



CLASE 2. Propiedades mecánicas

Parte 1



Agenda

- CLASE 17/03.
 - Introducción a la reología
 - Reología de alimentos fluidos
 - Viscoelasticidad
- CLASE 24/03
 - Reología de sólidos
 - Introducción al laboratorio

Introducción a la reología



Qué es la reología?

- Proviene del griego ῥέω(rhéō) 'flujo' y -λογία (-logia) 'estudio de')
- Es la rama de la física que se enfoca en la deformación y el flujo de la materia
- Describe la interrelación entre la fuerza, la deformación y el tiempo
- Aplica a todos los materiales desde gases hasta sólidos



Por qué es importante?

- Propiedades organolépticas: podemos relacionar propiedades reológicas con la experiencia de consumir un alimento
- Funcionalidad/Ingeniería
 - Control de calidad
 - Diseño de procesos y equipamiento



Diferentes niveles de complejidad (ejemplos)

- Viscosidad del agua pura o el alcohol
- Viscosidad de las soluciones de azúcar (concentración)
- Propiedades de los lípidos (moleculares)
- Propiedades de los geles puros (almidones, hidrocoloides)
- Propiedades de los tejidos (pulpa de frutas, carnes)
- Propiedades de los tejidos triturados (concentrados de tomate, naranja)
- Propiedades de las unidades individuales (cereales de desayuno, aperitivos)
- Propiedades de las estructuras mixtas (caramelos de chocolate rellenos)



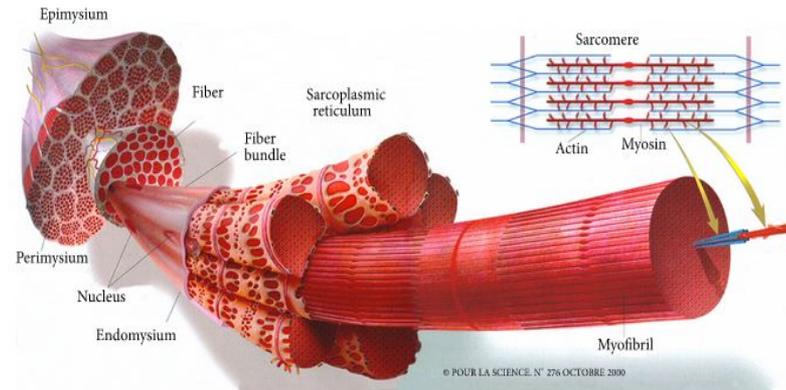
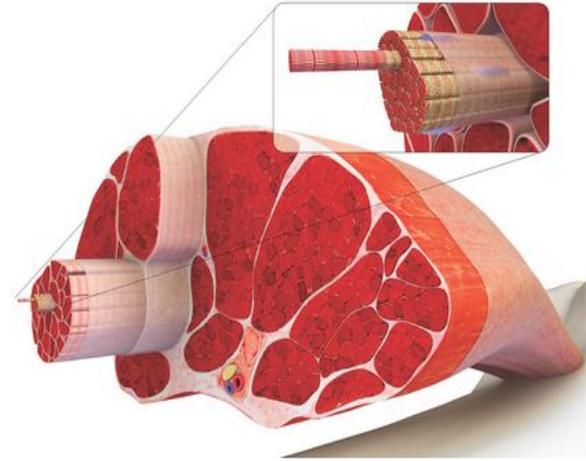
Relación entre reología, estructura y microestructura

- Quarks $< 10^{-19}$ m
- Partículas subatómicas $\sim 10^{-15}$ m
- Átomos $\sim 10^{-15}$ m
- Moléculas $\geq 10^{-9}$ m
- Organizaciones moleculares
- Organización de organizaciones moleculares
- Tejidos
- Unidades (incluyendo organización de tejidos) 10^{-3} - 10^{-1} m
- Colecciones de unidades (bulk) 10^{-2} (ej. cucharada) - 100 m (ej. contenedor de naranjas)

Las propiedades mecánicas son la manifestación general de todas las escalas anteriores + el tamaño y/o la geometría.

Niveles de organización estructural

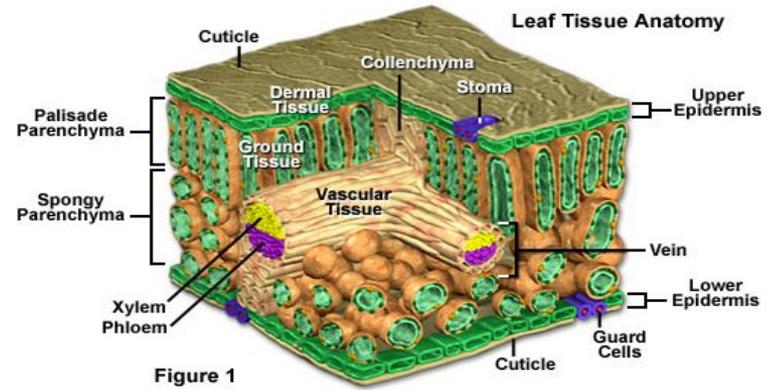
Carne





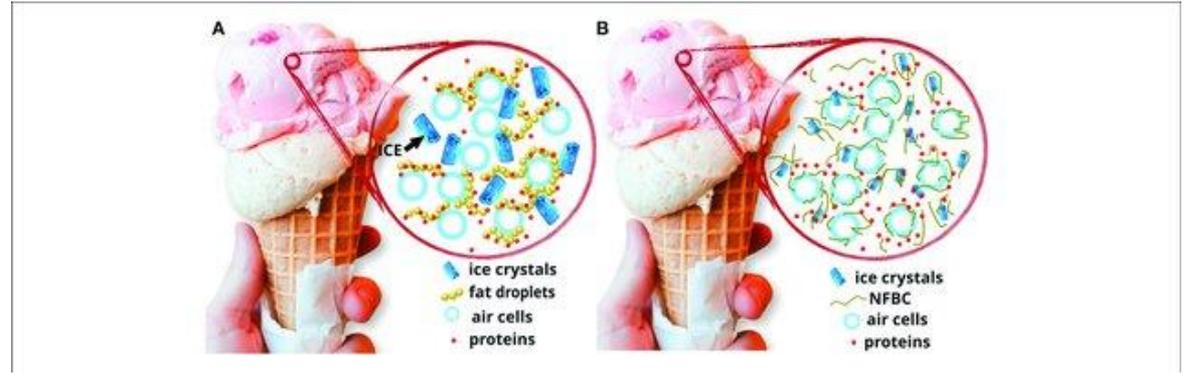
Niveles de organización estructural

Lechuga



Niveles de organización estructural

Helado



Azeredo, Henriette & Barud, Hernane & Farinas, Cristiane & Vasconcellos, Vanessa & Claro, Amanda. (2019). Bacterial Cellulose as a Raw Material for Food and Food Packaging Applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 3. 10.3389/fsufs.2019.00007.



