



# ***Introducción a la Reología***


**El comportamiento de flujo también puede denominarse comportamiento reológico cuando los materiales se evalúan acorde a los parámetros de la reología**

**Capítulo 2: *Propiedades físicas de los sistemas dispersos***

**Viernes, 4 de septiembre de 2009**

# ***Reología...***

**Prof. Bingham, años 1920 ...**

**Rheos**        **Movimiento**

**“Todo fluye (panta rheis)”...  
¡eventualmente!**


**La Reología cobró importancia a partir de la  
segunda guerra mundial, debido principalmente  
al surgimiento de materiales complejos...**



# ***Reología...***

## **Utilidad e importancia**

- **Prever el comportamiento durante el manejo del material**
- **Inferir la microestructura del material**
- **Como herramienta de formulación**
- **Contribuir al avance de la ciencia y el conocimiento**



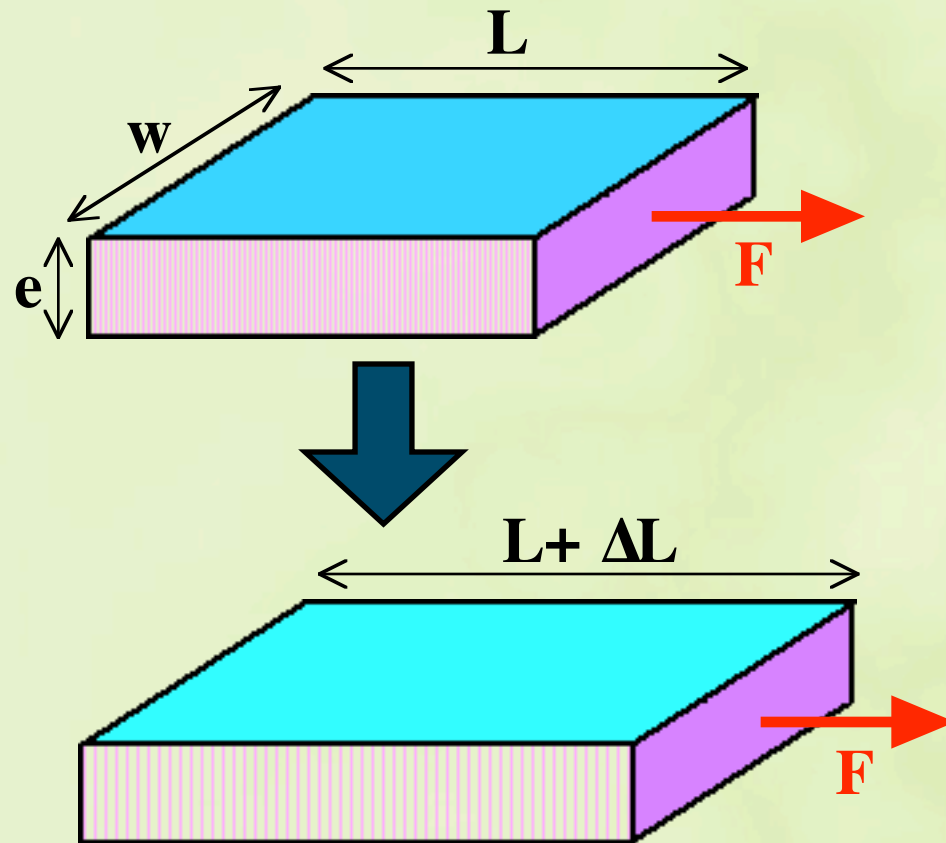
## **Comportamiento de los materiales:**

- **El sólido elástico de Hooke**
- **El fluido viscoso Newtoniano**

**Se trata de modelos ideales de comportamiento a los cuales se acercan muchos materiales**

# ***Sólido elástico!***

**Robert Hooke: “True Theory of Elasticity” (1678)**



**Ley de Hooke:**

$$F = k \Delta L$$

$$F = k \Delta L$$

$$\left[ \frac{F}{ew} \right] \approx \left[ \frac{kL}{ew} \right] \left[ \frac{\Delta L}{L} \right]$$

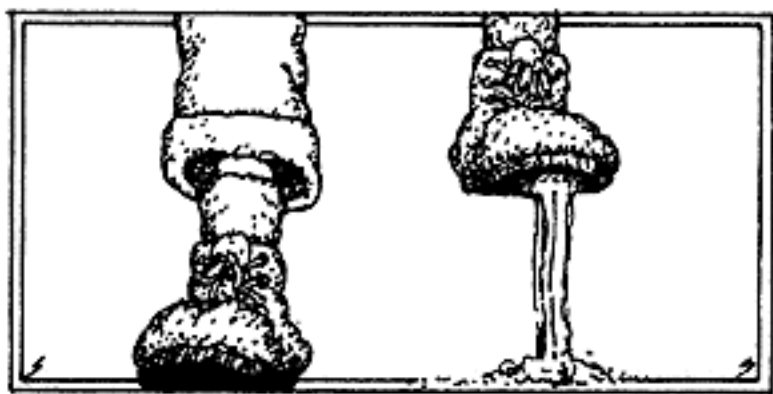


$$\tau = G \gamma$$

- ✓  $\tau$  : esfuerzo, Pa
- ✓  $G$  : modulo de elasticidad, Pa
- ✓  $\gamma$  : deformación relativa



**Muchos materiales, cuando son sometidos a esfuerzos relativamente pequeños se comportan como sólidos de Hooke.**

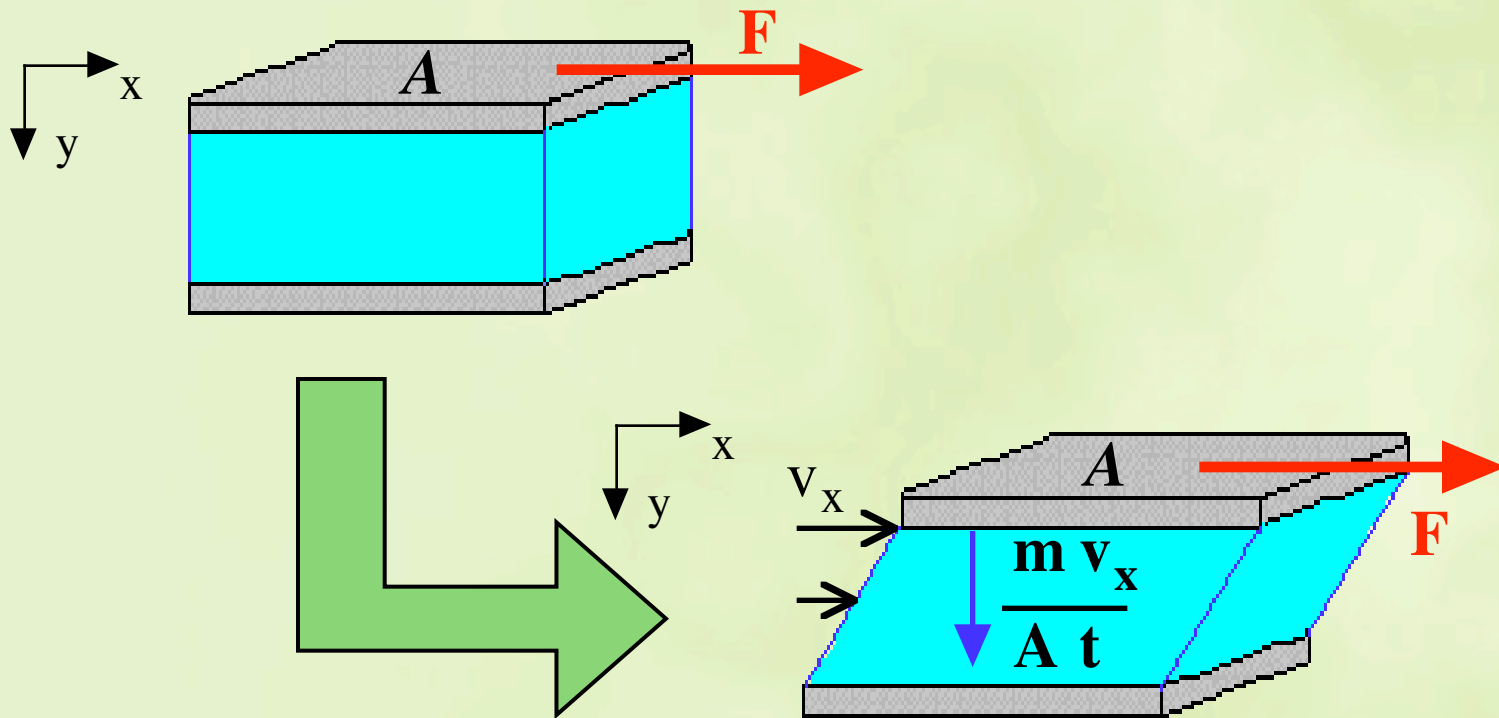


**Chicle!**



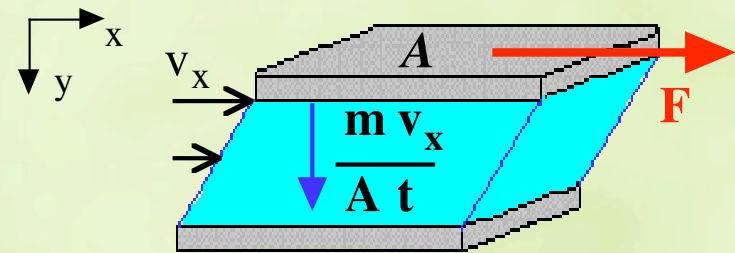
# *Fluido viscoso!*

Isaac Newton, “Principia” (1687)





# Ley de Newton



El flujo de cantidad de movimiento es proporcional a la densidad de flujo de cantidad de movimiento a través del material o fluido:

$$\frac{mv_x}{At} \propto \left( -\frac{d\rho v_x}{dy} \right)$$

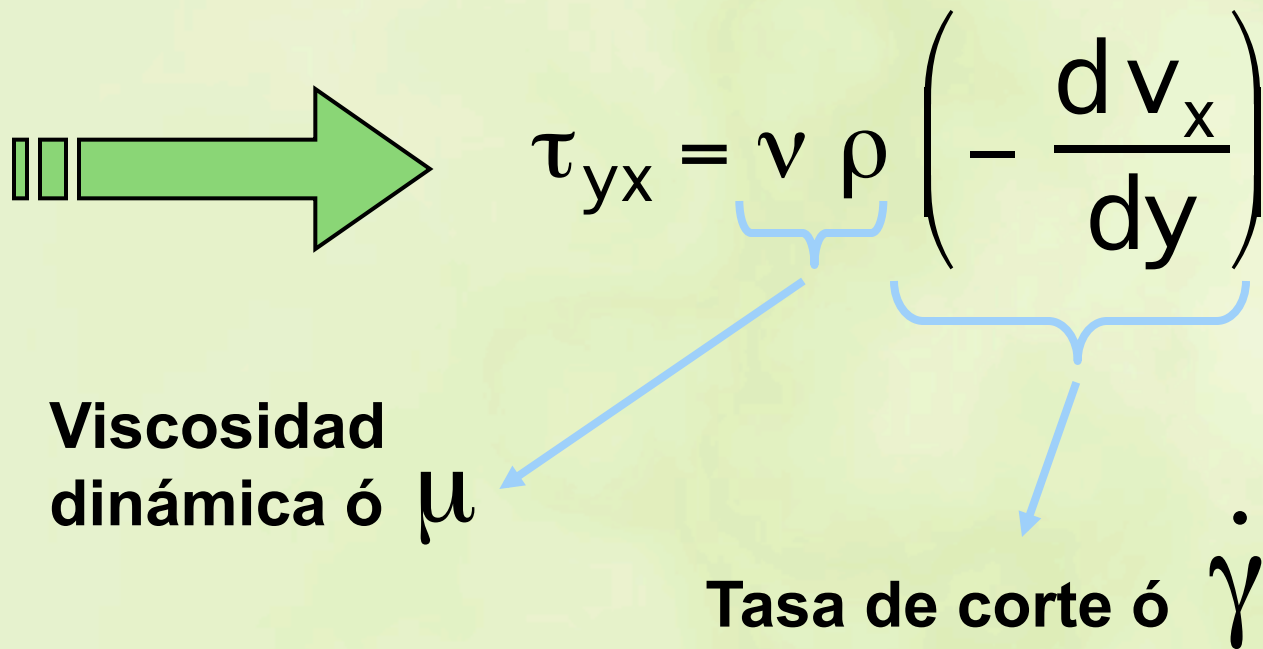
La conductividad de cantidad de movimiento se denomina **viscosidad cinemática  $\nu$**

$$\frac{mv_x}{At} = \nu \left( -\frac{d\rho v_x}{dy} \right)$$

**A condición de que el medio sea conductor !**

$$\tau_{yx} = \nu \left( - \frac{d \rho v_x}{dy} \right)$$

*Si la densidad  $\rho$   
es constante...*



$$\tau_{yx} = \underbrace{\nu \rho}_{\text{Viscosidad din\u00e1mica \u00f3 } \mu} \underbrace{\left( - \frac{dv_x}{dy} \right)}_{\text{Tasa de corte \u00f3 } \dot{\gamma}}$$

