



# *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**

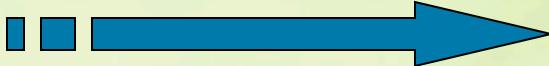
**Capítulo 2: *Propiedades físicas de los sistemas dispersos***

**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



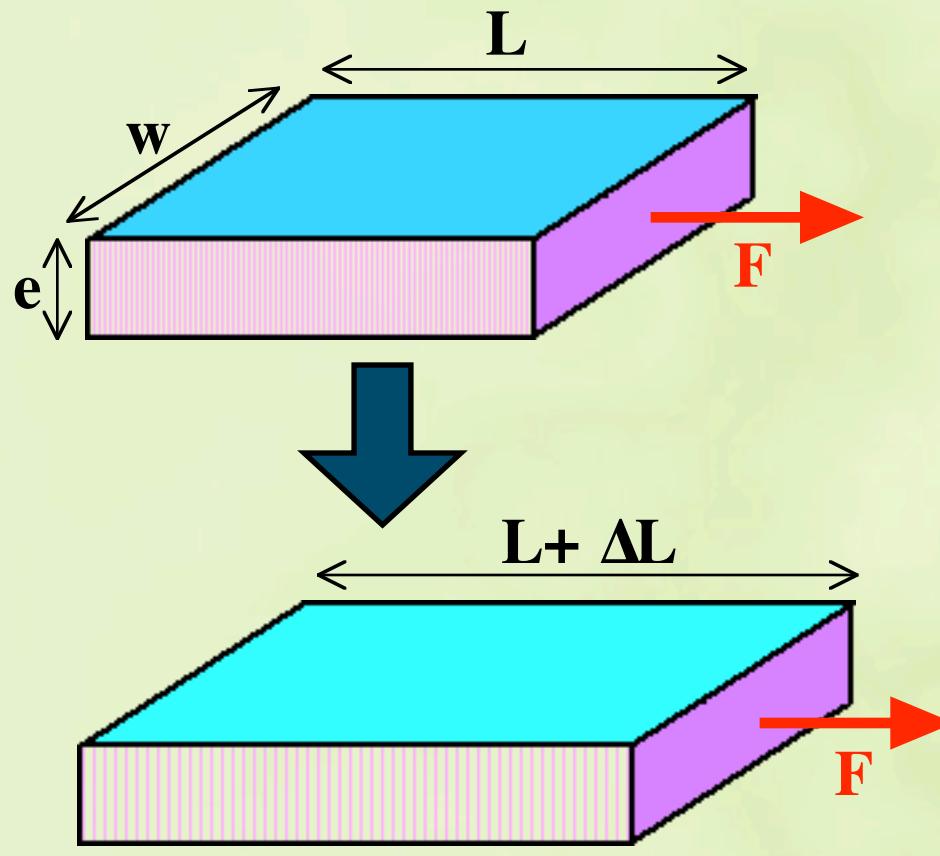
## **Comportamiento de los materiales:**

- **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)

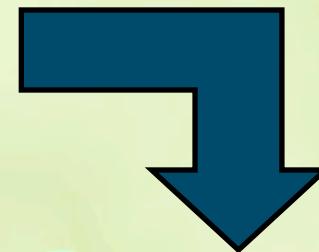


Ley de Hooke:

$$F = k \Delta L$$

$$F = k \Delta L$$

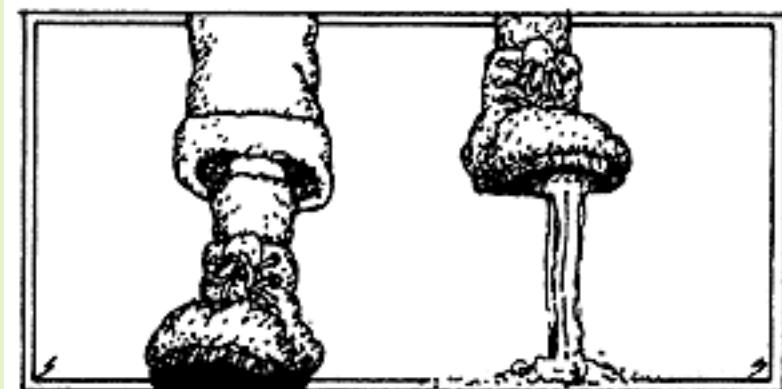
$$\left[ \frac{F}{ew} \right] \approx \left[ \frac{kL}{ew} \right] \left[ \frac{\Delta L}{L} \right]$$



$$\tau = G \gamma$$

- ✓  $\tau$  : 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.**

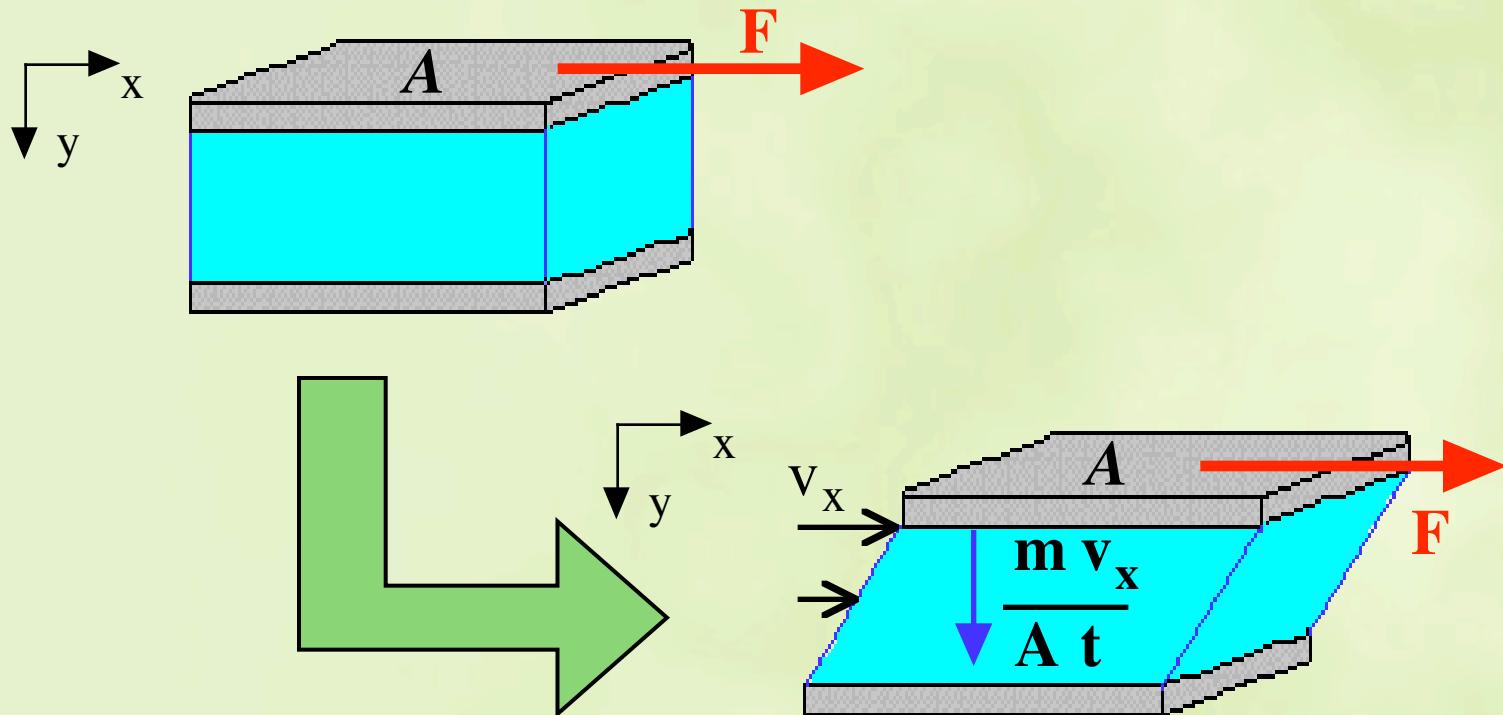


**Chicle!**

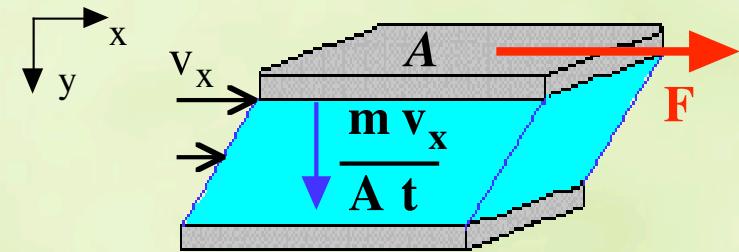


# *Fluido viscoso!*

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...*



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

Viscosidad  
dinámica ó  $\mu$

Tasa de corte ó  $\dot{\gamma}$



## Ley de Newton:

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

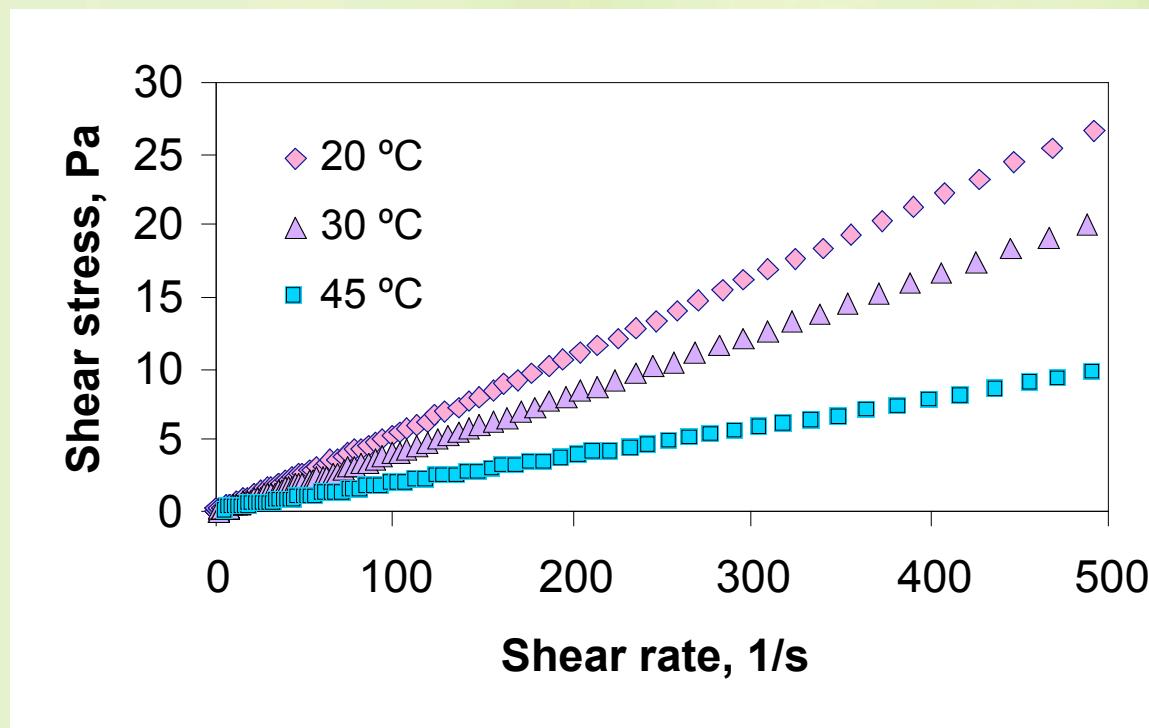
$$\mu = f(T, P)$$

T: temperatura

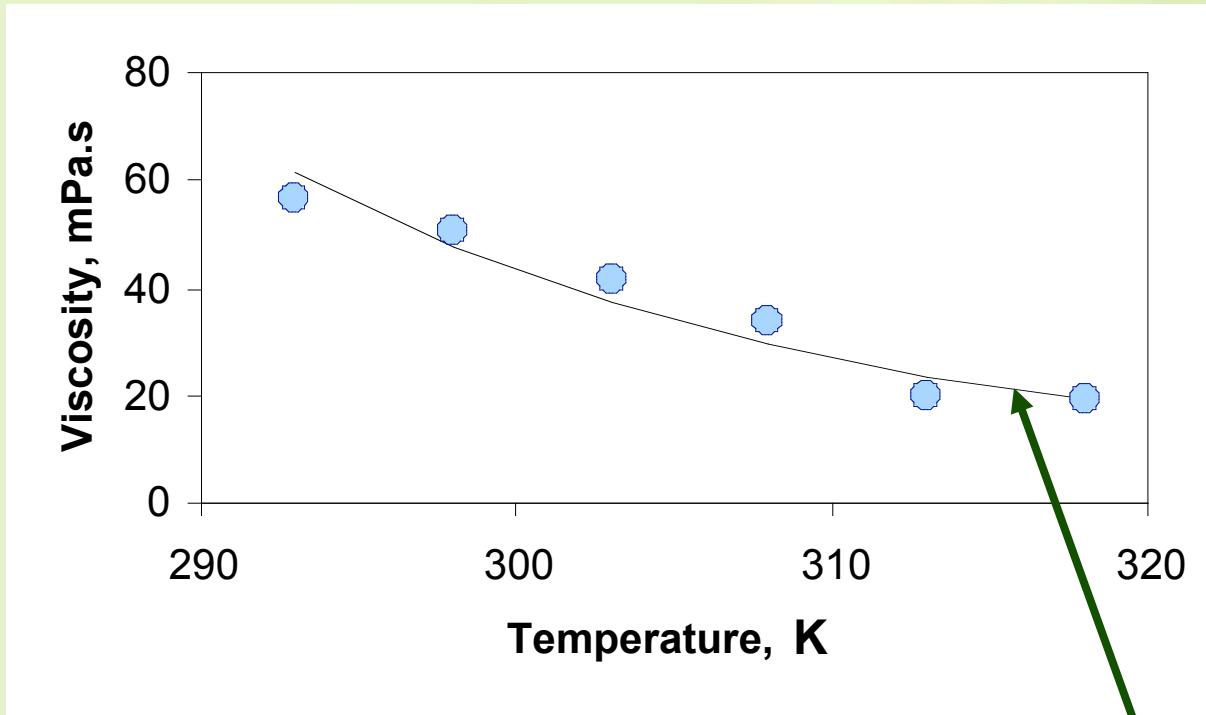
P: presión

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 dina s/cm<sup>2</sup> = 1 g/cm s = 1 Poise

