ; γ_{xz} ; γ_{yz} .

VITEZA DE DEFORMARE

o Viteza de deformare, se exprimă prin derivata deformației în raport cu timpul:

$$\dot{\gamma}_{ij} = \frac{d}{dt} (\gamma_{ij}) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial X_i}{\partial j} \right) = \frac{\partial}{\partial j} \left(\frac{\partial X_i}{\partial t} \right) = \frac{dv_i}{dj}$$

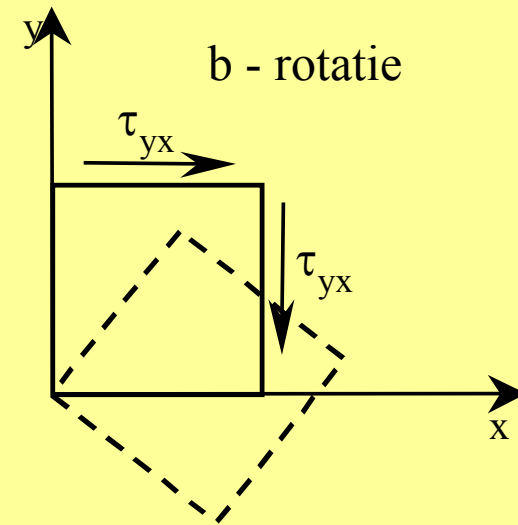
o Dacă $i \neq j$, viteza de deformare devine viteză de forfecare.

VITEZA DE DEFORMARE

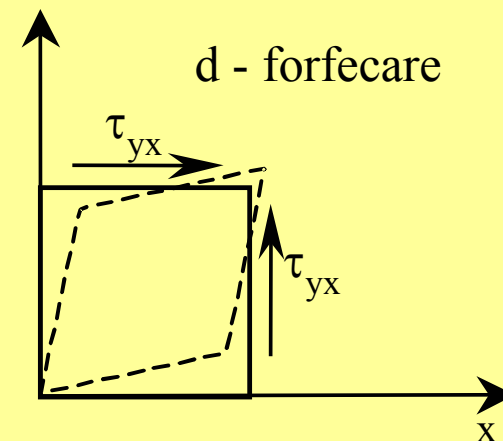
o Conform relației anterioare rezultă că viteza de deformare și gradientul de viteză sunt noțiuni identice, dar care nu se pot substitui reciproc.

VITEZA DE DEFORMARE

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = - \frac{\partial v_y}{\partial x}$$



$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{\partial v_y}{\partial x}$$



VITEZA DE DEFORMARE

- o Numai gradientii de viteză nu pot constitui o măsură a vitezei de forfecare.
- o Măsura vitezei de forfecare o constituie media gradientilor de viteză:

$$\dot{\gamma}_{ij} = \dot{\gamma}_{ji} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial j} + \frac{\partial v_j}{\partial i} \right)$$

VITEZA DE DEFORMARE

o Viteza de deformare volumică se poate scrie:

$$\dot{\gamma}_v = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \operatorname{div} \mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{v}$$

ECUAȚII REOLOGICE

o Ecuațiile care corelează

- **tensiunile** cu **deformațiile** (în cazul **solidelor**),

- **tensiunile** cu **vitezele de deformare** (în cazul **fluidelor**)

poartă denumirea de ecuații reologice

o Reprezentarea grafică a ec. reologice în coordonate tensiune - deformație, (tensiune - viteză de deformare), = **reograme**.

ECUAȚII REOLOGICE

- o Toate ecuațiile reologice conțin un număr de **coeficienți de material**:
 - Pentru mediile anizotrope și neomogene sunt necesari 81 de coeficienți de material.
 - Pentru mediile izotrope și neomogene sunt necesari 21 de coeficienți de material.
 - Pentru mediile izotrope și omogene sunt necesari 2 coeficienți de material.

ECUAȚII REOLOGICE

- o Ex. de coeficienți de material:
 - modulul de elasticitate al lui Young,
 - modulul de elasticitate la forfecare,
 - coeficientul de viscozitate la forfecare simplă (viscozitatea dinamică),
 - pragul de elasticitate (limita de elasticitate pragul de curgere)
 - etc.

Corpuri cu proprietăți unitare și comportare ideală

Dacă un corp este sollicitat, funcție de proprietățile corpului, răspunsul la sollicitare poate fi:

1. Deformație nulă; corpul este **neelastic (pur rigid)**;
2. Deformație temporară, recuperabilă; corpul este **perfect elastic**;
3. Deformație permanentă, nerecuperabilă; corpul este **pur viscos**;
4. Deformație parțial temporară, parțial permanentă; corpul este **simultan elastic și viscos**;
5. Deformație temporară sau/și permanentă; corpul este **succesiv elastic și viscos (plastic)**;
6. Deformație permanentă pentru sollicitare nulă; corpul este **neviscos (inviscid)**.

Corpuri cu proprietăți unitare și comportare ideală

- o Deformație nulă; corp **neelastic** (pur rigid):
SOLIDUL LUI EUCLID;
- o Deformație permanentă pentru sollicitare nulă;
corp **neviscos** (**inviscid**): **FLUIDUL LUI PASCAL**;
- o Corpuri ipotetice pe baza cărora s-au dezvoltat:
 - mecanica clasică a solidului;
 - teoria clasică a dinamicii fluidelor;
 - d.p.d.v. reologic, cele 2 corpuri nu prezintă importanță, neposedând nici una din însușirile specifice materiei reale: elasticitate, viscozitate.

Corpuri cu proprietăți unitare și comportare ideală

- o Cele mai simple corpuri studiate de reologie posedă o singură proprietate = **corpuri reologice particulare** = corpuri cu proprietăți unitare cu comportare ideală.
- o Comportarea lor este descrisă cu ajutorul unor **legi liniare**.
- o Aceste corpuri sunt:
 - solidul lui Hooke (perfect elastic),
 - fluidul lui Newton (pur viscos),
 - plasticul lui St. Venant (perfect plastic).

SOLIDUL LUI HOOKE

- o Corpul perfect elastic
- o Posedă numai **elasticitate**
- o Sub acțiunea unei tensiuni aplicate sub formă de impact, se deformează instantaneu, iar la descărcare recuperează întreaga deformație.
- o Este elastic pe întregul domeniu al solicitării.
- o Forma corpului depinde exclusiv de solicitare și este independentă de factorul timp

SOLIDUL LUI HOOKE

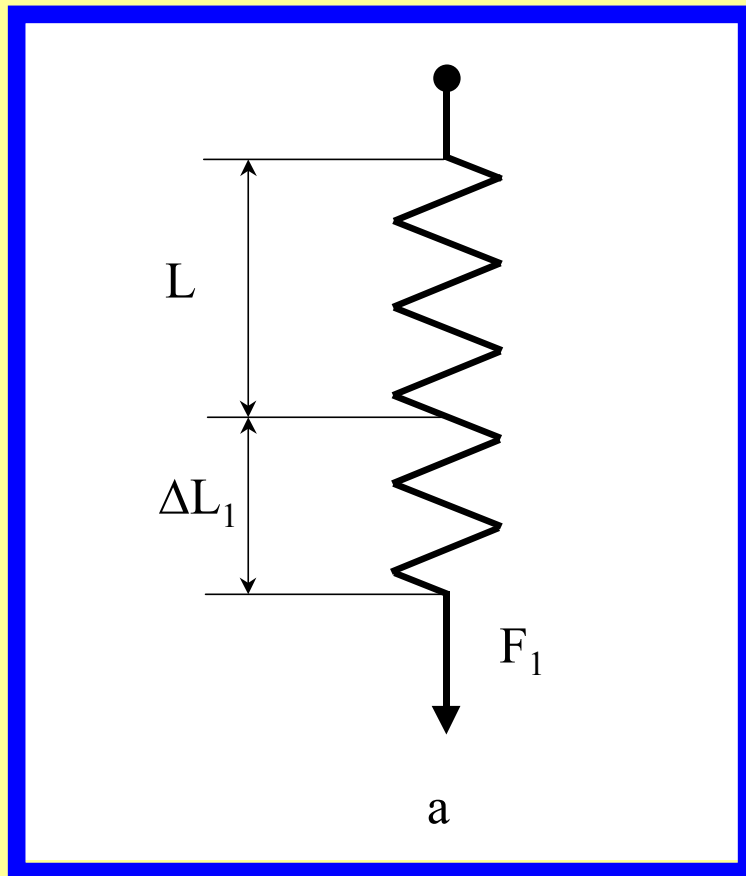
o Ecuația reologică (legea lui Hooke) a corpului supus la forfecare simplă:

$$\tau_{yx} = G \cdot \gamma_{yx}$$

în care G reprezintă modulul de elasticitate la forfecare (modulul de rigiditate).

SOLIDUL LUI HOOKE

- o Modelul analog mecanic: arcul elicoidal (resortul)



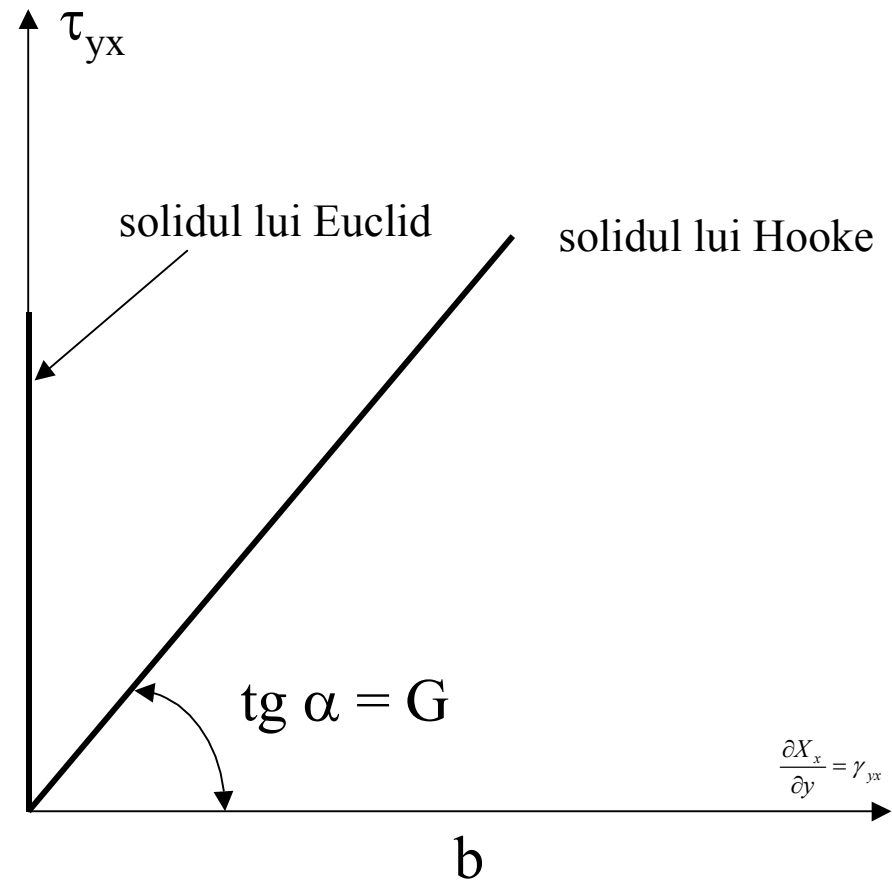
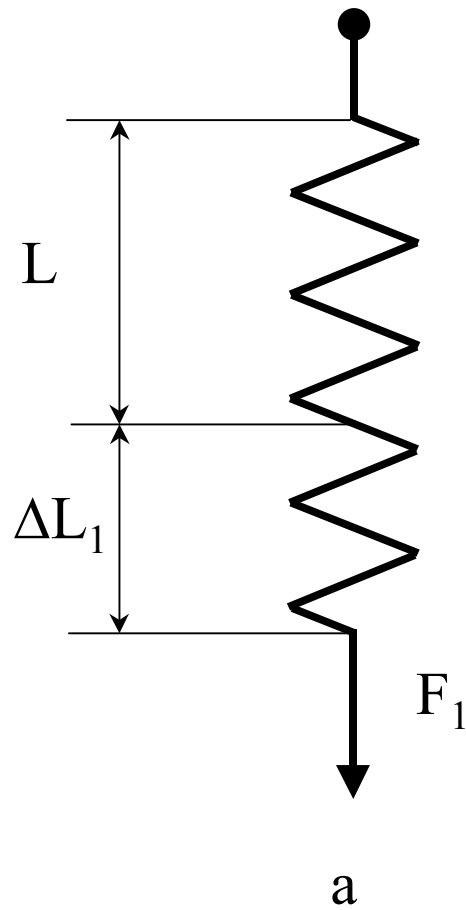
$$F_1 = k \cdot \Delta L_1$$

$$\tau_{yx} = G \cdot \gamma_{yx}$$

SOLIDUL LUI HOOKE

- o Dacă asupra unui arc de lungime L acționează o forță instantanee F_1 , arcul se deformează instantaneu cu ΔL_1 .
- o Sub acțiunea forței F_1 deformația se menține constantă în timp.
- o După îndepărtarea forței, arcul revine la starea lui naturală.
- o Recuperarea deformației este instantanee.
Între forță și deformație există o proporționalitate directă:
$$F_1 = k \cdot \Delta L_1$$

SOLIDUL LUI HOOKE



FLUIDUL LUI NEWTON

- o Corpul pur viscos = posedă numai **viscozitate**.
- o Sub acțiunea unei solicitări, curge.
- o Legea care descrie comportarea reologică include coeficienții de viscozitate și este valabilă numai în **curgerea laminară**.
- o Deformația viscoasă depinde de mărimea și durata solicitării.
- o La efort constant curgerea este continuu întreținută, deformația este continuu crescătoare și viteza de deformare este constantă.
- o Din acest motiv, în cazul fluidelor viscoase, tensiunea se corelează cu viteza de deformare.

FLUIDUL LUI NEWTON

- o Ecuația reologică generală a acestui corp exprimă dependența liniară dintre tensorul tensiunilor și tensorul vitezelor de deformare:

$$\tau_{ij} = 2\mu\dot{\gamma}_{ij} + \left[\mu_v - \frac{2}{3}\mu\right]\dot{\gamma}_{ij}\delta_{ij} \quad (1)$$

δ_{ij} este tensorul unitate (simbolul lui Kronecker):

- are valoarea 1 pentru $i = j$,
- are valoarea 0 pentru $i \neq j$

FLUIDUL LUI NEWTON

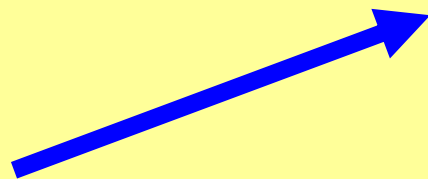
- o Pentru fluide incompresibile când deformarea volumică este exclusă ($\dot{\gamma}_{ii} = 0$),
- o Pentru fluide compresibile sollicitate numai la forfecare ($i \neq j$ și $\delta_{ij} = 0$), ecuația reologica devine:

$$\tau_{ij} = 2\mu\dot{\gamma}'_{ij} \quad (2)$$

FLUIDUL LUI NEWTON

o Considerand solicitările pe direcțiile x și y , corpul este supus la forfecare simplă după direcția x ($v_y = 0$):

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} = \mu \cdot \dot{\gamma}_{yx} \quad (3)$$



legea de frecare a lui Newton

FLUIDUL LUI NEWTON

Deși ecuația (3):

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} = \mu \cdot \dot{\gamma}_{yx}$$

este considerată în mod curent ecuația reologică a fluidelor newtoniene, ea reprezintă doar un caz particular al ecuației (1),

$$\tau_{ij} = 2\mu\dot{\gamma}_{ij} + \left[\mu_v - \frac{2}{3}\mu \right] \dot{\gamma}_{ij} \delta_{ij}$$