## Ley de Newton:

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

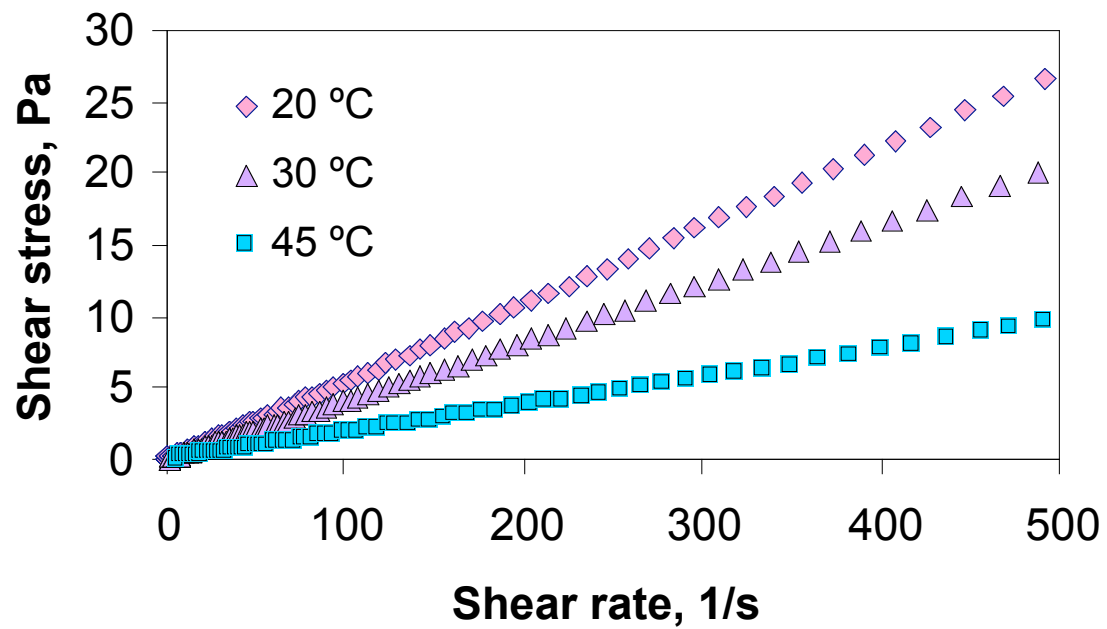
$$\mu = f(T, P)$$

T: temperatura

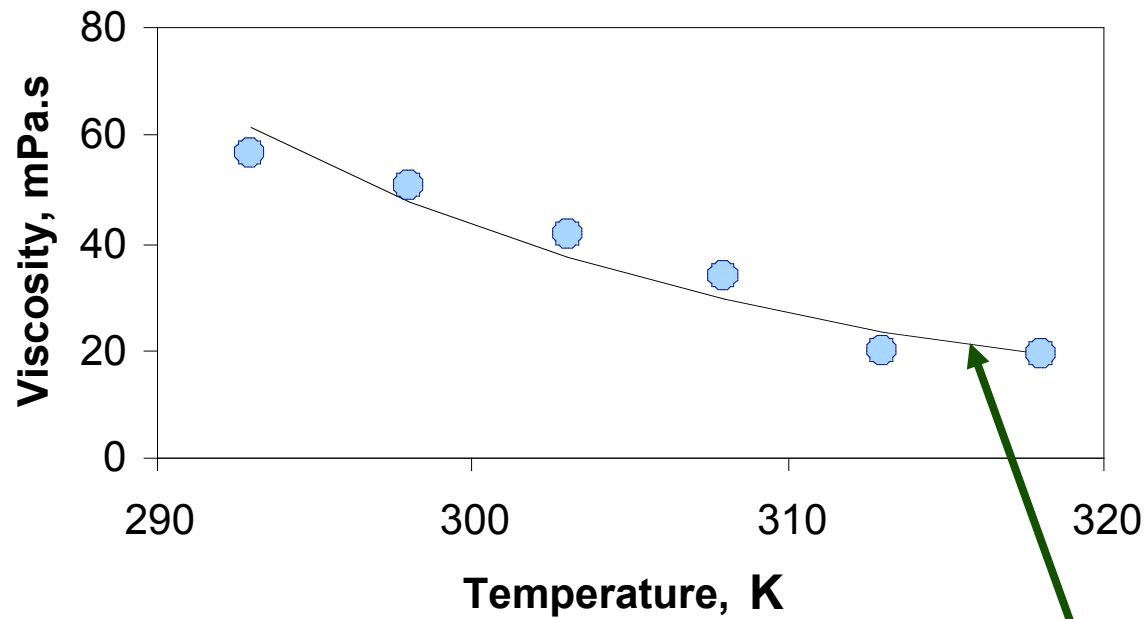
P: presión

← Para los fluidos Newtonianos...

## Ley de Newton (cont.)



*Aceite de coco*



***Aceite de coco***

***Ec. de Arrhenius:***

$$\mu = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$



# Fluidos Newtonianos

- ✿ Todos los gases
- ✿ Líquidos con pesos moleculares inferiores a ~ 500 ...
- ✿ Soluciones poliméricas **diluidas**
- ✿ Suspensiones y emulsiones **diluidas**



# Viscosidad - Unidades

$$\mu (=) \text{ML}^{-1} \text{t}^{-1}$$

en honor a Poiseuille

En el sistema CGS:  $1 \text{ dina s/cm}^2 = 1 \text{ g/cm s} = 1 \text{ Poise}$

En el sistema internacional SI:  $1 \text{ N s/m}^2 = 1 \text{ Pa s} = 10 \text{ Poise}$

En la práctica se usa el centiPoise:  $1 \text{ cP} = 0,01 \text{ Poise} = 1 \text{ mPa s}$

## Algunos valores de $\mu$


(a 20°C, mPa.s)

aire	-----	0,02
agua	-----	1
querosén	-----	10
aceite de oliva		100
crudo liviano 25°API		100
glicerina	-----	1.000
miel		10.000
crudo extrapesado 8°API	-----	500.000
polímero fundido	-----	$10^6$
asfalto	-----	$10^{11}$
vidrio fundido	-----	$10^{15}$
vidrio	-----	$10^{43}$

***Lamentablemente...***



***...los fluidos Newtonianos  
y los sólidos elásticos son  
las excepciones ...***



# Reología

**Fluidos simples (Newtonianos)**  
como agua, vino, aceite, glicerina

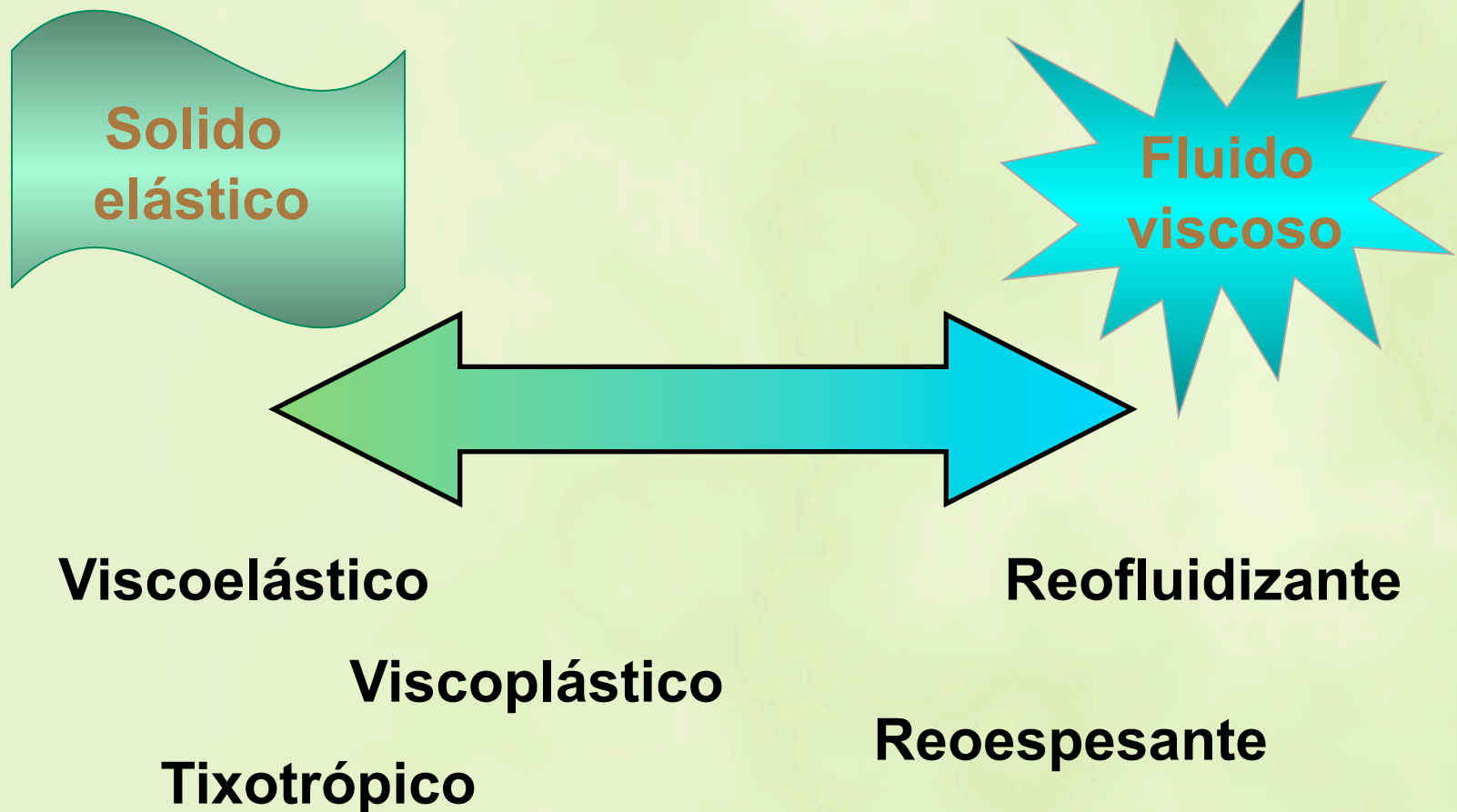
**caracterizados  
por su viscosidad**

**Otras sustancias “fluyen” pero su viscosidad ya no es una característica suficiente para diferenciarlos.**

geles, pinturas  
suspensiones, emulsiones  
adhesivos, pasta de diente  
salsas ...

**fluidos  
reológicamente  
complejos**

# Tipos de comportamiento de flujo





# **Comportamientos reológicos**

**no-Newtonianos:**

**\*\* Su descripción**

**\*\* Los modelos que los**

**representan**

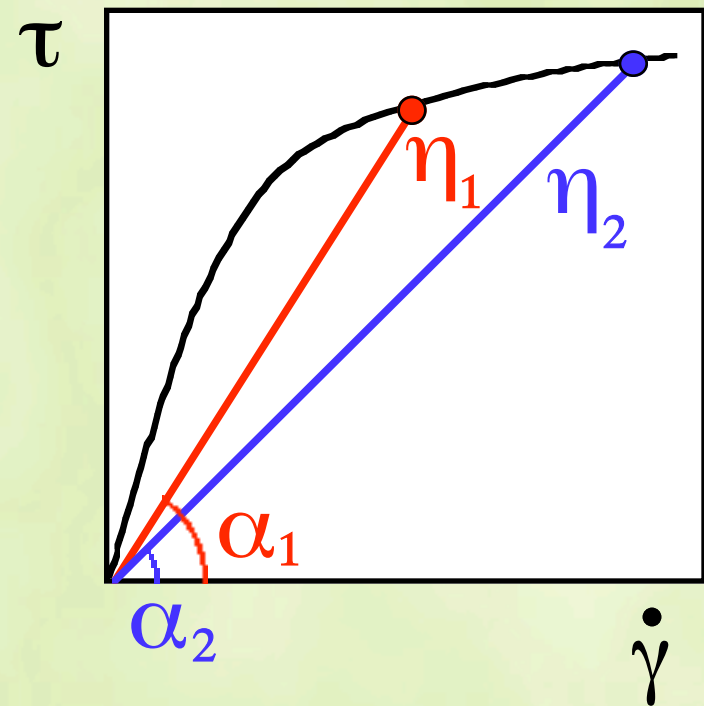


# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

✱ **Reofluidizante** (o *seudoplástico*)

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \text{tg } \alpha$$

$\eta$  Viscosidad aparente  
disminuye cuando  $\tau$  o  $\dot{\gamma}$  aumenta

