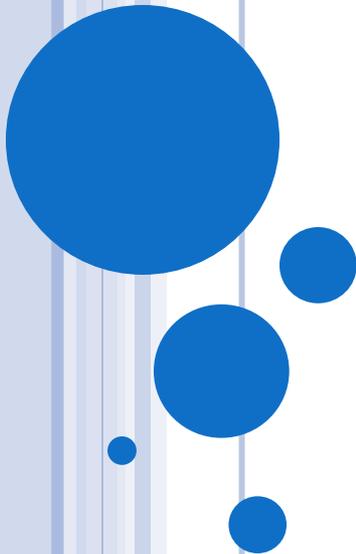


# OPERACIONES UNITARIAS AGROINDUSTRIALES I

Ing. Williams E. Castillo Martinez  
E-mail: [williamsscm@hotmail.com](mailto:williamsscm@hotmail.com)

## REOLOGIA DE FLUIDOS ALIMENTARIOS



# REOLOGÍA

- La reología es la ciencia que estudia el flujo y las deformaciones de sólidos y fluidos, bajo la influencia de fuerzas mecánicas
- La rama de la Física que estudia, en general, la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad, y el flujo de la materia



# REOLOGÍA

- Las propiedades reológicas de un material se determinan por aplicación de las leyes básicas de la Mecánica



# REOLOGÍA



- Existe una relación específica Esfuerzo-Deformación, que es una función única del material