En el sistema internacional SI: 1 N s/m<sup>2</sup> = 1 Pa s = 10 Poise

En la práctica se usa el centiPoise: 1 cP = 0,01 Poise = 1 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

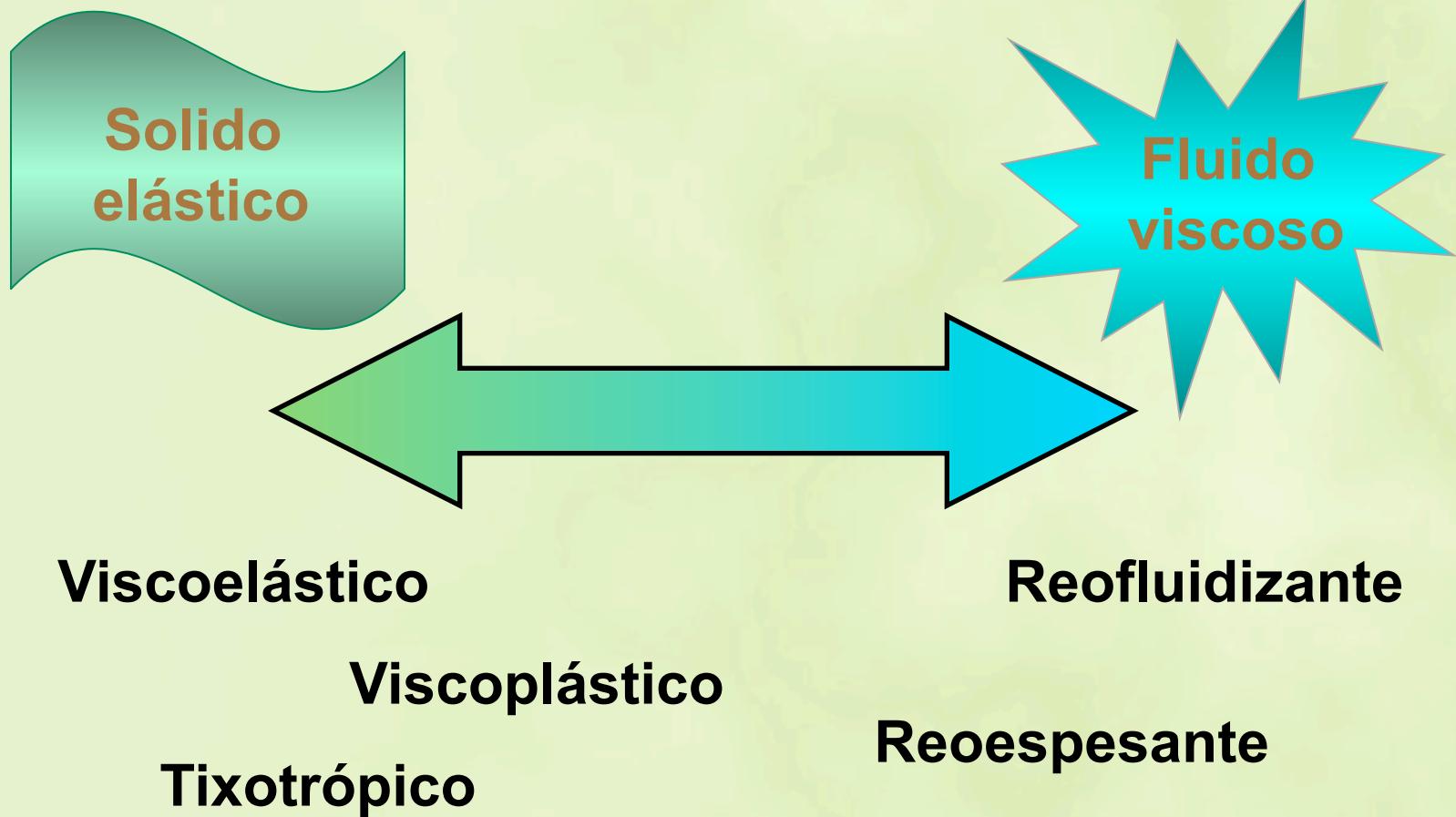
**caracterizados  
por su viscosidad**

**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**

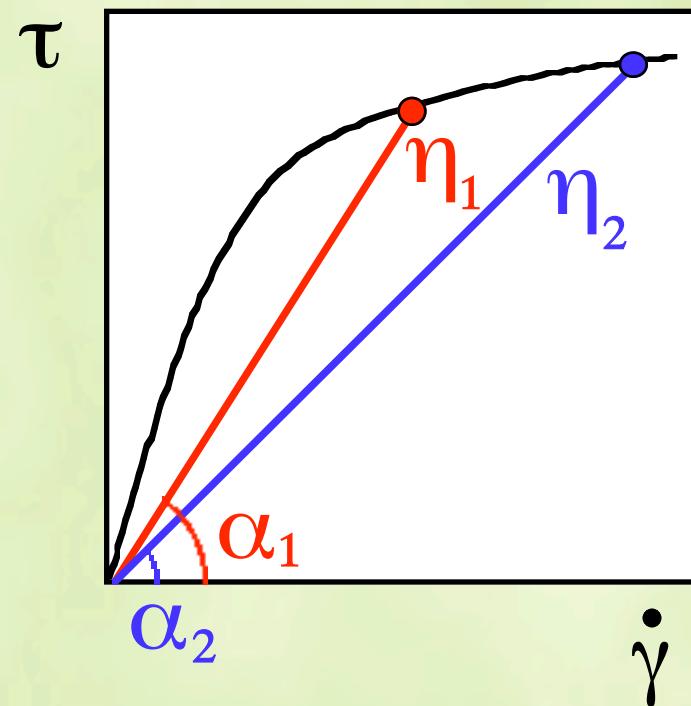
**representan**

# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

- \* **Reofluidizante (o seudoplástico)**

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

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

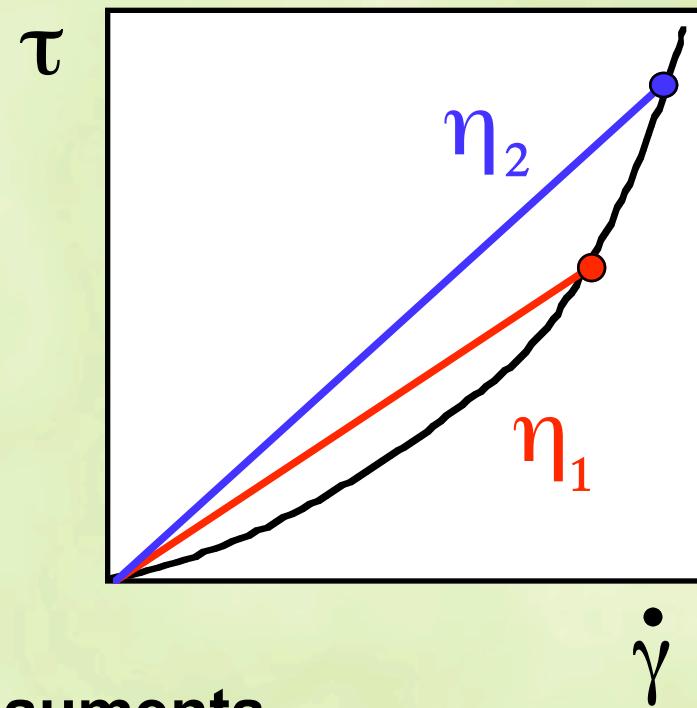


# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

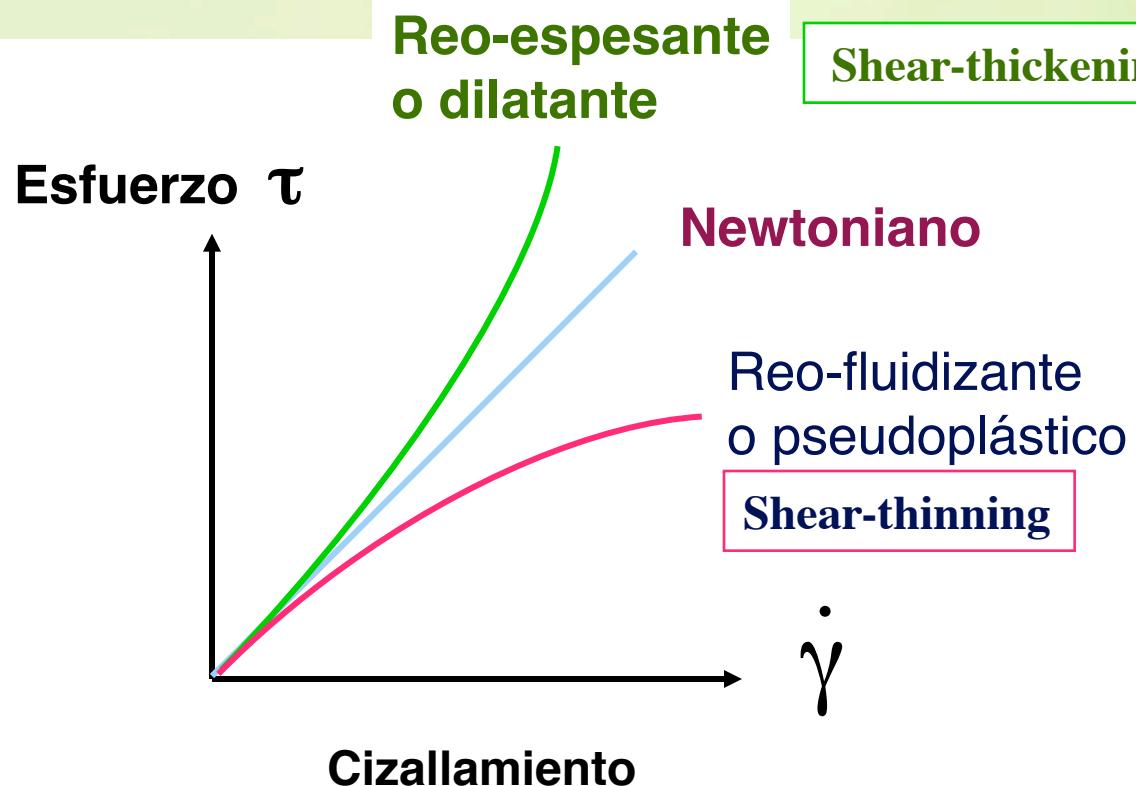