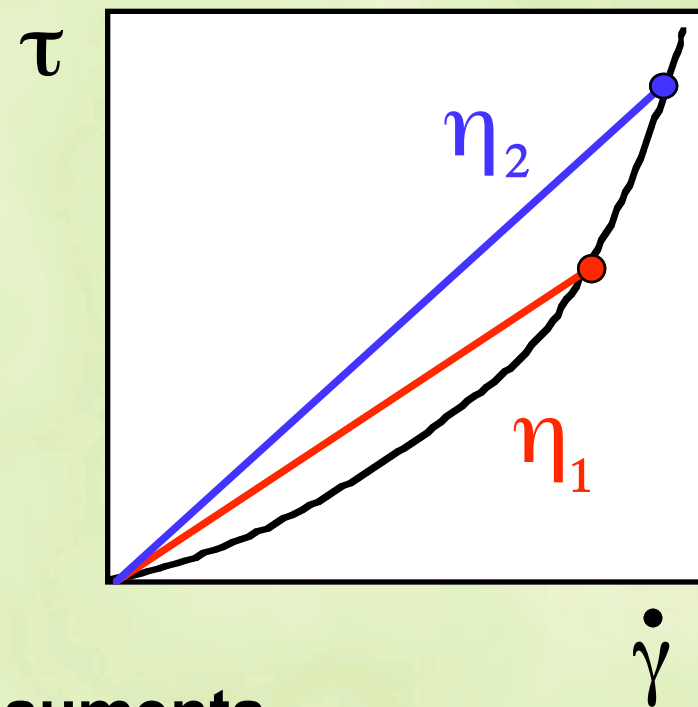


# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

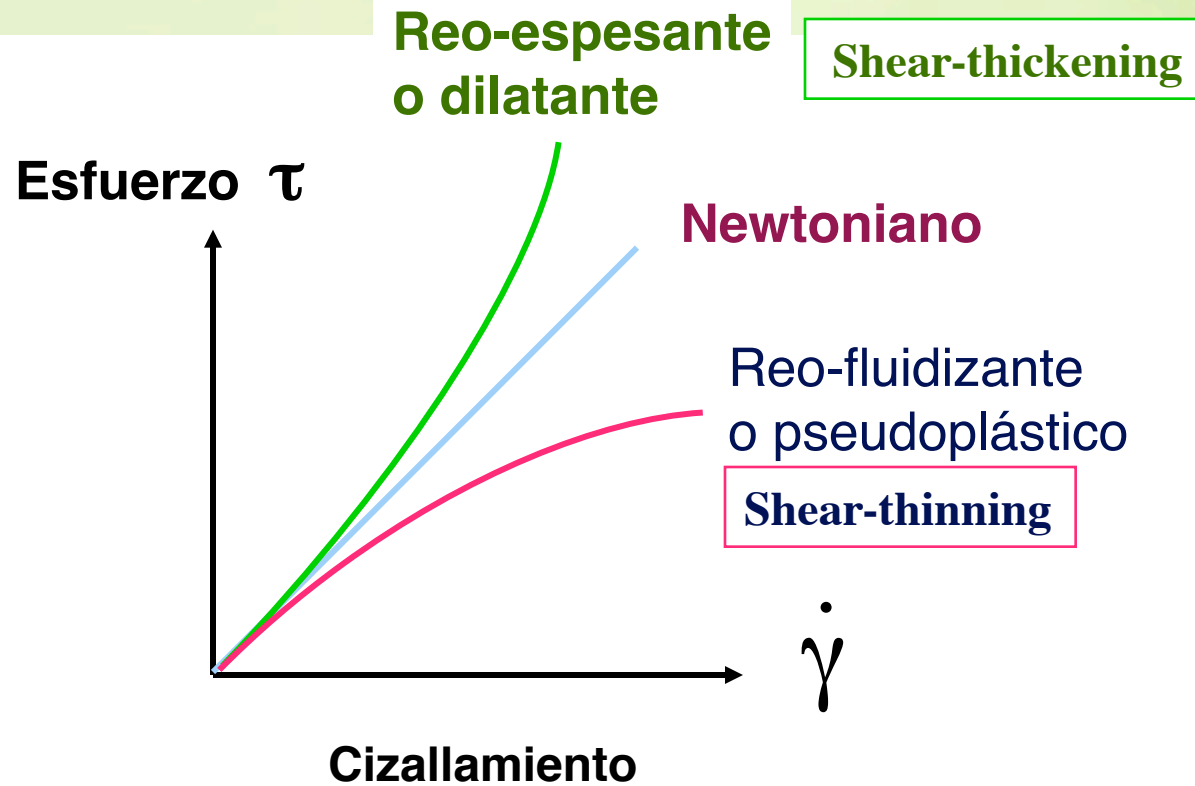
✿ **Reoespesante** (o *dilatante*)

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \tan \alpha$$

$\eta$  Viscosidad aparente  
aumenta cuando  $\tau$  o  $\dot{\gamma}$  aumenta

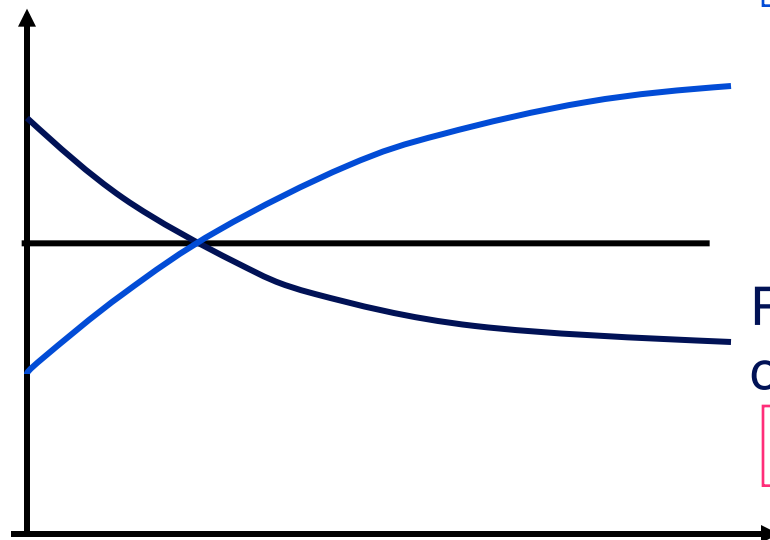


## Fluidos viscosos



# Fluidos viscosos

Viscosidad  $\eta$



**Shear-thickening**

Reo-espesante  
o dilatante

**Newtoniano**

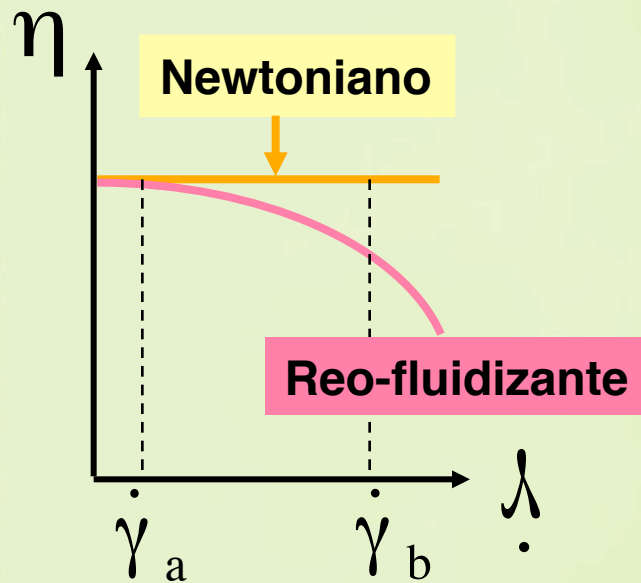
Reo-fluidizante  
o pseudoplástico

**Shear-thinning**

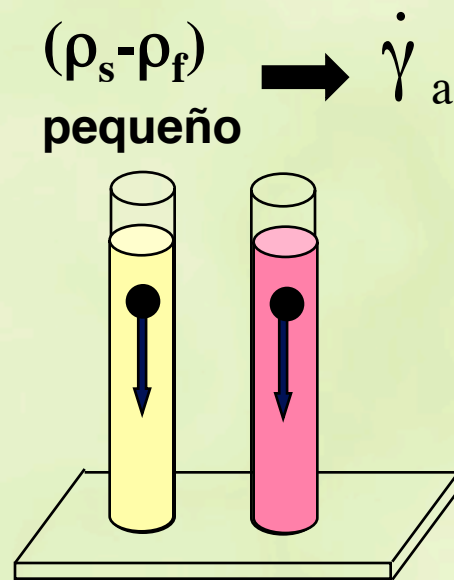
Cizallamiento

$\dot{\gamma}$

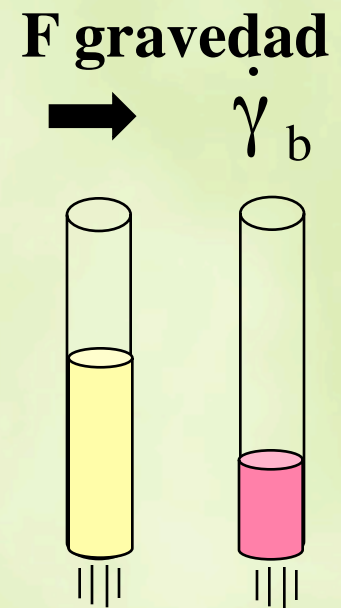
# Comportamiento reofluidizante



*Reograma*

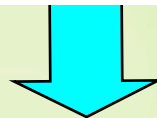
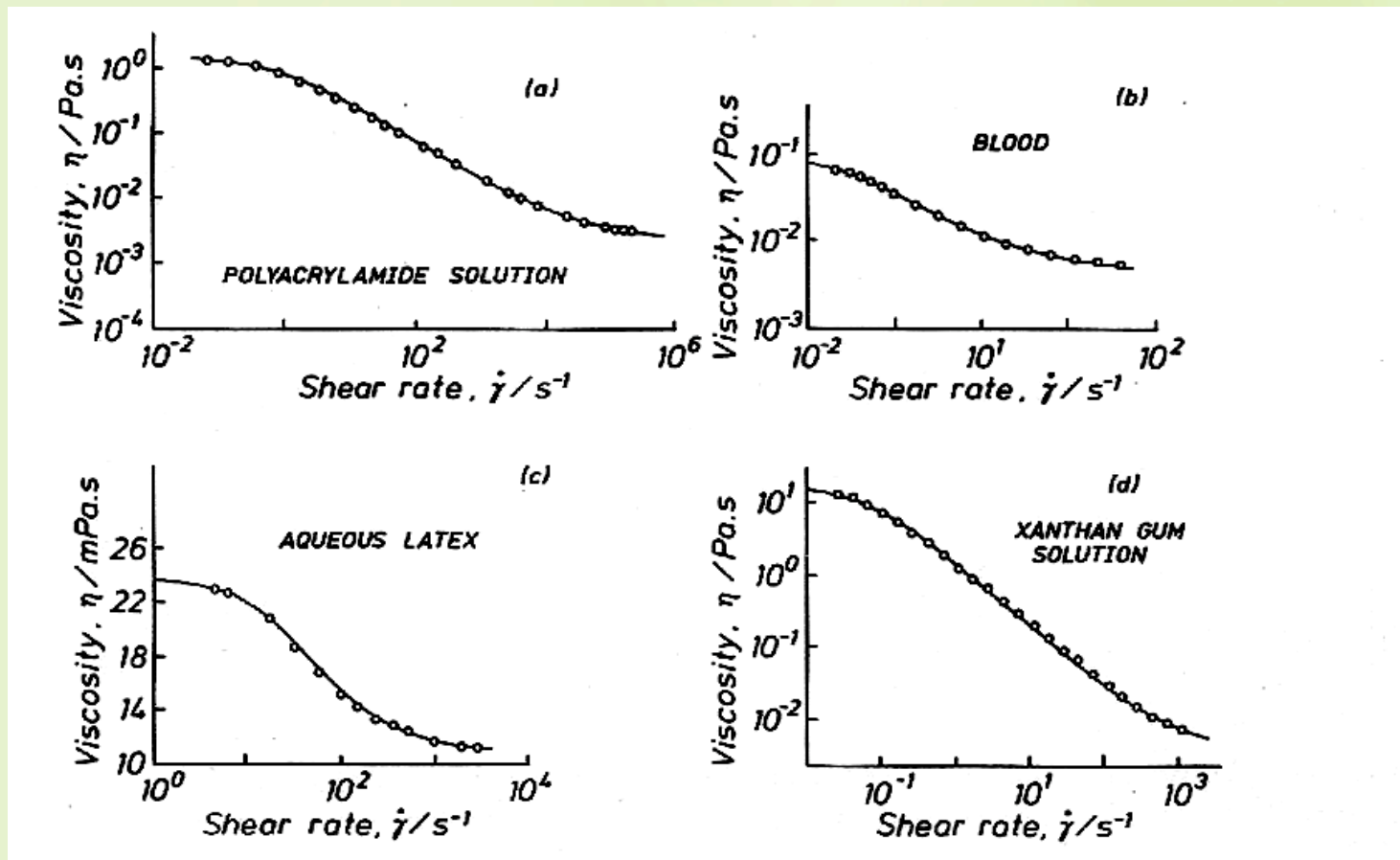


las esferas caen  
a la misma  
velocidad



El líquido  
reo-fluidizante  
se derrama más  
rápidamente

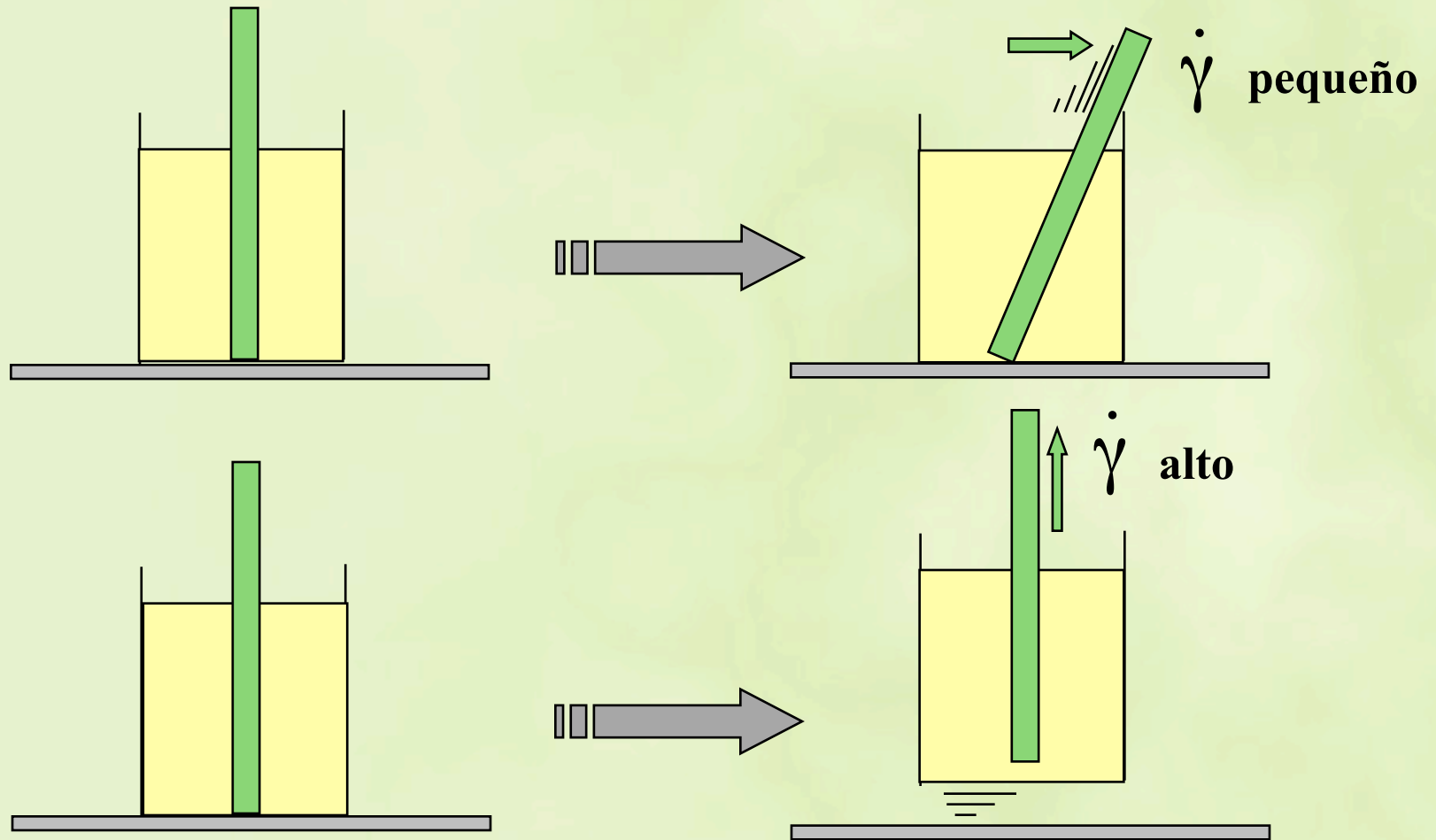
## Comportamiento reo-fluidizante (escalas log-log)