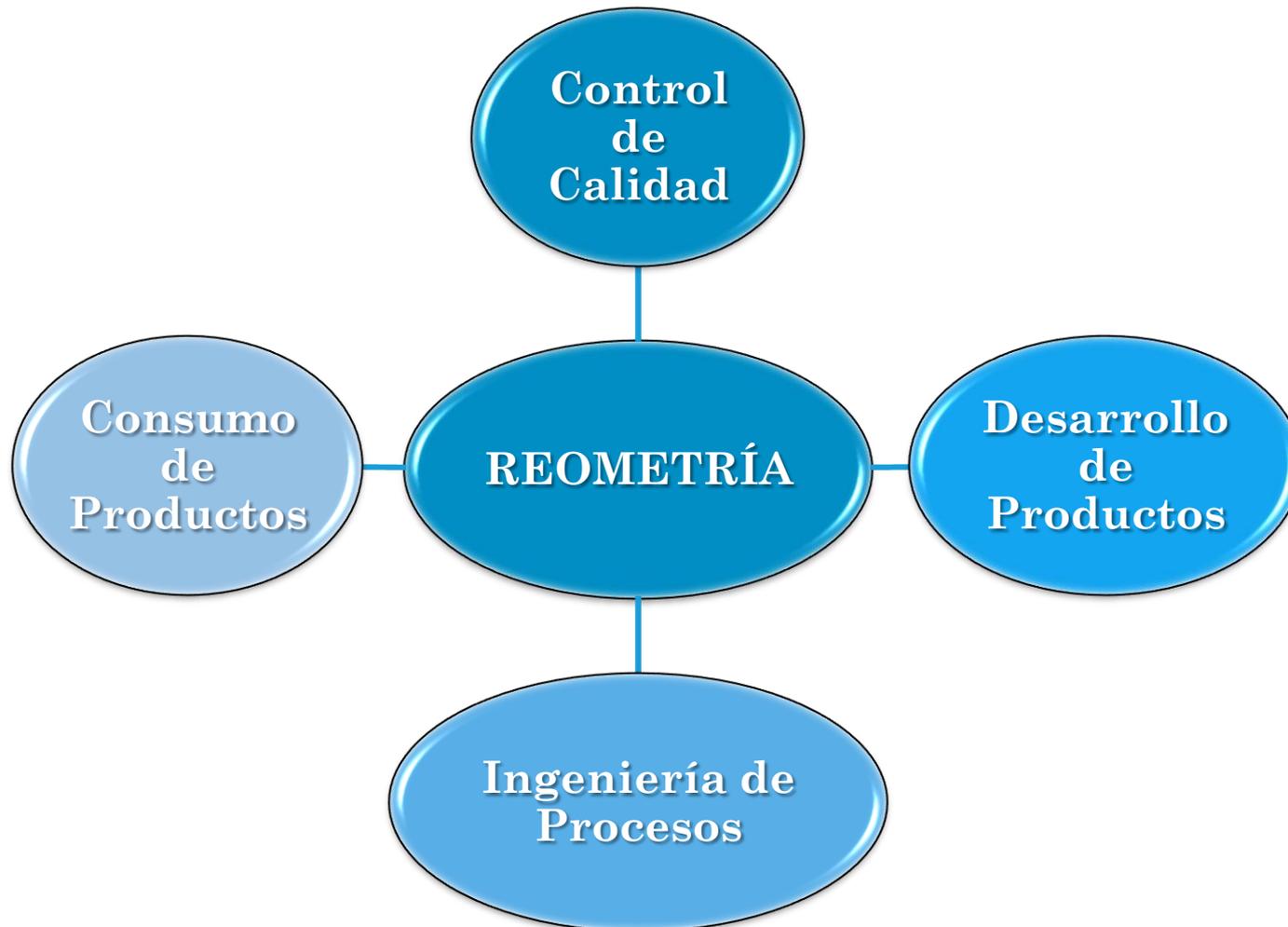


# COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

- **Característica de calidad**
- **Diseño, evaluación y operación de equipos**



# COMPORTAMIENTO REOLÓGICO



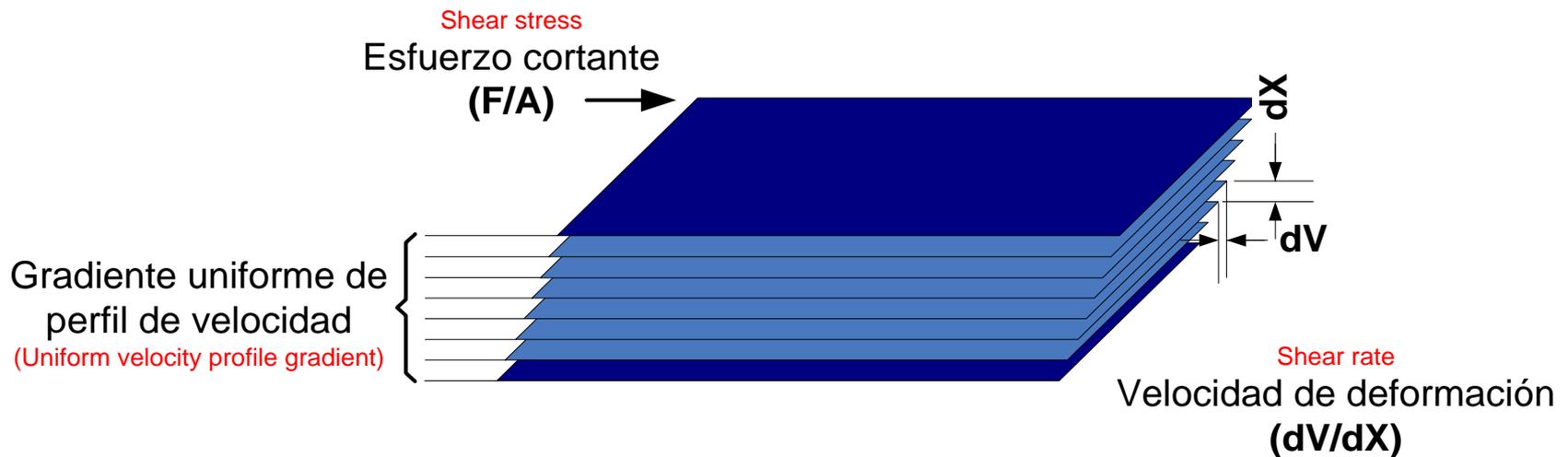
# COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

- **Control de Calidad:**
  - Medida reológica del producto
  - Etapa de elaboración
- **Desarrollo de Productos:**
  - Relación Reología-microestructura
  - Obtención nuevos materiales
- **Ingeniería de Procesos:**
  - Obtención Ecuación reológica
  - Aplicación Operaciones Unitarias
- **Consumo de Productos:**
  - Elaborar producto según exigencias



# VISCOSIDAD

- La viscosidad es una propiedad de los líquidos que describe la magnitud de la resistencia por fuerzas de corte en el líquido.



**Figura 1.1:** Flujo laminar en cizalla simple.  $F/A = \eta \cdot dV/dX$

, donde  $F$  es la fuerza que actúa en un área  $A$ ,  $V$  la velocidad y  $X$  es la distancia entre las placas, y  $\eta$  el coeficiente de viscosidad o viscosidad Newtoniana.