Tipos de comportamiento reológico

Puramente elástico (sólidos de Hooke):

- Cuando se aplica una fuerza sobre el material, este se deforma instantáneamente.
- Una vez que la fuerza se retira el material vuelve a su forma original instantáneamente.
- La deformación es proporcional a la fuerza aplicada



MÓDULO ELÁSTICO (E)



Tipos de comportamiento reológico

Puramente viscoso (fluidos newtonianos):

- El material comienza a fluir con la aplicación de la fuerza y la velocidad de flujo es proporcional a la fuerza aplicada.
- Una vez que la fuerza se retira el material no tiene la capacidad de volver a su forma original.
- La deformación es proporcional a la fuerza aplicada

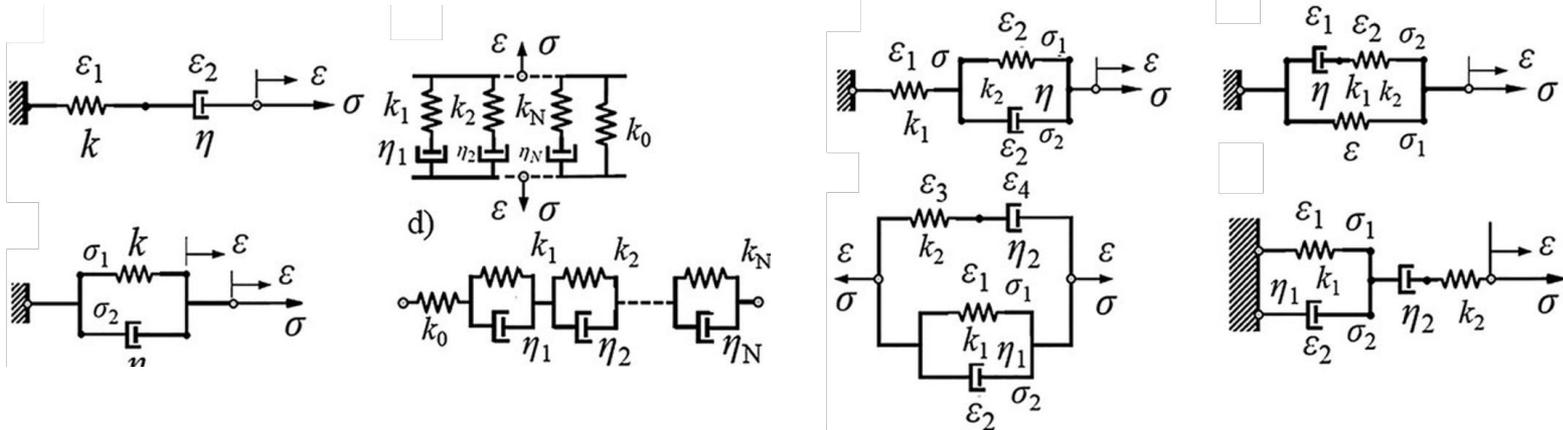


VISCOSIDAD (μ)

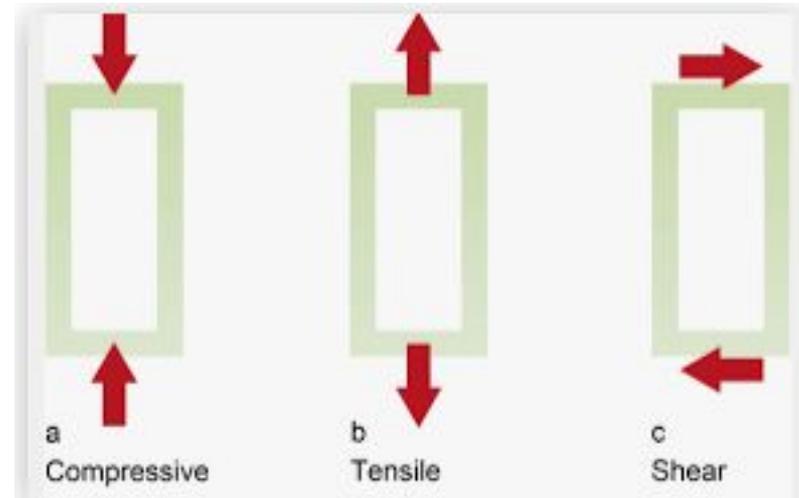
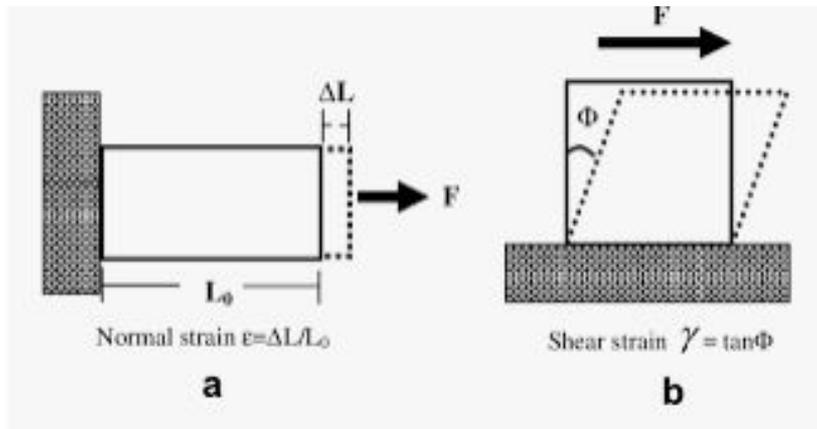
Tipos de comportamiento reológico

Viscoelástico:

- Poseen características asociadas a ambos comportamientos



Esfuerzos normales vs. esfuerzos de corte



Reología de alimentos fluidos



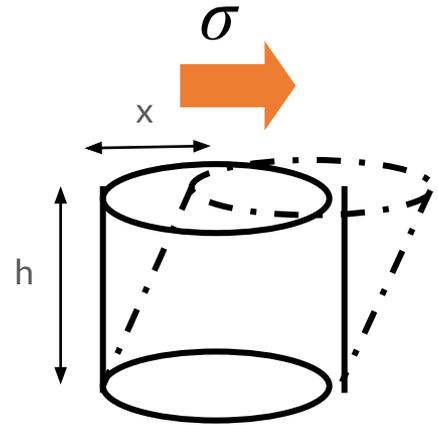
Reología de alimentos fluidos

- Llamaremos alimentos fluidos a aquellos que fluyen y no recuperan su forma luego de aplicado un esfuerzo
- Para caracterizarlos debemos relacionar el esfuerzo de corte aplicado con la deformación generada

Esfuerzo de corte y velocidad de deformación

Esfuerzo de corte σ (Pa): Es un esfuerzo que se aplica en paralelo a la superficie sobre la que se aplica. Se refiere a la fuerza por unidad de área.