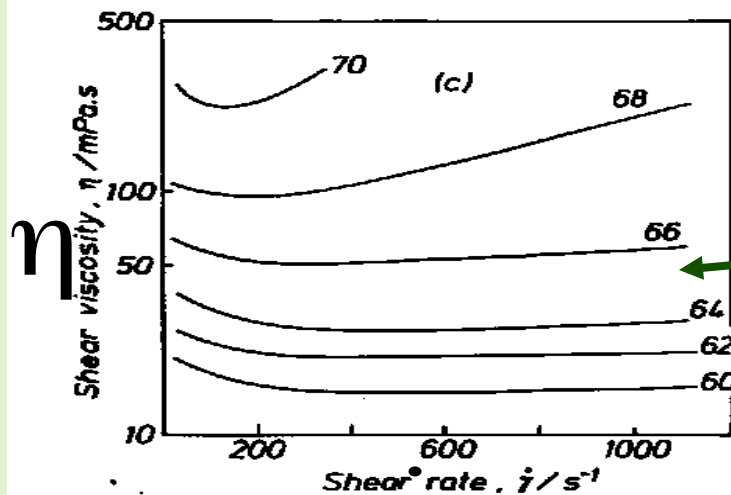
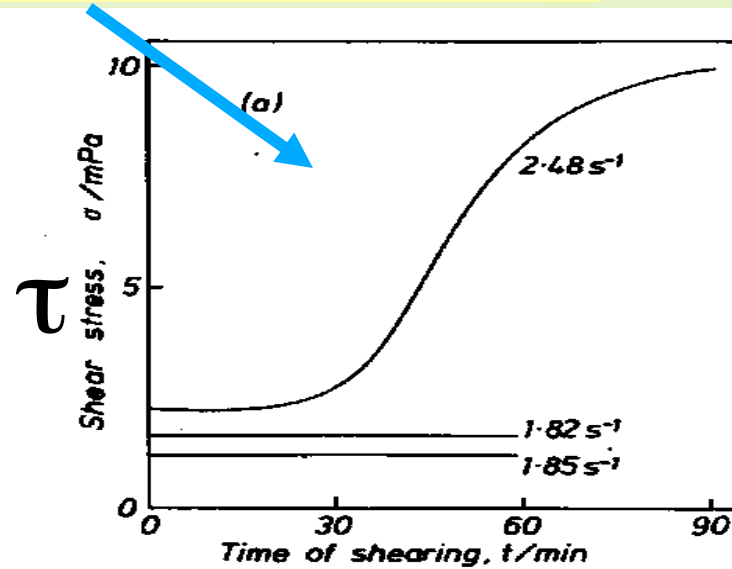
***Este es el comportamiento más usual***



# Comportamiento reoespesante



## Surfactantes en solución, efectos temporales



*¡arena mojada!*

Suspensión de arcilla es  
más reoespeante cuando  $\phi$   
de sólido aumenta

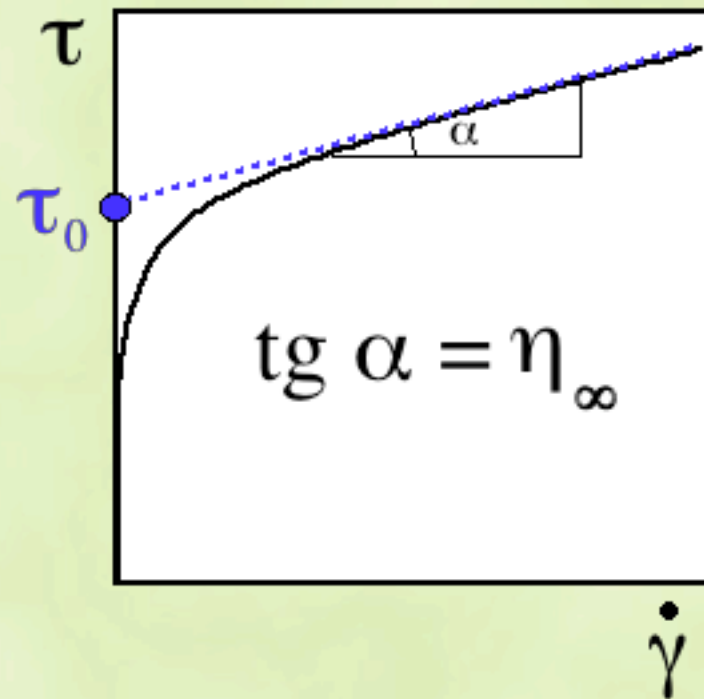
$\gamma$

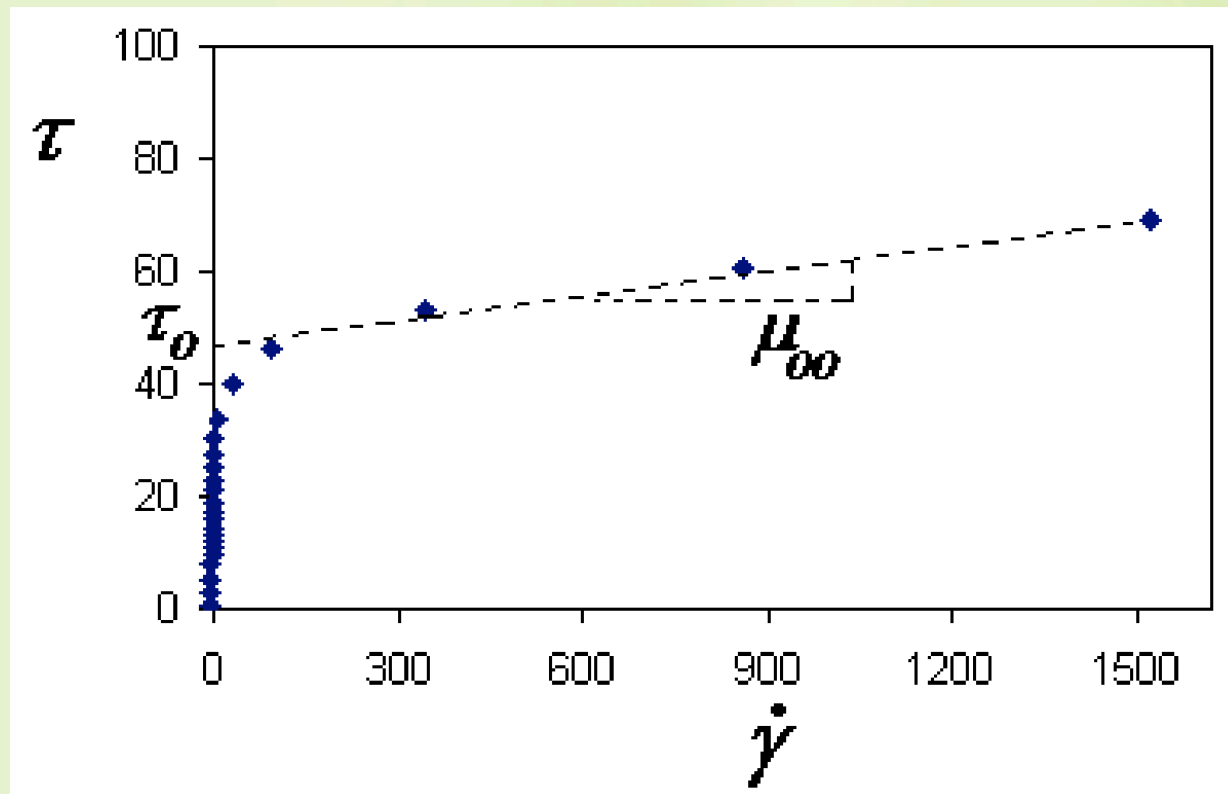
# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

✿ **Viscoplástico** (*fluido de Bingham*)

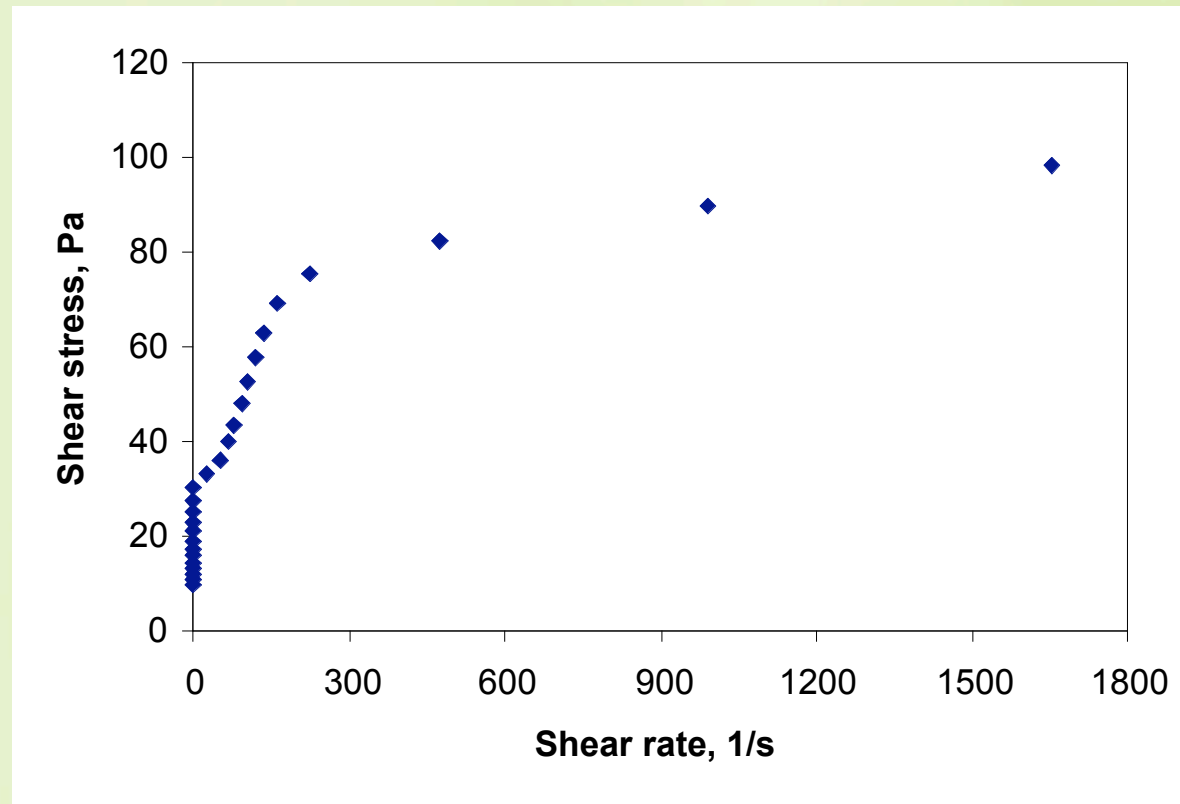
$\tau_0$  : esfuerzo umbral

$\eta_\infty$  : viscosidad límite





***¡Comportamiento experimental!***



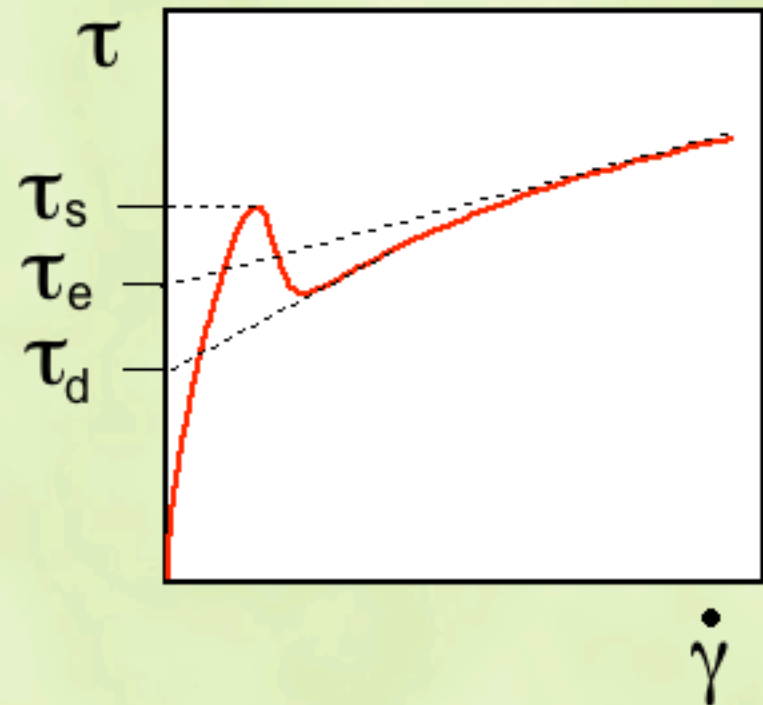
***Lodo de arcilla en solución de surfactante y  
polímero***

## ✿ Viscoplasticos complejos

$\tau_s$ : umbral estático  
(tiende a desaparecer)

$\tau_d$ : umbral dinámico

$\tau_e$ : umbral “ingenieril”