- ✳ **Reoespesante (o dilatante)**

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

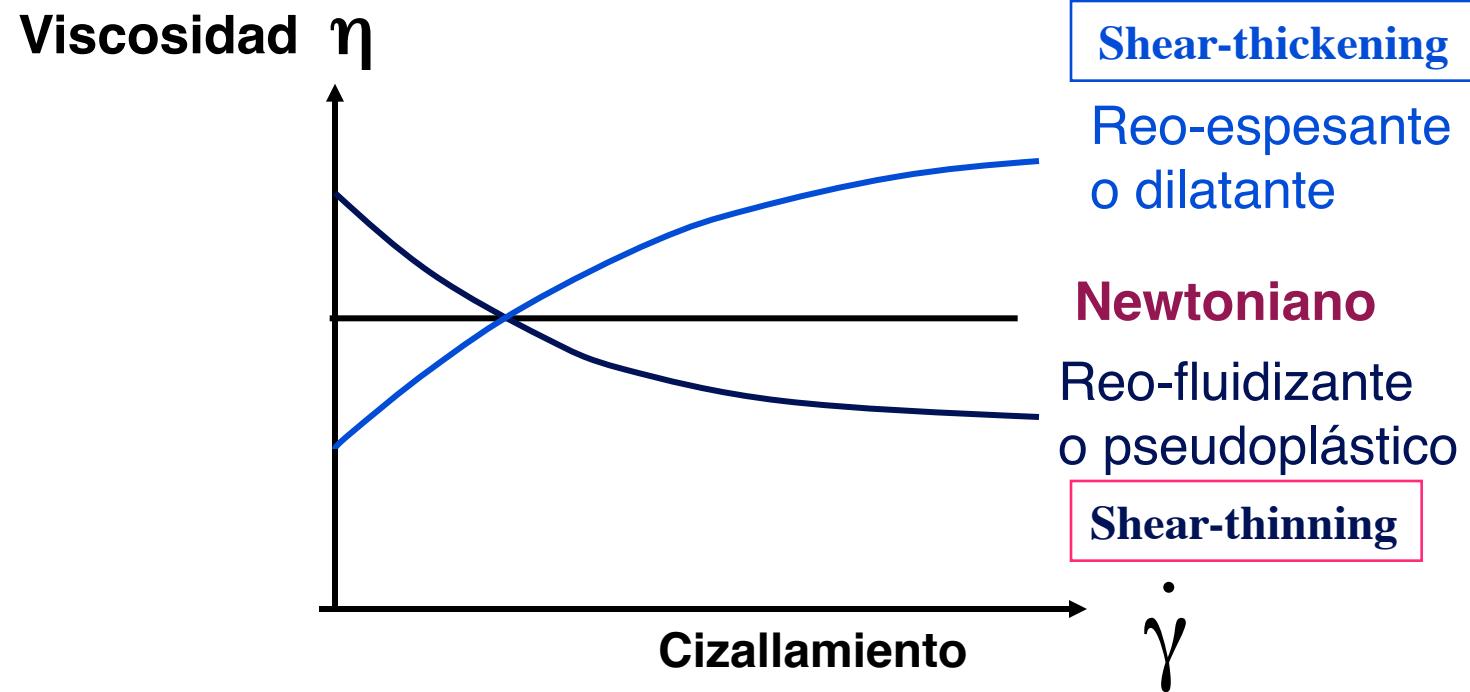
$\eta$  Viscosidad aparente aumenta cuando  $\tau$  o  $\dot{\gamma}$  aumenta



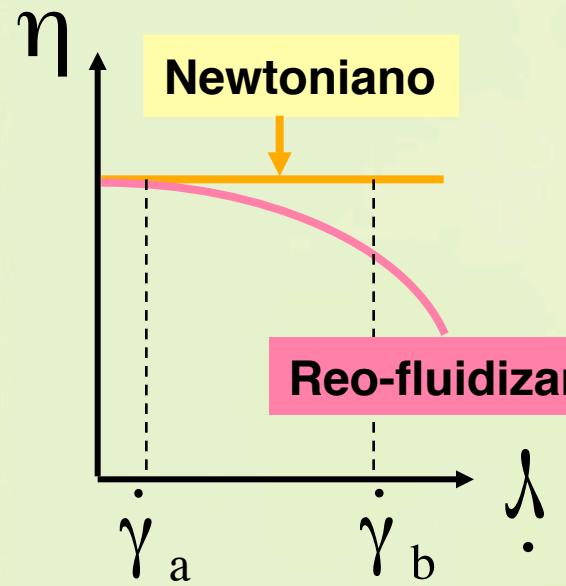
# Fluidos viscosos



# Fluidos viscosos

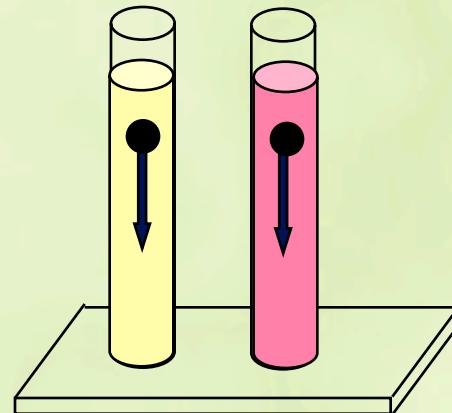


# Comportamiento reofluidizante



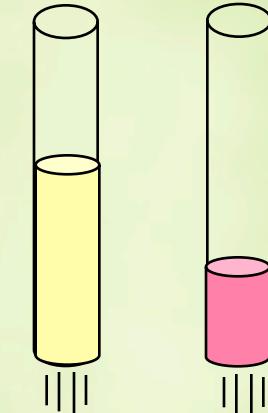
*Reograma*

$(\rho_s - \rho_f)$   
pequeño



$F$  gravedad  
 $\rightarrow$

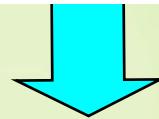
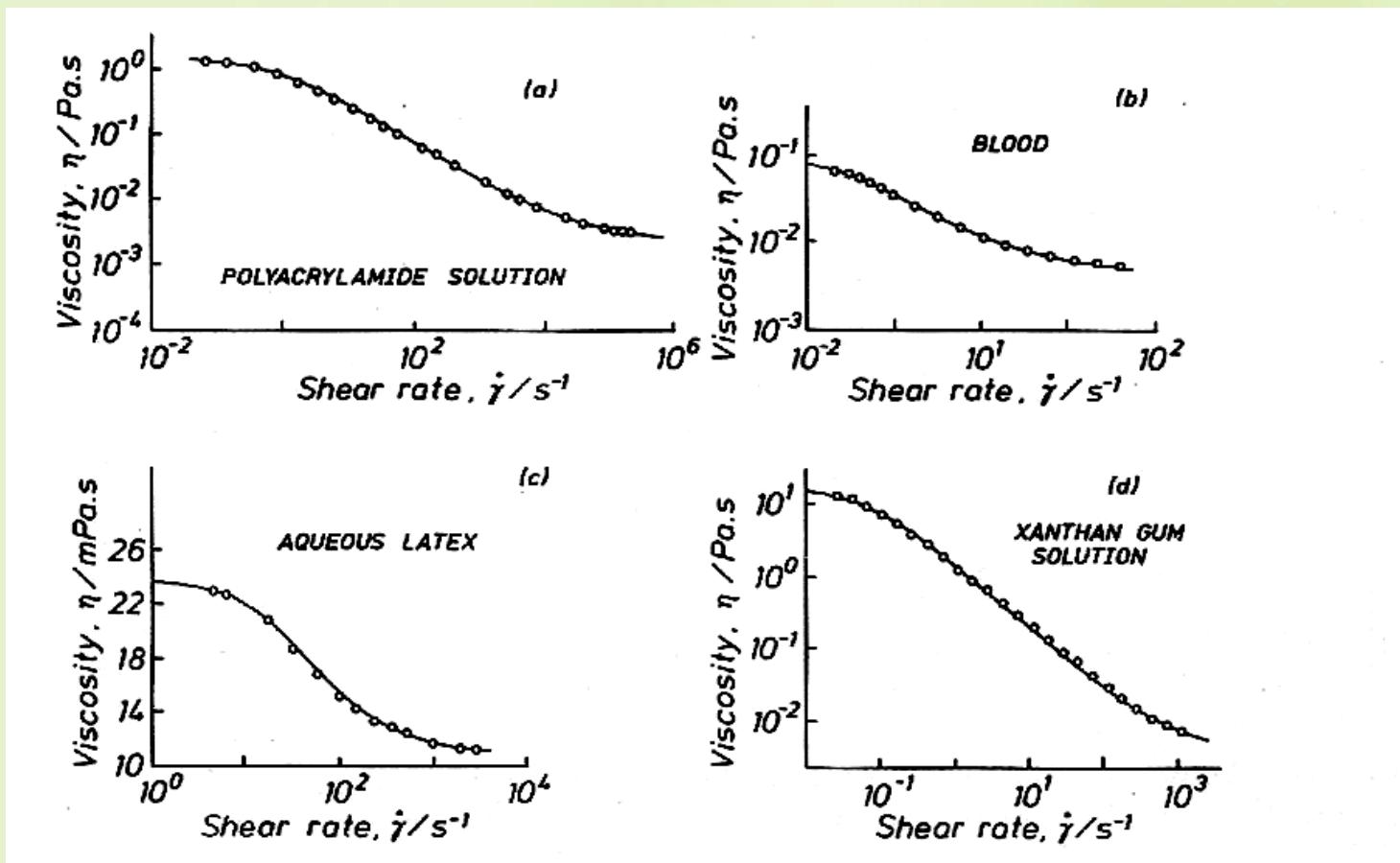
$\dot{\gamma}_b$



las esferas caen  
a la misma  
velocidad

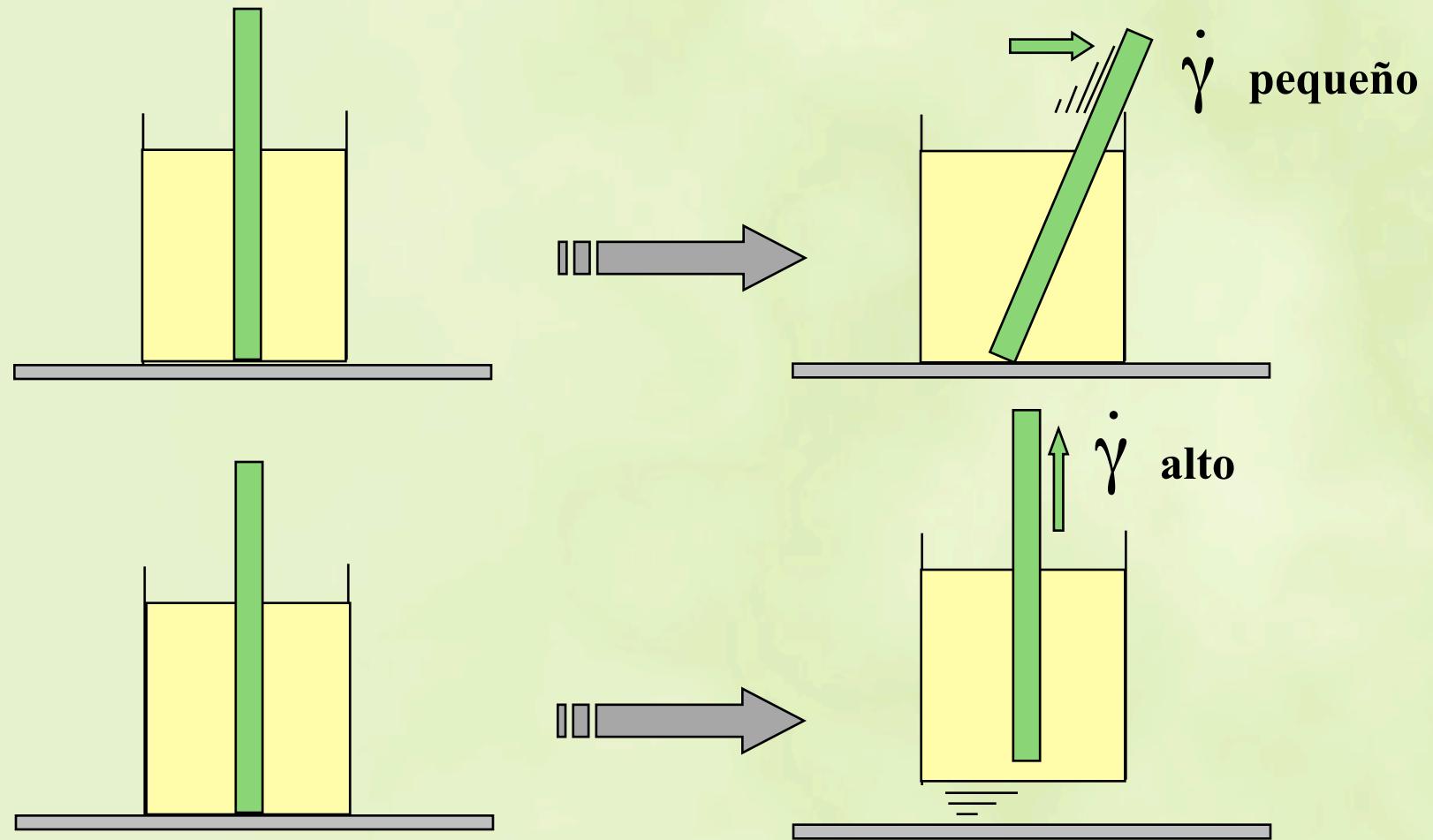
El líquido  
reo-fluidizante  
se derrama más  
rápidamente