Velocidad de deformación $\dot{\gamma}$ (s^{-1}): Si consideramos un material fluyendo entre dos platos, uno fijo y otro a velocidad v , la velocidad de deformación es el cociente entre la velocidad del plato superior y la distancia entre ambos platos





Estimados de velocidades de deformación

Pintura en una pared:

- Velocidad ~ 0.5 m/s
- Espesor ~ 1 mm
- $\dot{\gamma} \sim 0.5/0.001 = 500$ s⁻¹

Miel en pan:

- Velocidad ~ 4 cm en 2 s = 0.02 m/s
- Espesor ~ 3 mm
- $\dot{\gamma} \sim 0.02/0.003 = 7$ s⁻¹

Rango amplio



Viscosidad

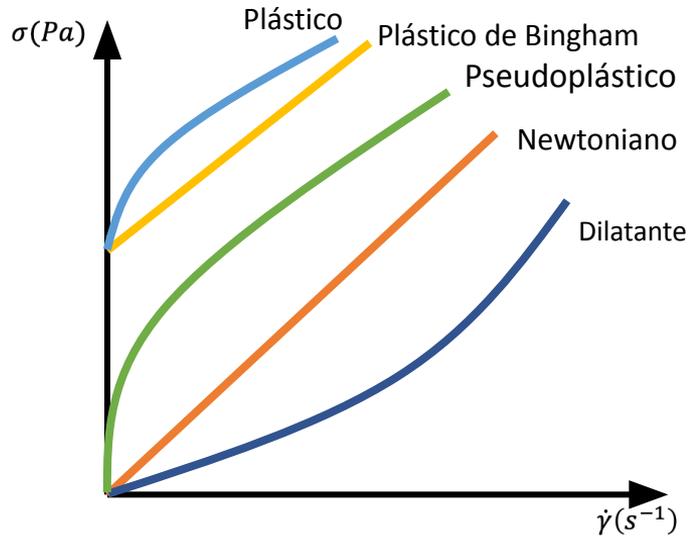


- Propiedad de los fluidos que mide la resistencia a fluir

Miel vs. mayonesa: Qué es más viscoso?

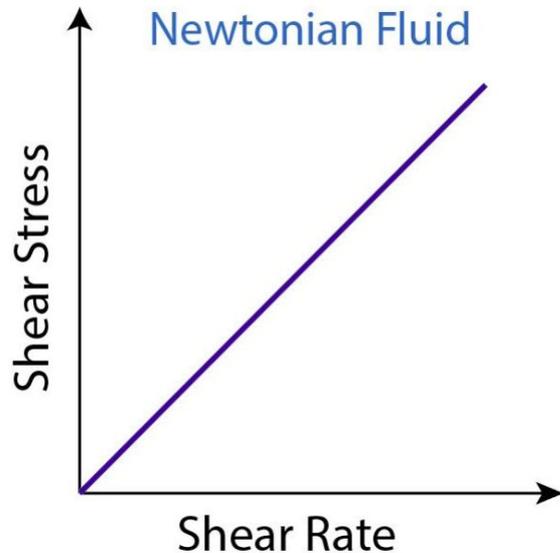


Curvas de flujo



Representación gráfica del comportamiento de un fluido cuando se lo somete a velocidades de deformación crecientes y decrecientes. Nos permite clasificar a los fluidos en función de su comportamiento

Clasificación de fluidos: Fluido newtoniano

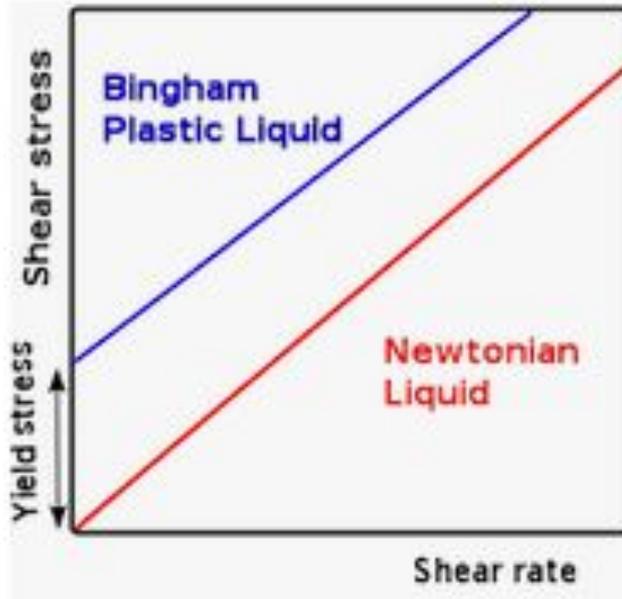


$$\sigma = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Características:

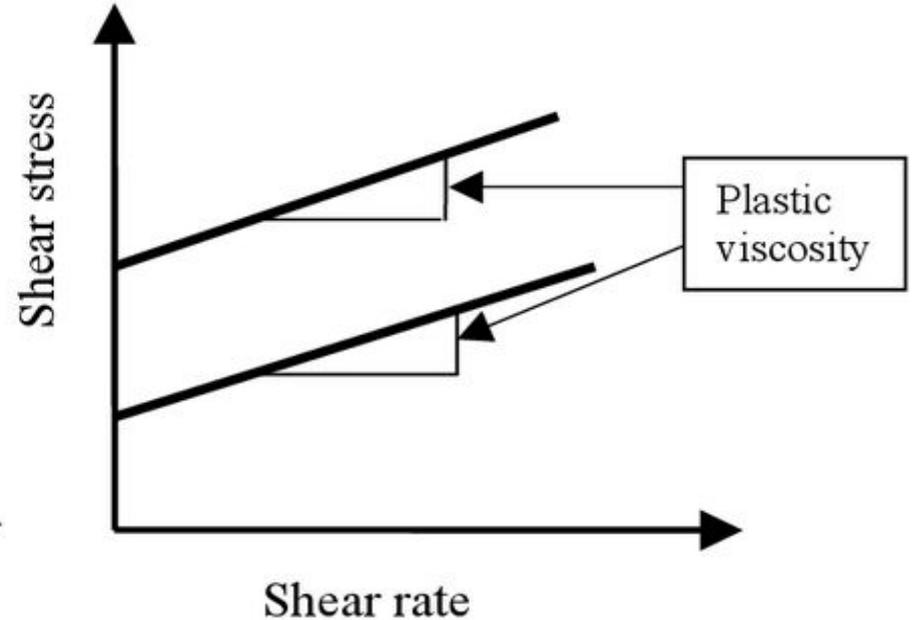
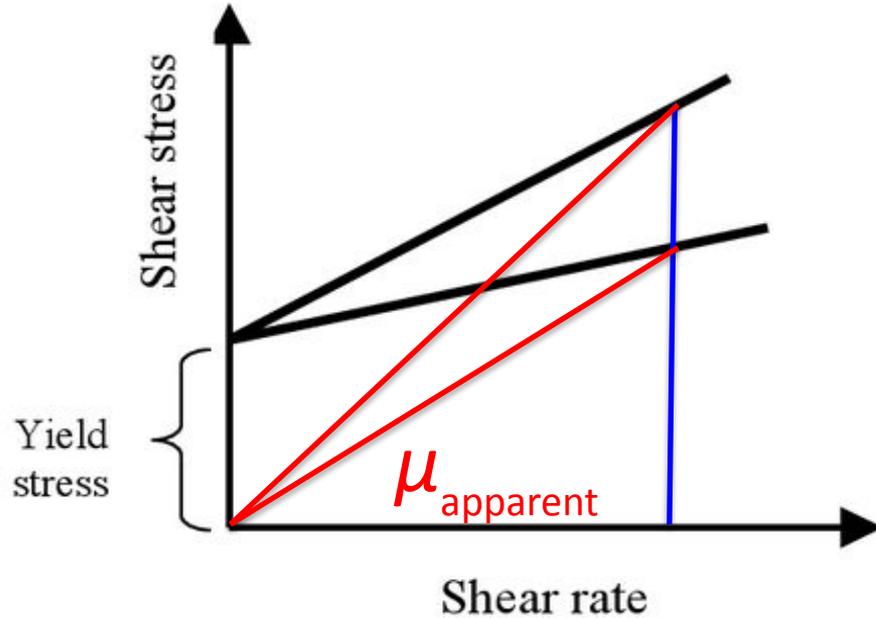
- Reversible (misma curva de ida y de regreso)
- La viscosidad no depende de la velocidad de deformación
- La viscosidad depende del fluido y de la temperatura
- Se necesita solo 1 punto para construir la curva

Clasificación de fluidos: Plástico de Bingham

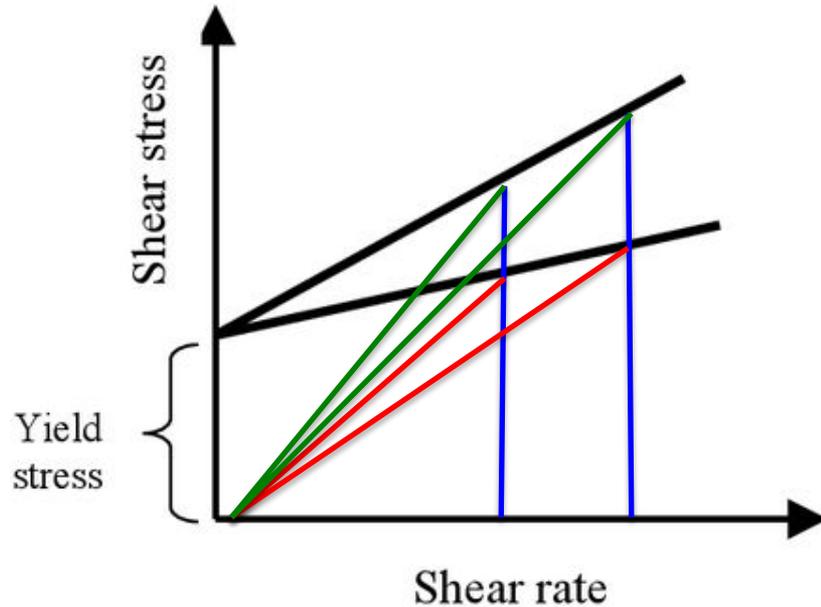


$$\sigma = \mu_{ap} \cdot \dot{\gamma}$$

Clasificación de fluidos: Plástico de Bingham



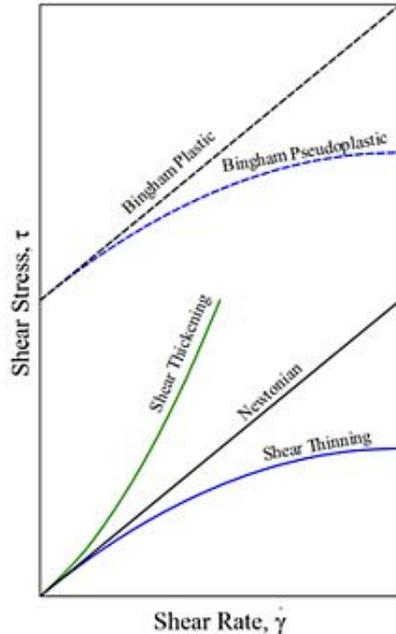
Clasificación de fluidos: Plástico de Bingham



Características:

- Presentan umbral de fluencia
- La viscosidad aparente depende de la velocidad de deformación

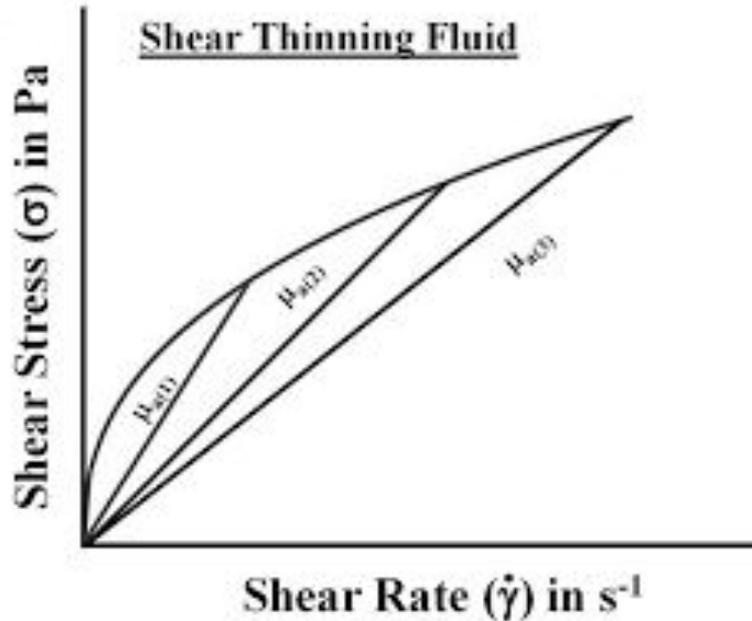
Clasificación de fluidos: pseudoplásticos y dilatantes