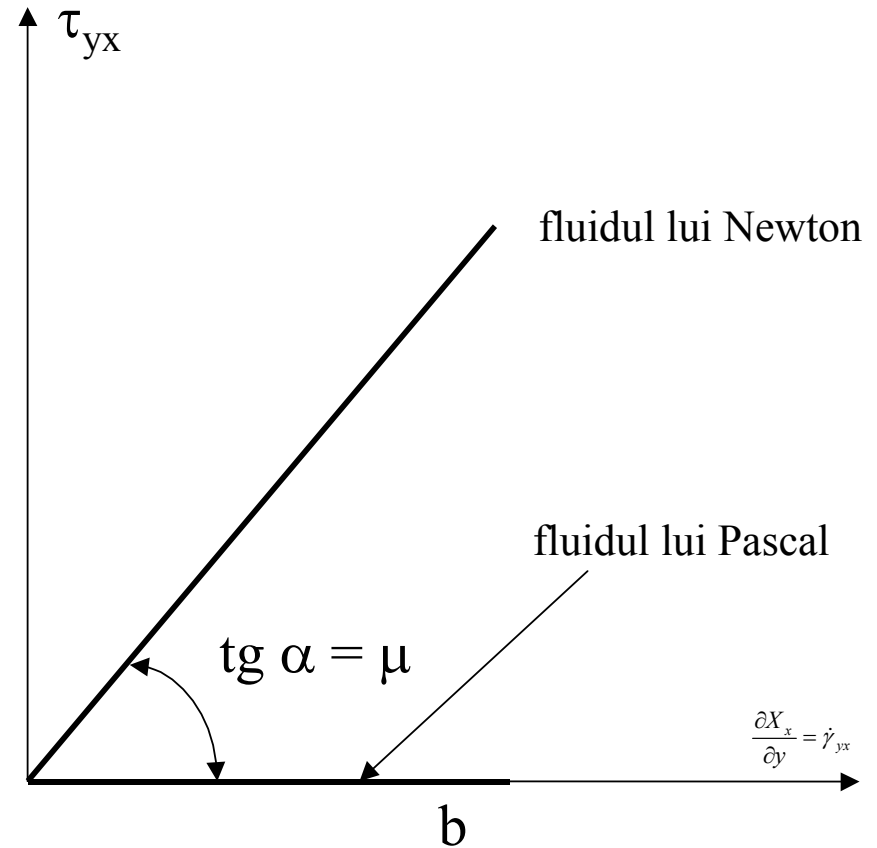
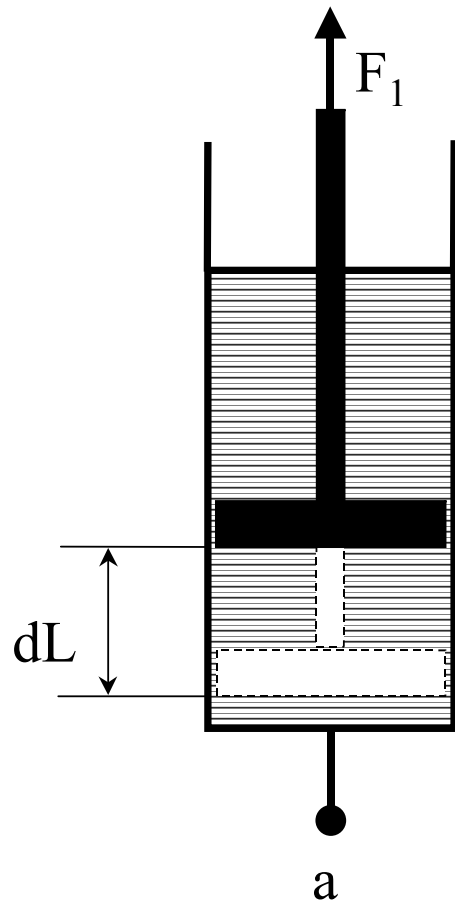
fiind valabilă numai pentru curgerea cu forfecare simplă.

FLUIDUL LUI NEWTON

Amortizorul se compune dintr-un recipient cilindric umplut cu un lichid newtonian, în care se deplasează un piston într-o manieră care exclude apariția turbulenței. Între partea fixă și cea mobilă a amortizorului nu există puncte de contact, ceea ce evită apariția unor forțe de frecare. Sistemul este astfel construit încât efectele inerțiale, gravitaționale și de capăt sunt neglijabile.

Forța F_1 aplicată tijeii determină deplasarea pistonului și trecerea lichidului din față în spate, prin spațiul dintre piston și cilindru.

FLUIDUL LUI NEWTON



o Modelul analog mecanic: **AMORTIZORUL**

FLUIDUL LUI NEWTON

- o Deplasarea crește continuu în timp iar viteza de deplasare este constantă.
- o La aplicarea unei forțe sub formă de impact, amortizorul nu reacționează instantaneu.
- o Viteza de deplasare este constantă atâta timp cât forța este constantă.
- o Între forța aplicată și viteza de deplasare există o proporționalitate directă:

$$F_1 = k \frac{dL}{dt}$$

k reprezintă constanta amortizorului,
 dL/dt reprezintă viteza de deplasare

FLUIDUL LUI NEWTON

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} = \mu \cdot \dot{\gamma}_{yx}$$

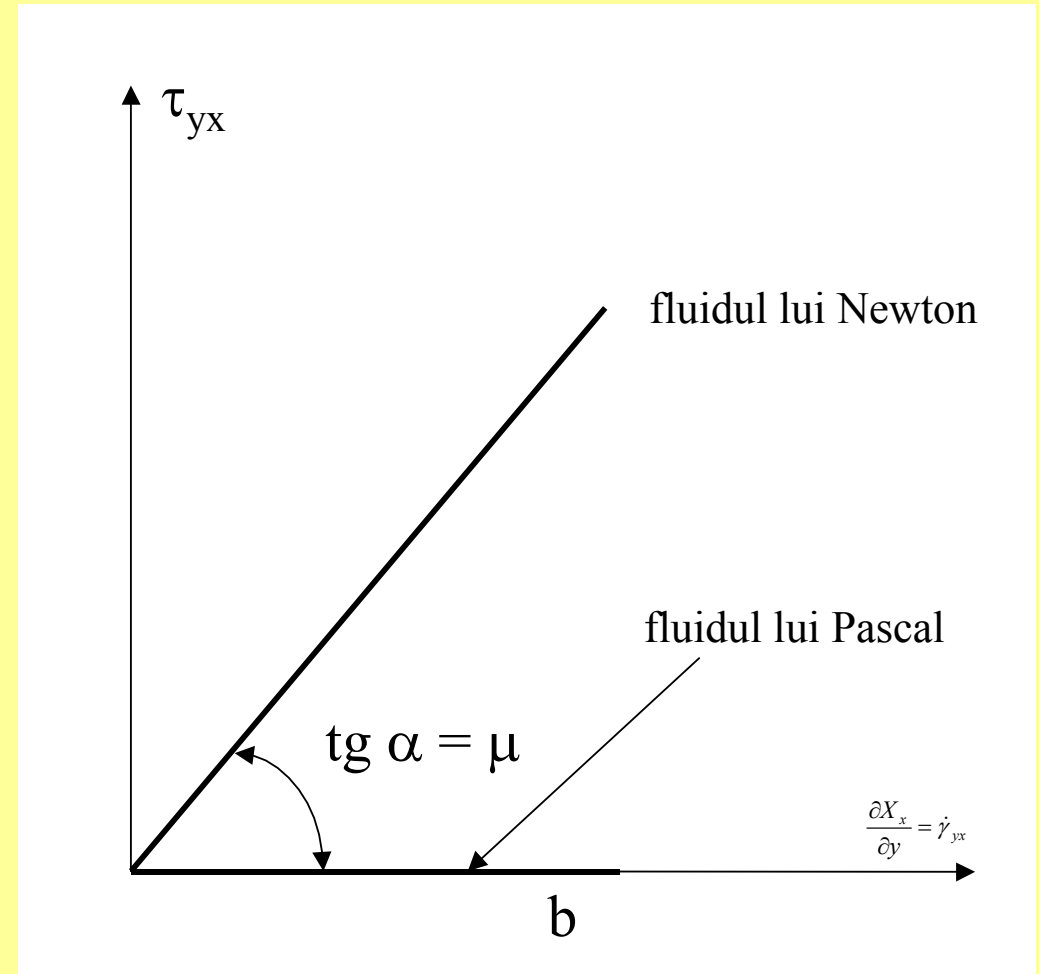
Ecuatia fluidului Newtonian
supus la forfecare

$$F_1 = k \frac{dL}{dt}$$

Ecuatia amortizorului

FLUIDUL LUI NEWTON

- o REOGRAMA fluidului cu comportare newtoniană supus la forfecare simplă (în condiții izoterme) este o dreaptă a cărei pantă este o măsură a viscozității



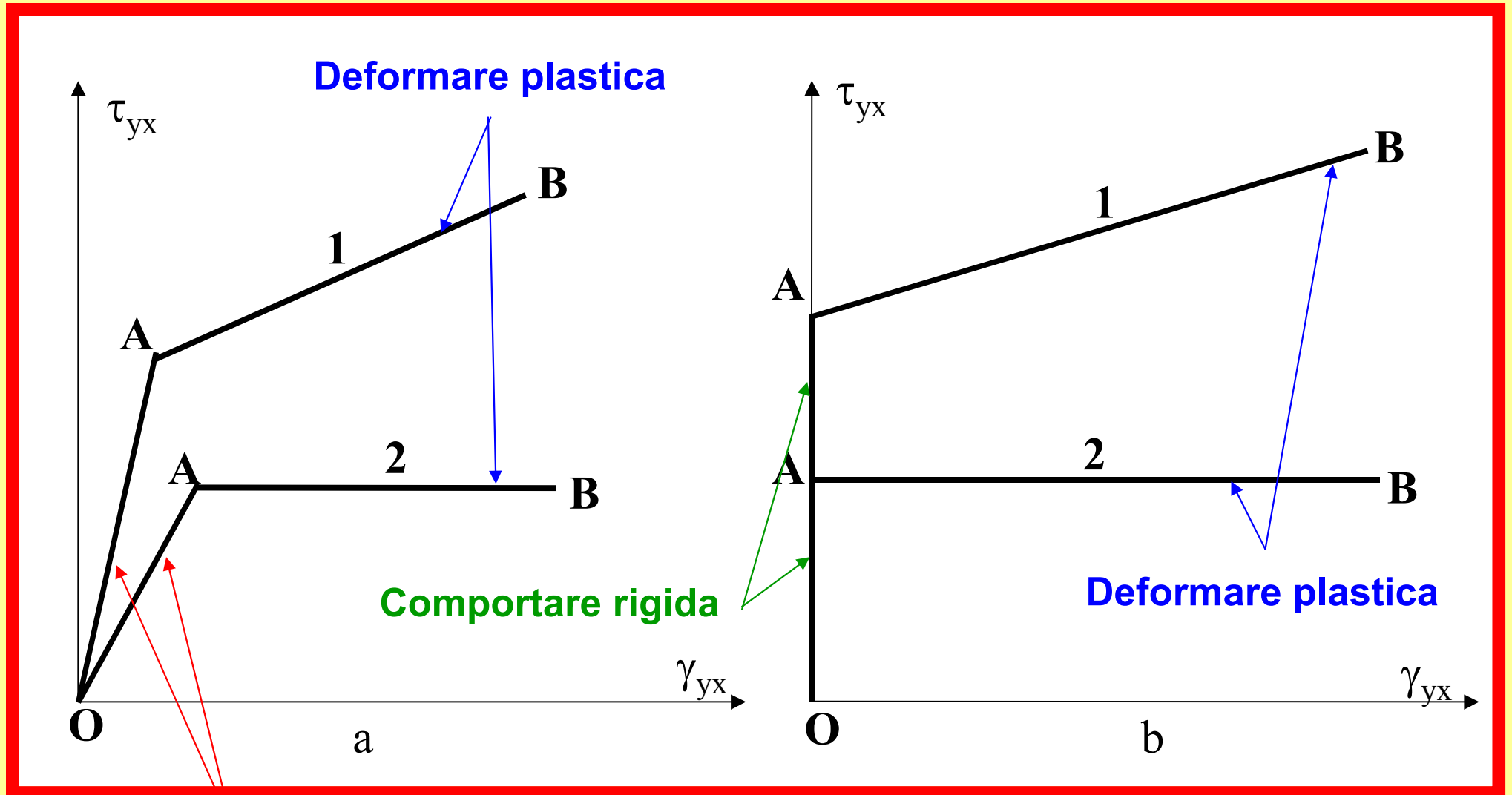
FLUIDUL LUI NEWTON

- o În fluidele viscoase, deformația duce la creșterea forțelor de frecare internă, care disipează o parte din energia cinetică a fluidului și o face să apară sub formă de căldură.
- o La viteze mici de forfecare, în fluide cu viscozitate mică, fenomenul este minor, creșterea temperaturii fluidului datorită disipării energiei fiind neglijabilă.
- o Fluidele cu viscozitate mare pot genera cantități apreciabile de căldură, fapt care duce la modificarea proprietăților fluidului.

PLASTICUL LUI ST. VENANT

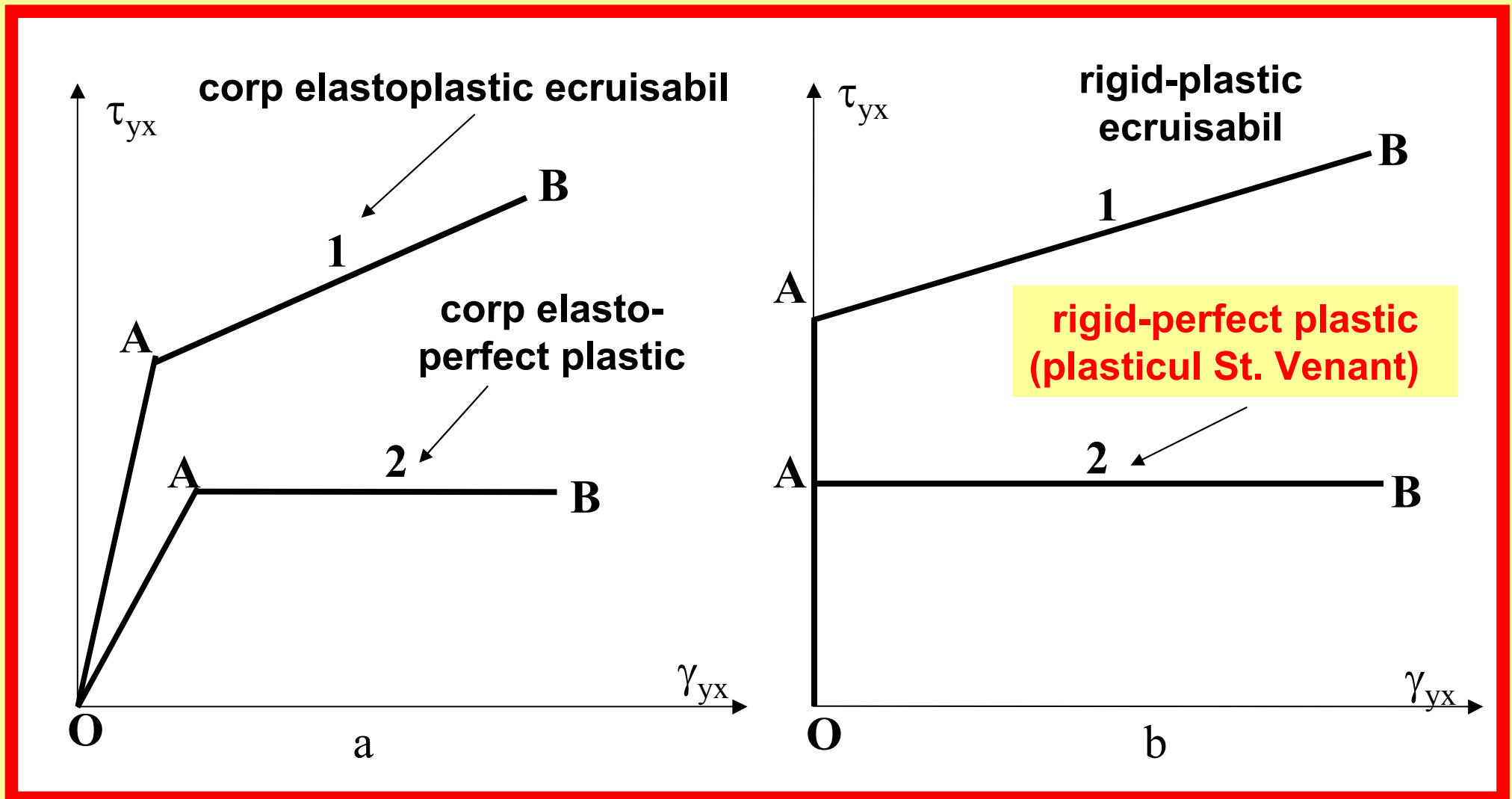
- o Denumit și **corpul pur plastic**, acest corp posedă numai **plasticitate**.
- o Până la **pragul de tensiune** se comportă ca un **solid**, după care se comportă ca un **lichid**.

PLASTICUL LUI ST. VENANT



Deformare elastica

PLASTICUL LUI ST. VENANT



PLASTICUL LUI ST. VENANT

- o Ecuația reologică a plasticului St. Venant supus la forfecare simplă:

$$\tau_{yx} = \tau_{of}$$

în care τ_{of} reprezintă **pragul de tensiune la forfecare**

- o Pentru $\tau_{yx} < \tau_{of}$, corpul se comportă ca un **solid rigid**.
- o Când solicitarea egalează pragul de tensiune, corpul se deformează iar **deformația este nerecuperabilă**.