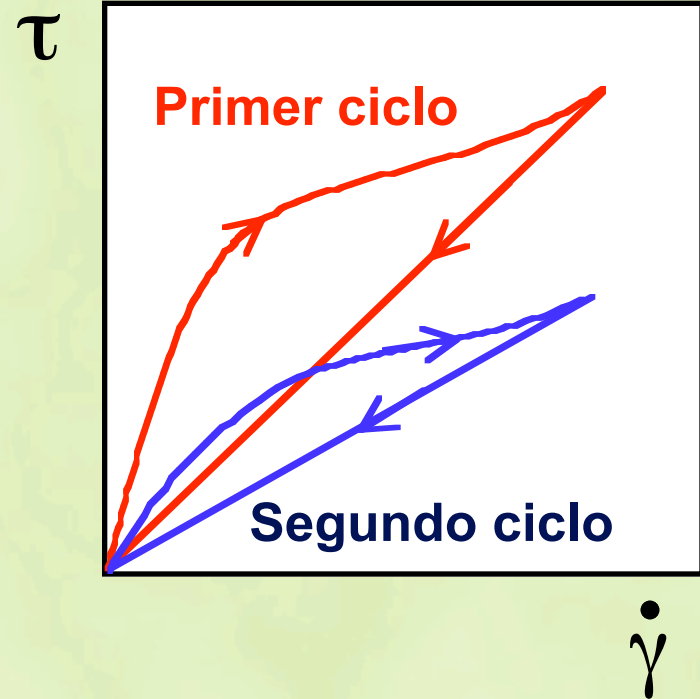


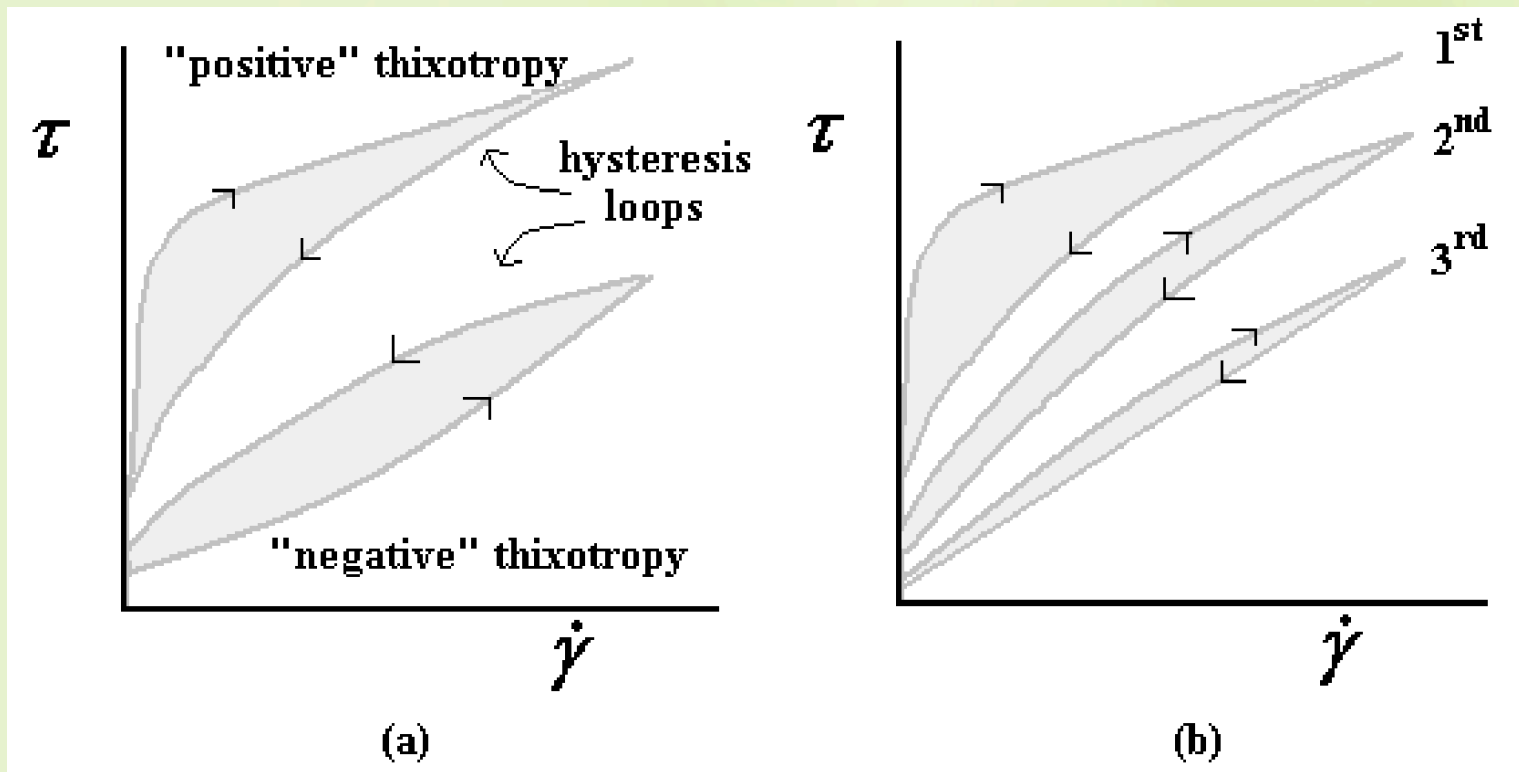


# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## ✿ Tixotrópicos

El comportamiento tixotrópico depende de la historia previa de cizallamiento.



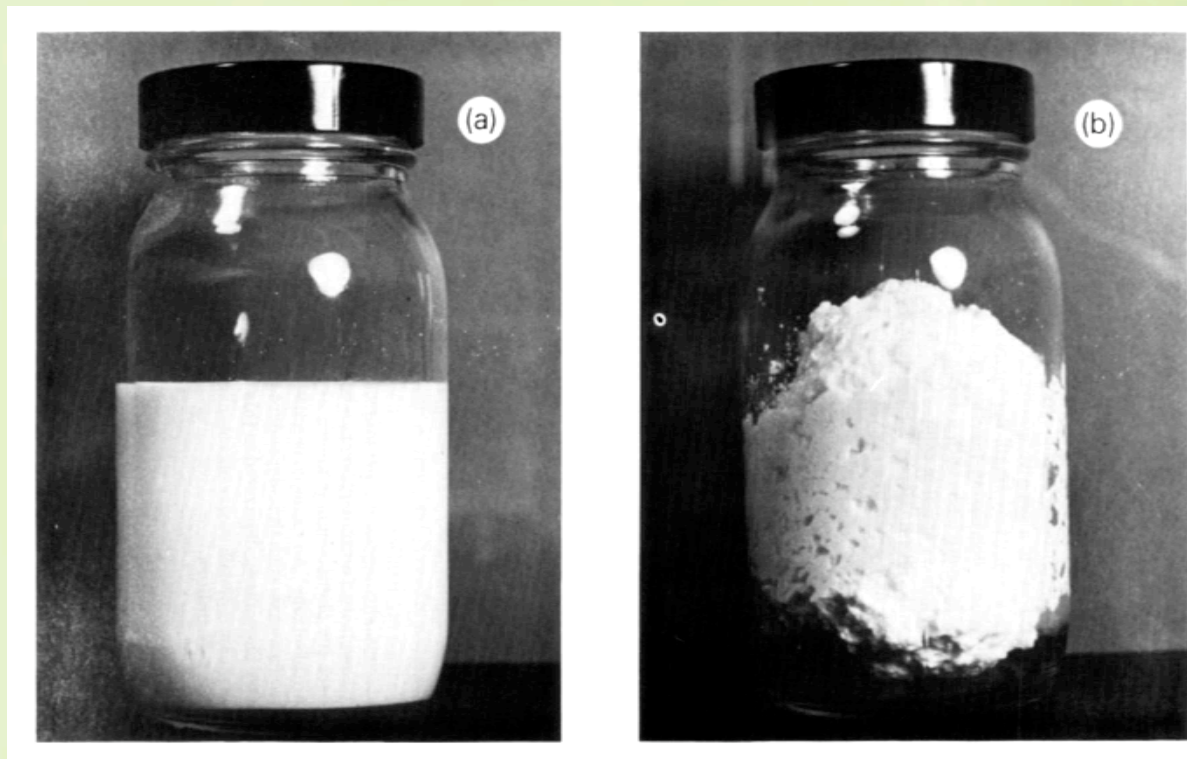


**Tixotropía reversible  
(comportamiento  
ideal)**

**Tixotropía irreversible  
(comportamiento real)**

## Tixotropía negativa o anti-tixotropía

« Alkaline Perbunan Latex » : (a) en reposo (b) después de agitación vigorosa. Cuando cesa la agitación, el producto recupera su estado del reposo en 2 min.



D.C.H. CHENG, *Nature* , 245 , 93 (1973)

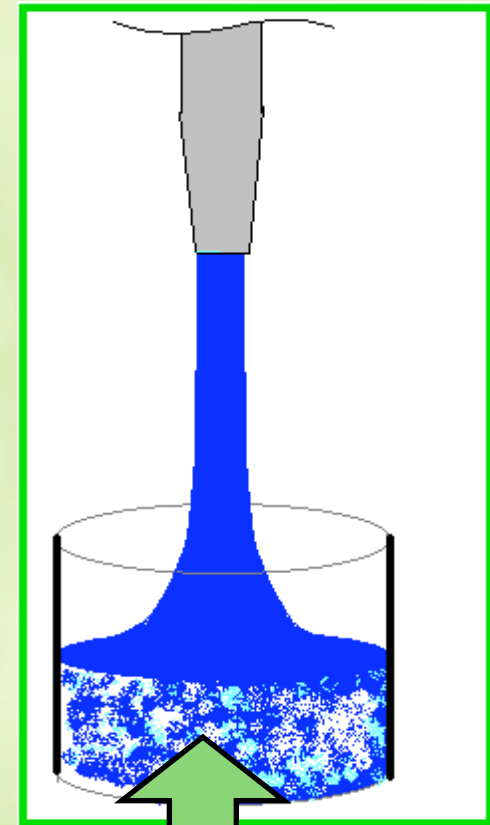
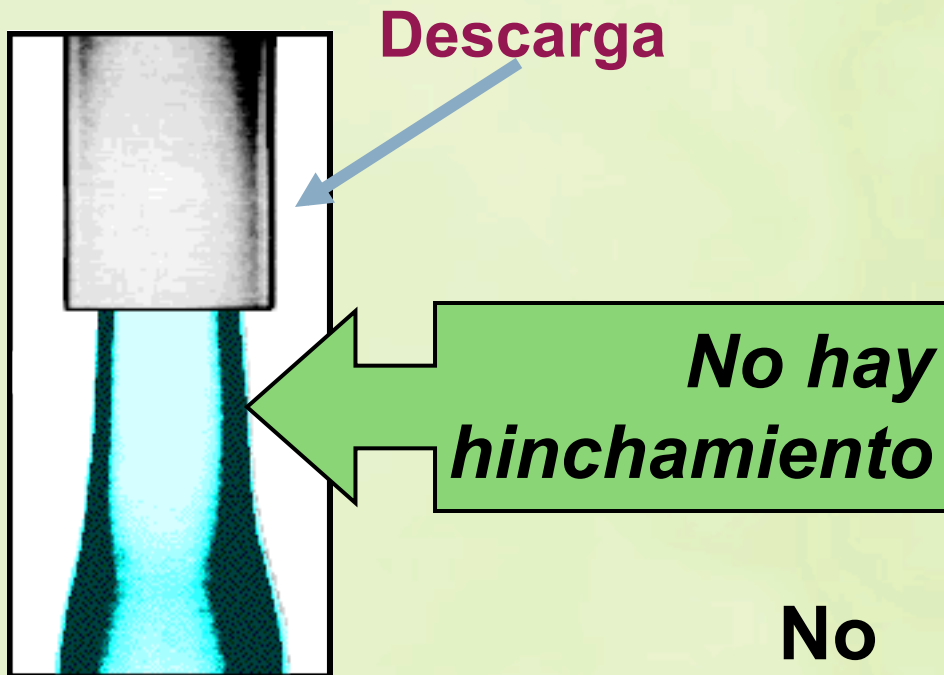
# **Comportamientos reológicos no-Newtonianos**