# Comportamiento reo-fluidizante (escalas log-log)

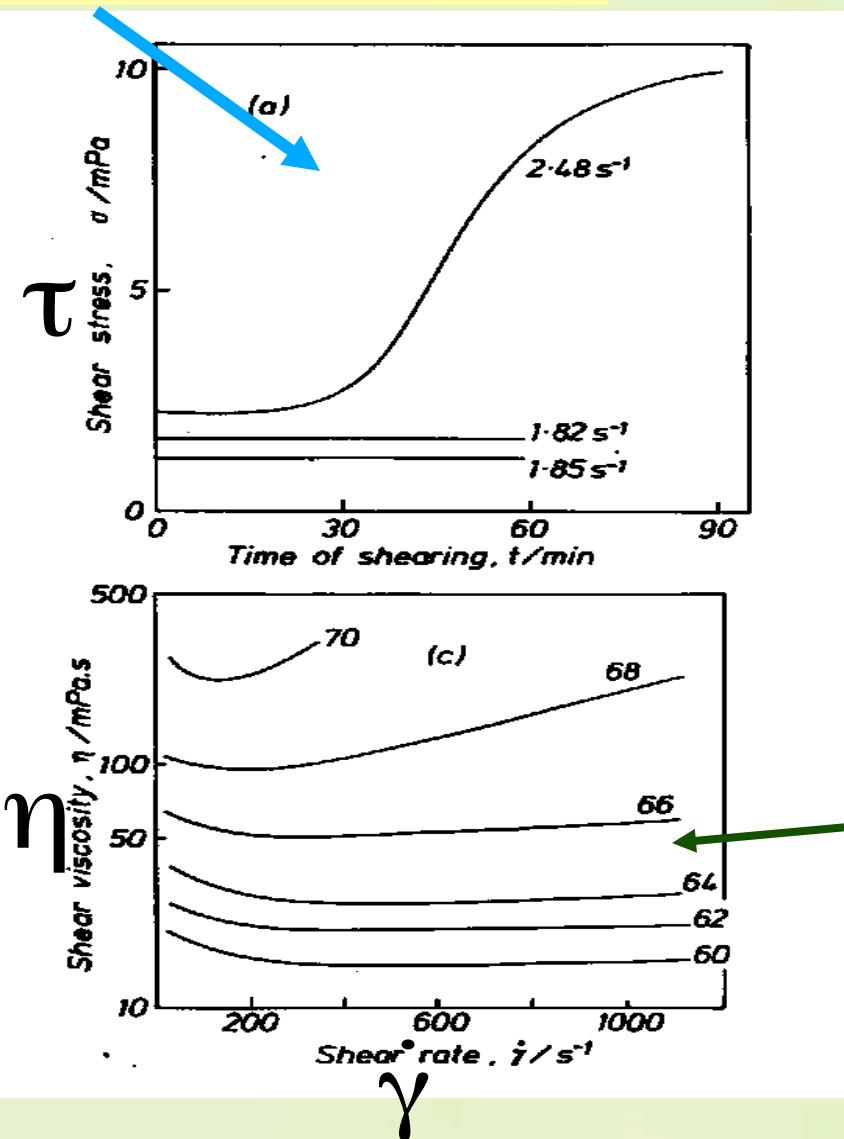


*Este es el comportamiento más usual*

# Comportamiento reoespesante



## Surfactantes en solución, efectos temporales



*¡arena mojada!*

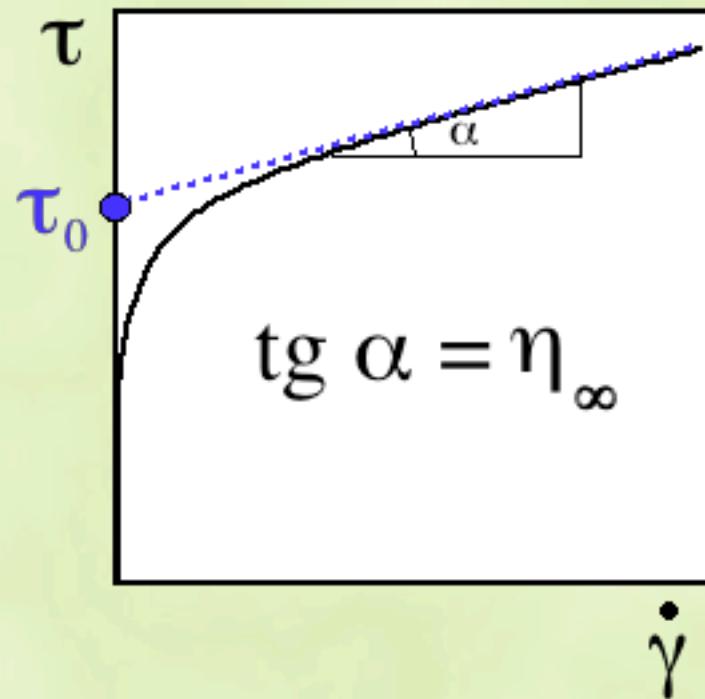
Suspensión de arcilla es  
más reoespeante cuando  $\phi$   
de sólido aumenta

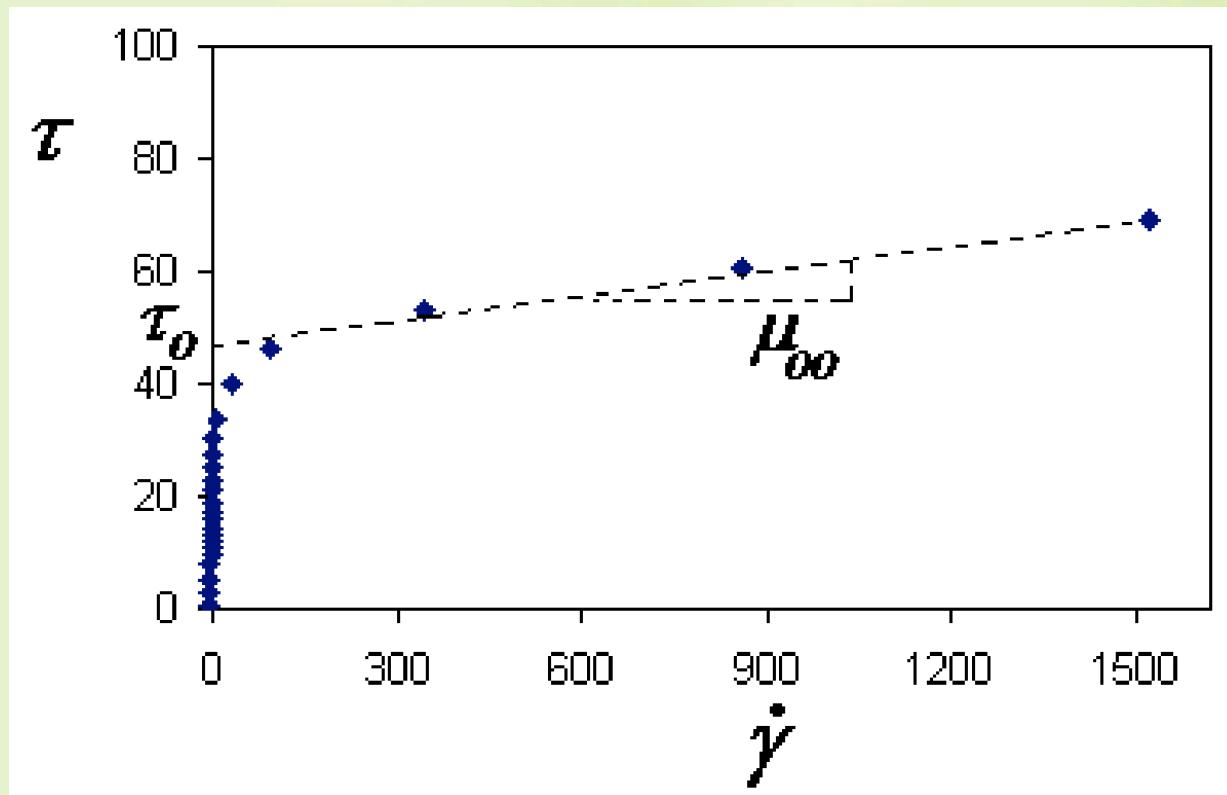
# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

- ✿ Viscoplástico (*fluido de Bingham*)