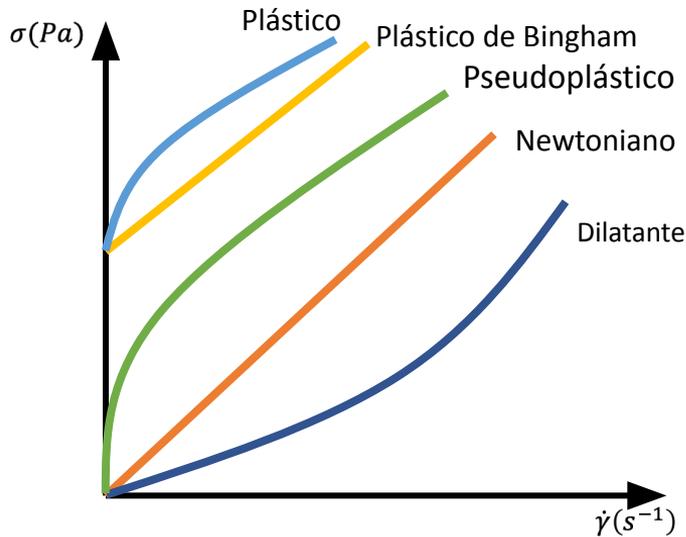
Características:

- La viscosidad aparente depende de la velocidad de deformación
- En los fluidos pseudoplásticos la viscosidad aparente disminuye con la velocidad de deformación
- En los fluidos dilatantes la viscosidad aparente disminuye con la velocidad de deformación

Clasificación de fluidos: : pseudoplásticos y dilatantes



Modelado del comportamiento: Herschel-Bulkley



$$\sigma = K * \dot{\gamma}^n + \sigma_0$$

σ esfuerzo de corte
 $\dot{\gamma}$ velocidad de deformación
 K coeficiente de consistencia
 n índice de flujo
 σ_0 umbral de fluencia

$$\eta_{ap} = K * \dot{\gamma}^{n-1}$$

n Para alimentos se encuentra entre 0.5 y 1
1 para fluidos newtonianos
0.5 para fluidos altamente pseudoplásticos
(concentrado de tomate)



Limitantes del modelo de potencia

- Los fluidos pseudoplásticos presentan un comportamiento newtoniano para muy bajas velocidades de deformación que el modelo de potencia no predice.
- Estos fluidos también pueden presentar una viscosidad aparente límite para muy altas velocidades de deformación



Otros modelos:

- Modelo de flujo de Cross

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \alpha \dot{\gamma}^{2/3}}$$

Utilizado por Doblier y Launay 1974 para describir el comportamiento de soluciones de goma guar en un amplio rango de velocidades de deformación (0.16-17600 s⁻¹)

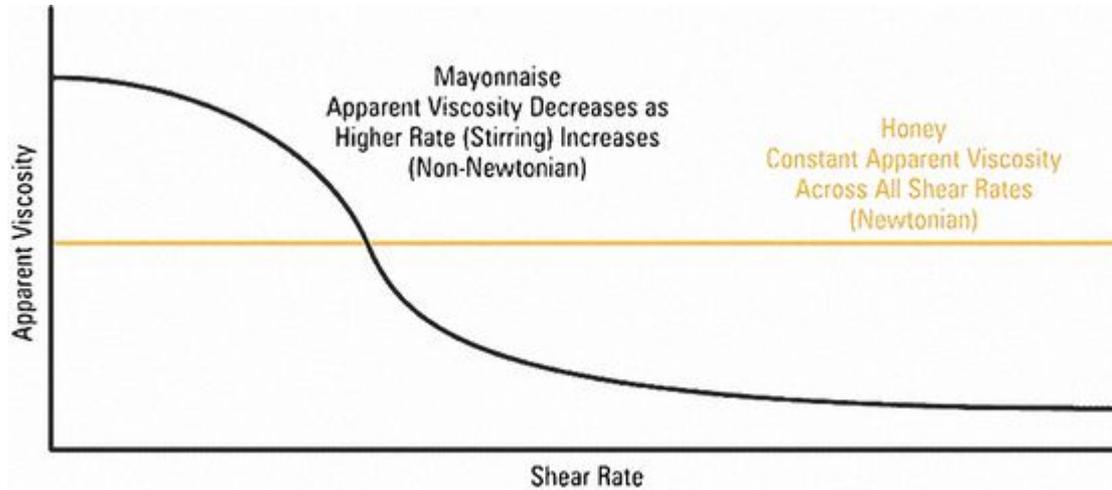
- Modelo de Powell-Eyring

$$\eta = \eta_{\infty} * \dot{\gamma} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{\beta} \sinh^{-1}(\beta * \dot{\gamma})$$

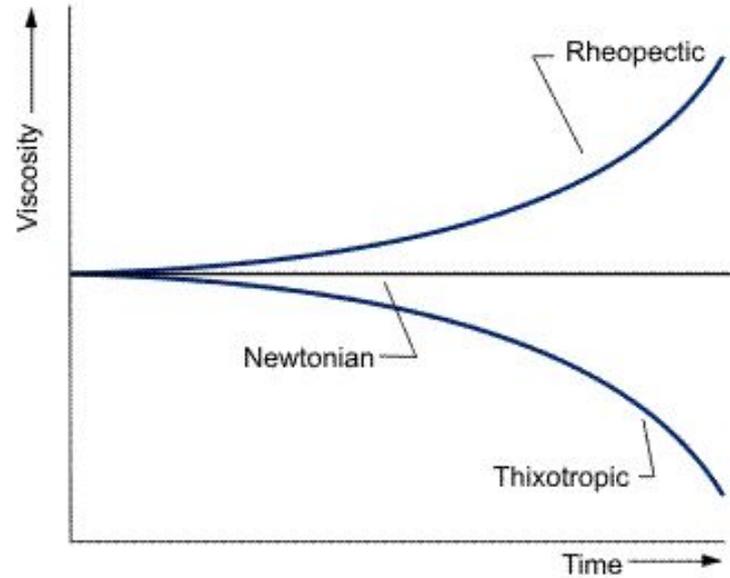
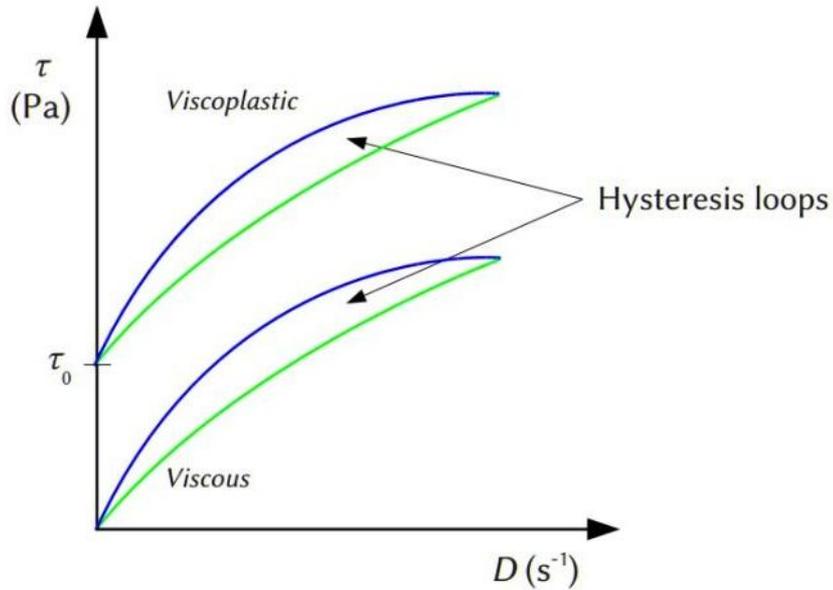
Utilizado para describir comportamiento de serum de concentrado de jugo de naranja (Vitali y Rao 1984)