PLASTICUL LUI ST. VENANT

o Modelul analog mecanic al plasticului St. Venant: corpul cu frecare (patina)

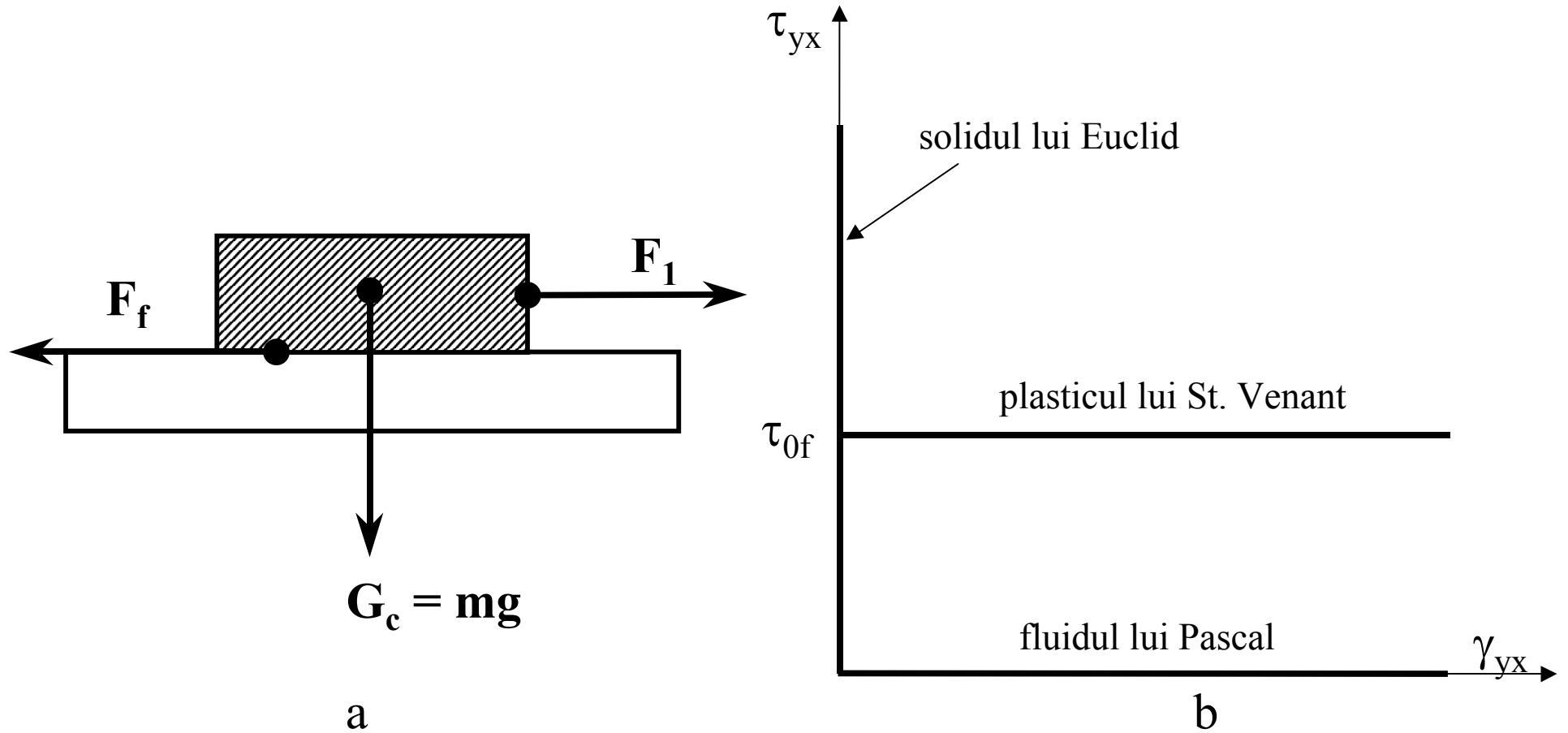
Un corp solid, așezat pe o suprafață plană, orizontală, asupra căruia acționează forța F_1 , este pus în mișcare numai când forța aplicată egalează forța de frecare, F_f , dată de ecuația:

$$F_f = \mu_f \cdot m \cdot g \quad (4)$$

în care m este masa corpului, g accelerația gravitațională și μ_f coeficientul de frecare

Pentru condiția de deplasare: $F_1 = F_f$

PLASTICUL LUI ST. VENANT



PLASTICUL LUI ST. VENANT

o Dacă se dau coeficientului de frecare din ecuația (4) valorile extreme se ajunge la corpurile ideale:

o Pt. $\mu_f = \infty$ se obține $F_1 = \infty$, ecuație analogă cu ecuația reologică a solidului euclidian:

$$\tau = \infty \text{ sau } \gamma = 0$$

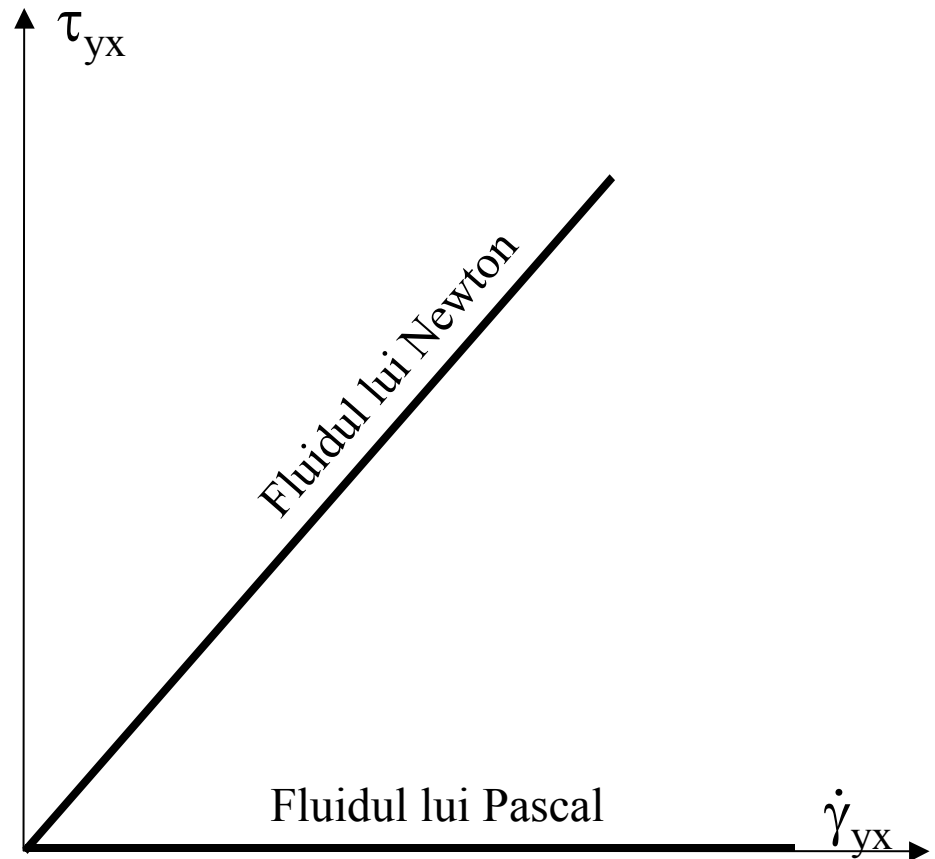
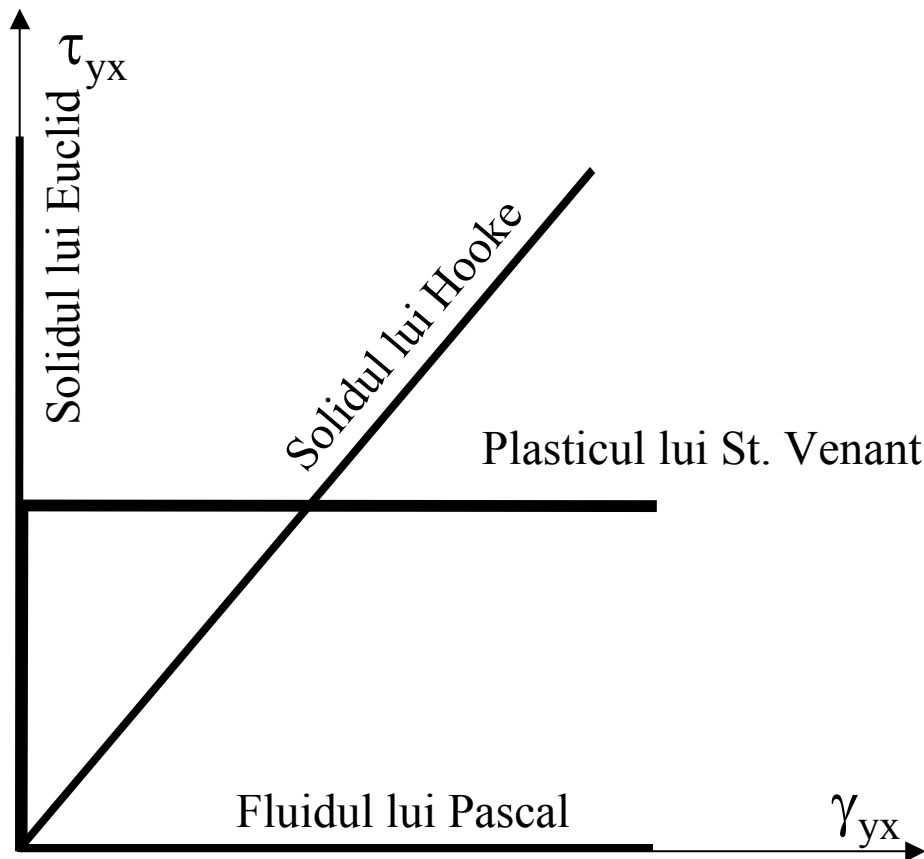
o Pt. $\mu_f = 0$ se obține $F_1 = 0$, ecuație analogă cu ecuația reologică a fluidului pascalian:

$$\tau = 0 \text{ sau } \dot{\gamma} = \infty$$

SUMAR: CORPURI CU COMPORTARE IDEALĂ

	LICHID		SOLID		
	curgere		deformare		rigid
	inviscidă	viscidă	plastică	elastică	
Corpul	PASCAL	NEWTON	ST. VENANT	HOOKE	EUCLID
Constanta de forfecare	$0 \leftarrow \mu$		τ_0	$G \rightarrow \infty$	
Ecuția reologică	$\tau = 0$	$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$	$\tau = \tau_0$	$\tau = G \cdot \gamma$	$\gamma = 0$

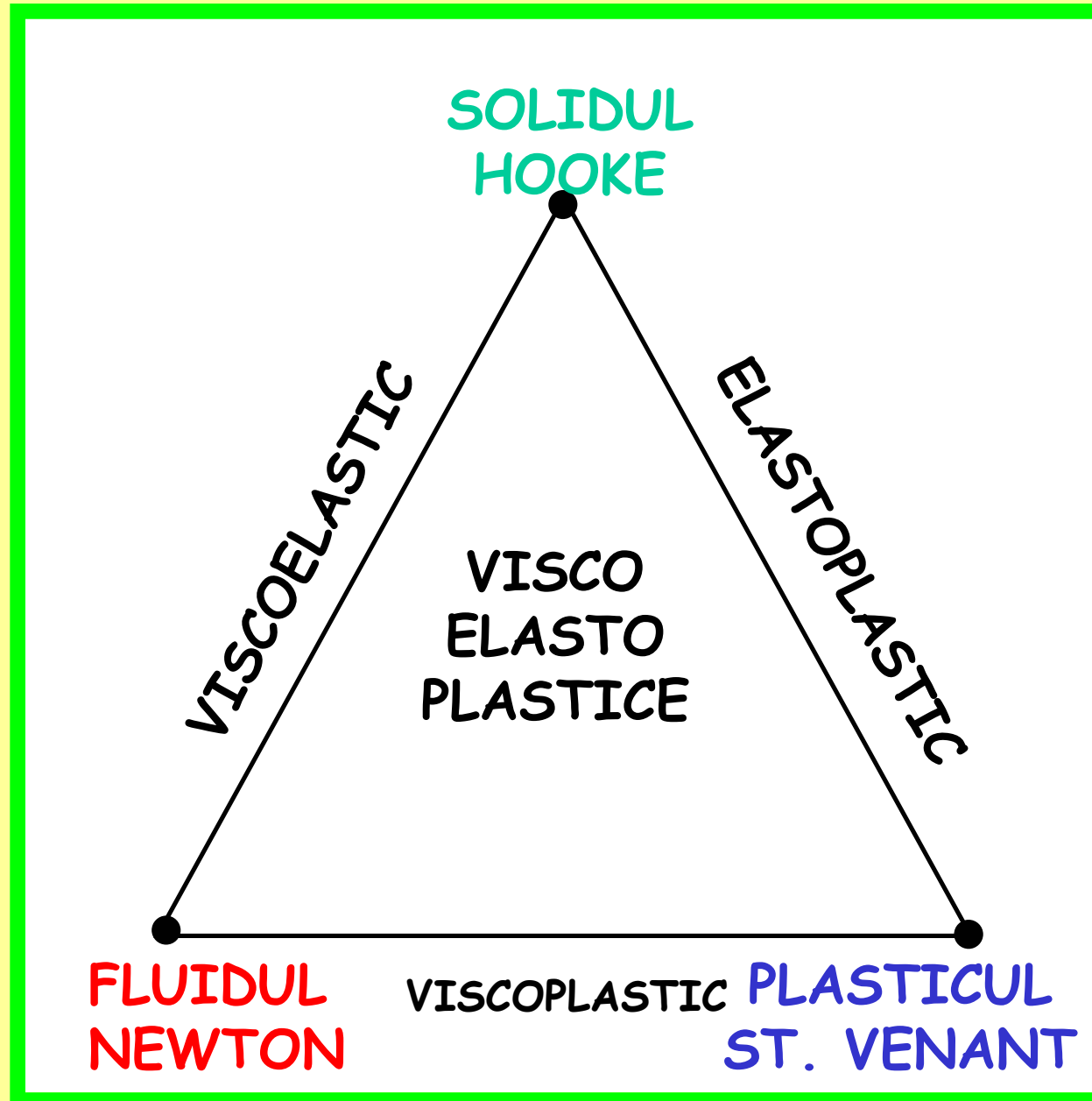
SUMAR: CORPURI CU COMPORTARE IDEALĂ



FLUIDE CU COMPORTARE NENEWTONIANĂ

- o Diversitatea comportării corpurilor reale apare ca urmare a asocierii - în diverse proporții - a mai multor proprietăți reologice:
 - Elasticitate;
 - Viscositate;
 - "Plasticitate".

FLUIDE CU COMPORTARE NENEWTONIANĂ



FLUIDE CU COMPORTARE NENEWTONIANĂ

Înțelegerea comportării fluidelor nenewtoniene - importantă pt. specialistul din ind. alimentară & biotehnologii:

1. Proprietățile nenewtoniene sunt caracteristici cerute anumitor produse: **muștarul**, **maioneza**, **sosurile** și alte produse ambalate în tuburi flexibile sunt fluide cu prag de curgere. Ele nu trebuie să curgă liber din tub, ci să iasă numai la presarea acestuia (deci după ce tensiunea aplicată a depășit limita de curgere). Elaborarea produselor alimentare (**creme**, **paste**, **sosuri**, **aluaturi**, etc.) necesită cunoașterea temeinică a comportării fluidelor nenewtoniene.

FLUIDE CU COMPORTARE NENEWTONIANĂ

Înțelegerea comportării fluidelor nenewtoniene - importantă pt. specialistul din ind. alimentară & biotehnologii:

2. La proiectarea utilajelor, instalațiilor și traseelor de conducte este absolut necesar să se țină seama de comportarea nenewtoniană a fluidelor. Coeficienții de transfer de căldură și de masă sunt considerabil afectați de comportarea fluidului. O deosebită atenție va trebui de asemenea acordată alegerii echipamentelor adecvate pentru amestecare și pompare.

Clasificarea fluidelor neneutroniene

- o Funcție de dependență dintre efortul unitar de forfecare și viteza de forfecare:
 - fluide newtoniene (dependența liniară)
 - fluide neneutroniene (dependența neliniară)
- o În categoria fluidelor neneutroniene sunt incluse:
 - fluidele care posedă numai viscozitate,
 - fluidele care prezintă două sau chiar trei proprietăți reologice fundamentale.