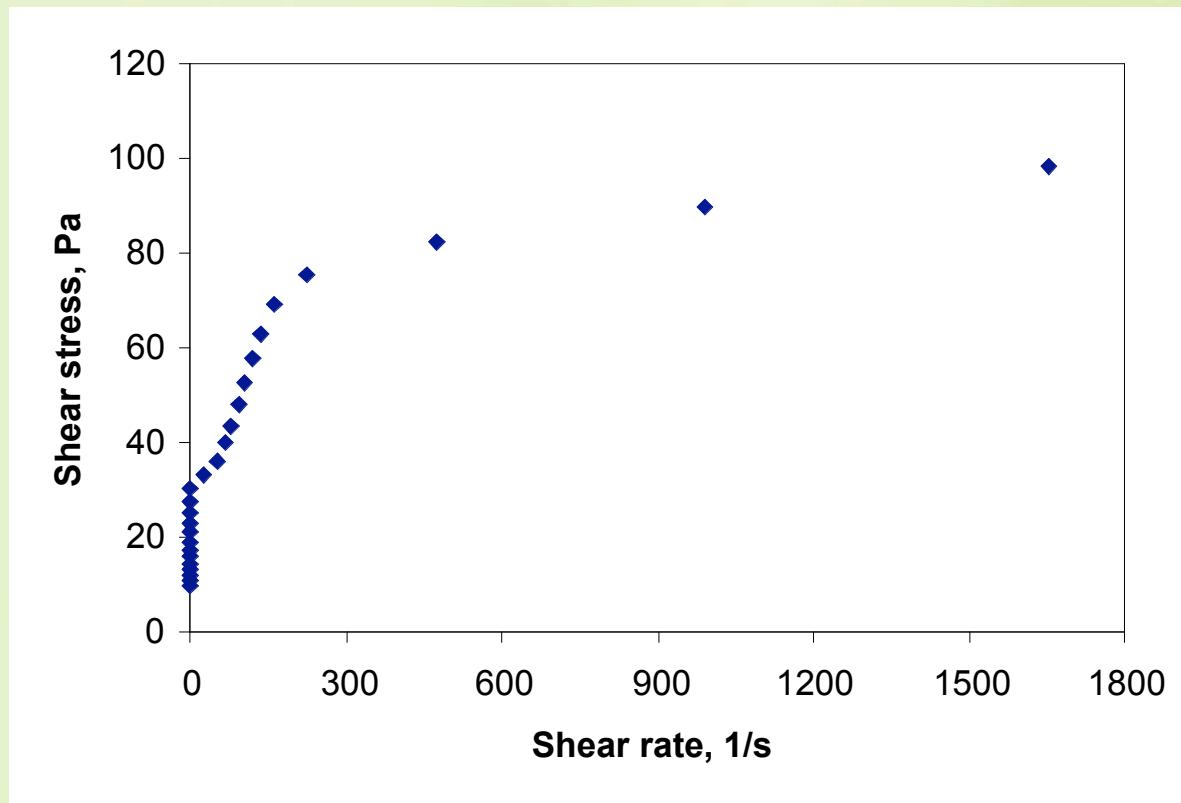
$\tau_0$  : esfuerzo umbral

$\eta_\infty$  : viscosidad límite





# *¡Comportamiento experimental!*



*Lodo de arcilla en solución de surfactante y polímero*

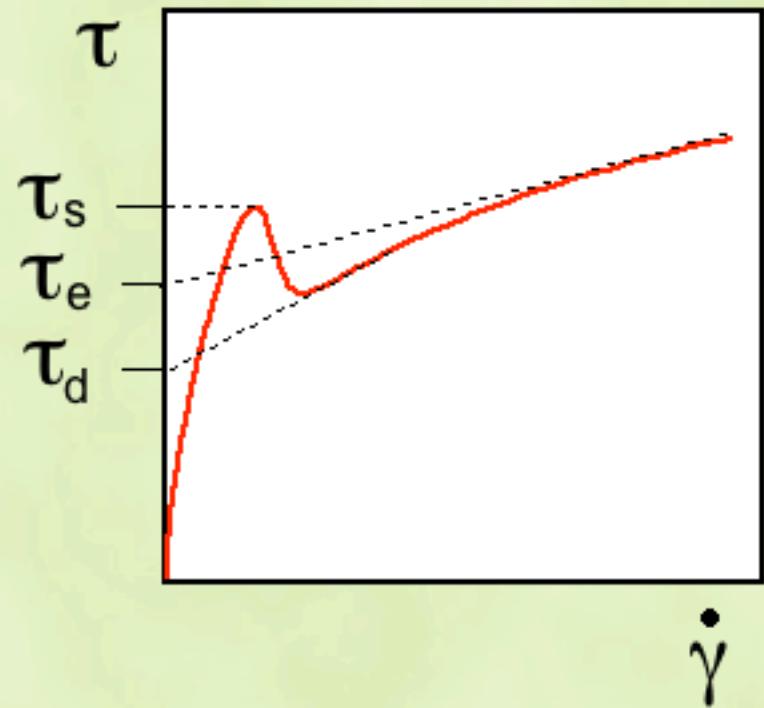


## ✳ Viscoplásticos complejos

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

$\tau_d$ : umbral dinámico

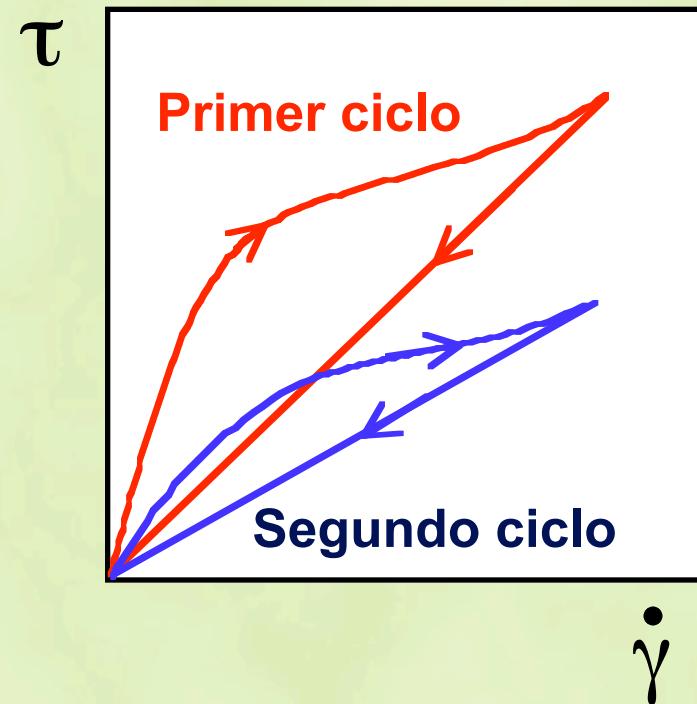
$\tau_e$ : umbral “ingenieril”

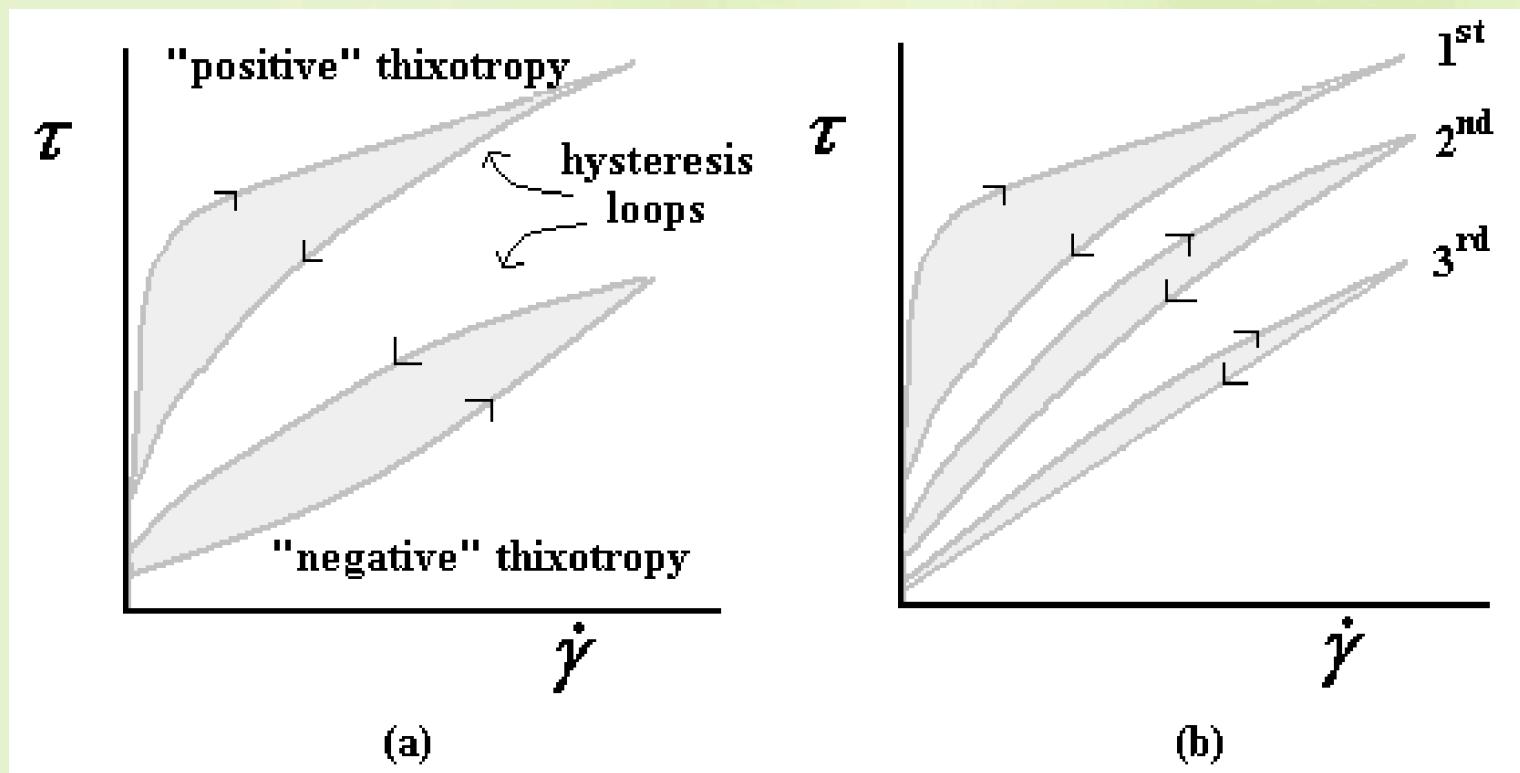


# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## ✿ Tixotrópicos

El comportamiento tixotrópico depende de la historia previa de cizallamiento.



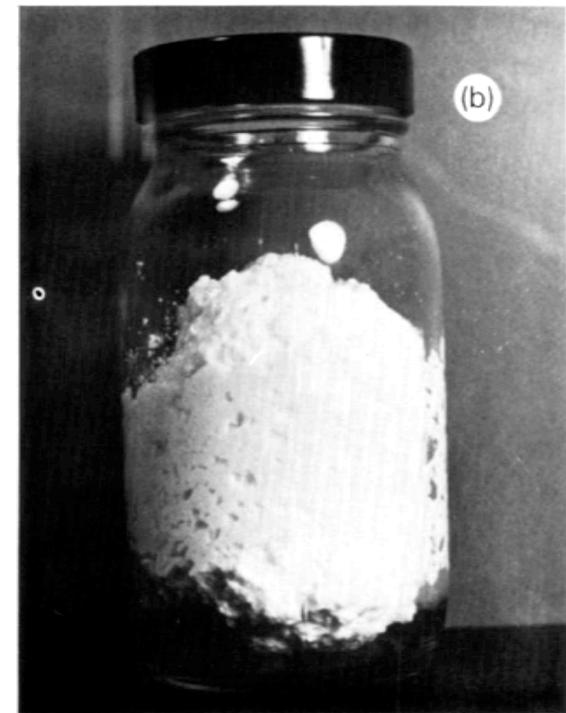
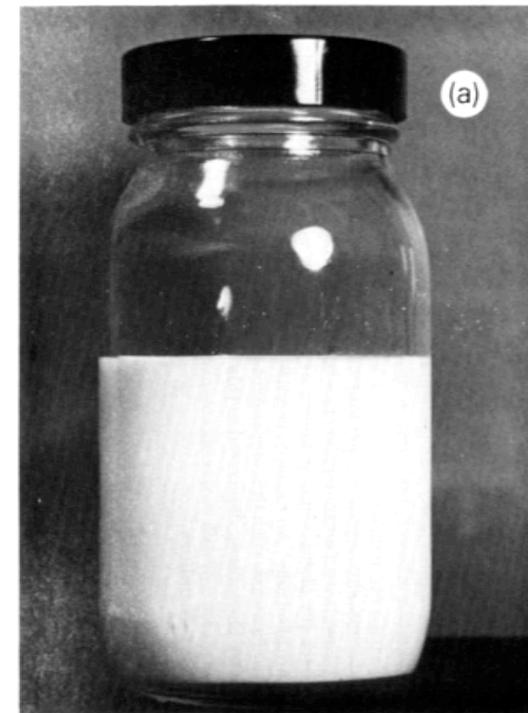


**Tixotropía reversible  
(comportamiento ideal)**

**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)

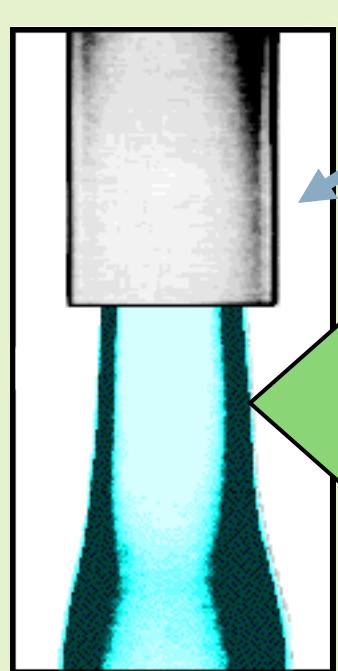
# Comportamientos reológicos no-Newtonianos



Fluidos  
viscoelásticos

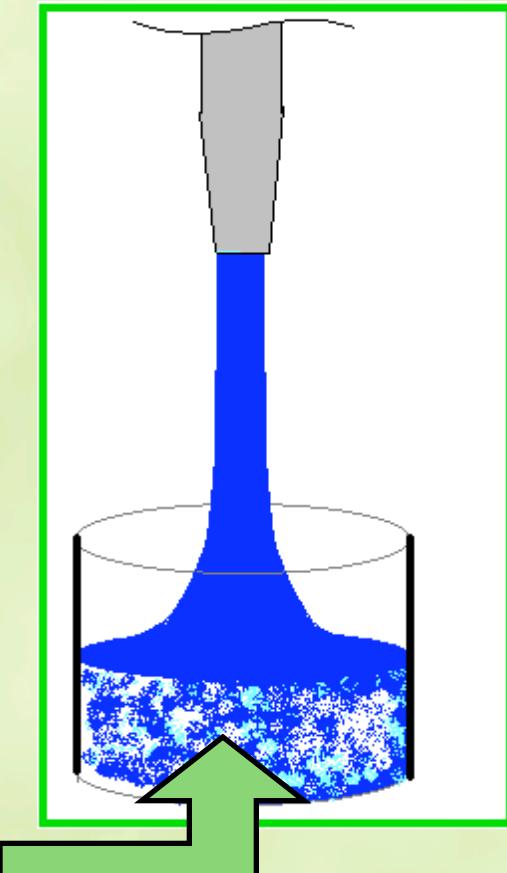
# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## \* No viscoelásticos



*No hay  
hinchamiento*

No  
viscoelástico



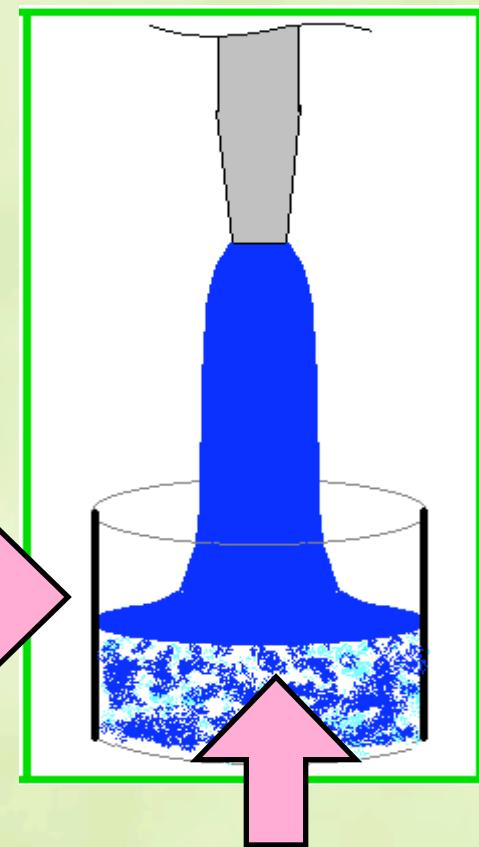
# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## \* Viscoelásticos