**Fluidos  
viscoelásticos**

# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

✿ No viscoelásticos

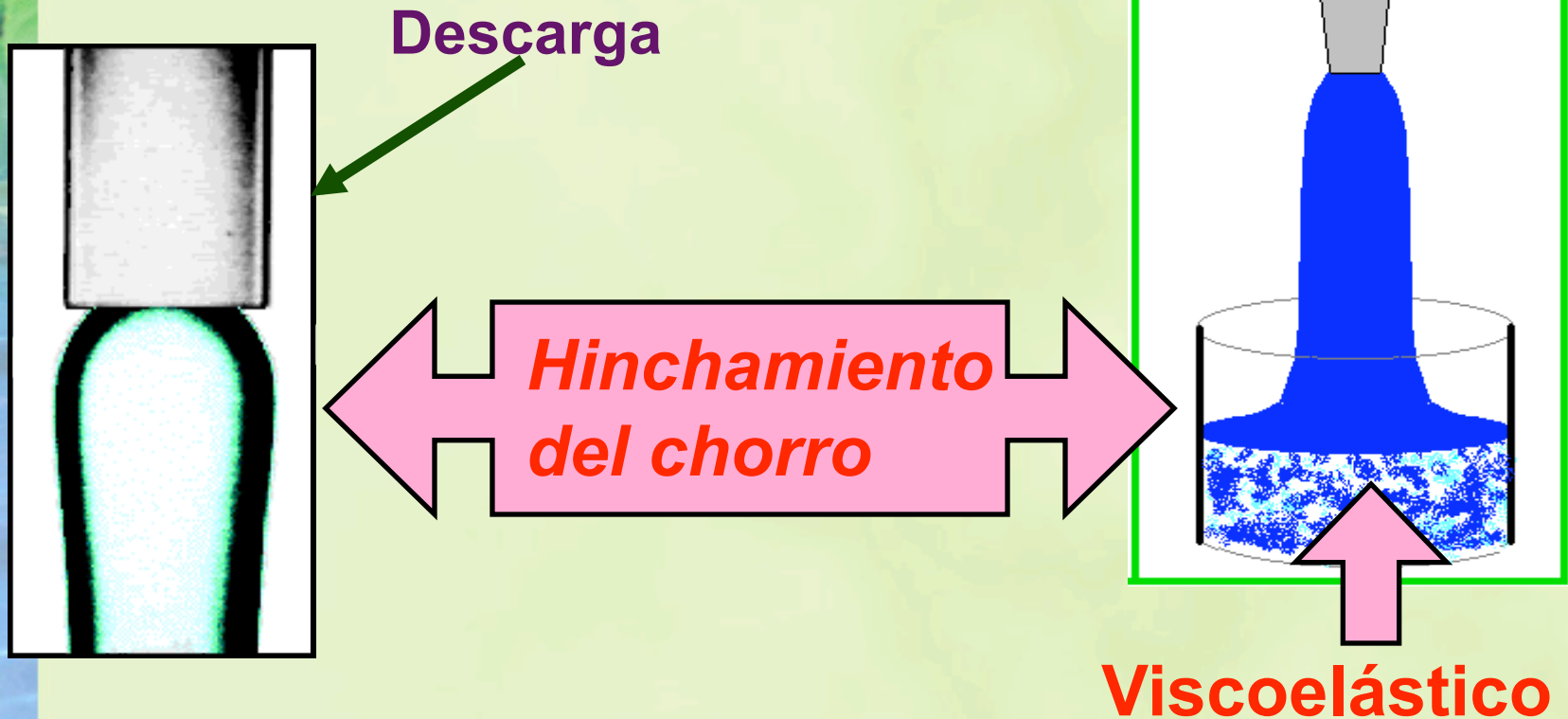


No  
viscoelástico



# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

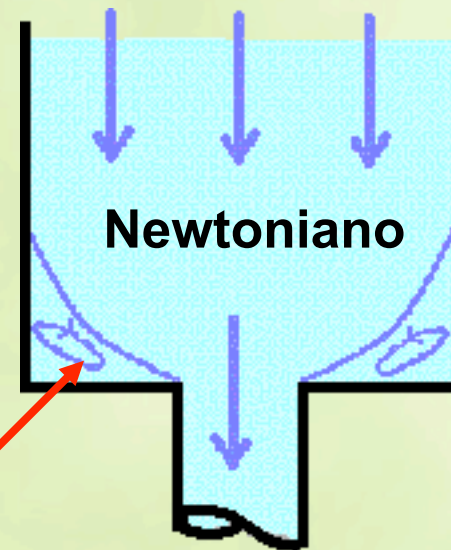
## ✿ Viscoelásticos





# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

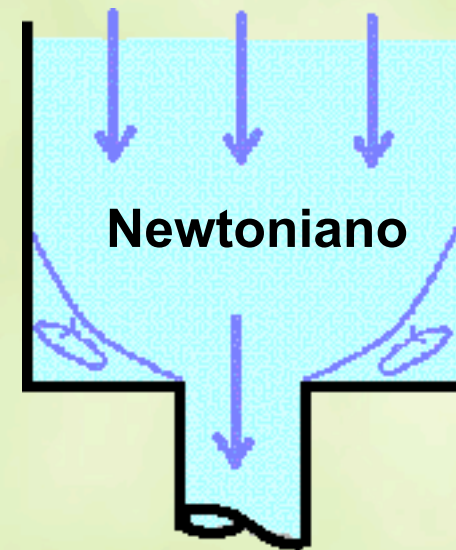
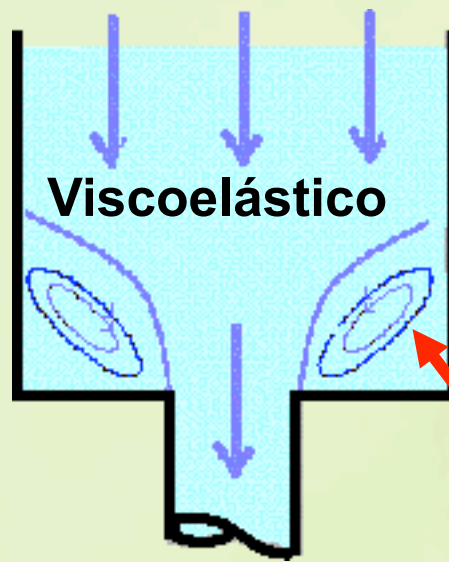
✿ No viscoelástico



vórtices

# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

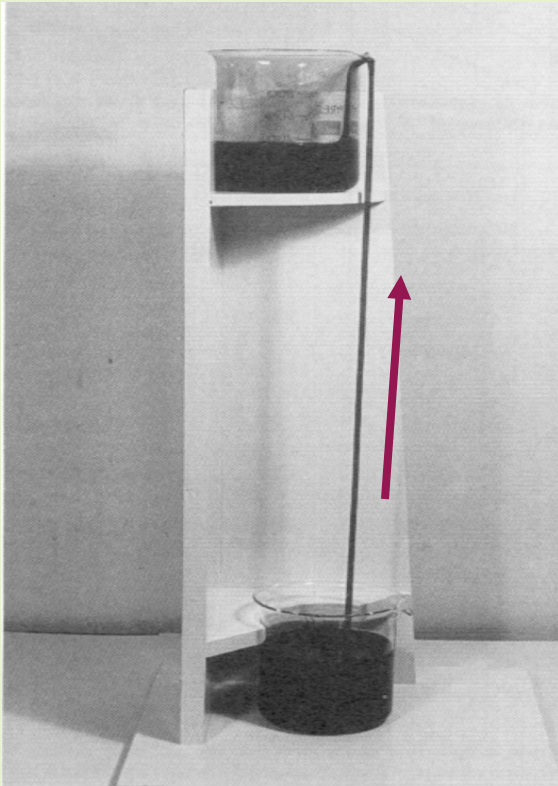
## ✿ Viscoelástico



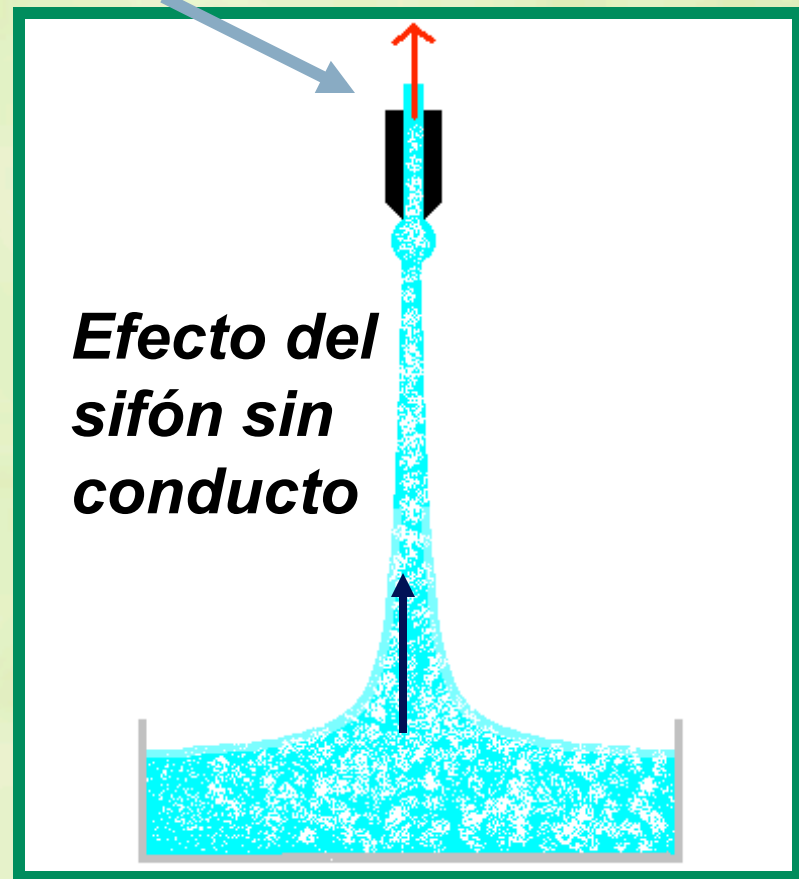
Aumento tamaño de los vórtices

# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## ✿ Viscoelástico

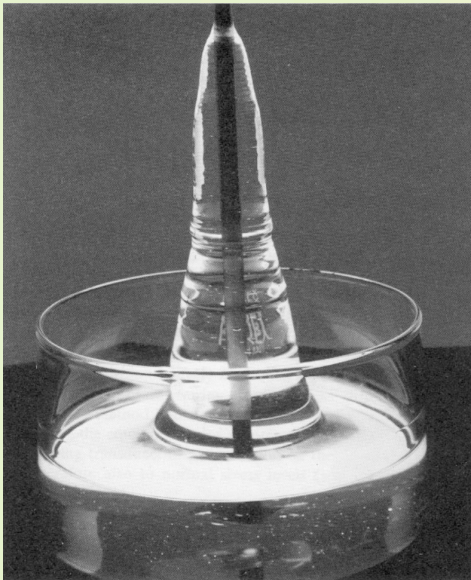


Succión



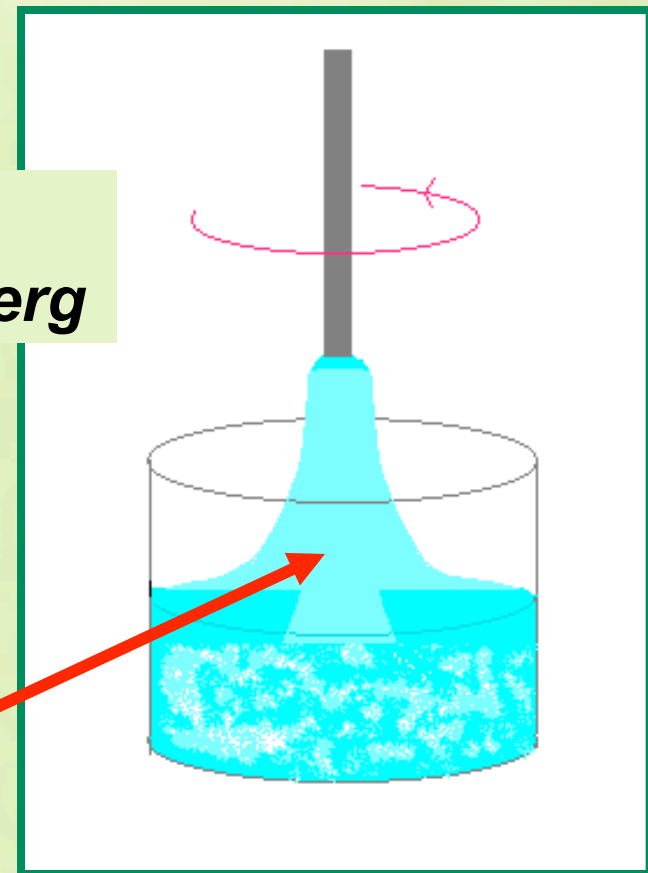
# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## ✿ Viscoelástico



*Efecto  
Weissenberg*

El vórtice se invierte





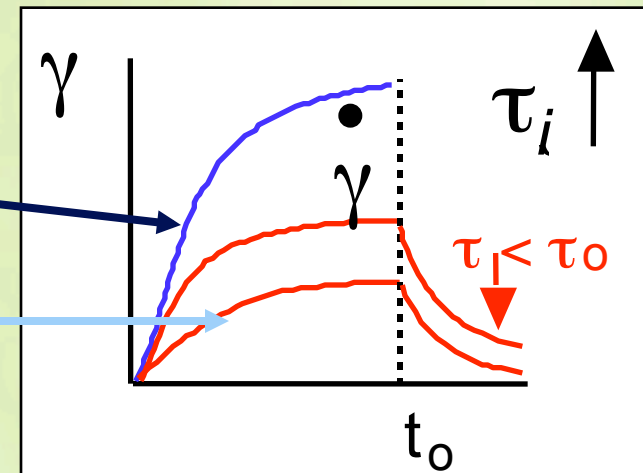
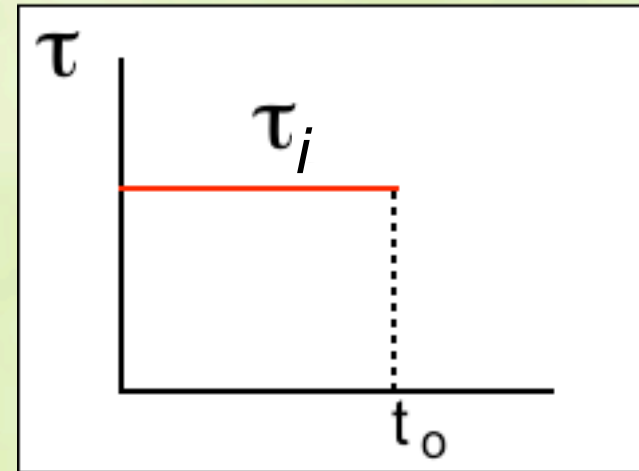
# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## ✿ Viscoelástico

*Prueba de “reptancia”:  
se aplica un esfuerzo conocido ( $\tau_i$ ) y se mide  
la deformación  $\gamma$*

$\tau_i > \tau_0$ : Flujo viscoso

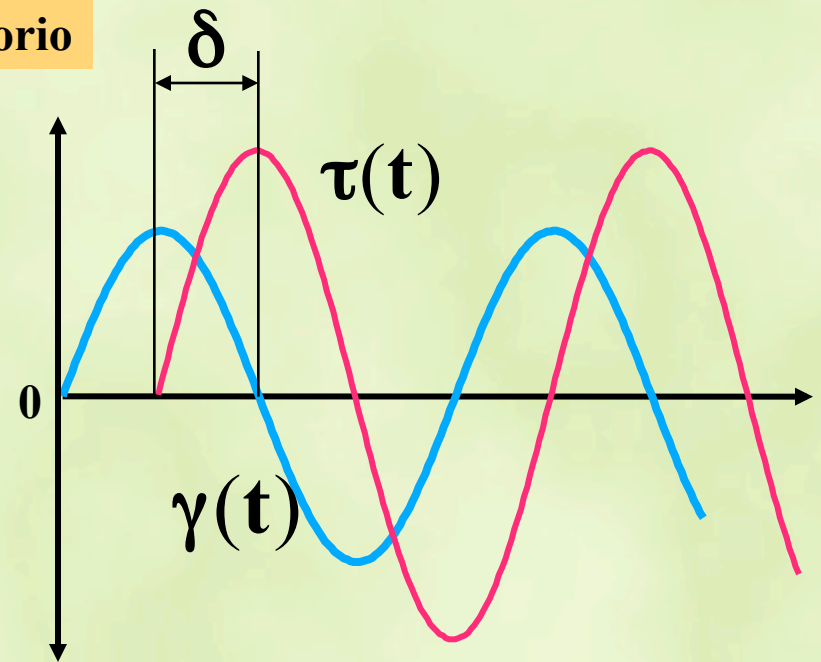
$\tau_i < \tau_0$ : Elástico



## CIZALLAMIENTO OSCILATORIO de baja amplitud: ensayo dinámico oscilatorio

Señal :  $\begin{cases} \gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \\ \dot{\gamma}(t) = \dot{\gamma}_0 \cos(\omega t) \end{cases}$