Clasificarea fluidelor nenewtoniene

- o Funcție de nr. și tipul prop. reologice fundamentale:
 - **Fluide fără nici o proprietate reologică:**
 - fluidul inviscid al lui Pascal
 - **Fluide cu o prop. reologică - viscozitatea:**
 - fluidul newtonian
 - fluide cu viscozitate de structură (fluide viscoase nenewtoniene)
 - **Fluide cu două proprietăți reologice:**
 - fluide viscoelastice
 - fluide viscoplastice (cu prag de tensiune = cu prag de curgere)
 - **Fluide cu trei proprietăți reologice:**
 - fluide visco-elasto-plastice (posedă concomitent elasticitate viscozitate și plasticitate).

Clasificarea fluidelor nenevtoniene

- o În cazul fluidelor nenevtoniene, viscozitatea dinamică nu este constantă nici în condiții izobar-izoterme.
- o Funcție de parametrii care influențează modificarea vitezei de forfecare, aceste fluide pot fi împărțite în două categorii:
 - **Fluide independente de timp (dependente de forfecare)**, pentru care viteza de forfecare într-un punct depinde exclusiv de tensiunea de forfecare în punctul respectiv;
 - **Fluide dependente de timp**, pentru care viteza de forfecare este o funcție de mărimea și durata efortului de forfecare, precum și de istoria forfecării.

Clasificarea fluidelor nenewtoniene

- o Funcție de modul în care variația vitezei de forfecare influențează viscozitatea:
 - Fluide pentru care valoarea viscozității este independentă de viteza de forfecare:
 - fluide newtoniene;
 - fluide tip plastic Bingham;
 - Fluide a căror viscozitate crește cu creșterea vitezei de forfecare:
 - fluide dilatante (independente de timp);
 - fluide reopexice (dependente de timp);
 - Fluide a căror viscozitate scade cu creșterea vitezei de forfecare:
 - fluide pseudoplastice (independente de timp);
 - fluide tixotrope (dependente de timp);

Fluide viscoase nenewtoniene

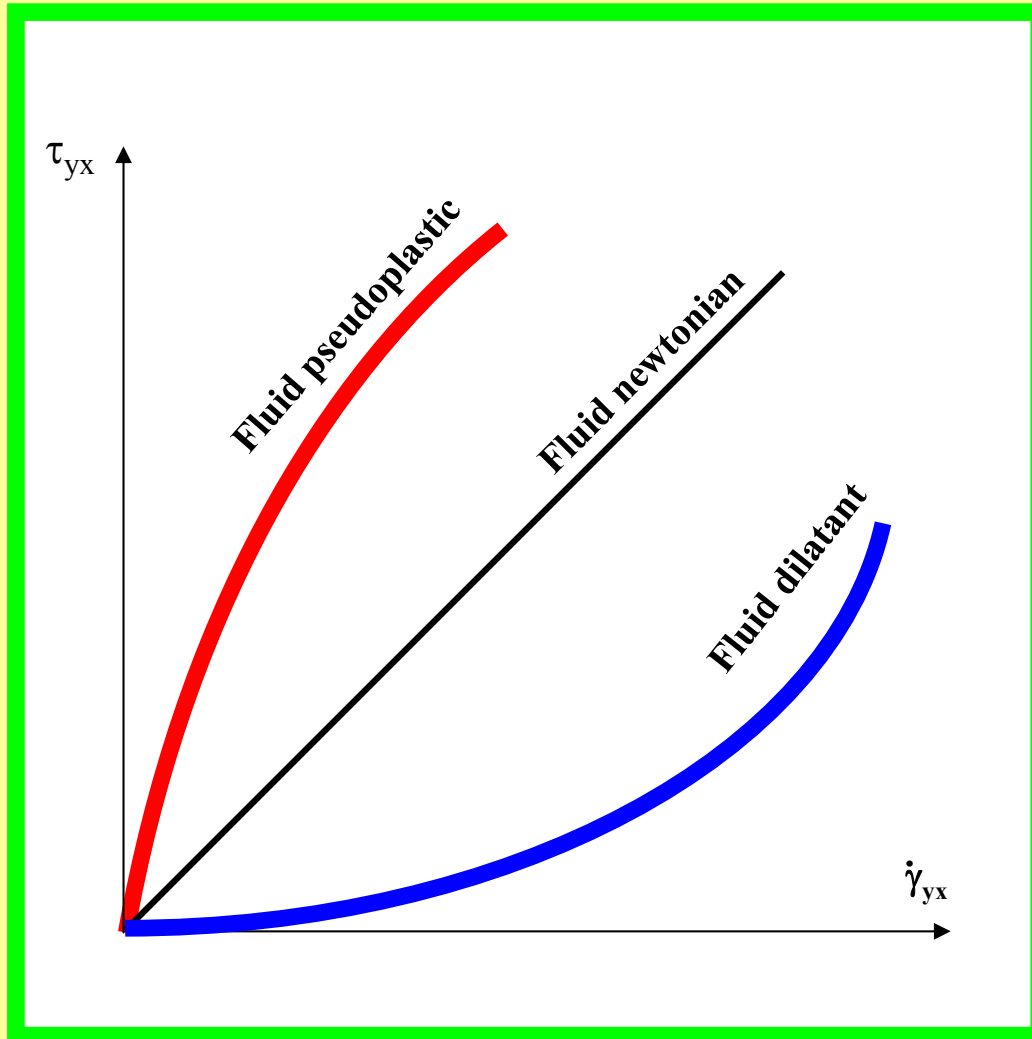
- o dependență tensiune - viteză de deformare ($T = ct.$) neliniară,
- o viscozitatea depinde de parametrii sollicitării,
- o se poate defini viscozitatea aparentă:

$$\mu_a = \frac{\tau_{ij}}{\dot{\gamma}_{ij}}$$

Fluide viscoase nenewtoniene

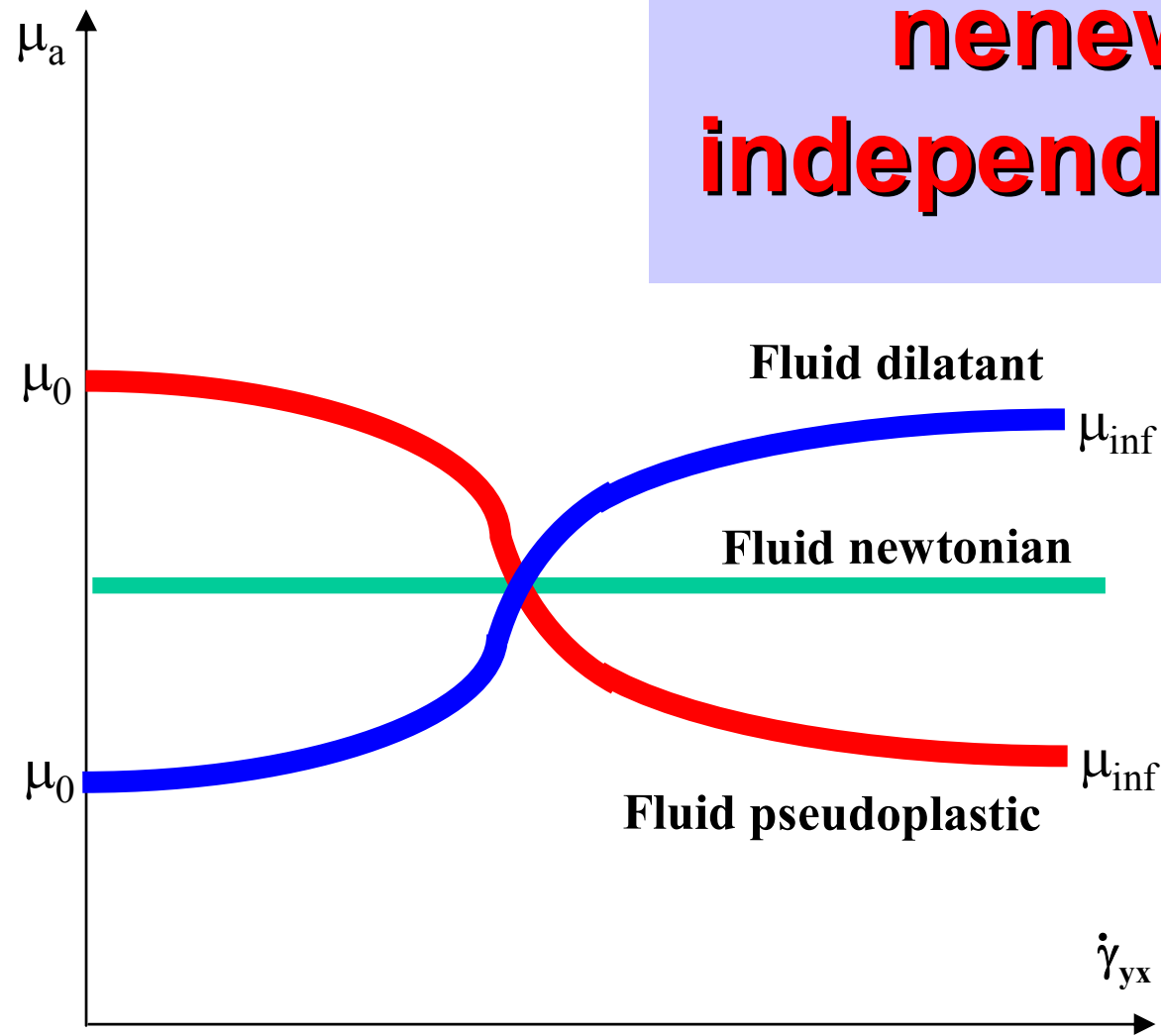
- o Factorul principal al abaterii acestor fluide de la comportarea newtoniană: **modificarea structurii fluidului** sub acțiunea forțelor de forfecare.
- o Dacă viteza de modificare a structurii este mare, insesizabilă experimental, **viscozitatea fluidului se modifică numai dacă se modifică parametrii sollicitării.**
- o Această comportare este **caracteristică fluidelor independente de timp**

Fluide viscoase nenevtoniene independente de timp



- o fluidele pseudoplastice prezintă fenomenul de fluidificare (viscozitatea scade la creșterea vitezei de forfecare),
- o fluidele dilatante prezintă fenomenul de îngroșare (viscozitatea crește la creșterea vitezei de forfecare)

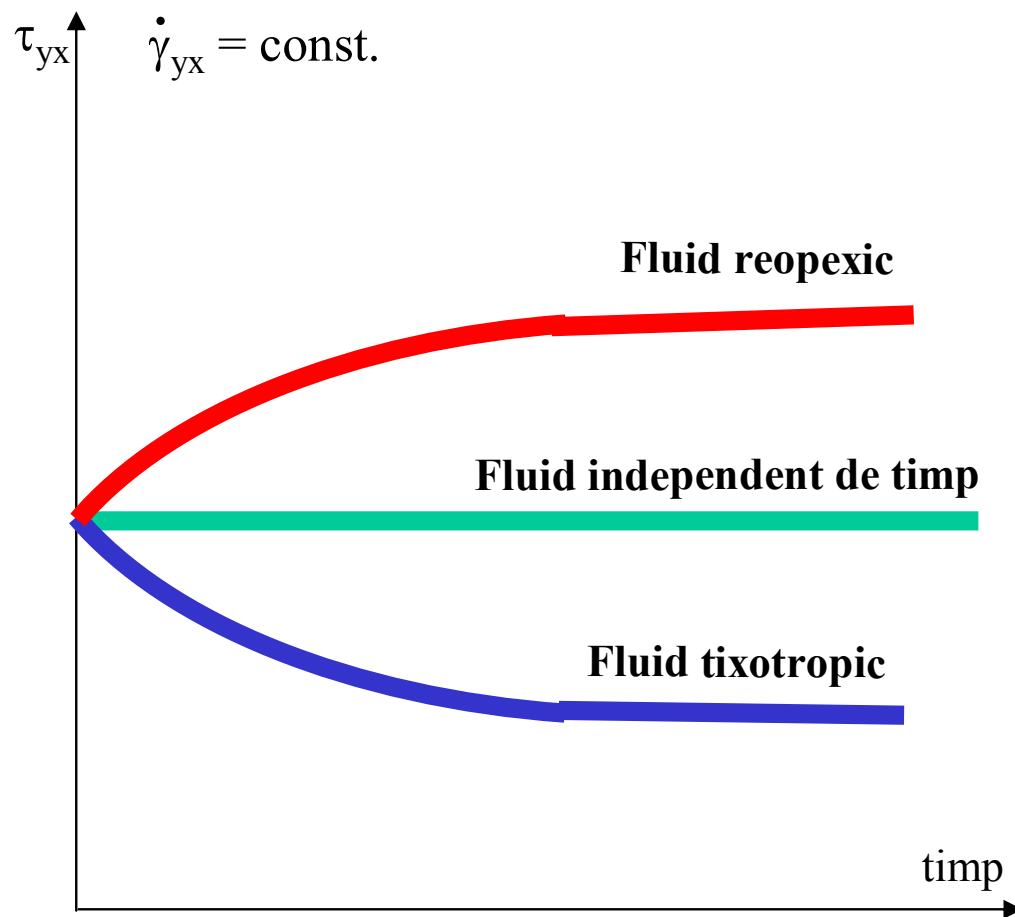
Fluide viscoase nenewtoniene independente de timp



Fluide viscoase nenewtoniene dependente de timp

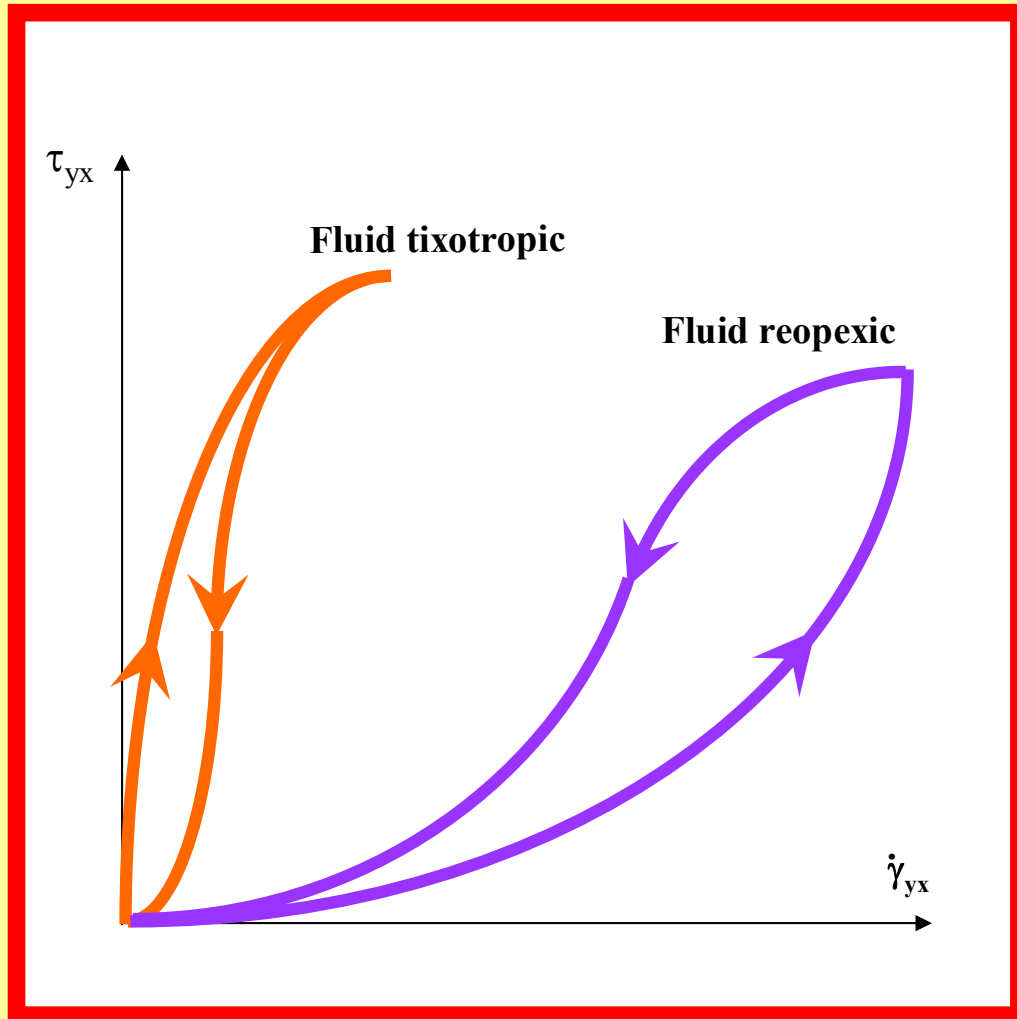
- o Dacă viteza de modificare a structurii este suficient de mică pentru a fi sesizabilă experimental, fluidul își modifică viscozitatea în timp, deși parametrii solicitării rămân constanți.
- o Această comportare este caracteristică fluidelor dependente de timp.