Descarga

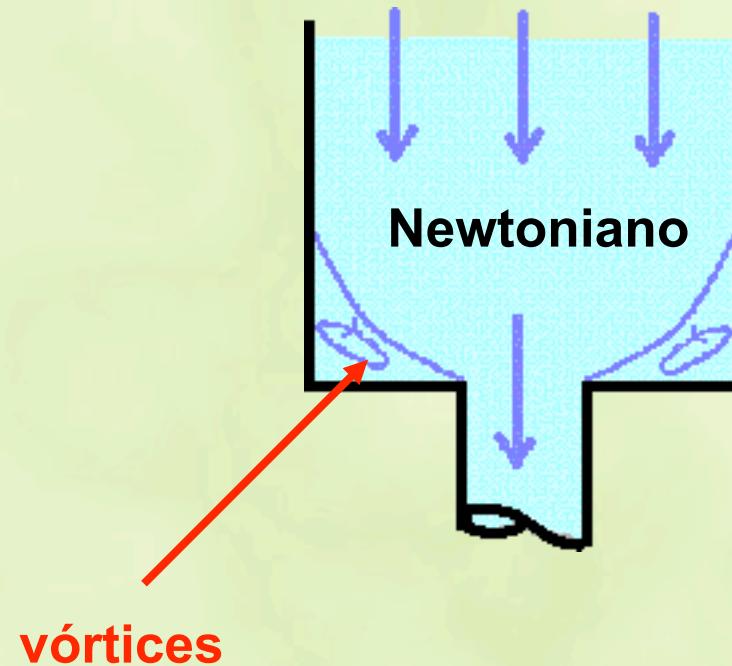
*Hinchamiento  
del chorro*



Viscoelástico

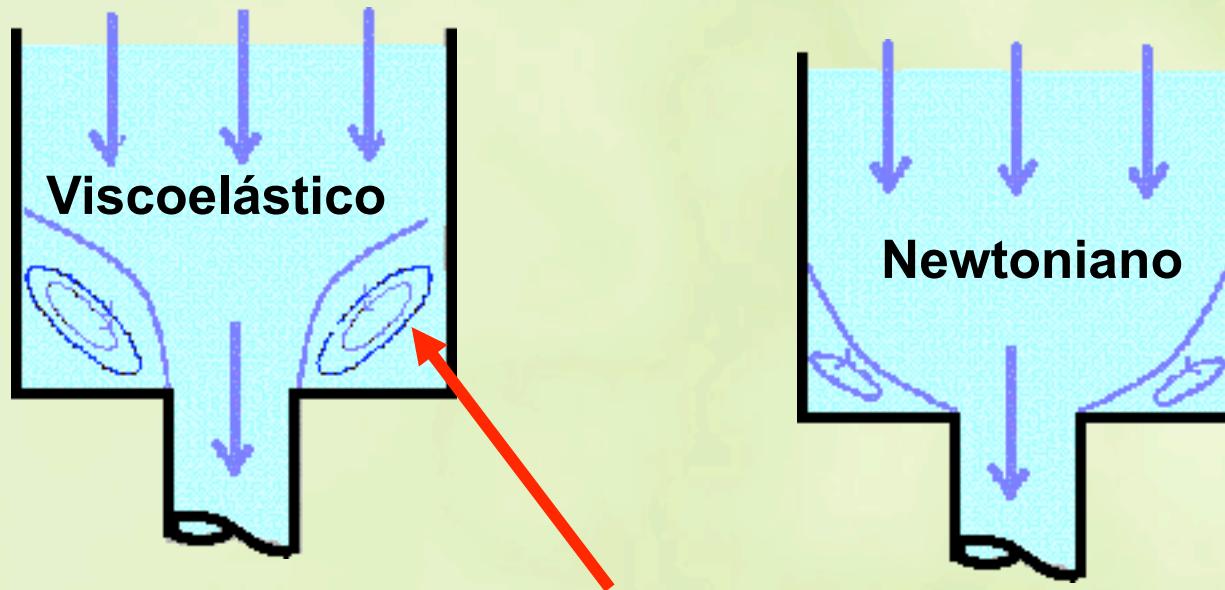
# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## \* No viscoelástico



# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

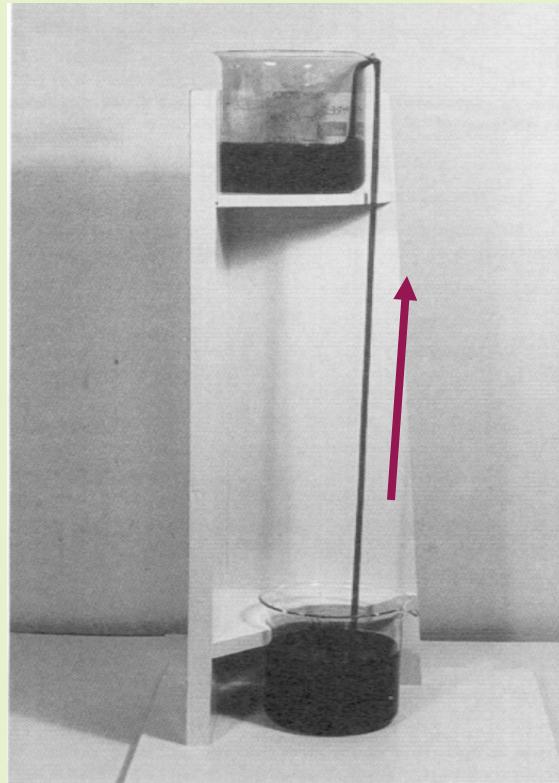
## Viscoelástico



Aumento tamaño de los  
vórtices

# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## Viscoelástico



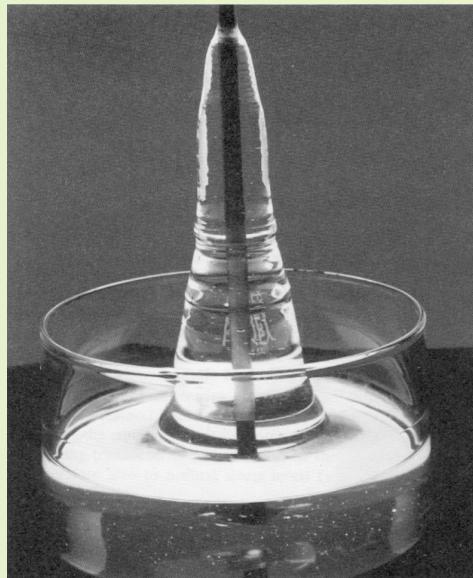
Succión

*Efecto del  
sifón sin  
conducto*



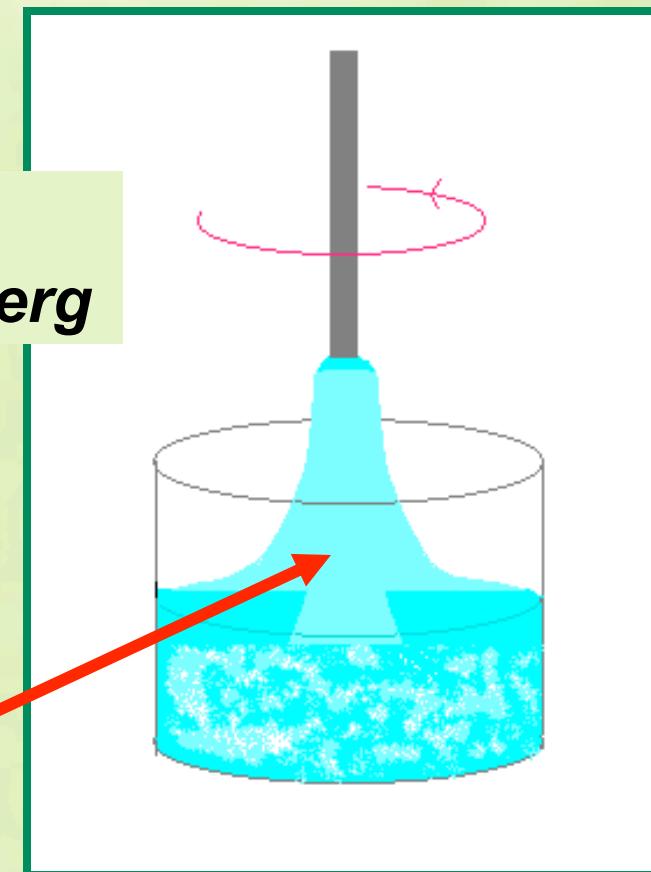
# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