η_{∞}	viscosidad límite a velocidad de deformación infinita
η_0	viscosidad límite a velocidad de deformación cero
α y β	constantes

Volviendo a la miel y la mayonesa



Dependencia con el tiempo





Dependencia con el tiempo

Tixotrópicos: Para una velocidad de deformación constante. La viscosidad aparente disminuye con el tiempo.

Ejemplos: leche condensada (Higgs y Norrington 1971), mayonesa (Tiu y Boger 1974)

Reopécticos: Para una velocidad de deformación constante. La viscosidad aparente aumenta con el tiempo.

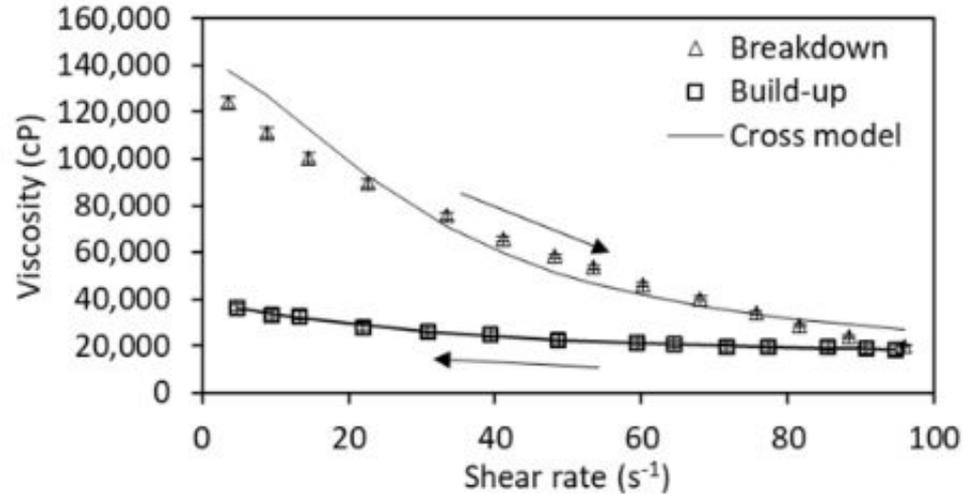
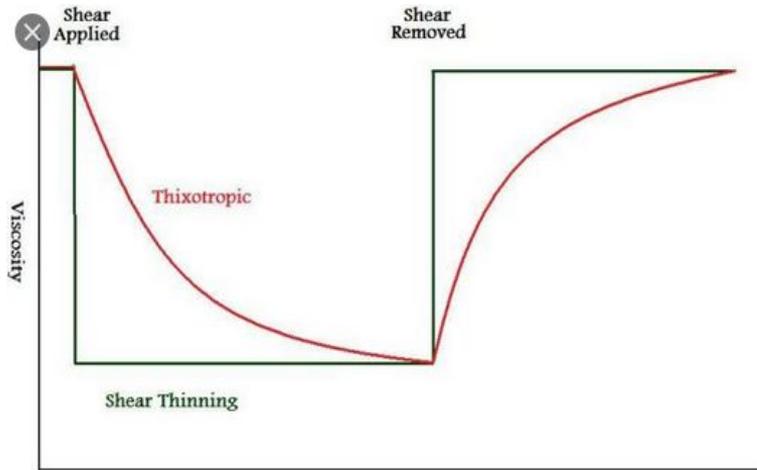
Ejemplos: observado en dispersiones de almidón de maíz gelatinizado (Chamberlain et al., 1999)

- Existen diversos modelos para caracterizar el comportamiento tixotrópico de los fluidos, uno simple es el modelo de Tiu y Boger

$$\sigma = \lambda * (K * \dot{\gamma}^n + \sigma_o)$$

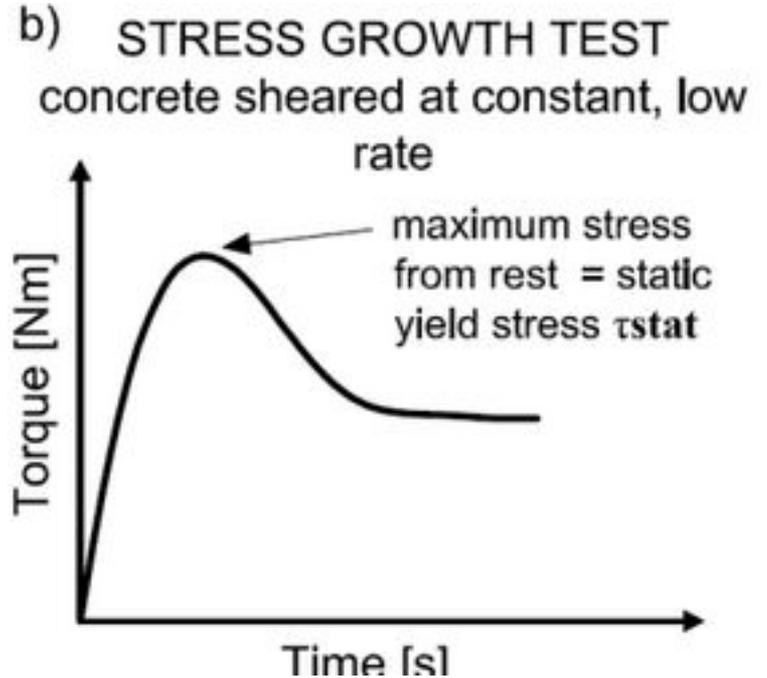
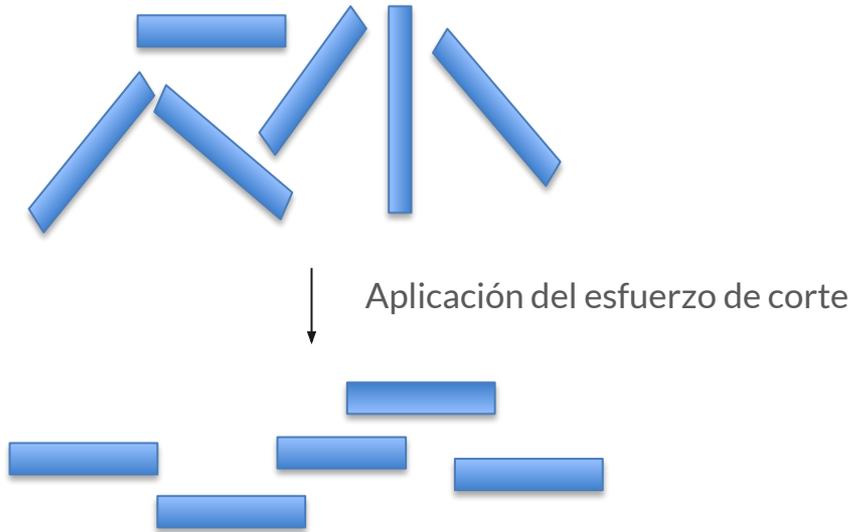
$$\frac{d\lambda}{dt} = -K_1 * (\lambda - \lambda_e) \quad \text{Para } \lambda > \lambda_e$$