Fluide viscoase nenevtoniene dependente de timp



- o Fluidele **reopexice** prezintă fenomenul de îngroșare,
- o fluidele **tixotrope** prezintă fenomenul de fluidificare

Fluide viscoase nenevtoniene dependente de timp



- o Comportarea dependentă de timp a acestor fluide se datorează modificării lente a structurii prin forfecare.
- o Modificând continuu viteza de forfecare în sens crescător și apoi în sens descrescător, se obțin curbe cu histerezis

MODELE REOLOGICE ALE FLUIDELOR VISCOASE NENEWTONIENE

- o Comportarea neliniară la solicitare la forfecare simplă a fluidelor viscoase nenewtoniene independente de timp este descrisă cu ajutorul unor modele reologice semiempirice.
- o Cel mai simplu dintre acestea este **modelul Ostwald - de Waele**, cunoscut și sub denumirea de **legea puterii**:

MODELUL OSTWALD – DE WAELE (LEGEA PUTERII)

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$$

o unde cele două constante de material sunt:

- k - indice de consistență [$ML^{-1}T^{n-2}$];
- n - indice de curgere [adimensional].

MODELUL OSTWALD – DE WAELE (LEGEA PUTERII)

o Combinând ecuația: $\mu_a = \frac{\tau_{ij}}{\dot{\gamma}_{ij}}$

o cu ecuația: $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$

o prin eliminarea tensiunii de forfecare,
se obține:

$$\mu_a = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

MODELUL OSTWALD – DE WAELE (LEGEA PUTERII)

o Ținând cont de ecuația de definiție a viscozității dinamice:

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} = \mu \cdot \dot{\gamma}_{yx}$$

o din $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$

rezultă: $\mu = n \cdot \mu_a$

MODELUL OSTWALD – DE WAELE (LEGEA PUTERII)

- o Funcție de valoarea indicelui n , modelul Ostwald - de Waele poate reproduce comportarea reologică a următoarelor fluide:
- o Fluide newtoniene: $n = 1 ; \mu_a = k ;$
- o Fluide pseudoplastice: $n < 1 ; \mu_a$ scade cu creșterea vitezei de forfecare;
- o Fluide dilatante: $n > 1 ; \mu_a$ crește cu creșterea vitezei de forfecare.

MODELUL OSTWALD – DE WAELE (LEGEA PUTERII)

- o **Pseudoplastice**: fluide biologice, maioneză, suspensii de amidon
- o **Dilatante**: soluții de zahăr, amidon, făină de porumb
- o **Tixotropice**: soluții de gelatină, albuș de ou, grăsimi, unt
- o **Reopexice**: soluții diluate de oleat de amoniu

FLUIDE VISCOELASTICE

- o Fluidele viscoelastice posedă două proprietăți reologice fundamentale:
 - viscozitate
 - elasticitate
- o Ele disipează numai o parte din energia care li se furnizează (componenta viscoasă), o parte (componenta elastică) o conservă și, după îndepărtarea sollicitării, o recuperează.

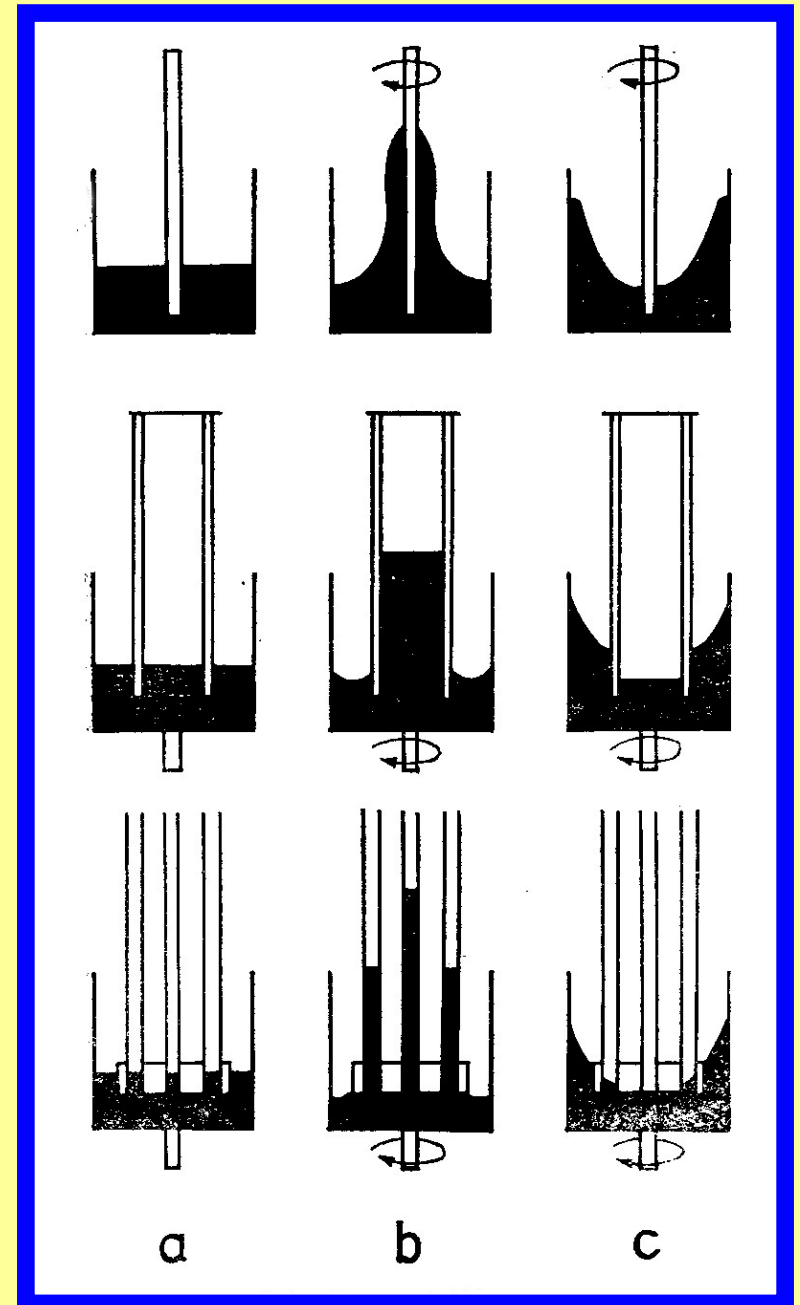
FLUIDE VISCOELASTICE

- o Datorită componentei elastice, în comportarea acestor fluide apar fenomene speciale, cum ar fi:
 - efectul de ridicare a lichidului pe tijă,
 - fenomenul de îngroșare a jetului la ieșirea dintr-un tub circular,
 - apariția recirculării curenților la îngustarea bruscă a secțiunii de curgere, etc.

FLUIDE VISCOELASTICE

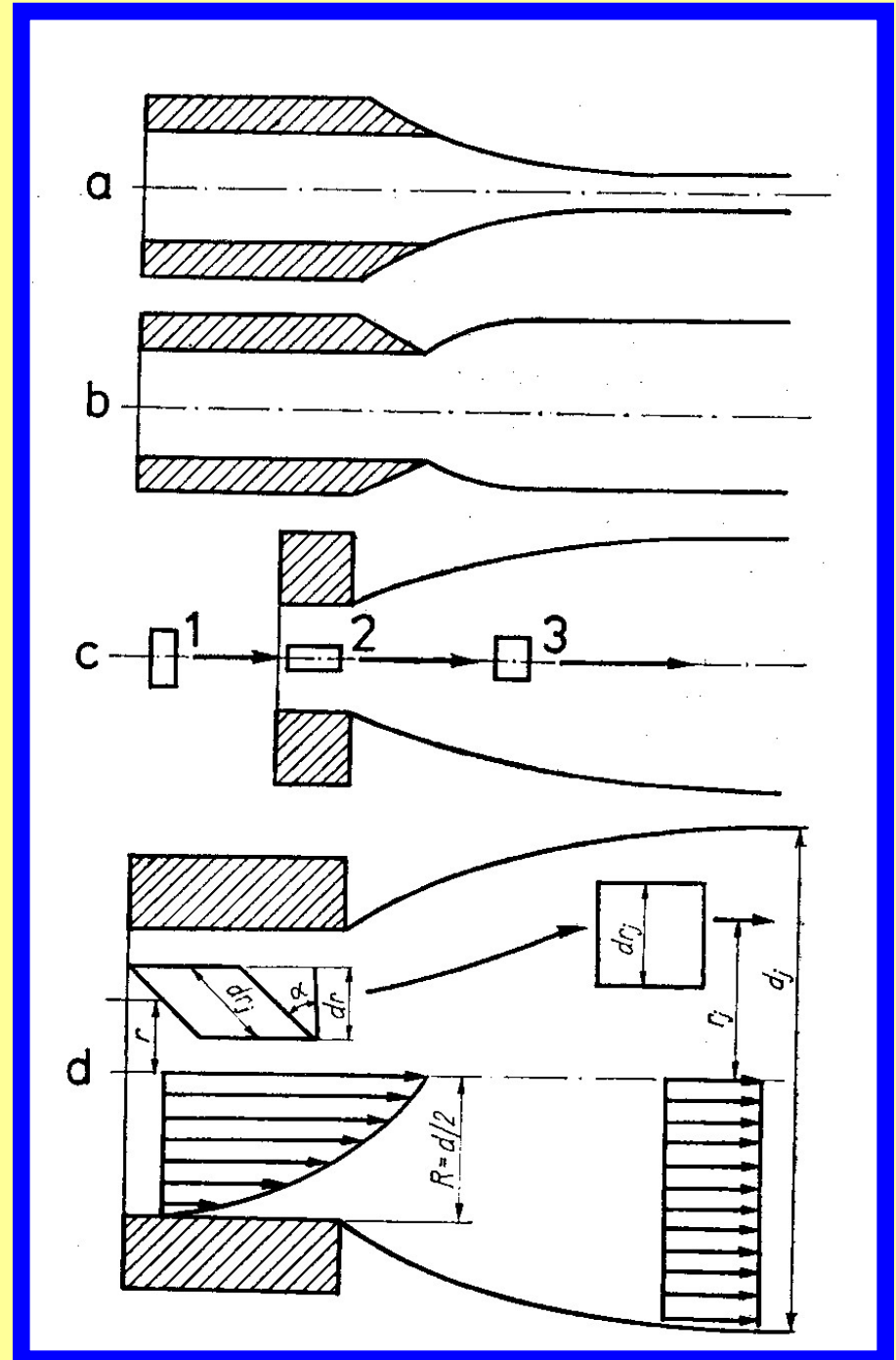
Efectul Weissenberg:

- a - Repaus;
- b - Rotatie - lichide viscoelastice;
- c - Rotatie - lichide newtoniene.



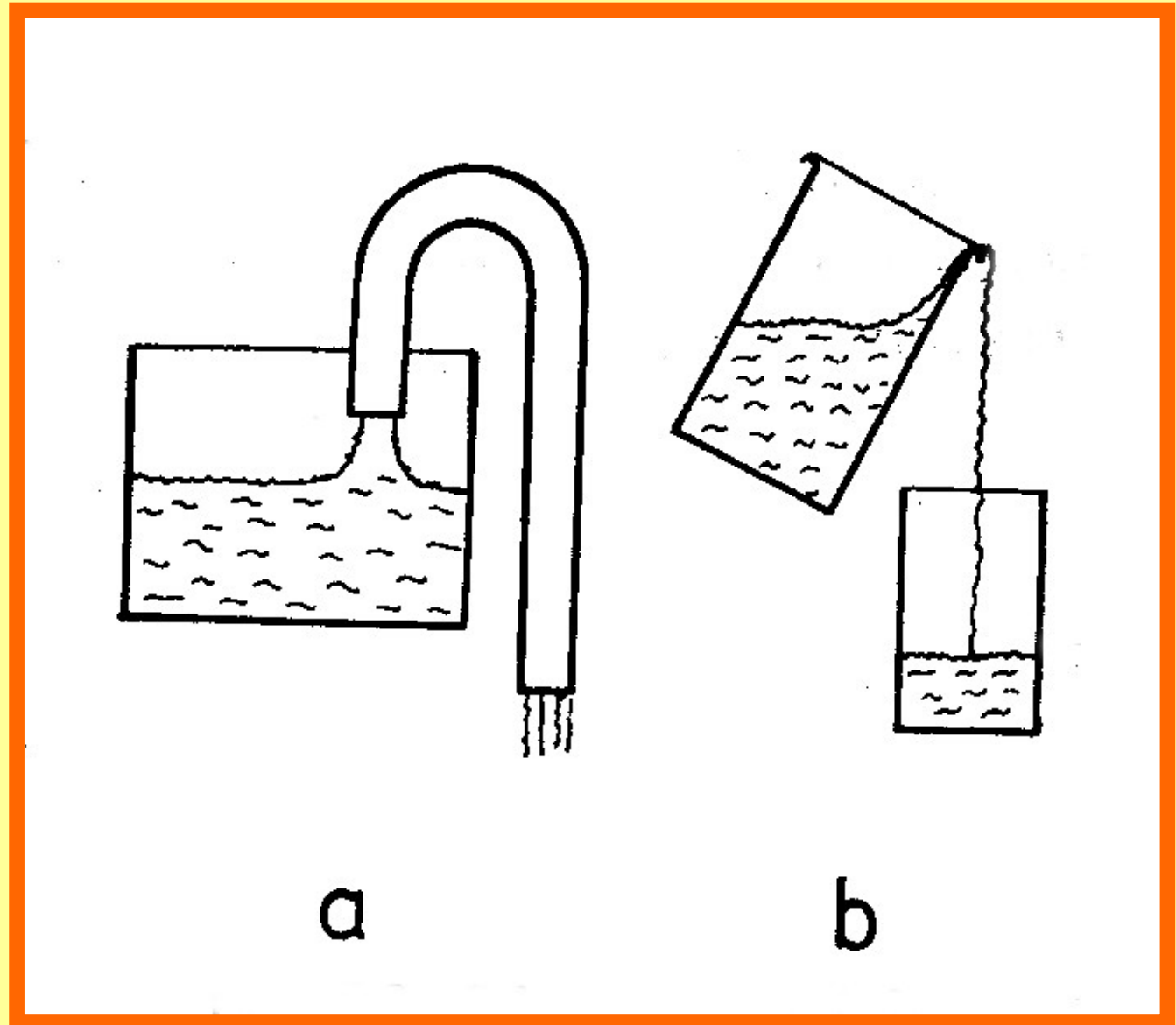
FLUIDE VISCOELASTICE

- a - lichide pur viscoase;
- b - lichide viscoelastice;
- c - mecanismul umflării jetului
- d - recuperarea elastica



FLUIDE VISCOELASTICE

- o Sifonul fara tub



FLUIDE VISCOELASTICE – MODELE ANALOGICE

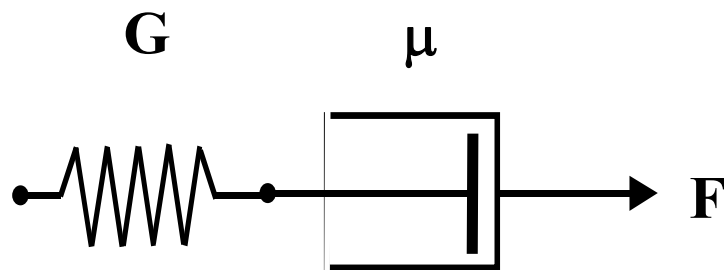
- o Comportarea acestor fluide poate fi descrisă prin intermediul unor modele analoge mecanice constituite din **resorturi** (care descriu componenta elastică) și **amortizoare** (care descriu componenta viscoasă).