Respuesta :  $\tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t + \delta)$



$$\tau(t) = \gamma_0 [G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t]$$

$$\tau(t) = iG^* \gamma_0$$

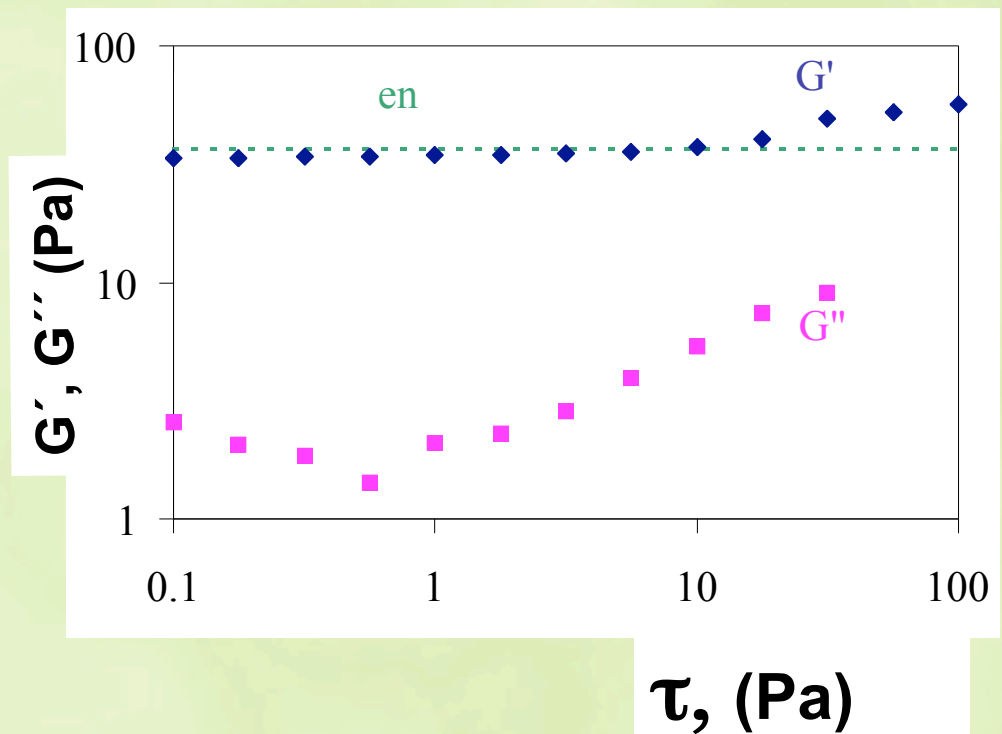
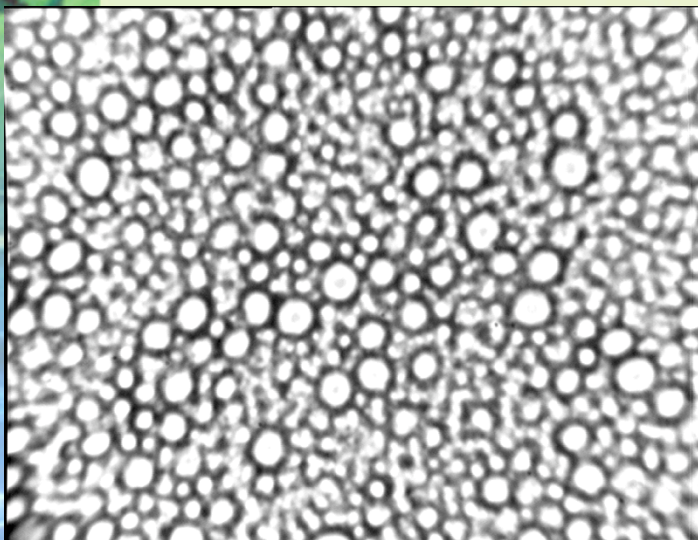
$$G^* = G' + iG''$$

Módulo complejo    Módulo elástico    Módulo viscoso



## Emulsión concentrada viscoelástica - comportamiento en ensayo dinámico oscilatorio

70% peso aceite Carnatio  
3% peso Tween 80  
27% peso H<sub>2</sub>O  
 $a_{32} \sim 4 \mu\text{m}$





# Modelos reológicos

✿ **Los más sencillos...**

# Modelos reológicos

## ✿ Ley de potencia

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

Muy utilizado en la mayoría de las aplicaciones prácticas.

**k: índice de consistencia**

**n: índice de comportamiento**

**n > 1: Reoespesante**

**n < 1: Reofluidizante**

**n = 1: Newtoniano**

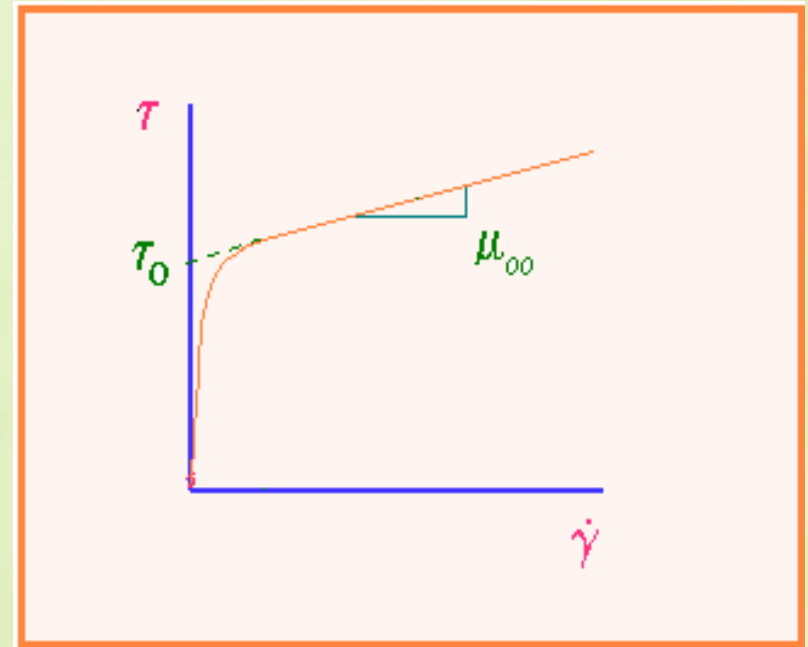
# Modelos reológicos

## ✿ Modelo de Bingham (viscoplásticos)

$$\tau = \tau_0 + \mu_{\infty} \dot{\gamma}$$

$\tau_0$  : esfuerzo umbral

$\mu_{\infty}$  : viscosidad plástica

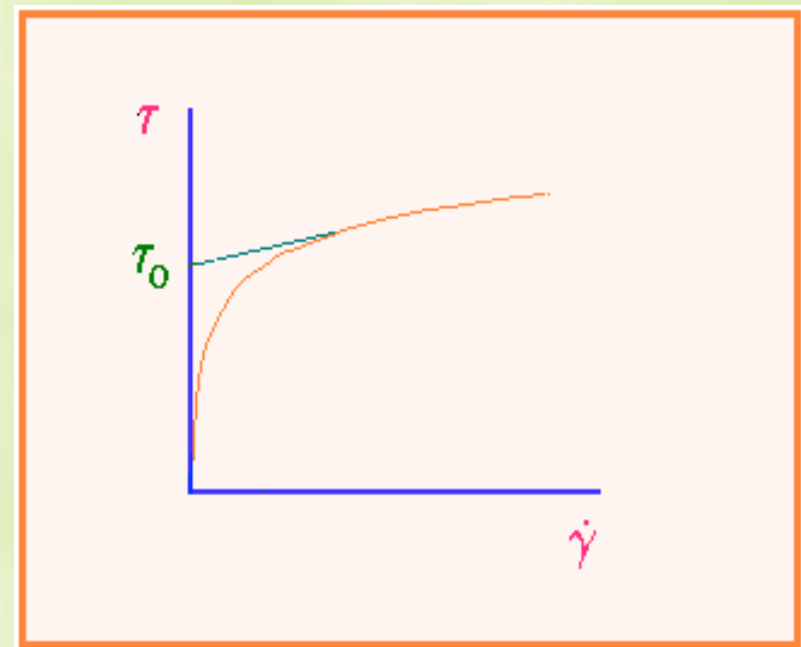


# Modelos reológicos

## ✿ Modelo de Herschel-Bulkley (viscoplásticos)

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$$

Puede aplicarse a datos  
tomados a bajas tasas de  
corte



# Modelos reológicos

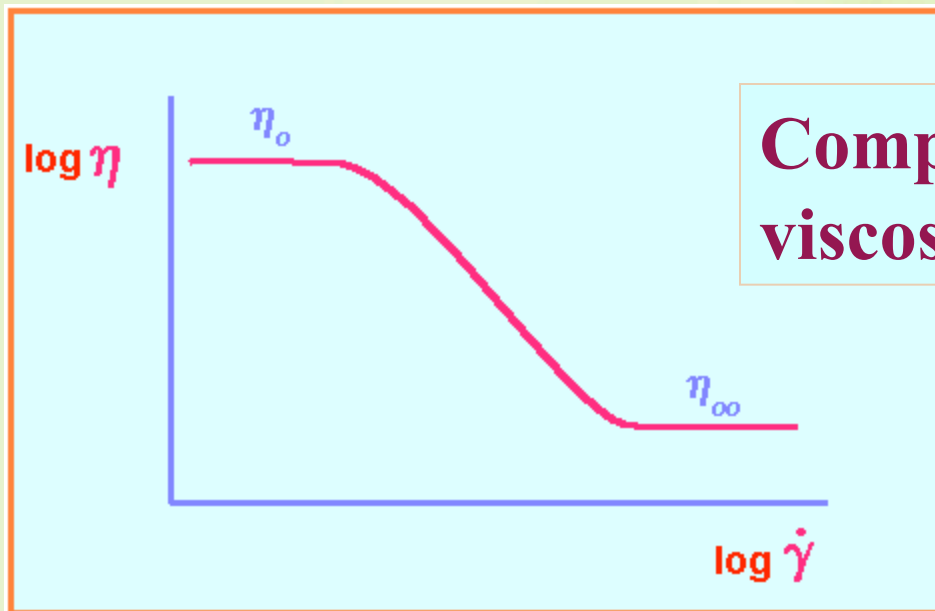
## ✿ Modelo de Casson (viscoplásticos)

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu_{\infty} \dot{\gamma}}$$



# Modelos reológicos

- ✿ Modelo general para fluidos reofluidizantes



**Comportamiento de  
viscosidad estructural**

# Modelos reológicos

## ✿ Modelo de Carreau

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + \frac{\eta_o - \eta_{\infty}}{\left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2\right]^p}$$

# Modelos reológicos

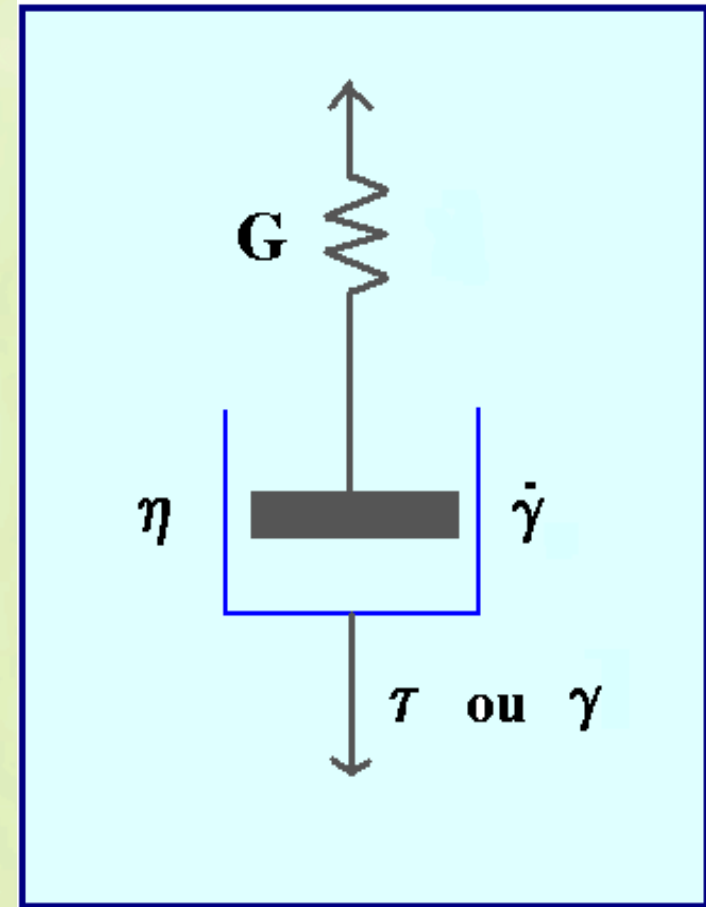
## ✿ Modelo de Maxwell

$$\tau + \lambda \frac{d\tau}{dt} = G\lambda \dot{\gamma} + \eta \dot{\gamma}$$

$$G^* = \frac{i \omega \lambda G}{1 + i \omega \lambda}$$

$$G' = \frac{\omega^2 \lambda^2 G}{1 + \omega^2 \lambda^2}$$

$$G'' = \frac{\omega \lambda G}{1 + \omega^2 \lambda^2}$$



$\lambda$ : Tiempo de relajación



## **Utilidad de la Reología**

**Prever el comportamiento  
durante el manejo del material:**

- **Viscosidad**
- **Bombeo, vertido, drenaje,  
esparcido, mezclado**
- **Dimensionamiento de equipos**