Daños estructurales reversibles e irreversibles





Stress overshoot



Dependencia de la viscosidad con la temperatura

- Durante el procesamiento, almacenamiento, transporte y consumo de alimentos estos suelen estar expuestos a cambios de temperatura.
- Cómo varía la viscosidad con la temperatura?
- Disminuye



Dependencia de la viscosidad con la temperatura

- Hay excepciones?
 - Si!



Gelatinización de almidón y de proteínas



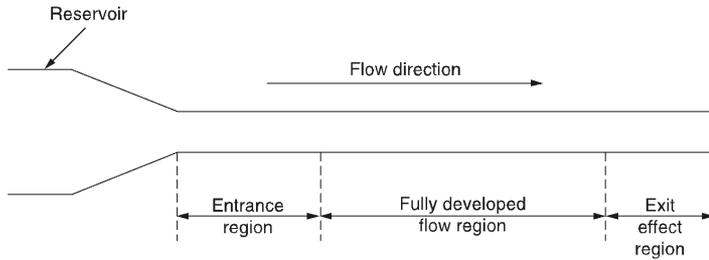


Determinación de propiedades reológicas

- Métodos fundamentales:
 - Miden propiedades inherentes al material y no dependen de la geometría de la muestra utilizada ni del equipo utilizado para la medida.
- Métodos empíricos:
 - La masa de la muestra, su geometría y las condiciones de ensayo determinan la magnitud del parámetro estimado

Métodos fundamentales

- Viscosímetro capilar

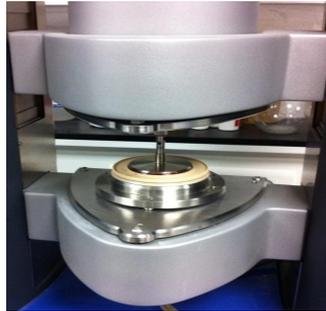


$$\sigma_w = \frac{D\Delta P}{4L}$$

$$\left(\frac{dv}{dr}\right)_w = \frac{3}{4} \left(\frac{32Q}{\pi D^3}\right) + \frac{\sigma_w}{4} \frac{d(32Q/\pi D^3)}{d\tau_w}$$

Métodos fundamentales

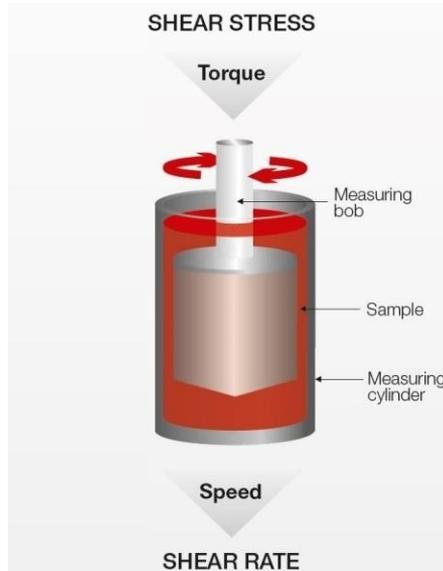
- Reómetro



- Dos tipos:
 - Control de esfuerzo de corte
 - Control de velocidad de deformación
- Utilizan distintas geometrías en función del material a medir

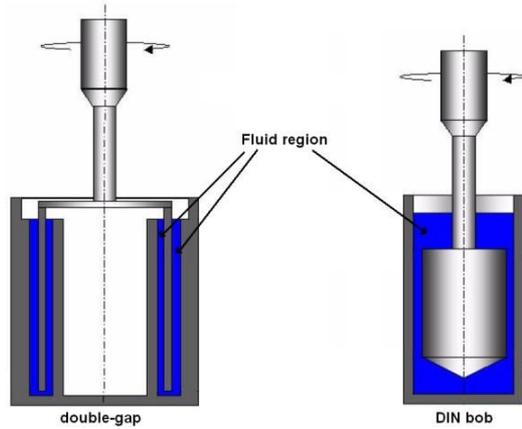
Métodos fundamentales

- Reómetro: geometría cilindros concéntricos



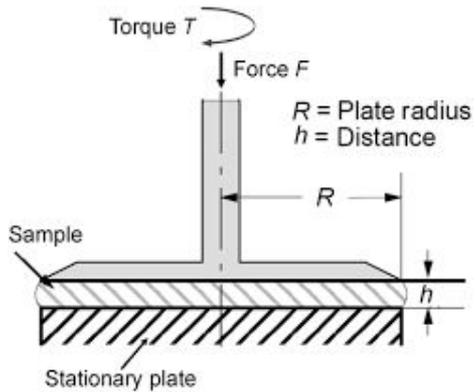
Métodos fundamentales

- Reómetro: geometría doble gap



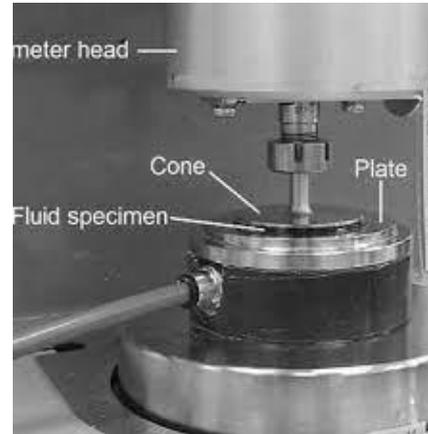
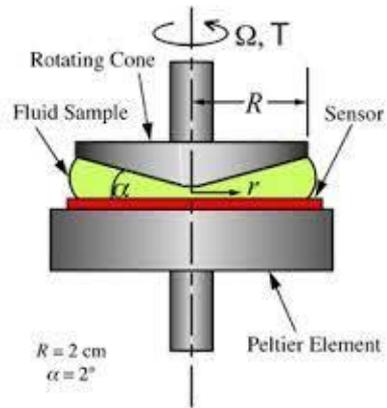
Métodos fundamentales