FLUIDE VISCOELASTICE – MODELE ANALOGICE

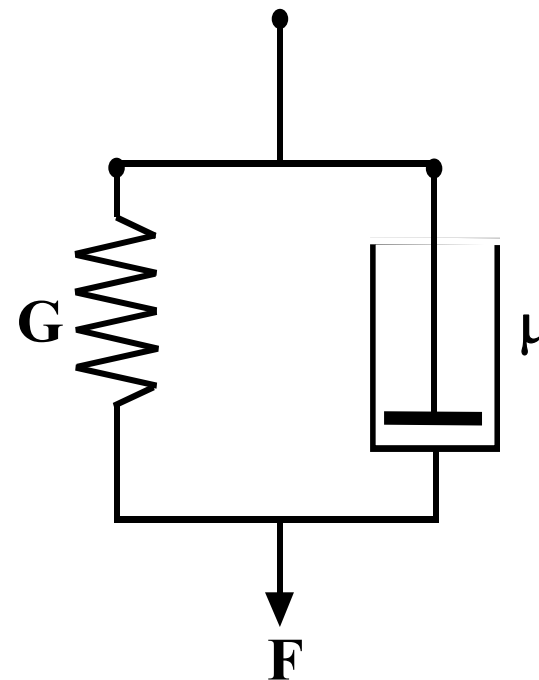
- o Cele mai simple modele sunt alcătuite:
 - dintr-un resort și un amortizor legate în serie (corpul Maxwell),
 - dintr-un resort și un amortizor legate în paralel (corpul Voigt - Kelvin).
- o Aceste modele descriu comportarea liniară a corpurilor visco-elastice, dar există și modele care descriu comportarea neliniară

FLUIDE VISCOELASTICE – MODELE ANALOGICE

corpul Maxwell



corpul Voigt - Kelvin



CORPUL MAXWELL

- o Deformația totală a corpului Maxwell este dată de suma dintre deformația elastică (γ_e) și deformația viscoasă (γ_v):

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_v$$

- o ecuația reologică a corpului Maxwell:

$$\tau_{yx} + \frac{\mu}{G} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial t} = -\mu \cdot \dot{\gamma}_{yx}$$

CORPUL VOIGT - KELVIN

- o deformațiile ambelor elemente componente (resortul și amortizorul) sunt egale,
- o sollicitarea totală este dată de suma:

$$\tau = \tau_e + \tau_v$$

ecuația reologică a corpului Voigt - Kelvin:

$$\tau_{yx} = G \cdot \gamma_{yx} + \mu \cdot \dot{\gamma}_{yx} = G \cdot \gamma_{yx} + \mu \frac{d\gamma_{yx}}{dt}$$

FLUIDE VISCOPLASTICE

- o Fluidele viscoplastice sunt cunoscute și sub denumirea de **fluide cu prag de tensiune**.
- o încep să curgă numai după ce sollicitarea atinge valoarea τ_0 , care reprezintă pragul de tensiune (pragul de curgere, limita de curgere).
- o În domeniul tensiunilor care satisfac condiția $\tau < \tau_0$ au comportare de solid,
- o pentru $\tau \geq \tau_0$ au o comportare viscoasă, prezentând fenomenul de curgere.

FLUIDE VISCOPLASTICE

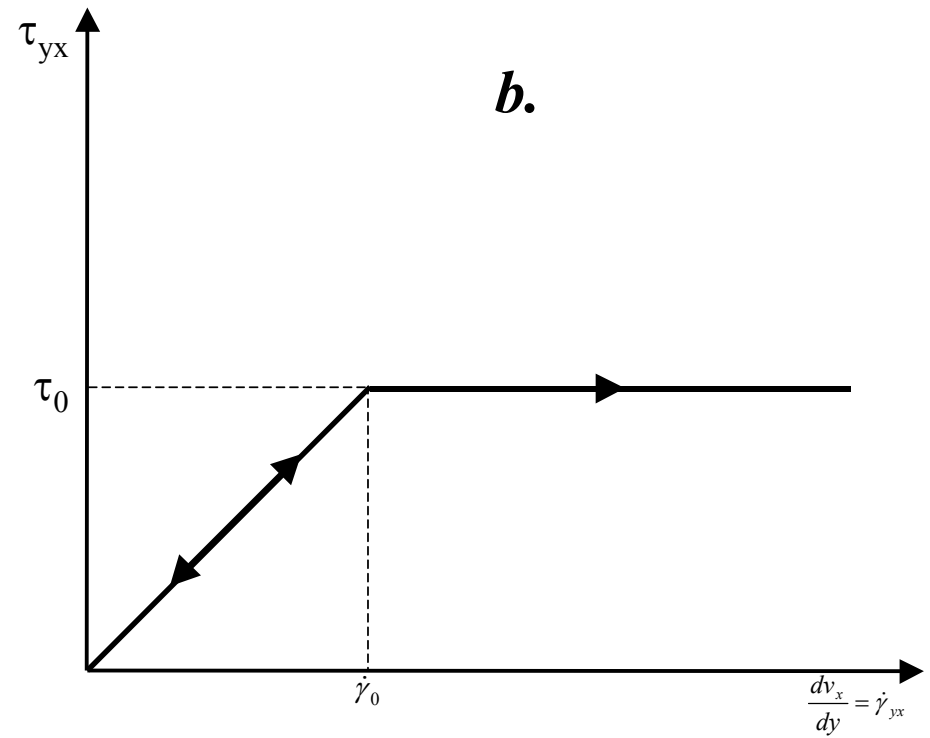
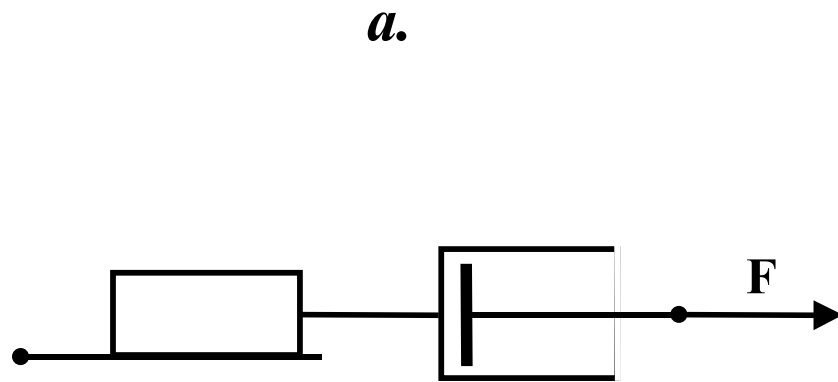
o Cel mai simplu model reologic al unui fluid viscoplastic se obține prin inserierea unui amortizor cu o patină:

- Până la pragul de curgere τ_0 , corpul are comportare de lichid newtonian:

$$\tau_{yx} = \mu \cdot \dot{\gamma}_{yx}$$

- După egalarea tensiunii $\tau_{yx} = \tau_0$, viteza de forfecare poate lua orice valoare mai mare decât $\dot{\gamma}_0$
- În acest caz patina are rolul unui limitator al solicitării; corpul nu poate suporta tensiuni mai mari decât τ_0

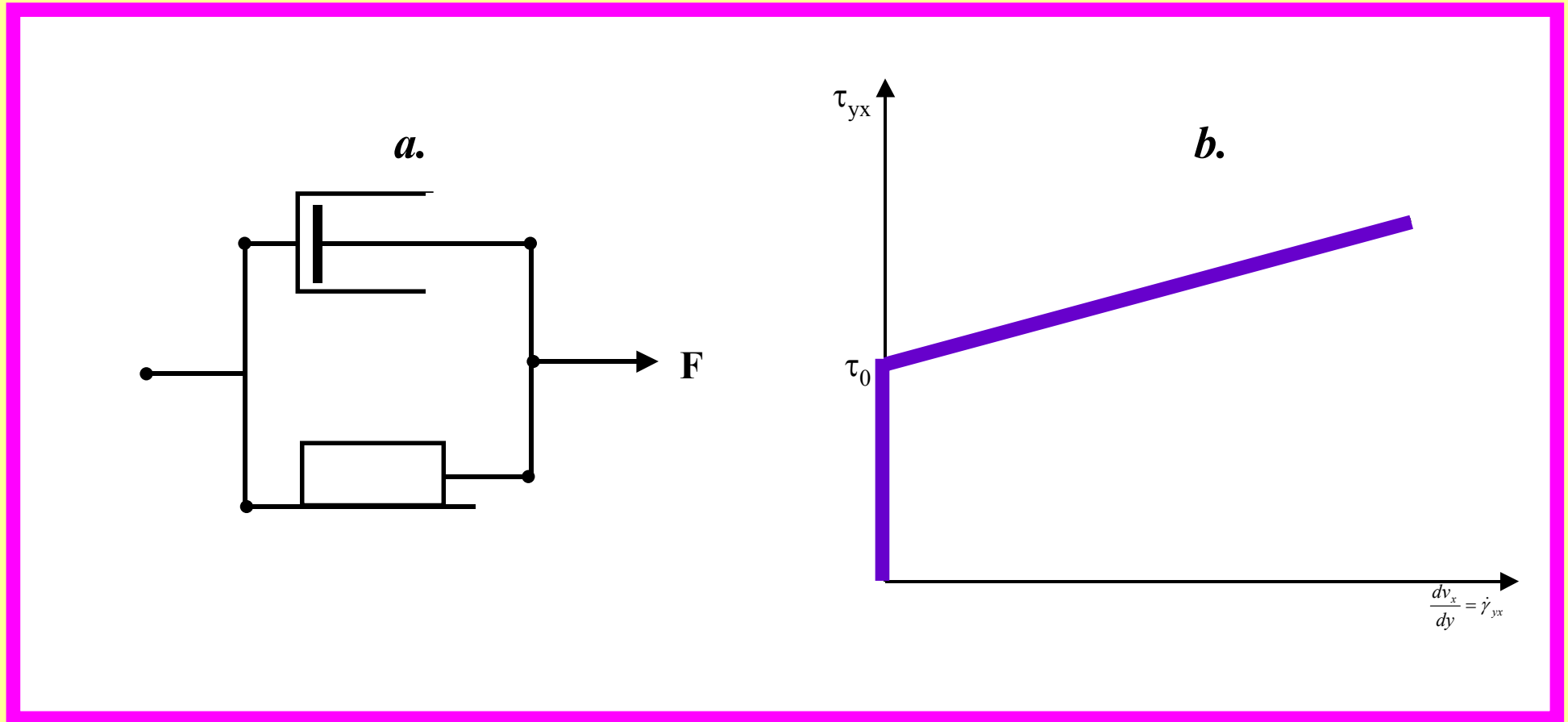
FLUIDE VISCOPLASTICHE



FLUIDE VISCOPLASTICE

- o Un alt model poate fi obținut prin legarea în paralel a unui amortizor cu o patină
- o Acest model, cunoscut ca **plasticul Bingham**, sub acțiunea unei forțe crescătoare se manifestă inițial ca un solid rigid, iar peste pragul τ_0 are comportare de lichid newtonian

FLUIDE VISCOPLASTICE



plasticul Bingham

FLUIDE VISCOPLASTICE

o Ecuația reologică a plasticului Bingham are forma:

$$\tau_{yx} - \tau_0 = \mu_p \cdot \frac{dv_x}{dy} \quad \text{pentru} \quad \tau_{yx} > \tau_0$$

o în care μ_p este viscozitatea plastică (mobilitatea).

FLUIDE VISCOPLASTICE

- o Modelul plasticului Bingham conține două constante de material: pragul de curgere τ_0 și viscozitatea plastică μ_p . Prin analogie cu fluidele viscoase newtoniene se definește o viscozitate aparentă a plasticului Bingham:

$$\mu_p = \frac{\tau_{yx}}{\frac{dv_x}{dy}} = \mu + \frac{\tau_0}{\frac{dv_x}{dy}}$$

- o Valoarea sa descrește cu creșterea vitezei de forfecare. Pentru valori mici ale lui τ_0 și valori mari ale vitezei de forfecare, al doilea termen din membrul drept al ecuației se poate neglija astfel încât:

$$\mu_p = \mu$$

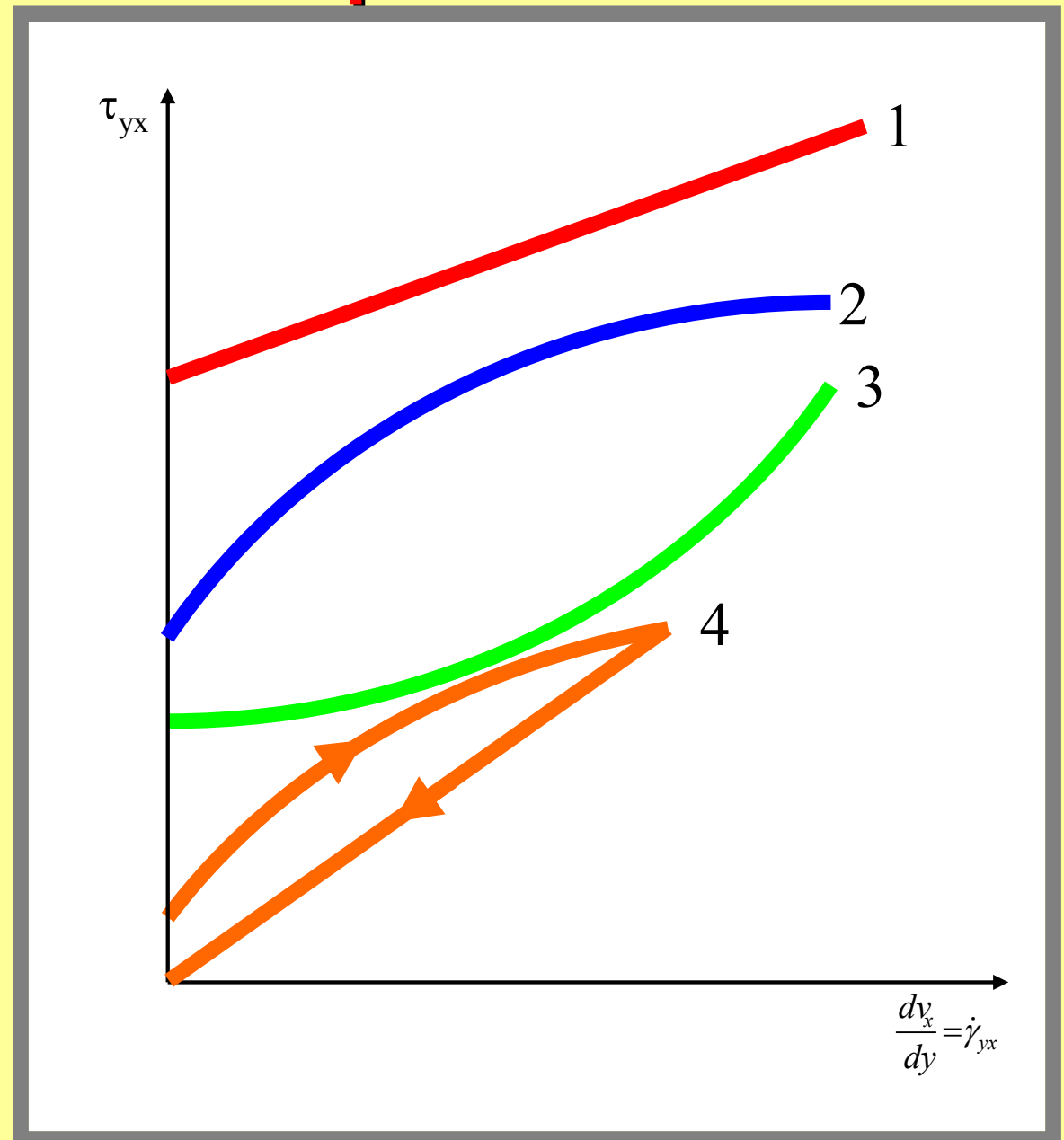
Principalele tipuri de comportări viscoplastice

o Toate corpurile sunt cu prag de curgere

τ_0 .

- (1) - plastic Bingham
- (2) comportare plastica neliniara cu fluidificare
- (3) comportare plastica neliniara cu îngroşare
- (4) lichid viscoplastic tixotrop

o Reograme valabile numai pentru forfecarea simplă.



FLUIDE VISCOPLASTICE

- o Plasticul Bingham are comportare liniară viteza de forfecare fiind o funcție liniară de tensiune.
- o comportarea este caracteristică pentru:
 - suspensii,
 - margarina,
 - grăsimi,
 - pasta de dinți,
 - suspensii de săpunuri și detergenți,
 - paste de hârtie

FLUIDE VISCOPLASTICE

MODELE REOLOGICE

o Modelul Herschel - Bulkley:

$$\tau_{yx} - \tau_0 = \left(\mu' \cdot \frac{dv_x}{dy} \right)^{1/m}$$

- are o formă echivalentă cu modelul Ostwald - de Waele
- conține trei constante reologice (τ_0 , μ' și m), ale căror valori se obțin din datele experimentale.

FLUIDE VISCOPLASTICE

MODELE REOLOGICE

o Funcție de valorile exponentului m , se obțin comportările corespunzătoare curbelor (1) - (3):

- pentru $m = 1$ comportare liniară (plastic Bingham - curba (1));
- pentru $m < 1$ comportare dilatantă (curba (3));
- pentru $m > 1$ comportare fluidifiantă (curba (2)).