## Viscoelástico



*Efecto  
Weissenberg*

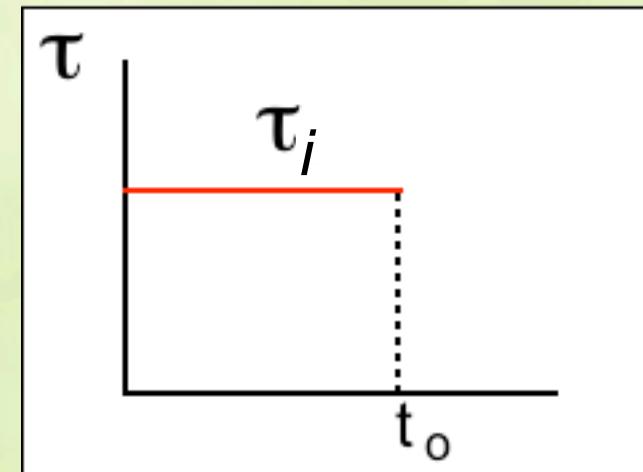
El vórtice se invierte



# Comportamientos reológicos no-Newtonianos

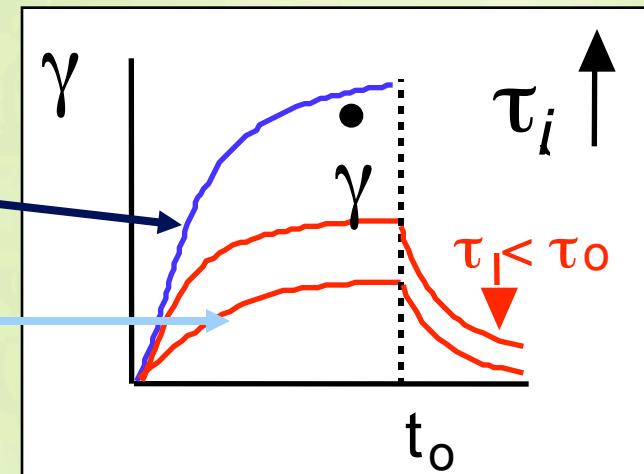
## Viscoelástico

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



$\tau_i > \tau_0$ : Flujo viscoso

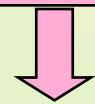
$\tau_i < \tau_0$ : Elástico



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

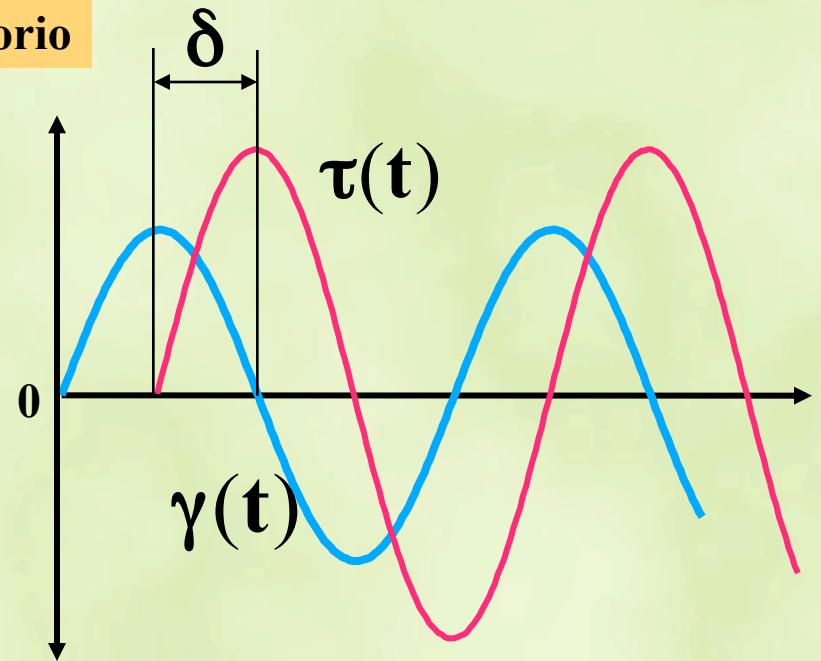


$$\tau(t) = \gamma_0 [G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t]$$

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

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

Módulo complejo    Módulo elástico    Módulo viscoso



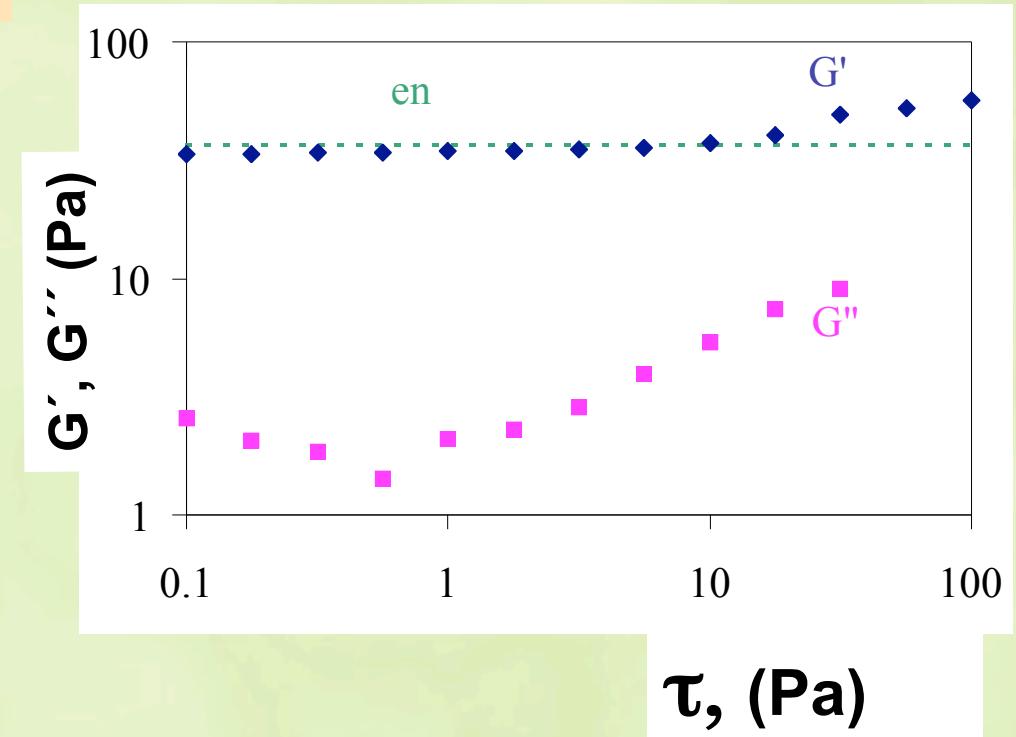
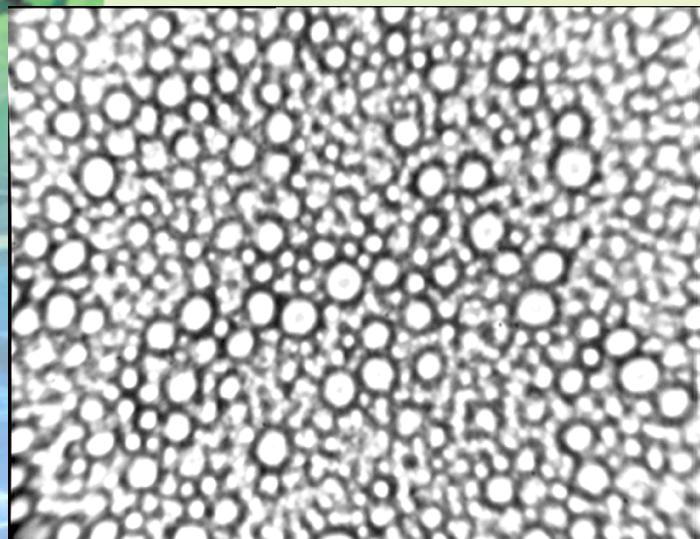
## Emulsión concentrada viscoelástica - comportamiento en ensayo dinámico oscilatorio

70% peso aceite Carnatio

3% peso Tween 80

27% peso  $H_2O$

$a_{32} \sim 4 \mu m$





# Modelos reológicos

✳ Los más sencillos...



# Modelos reológicos

## ✳ Ley de potencia

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

**k: índice de consistencia**

**n: índice de comportamiento**



- n>1: Reoespesante**
- n<1: Reofluidizante**
- n=1: Newtoniano**

Muy utilizado en la mayoría de las aplicaciones prácticas.

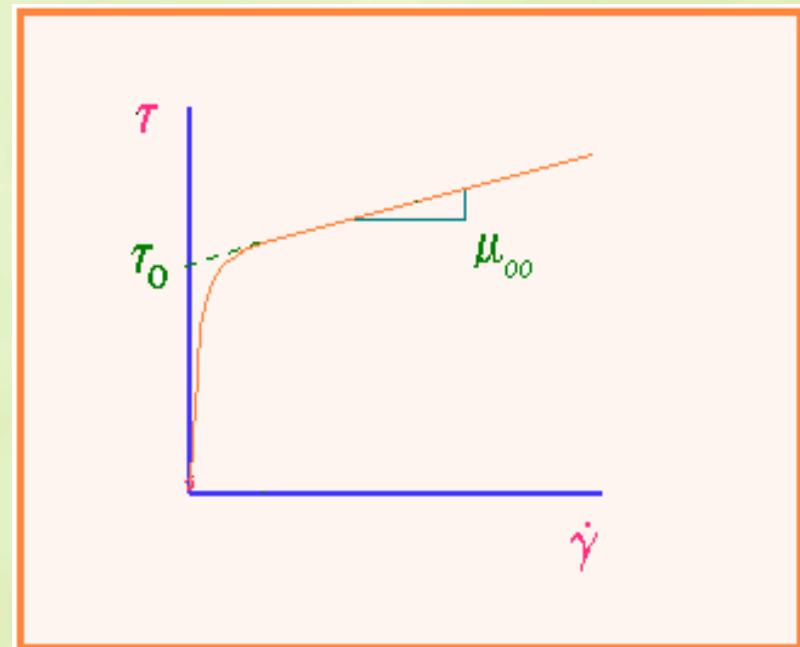
# Modelos reológicos

## ✳ Modelo de Bingham (viscoplásticos)

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

$\tau_0$  : esfuerzo umbral

$\mu_\infty$  : viscosidad plástica

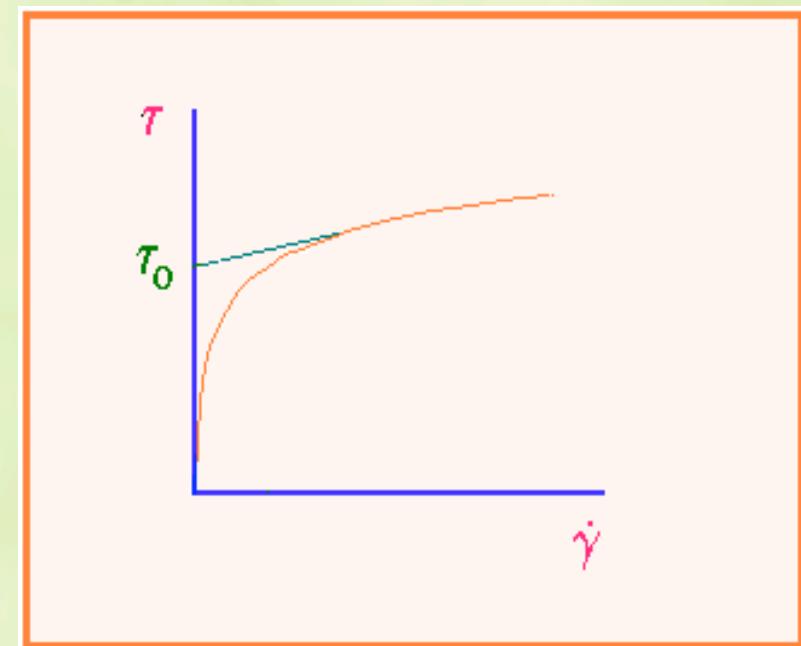


# Modelos reológicos

## ✳ Modelo de Herschel-Bulkley (viscoplásticos)

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

Puede aplicarse a datos tomados a bajas tasas de corte





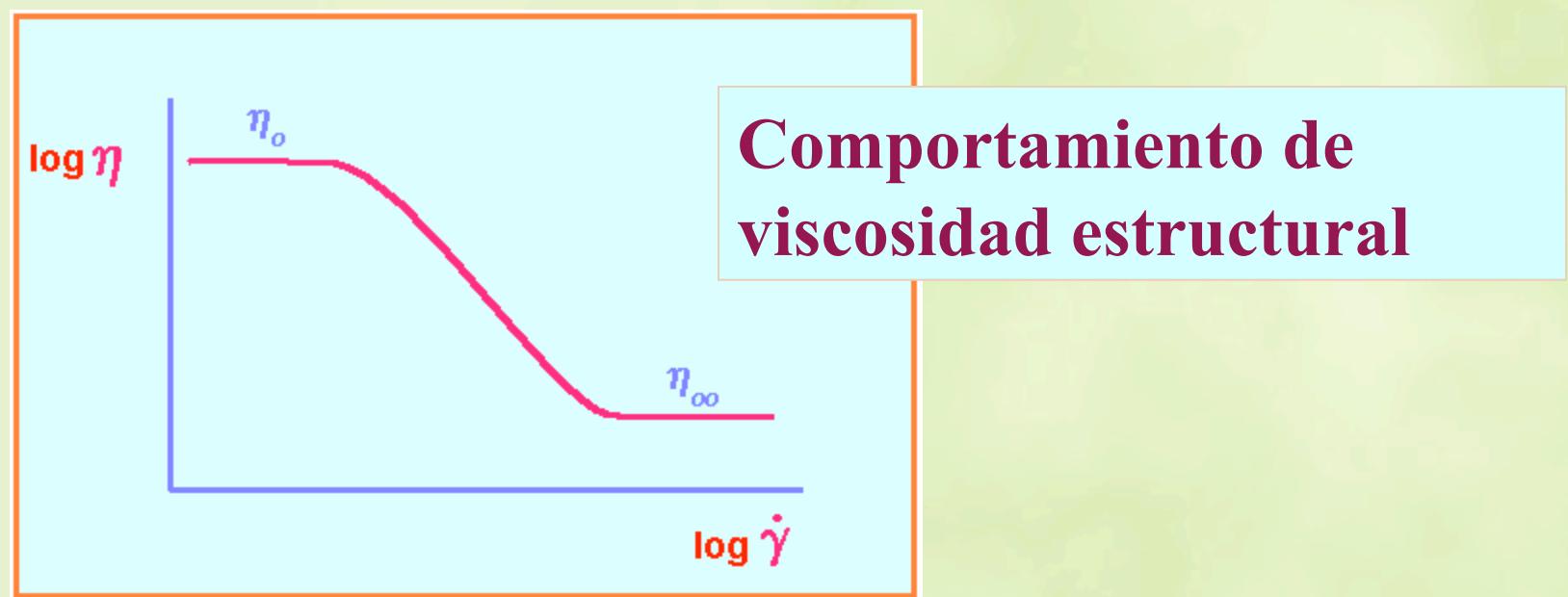
# Modelos reológicos

- ✳ **Modelo de Casson  
(viscoplásticos)**

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

# Modelos reológicos

- ✳ Modelo general para fluidos reofluidizantes





# Modelos reológicos

- ✳ Modelo de Carreau

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

# Modelos reológicos

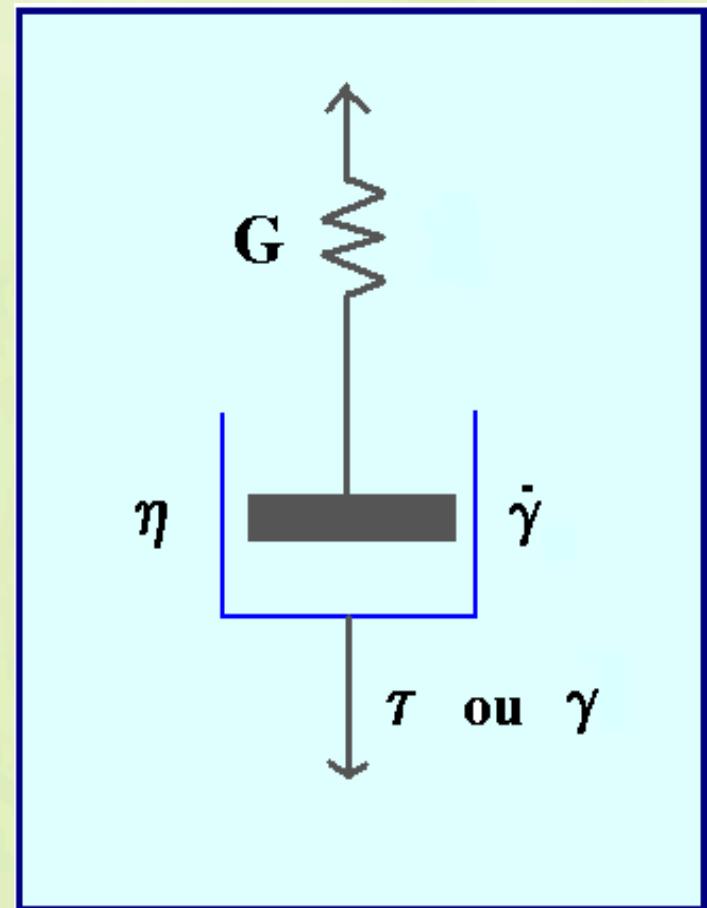
## ✳ Modelo de Maxwell

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

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

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

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



$\lambda$ : 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:

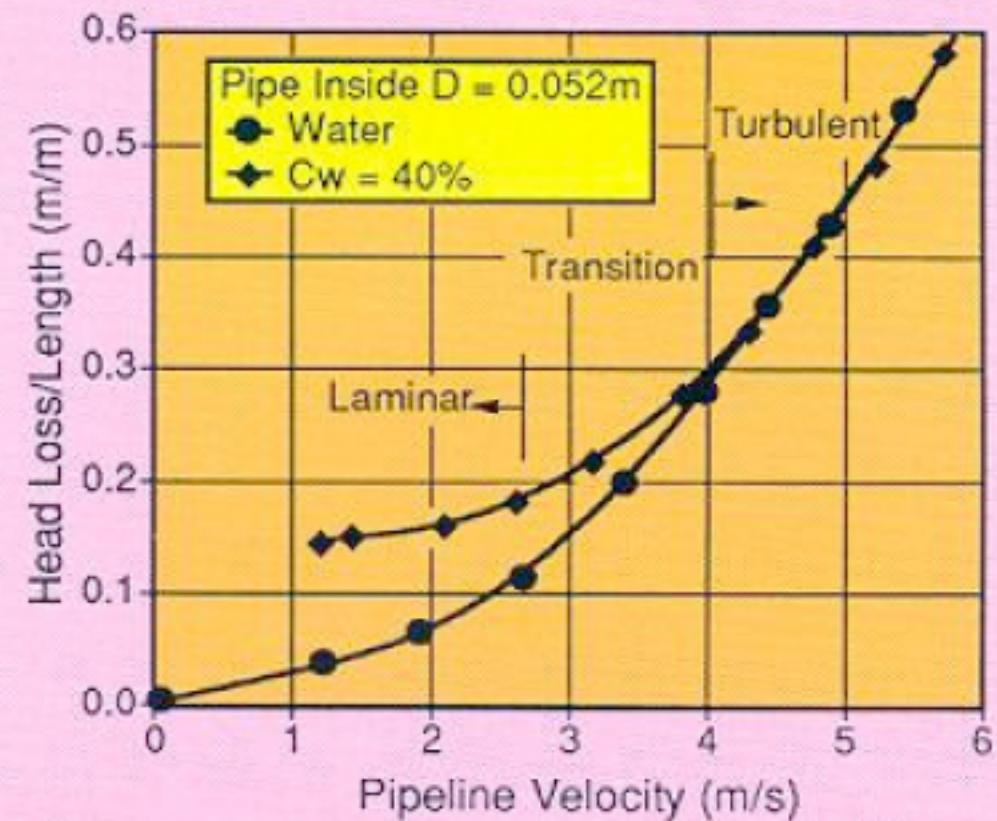
$$\frac{\Delta P}{L} = 5,33 \frac{\tau_o}{D} + 32 \eta \frac{v^2}{D}$$

$\tau_o$ : esfuerzo umbral

$\eta$ : viscosidad aparente

$v$ : velocidad media

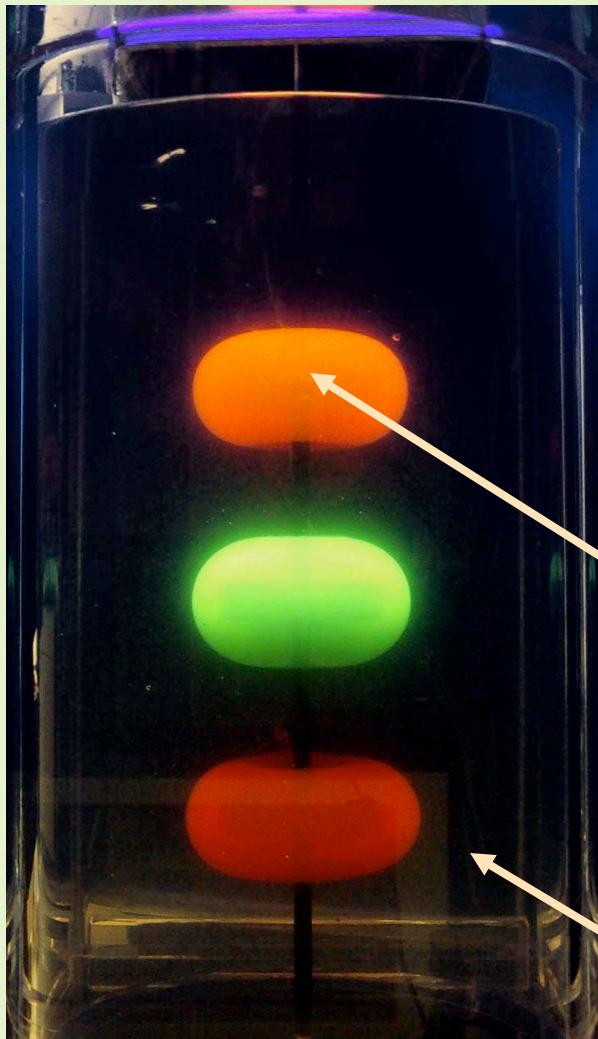
$L, D$ : longitud y diámetro interno tubo.



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

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

# Mezclado



100 rpm

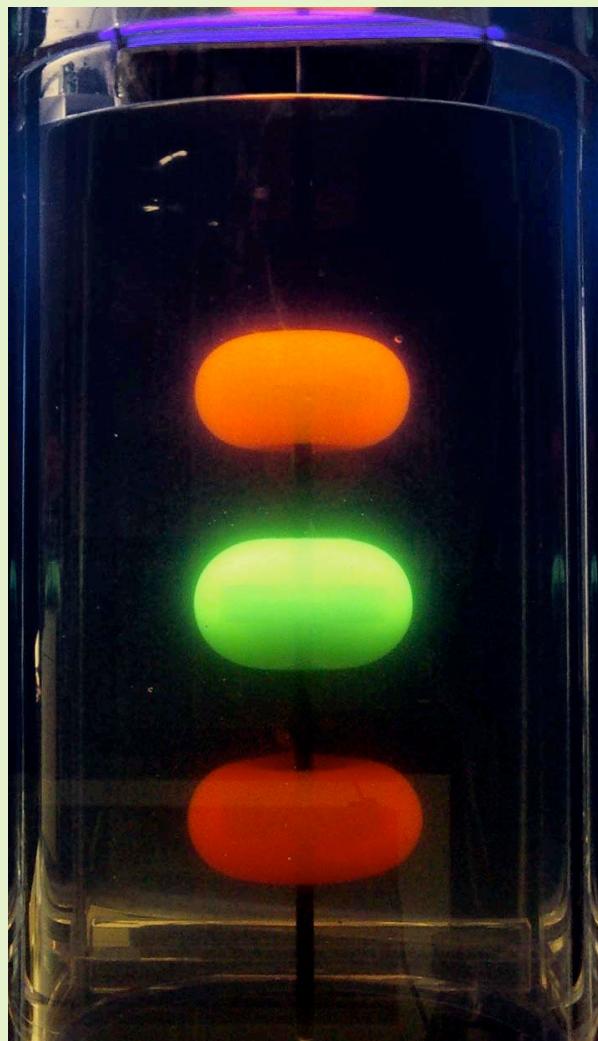
*Solución al 0,1 % de Carbopol.*

*Tres impulsores de tipo Rushton.*



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

*Periferia: no hay movimiento (sólido)*

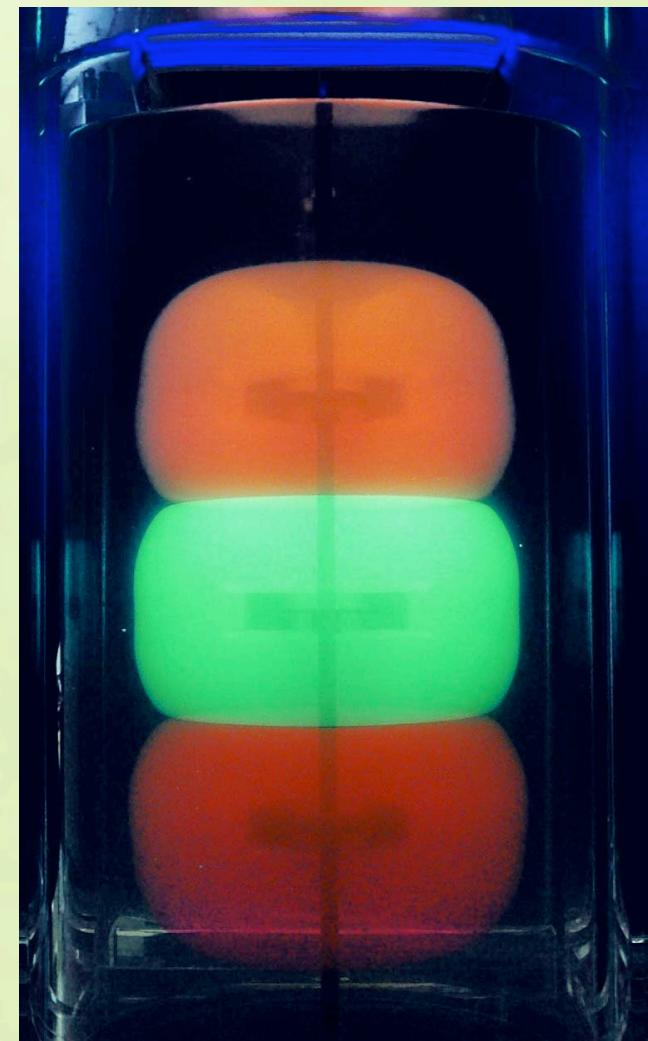


*100 rpm*



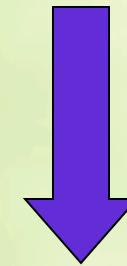
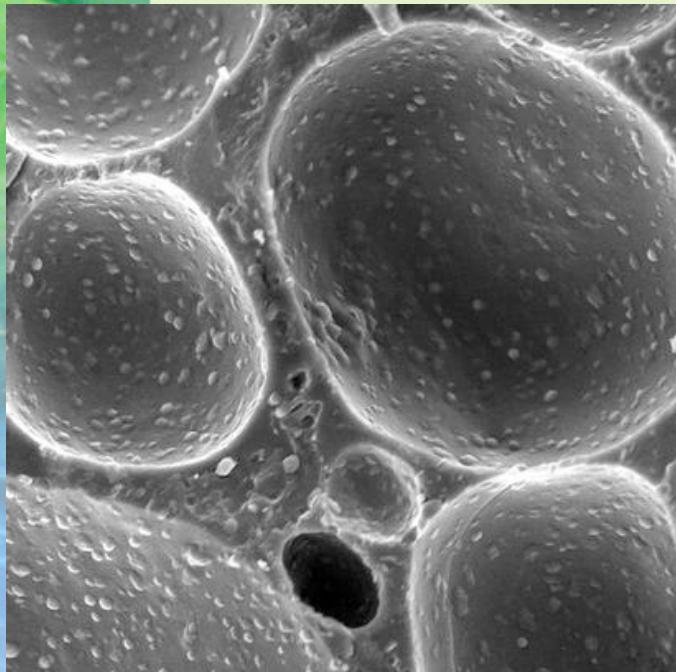
*250 rpm*

*Efecto de la velocidad de mezclado*





✓ Inferir la microestructura del material:



Herramienta de formulación

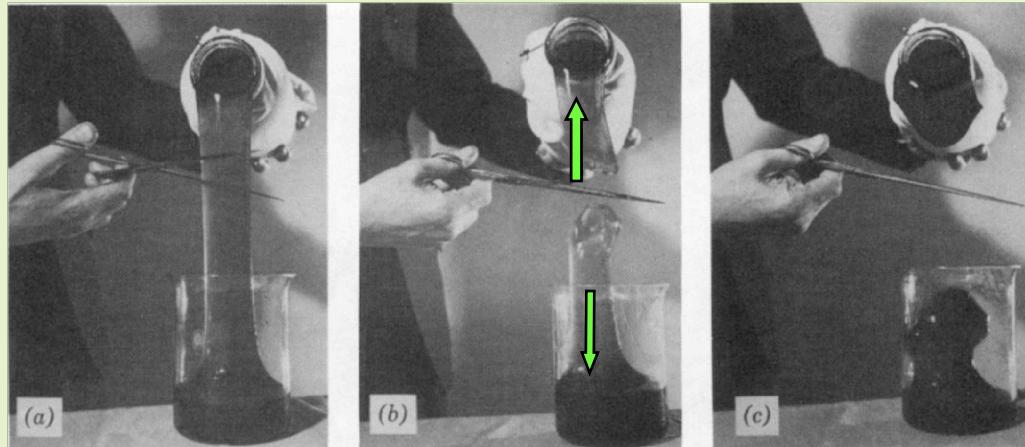
Helado

([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).**