- Reómetro: geometría platos paralelos



Métodos fundamentales

- Reómetro: geometría cono-plato



Métodos empíricos

- Bureta



- Se mide el tiempo entre dos marcas
- Ni la velocidad de flujo ni la diferencia de presión son constantes

Métodos empíricos

- Viscosímetros



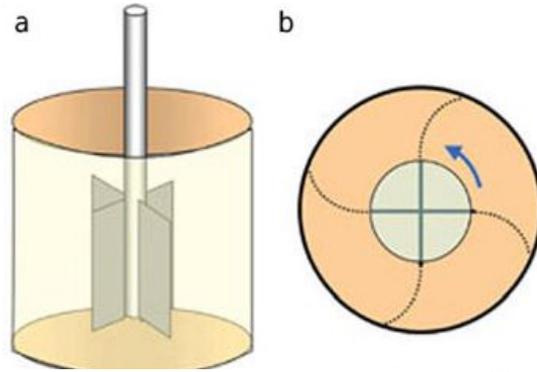
Métodos empíricos

- Viscosímetros



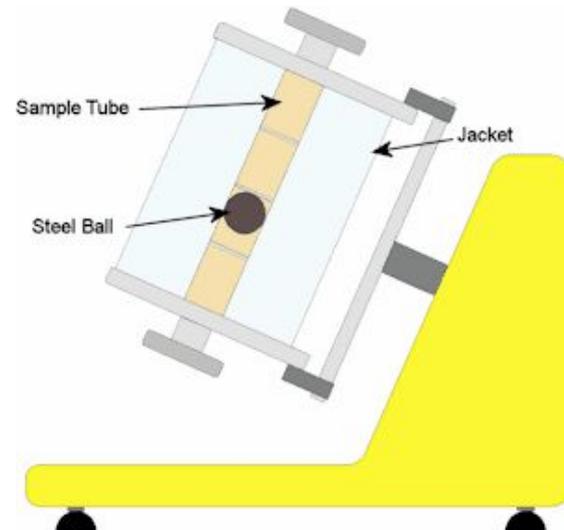
Métodos empíricos

- Viscosímetros de paletas



Métodos empíricos

- Viscosímetros de caída de bola



Métodos empíricos

- Consistómetro de Bostwick



- Se colocan 100 ML de la muestra en el compartimiento superior
- Se deja fluir por el canal
- Se mide la distancia recorrida en 30s

Métodos empíricos

- Consistómetro de adams



- Se colocan 200 mL de la muestra en el cono
- Se levanta el cono
- Se mide la distancia recorrida para cuatro puntos en 30s
- El promedio de esos cuatro valores es el resultado informado



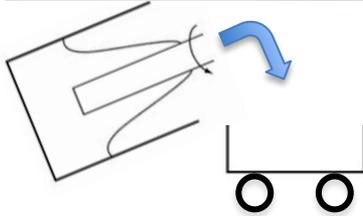
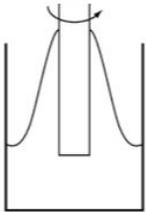
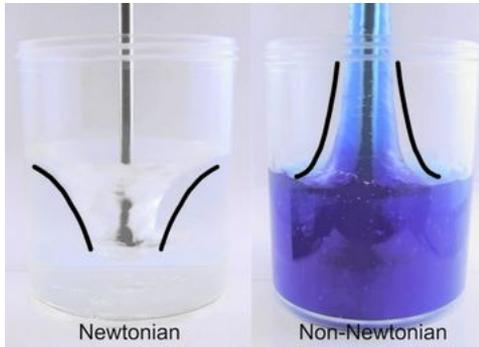
RECORDATORIO IMPORTANTE

- Las medidas instrumentales siempre dan resultados
- Lo importante es determinar si estos resultados son significativos

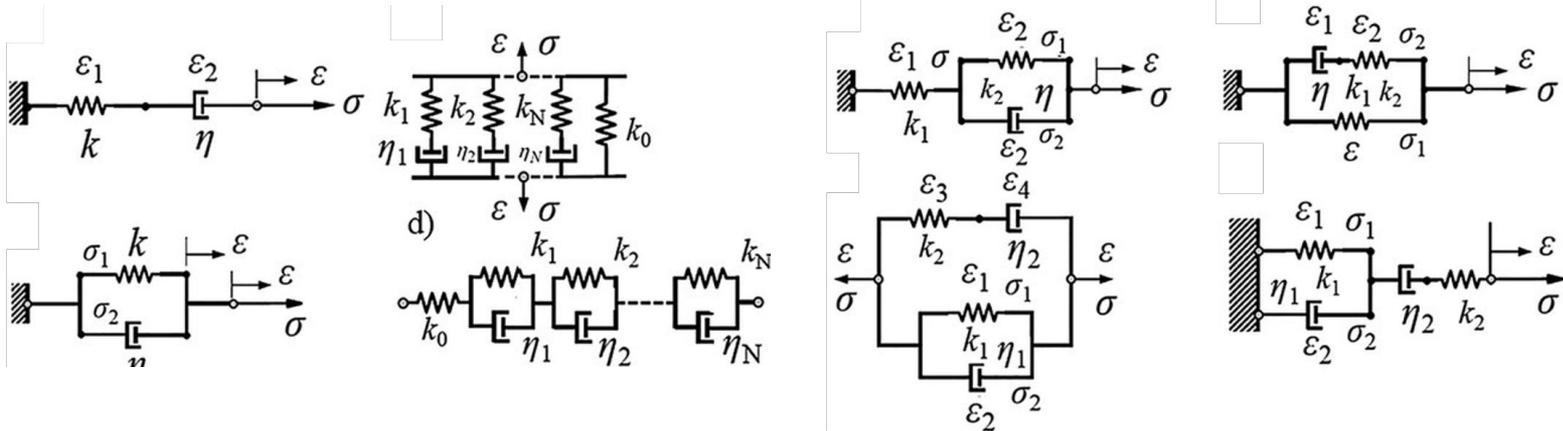
Viscoelasticidad

Alimentos viscoelásticos

- Presentan características viscosas y elásticas al deformarse



Alimentos viscoelásticos: como los caracterizamos



Alimentos viscoelásticos: Ensayos dinámicos

$$G' = \frac{\sigma_o}{\gamma_o} \cos \delta$$

$$G'' = \frac{\sigma_o}{\gamma_o} \sin \delta$$

- G' módulo de almacenamiento (relacionado con la componente elástica del material)
- G'' módulo de pérdida (relacionado con la componente viscosa del material)