FLUIDE VISCOPLASTICE

MODELE REOLOGICE

o Modelul Casson:

$$\sqrt{\tau_{yx}} - \sqrt{\tau_0} = k \cdot \sqrt{\frac{dv_x}{dy}}$$

- conține două constante empirice, τ_0 și k ale căror valori se obțin prin prelucrarea grafică a datelor experimentale.
- descrie comportarea reologică a:
 - cernelurilor tipografice,
 - sângelui,
 - sucului de portocale,
 - pastelor de tomate,
 - ciocolatei topite

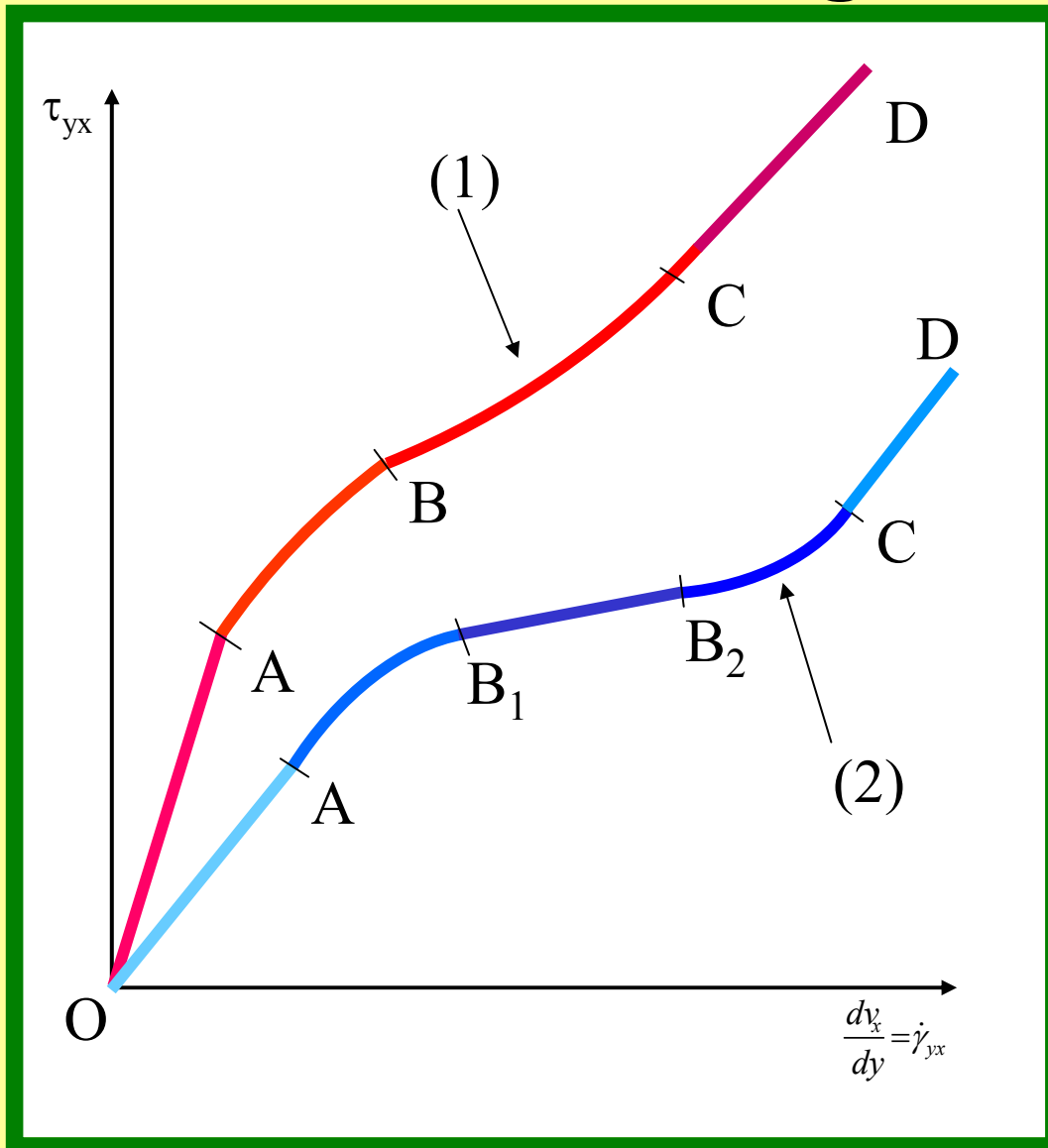
Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor

o Comportarea reologică a:

- fluidelor viscoase nenevtoniene,
- fluidelor viscoelastice,
- fluidelor viscoplastice,

permite stabilirea unor concluzii generalizatoare pe baza cărora poate fi înțeleasă și explicată comportarea **fluidelor reale**

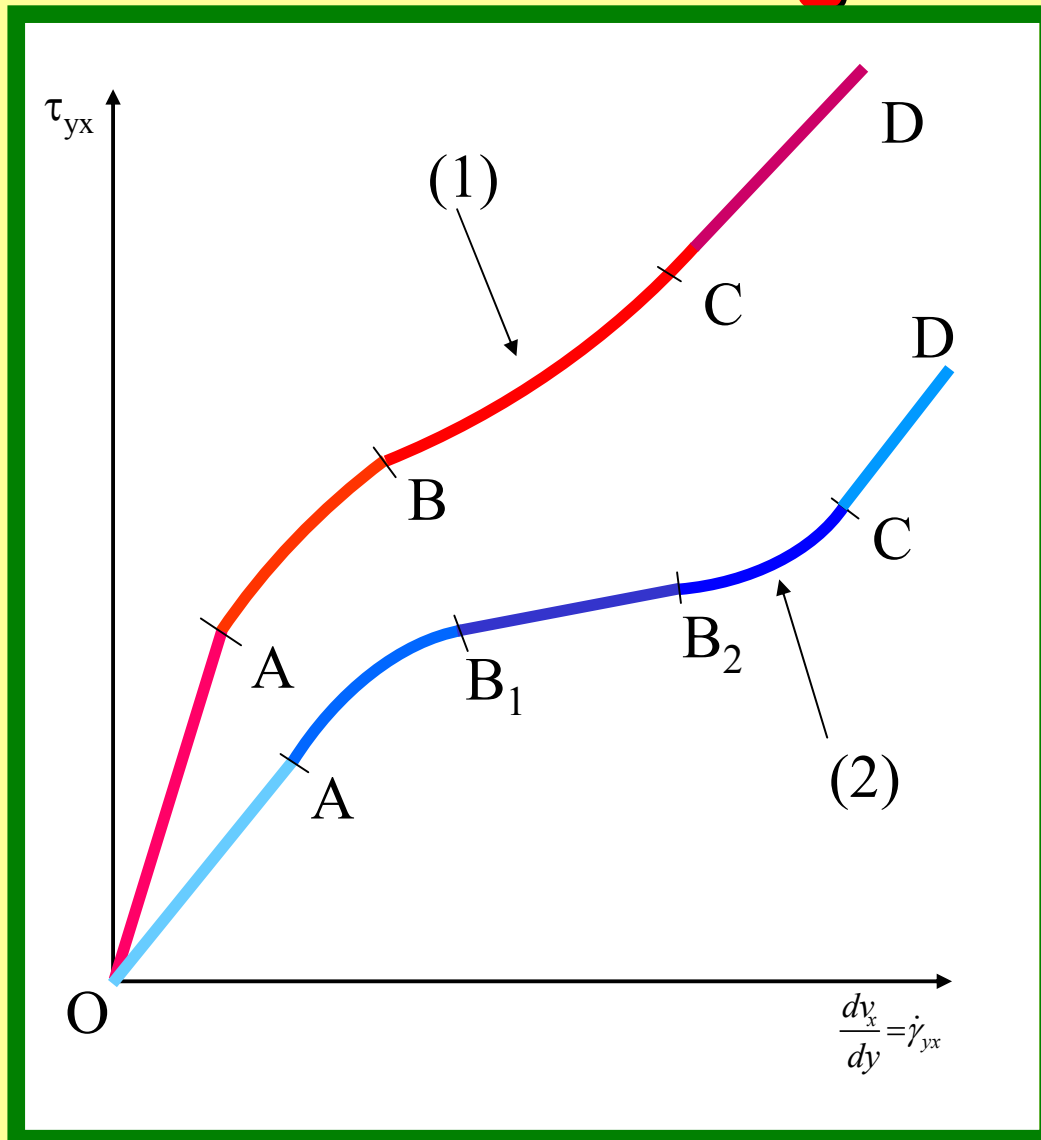
Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor



CURBA (1) (OSTWALD):

- dreapta OA, corespunzătoare primului domeniu newtonian;
- curba AB, corespunzătoare comportării pseudoplastice;
- curba BC, corespunzătoare comportării dilatante;
- dreapta CD, corespunzătoare celui de-al doilea domeniu newtonian.

Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor



o Curba (2), generalizare a curbei (1):

- 3 domenii de comportare newtoniană:

- OA,
- B₁B₂,
- CD),

- se intercalează:

- un domeniu pseudoplastic (AB₁)
- Un domeniu dilatant (B₂C).

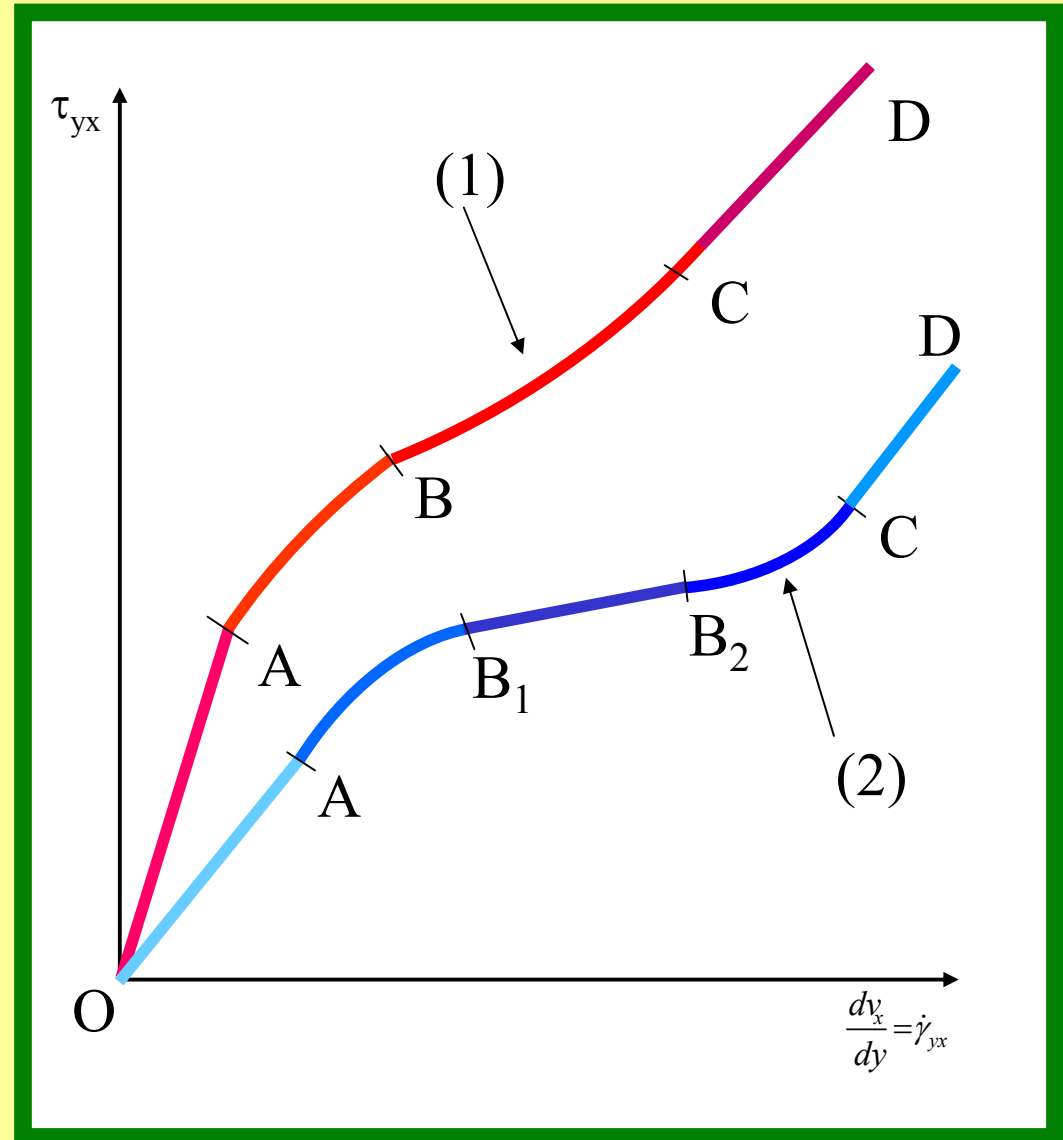
Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor

o Pe baza curbei generalizate de curgere, precum și prin posibilitatea restrângerii, lărgirii sau contopirii domeniilor, se pot explica toate tipurile de comportări reologice:

Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor

o Fluidul newtonian:

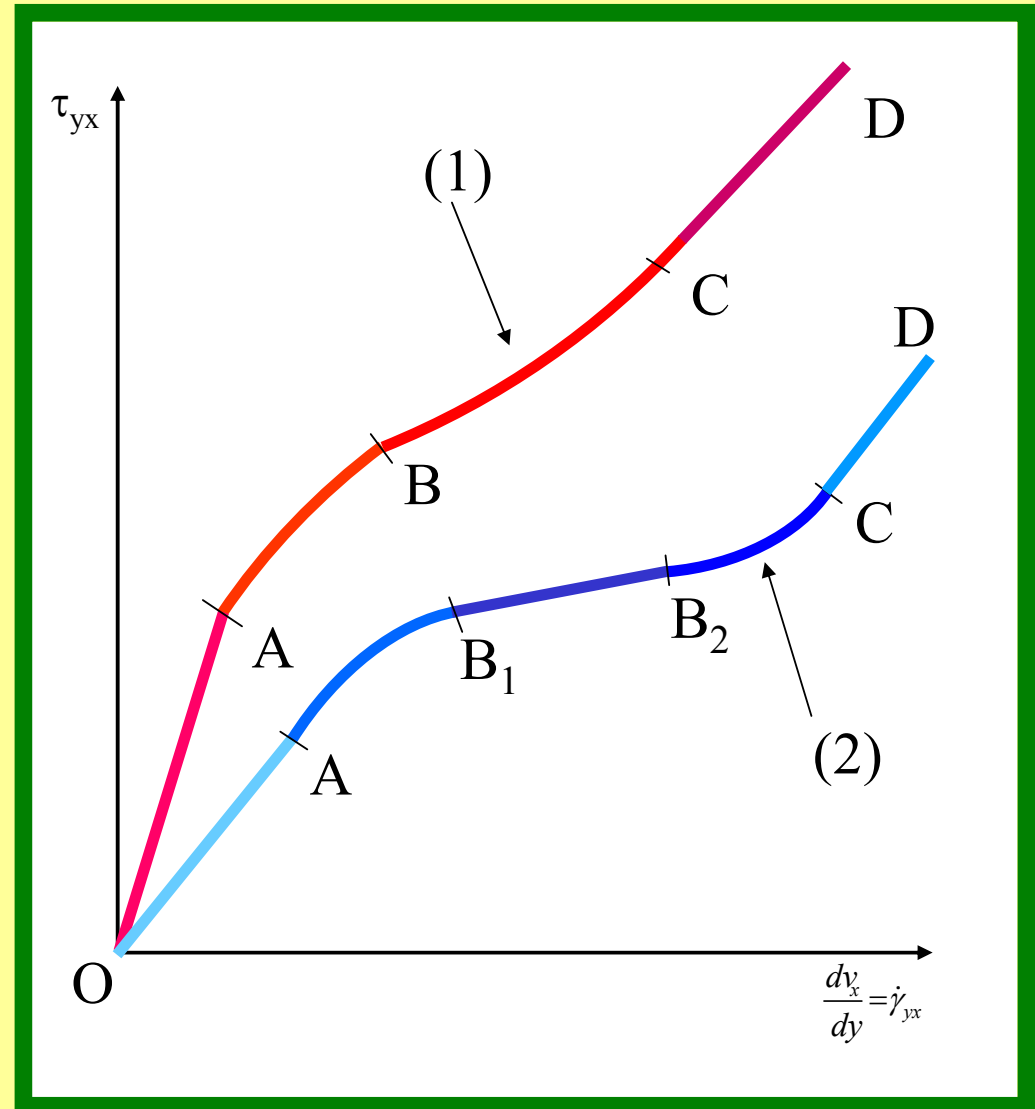
Un corp cu o curbă generalizată de curgere, la care modificarea comportării după punctul A, apare la viteze de forfecare foarte mari, nerealizabile experimental.



Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor

o Lichidul pseudoplastic:

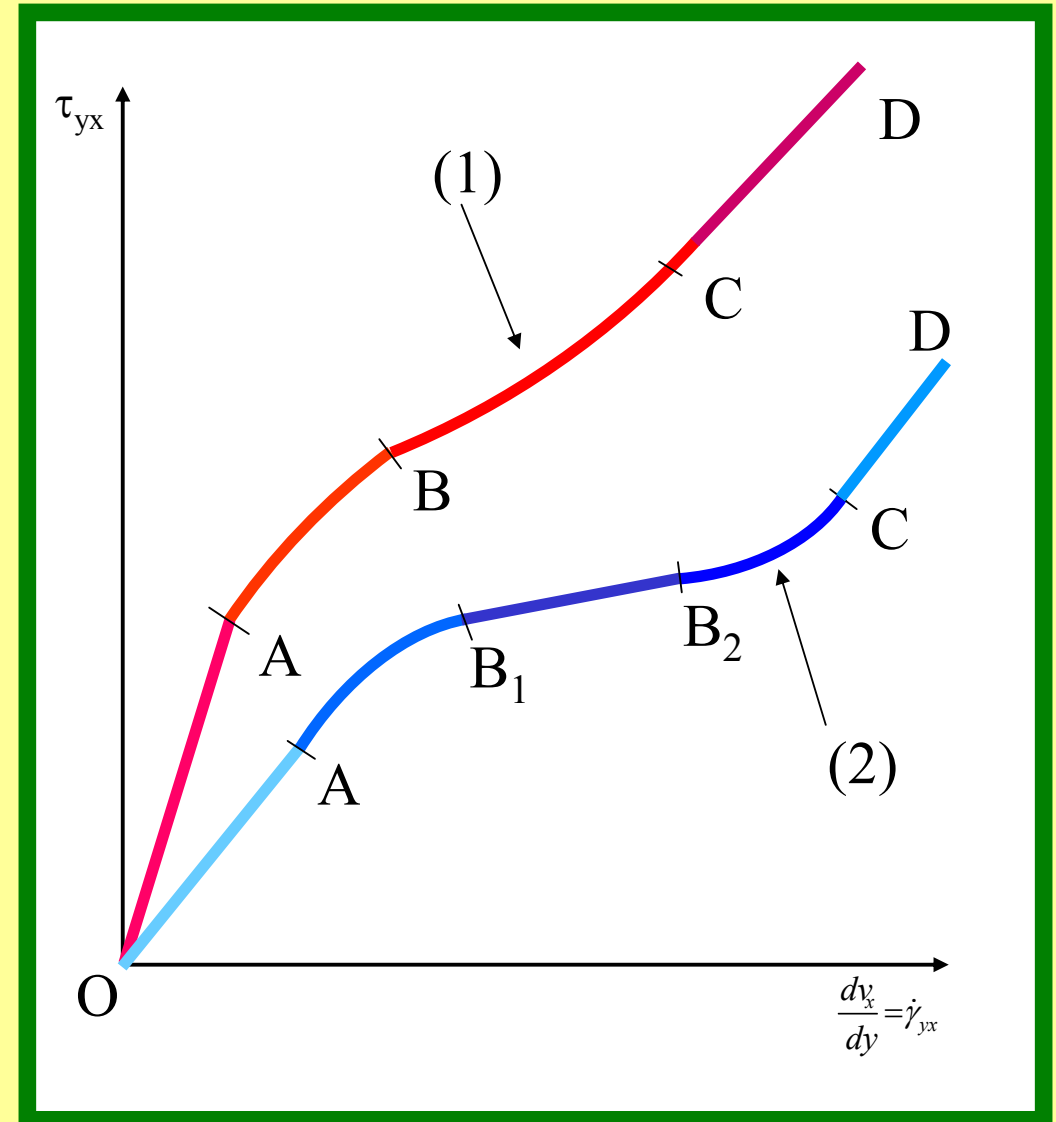
Corpul la care curba generalizată de curgere poate fi stabilită pe cale experimentală până la o limită situată între punctele A și B₂, în condiții de curgere laminară.



Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor

o Lichidul dilatant:

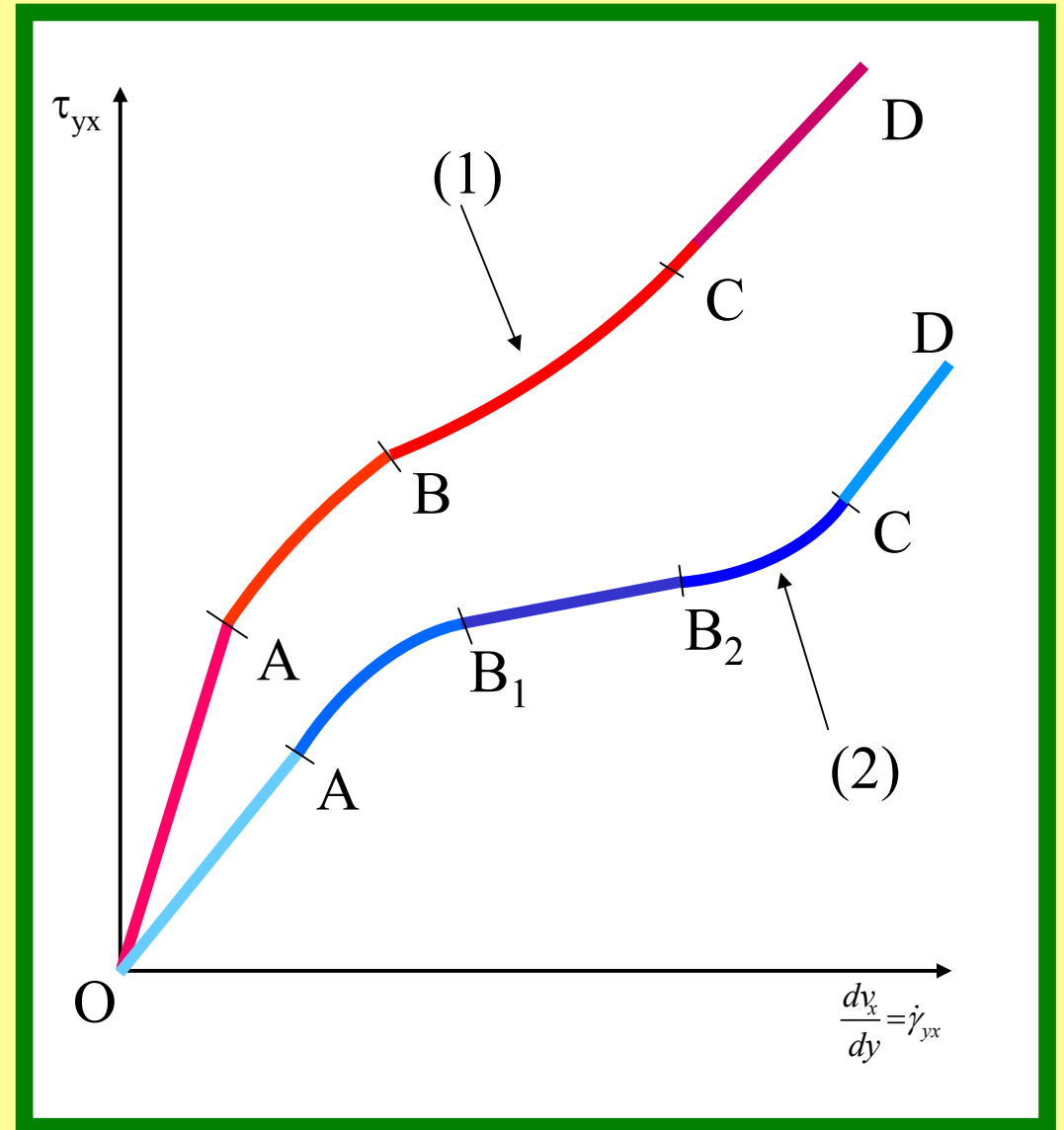
Materialul cu curbă generalizată de curgere, pentru care primul domeniu newtonian, domeniul pseudoplasthic și uneori o parte din al doilea domeniu newtonian, apar succesiv la viteze de forfecare mici și nu pot fi separate pe cale experimentală.



Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor

o Corpul plastic:

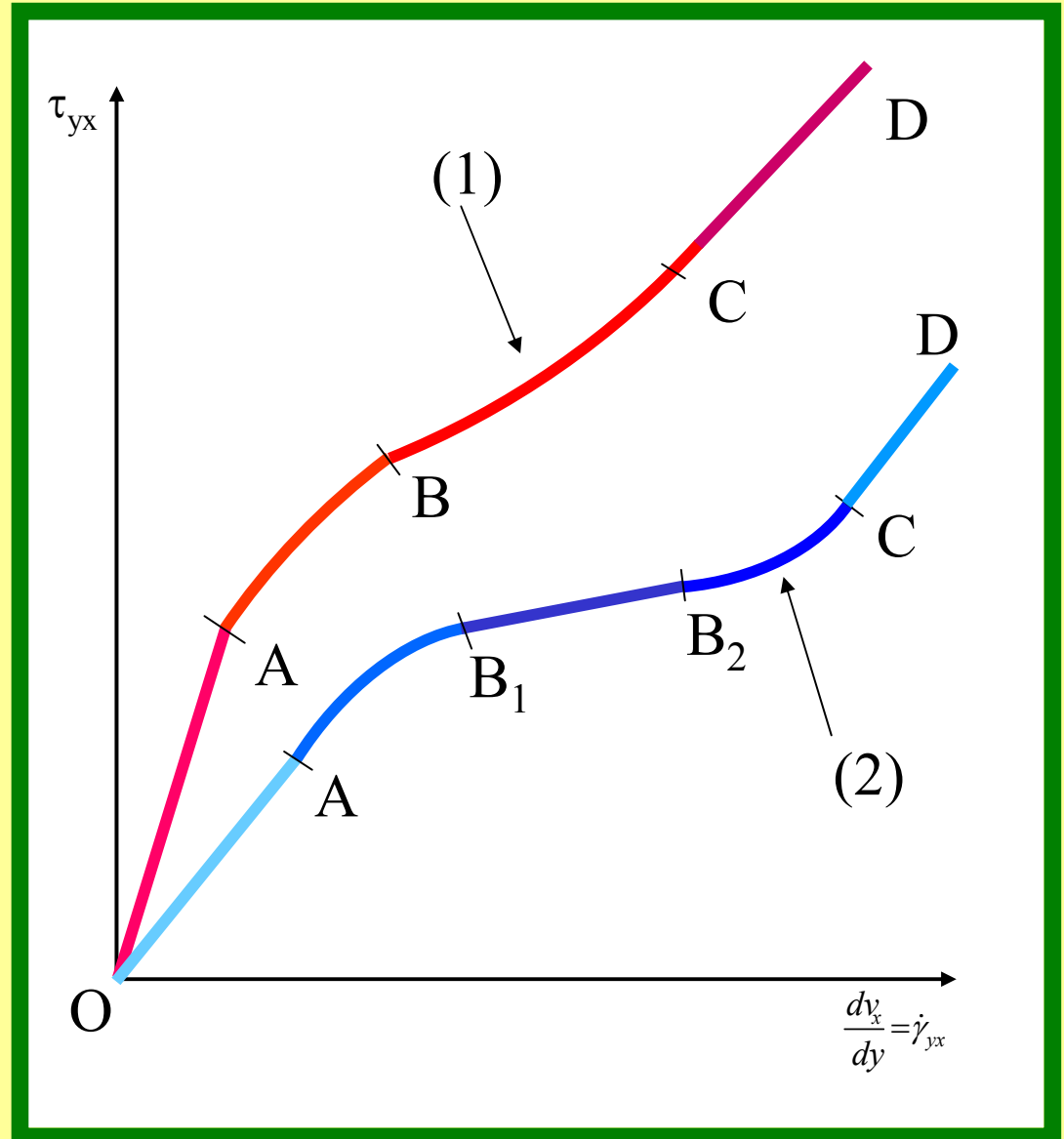
Materialul cu curbă generalizată de curgere la care primul domeniu newtonian se suprapune pe axa tensiunilor de forfecare, după care urmează domeniul pseudoplastice și, posibil, o parte din al doilea domeniu newtonian.



Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor

o Plasticul Bingham:

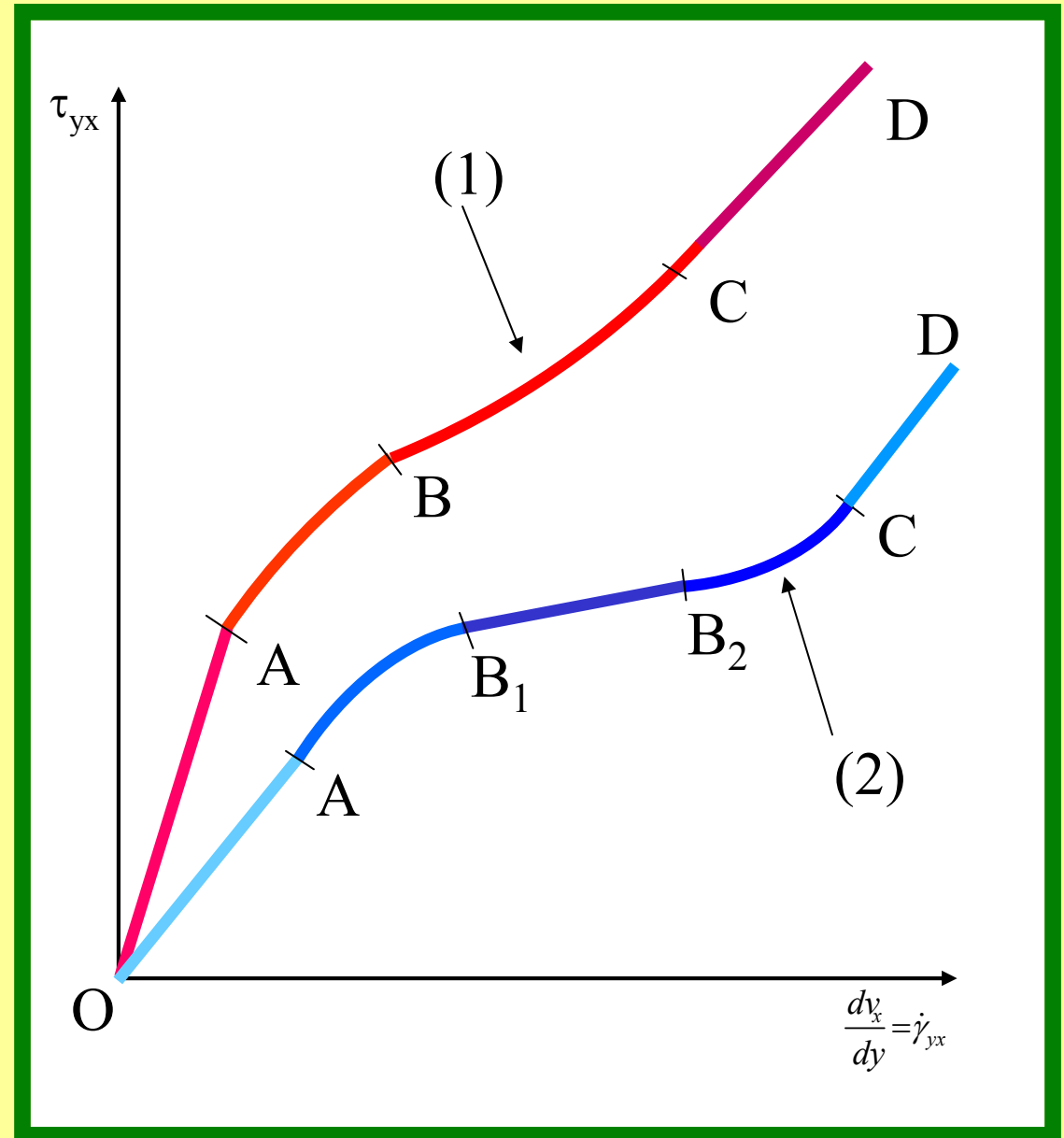
Corpul cu curbă generalizată de curgere, la care primul domeniu newtonian coincide cu axa tensiunilor, domeniul de comportare pseudoplastică este atât de restrâns, încât primul domeniu newtonian pare să fie urmat de cel de-al doilea domeniu newtonian, iar domeniul dilatant nu mai poate fi obținut pe cale experimentală.



Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor

o Lichidul Ostwald:

Un material cu curbă generalizată de curgere, la care al doilea domeniu newtonian este atât de restrâns încât se reduce la un punct de inversiune ce marchează trecerea de la domeniul pseudoplasticității la cel dilatant.



Reprezentarea generalizată a comportării reologice a fluidelor

Conceptul de **curbă generalizată de curgere** este important atât pentru comportarea reologică a fluidelor, cât și pentru comportarea reologică a solidelor.