# Bombeo

Cálculo pérdidas de carga:

$$\frac{\Delta P}{L} = 5,33 \frac{\tau_o}{D} + 32\eta \frac{v^2}{D}$$

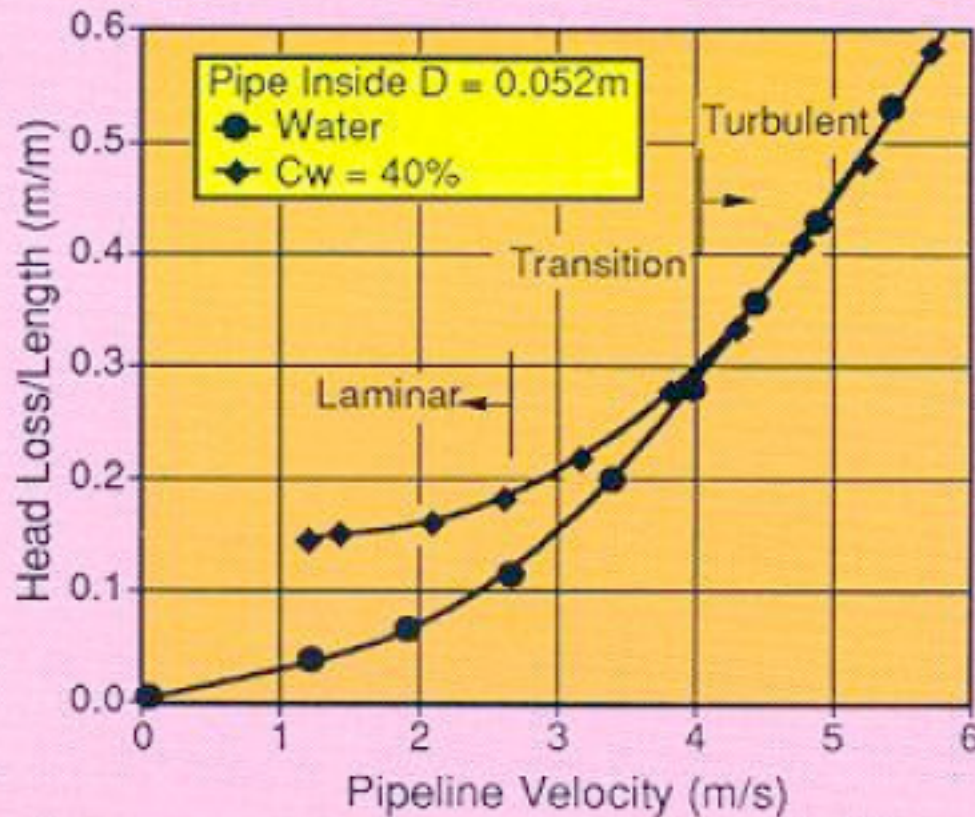
$\tau_o$ : esfuerzo umbral

$\eta$ : viscosidad aparente

$v$ : velocidad media

$L, D$ : longitud y diámetro interno tubo.

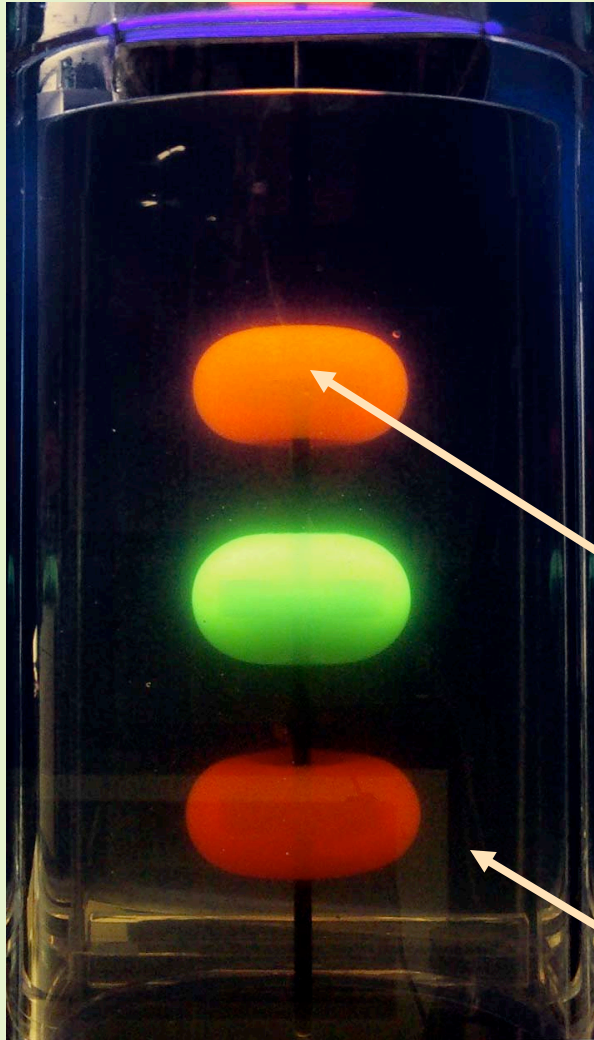
La eficiencia de bombas centrífugas tiende a reducirse cuando se manejan fluidos no-Newtonianos



Comparación de pérdidas de carga ( $\Delta P/\rho g L$ ) entre agua y lodo de uranio



# Mezclado



***Solución al 0,1 % de Carbopol.***

***Tres impulsores de tipo Rushton.***

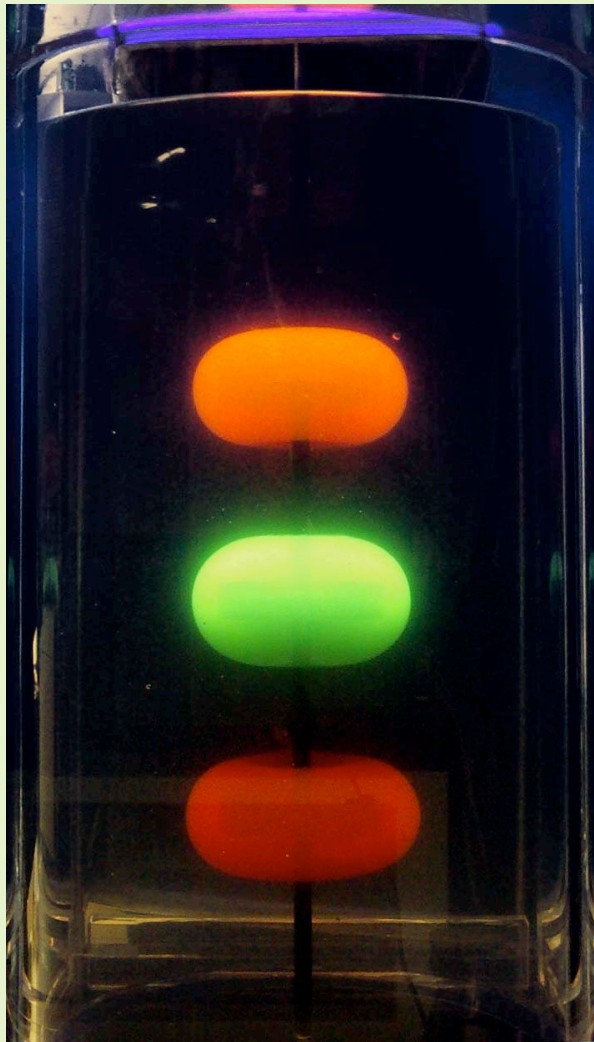


***Caverna: hay movimiento o flujo viscoso (Newtoniano)***

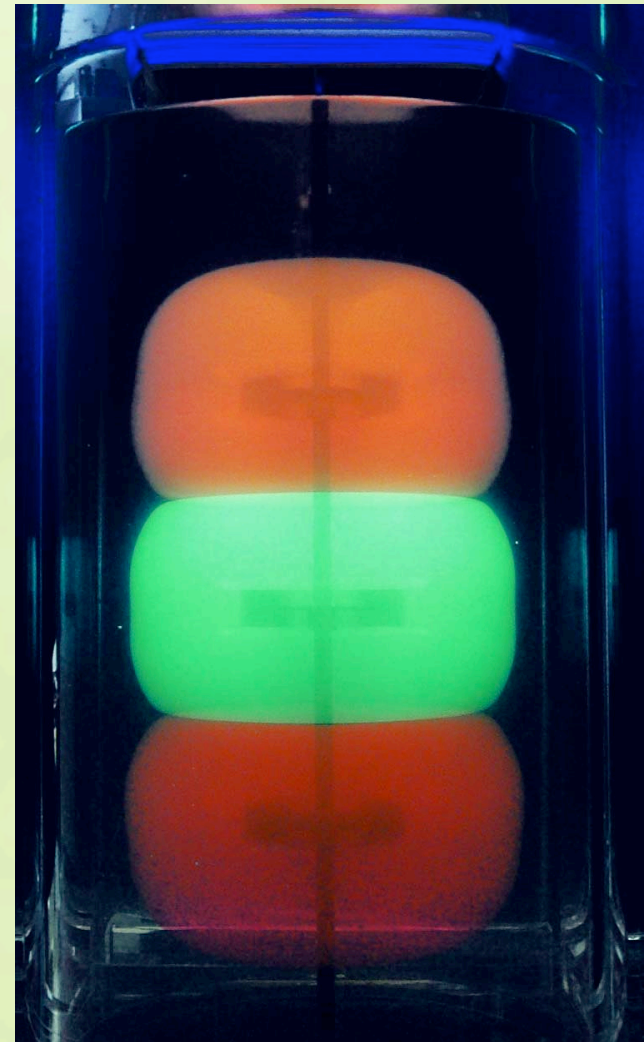
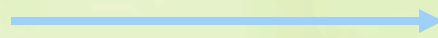
***Periferia: no hay movimiento (sólido)***

***100 rpm***





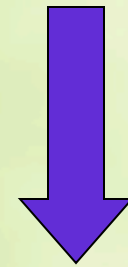
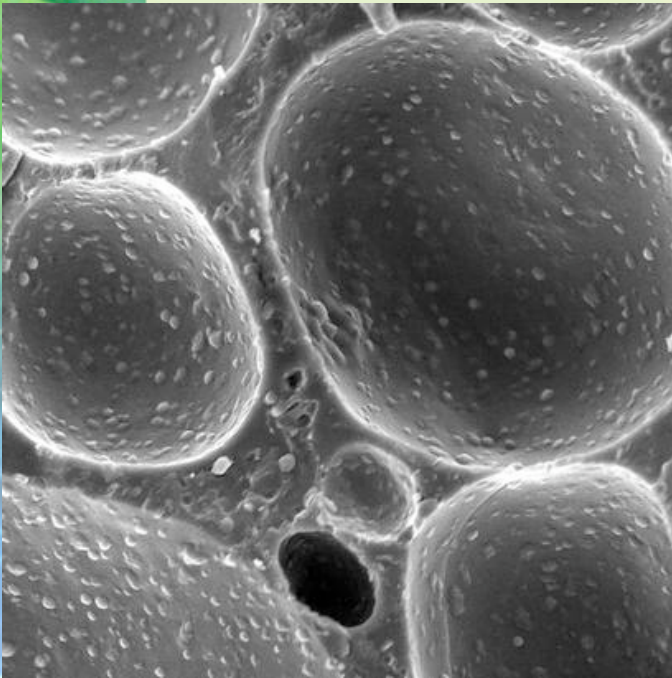
**100 rpm**



**250 rpm**

***Efecto de la velocidad de mezclado***


✓ Inferir la microestructura del material:



Herramienta de  
formulación

Helado

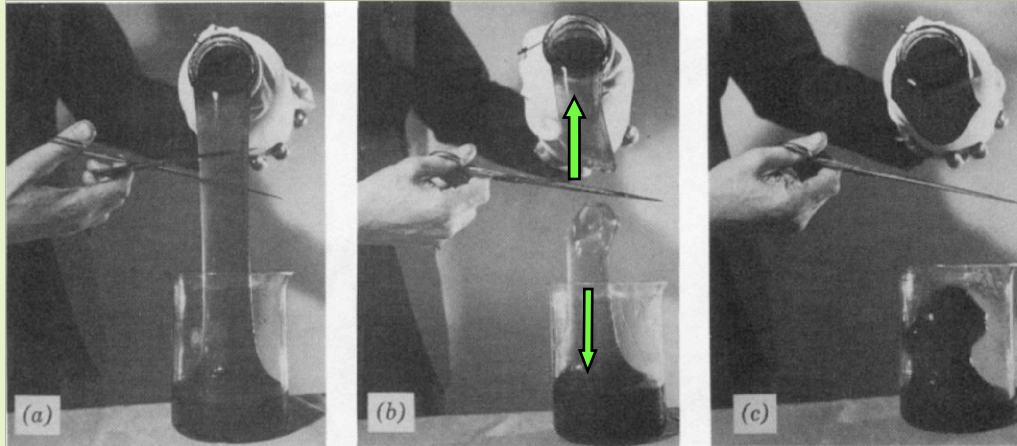
([www.ilw.agrl.ethz.ch](http://www.ilw.agrl.ethz.ch))



**¿Por qué  
interesarse por la  
microestructura?**

- ✓ **Velocidad de liberación de algún principio activo**
- ✓ **Comportamiento en tejidos: velocidad difusión**
- ✓ **Textura (sabor, sensación de piel)**
- ✓ **Capacidad de suspensión y estabilización**
- ✓ **Lubricación**
- ✓ **Recubrimiento de superficies**





**Experimento de Lodge (1964):  
7 % de dilaureato de aluminio en  
mezcla de decalin y m-cresol.**

**Este fenómeno  
produce  
problemas en  
llenado, drenaje,  
esparcimiento,  
medidores de  
flujo.**

**La microestructura puede producir  
comportamientos anómalos tales  
como el “recoil” (ejemplo, cola de  
zapatero).**