# ESFUERZO CORTANTE

- Es la fuerza por unidad de área aplicada paralelamente al desplazamiento (cortante).
- Tiene unidades de fuerza dividido por superficie, en el SI se mide en  $\text{N m}^{-2}$ . Es homogéneo con la unidad de presión, Pa, aunque hay que recordar que a diferencia de ésta, el esfuerzo cortante es una magnitud vectorial.
- El esfuerzo cortante es una magnitud microscópica ya que cambia en cada punto del perfil de velocidades.

$$\sigma = F/A$$

# VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN, $\dot{\gamma}$

- El esfuerzo cortante provoca el desplazamiento ordenado de los elementos del fluido, que alcanzan unas velocidades relativas estacionarias que denotaremos  $V(x)$ . La velocidad de corte se define como el gradiente (velocidad espacial de cambio) del perfil de velocidades

$$\frac{dx}{dV} = \dot{\gamma}$$

- La velocidad de corte se mide en tiempo<sup>-1</sup>. Aunque a menudo sólo se representa una componente,  $\dot{\gamma}$  es una magnitud vectorial.



# VISCOSIDAD APARENTE,

- Cuando un fluido es ideal, la expresión que describe su comportamiento es la ley de Newton de la viscosidad:

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

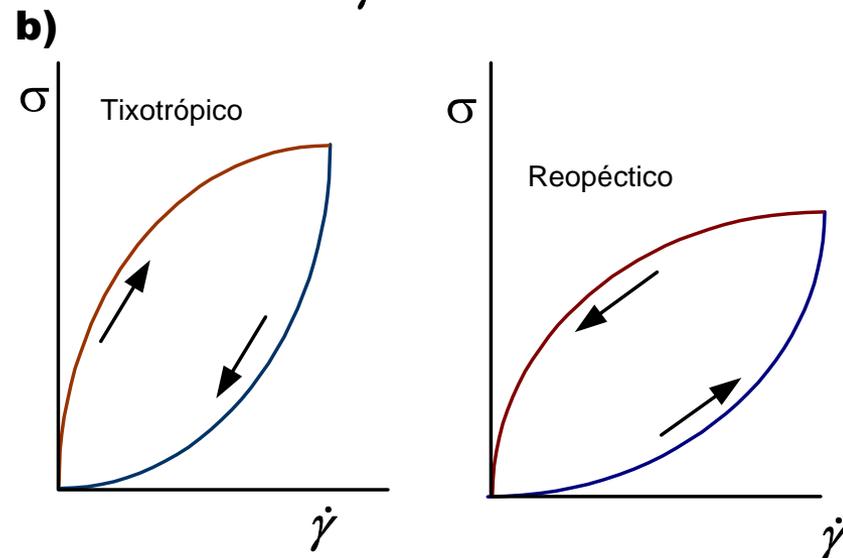
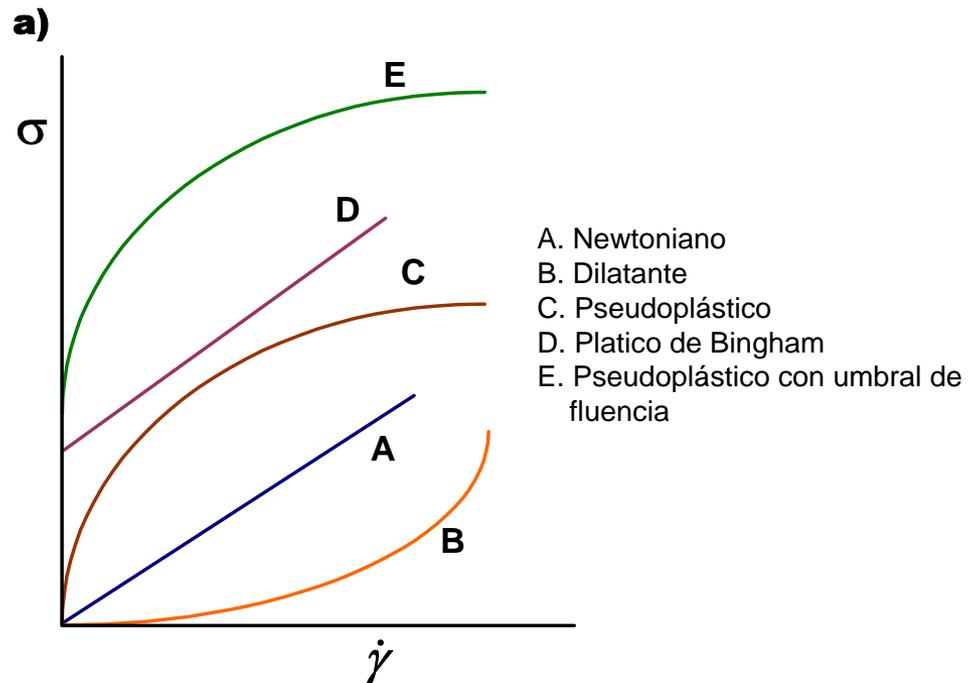
- en la que  $\eta$  es la constante de proporcionalidad, denominada viscosidad.
- A la vista de esta ecuación puede decirse que la viscosidad es el esfuerzo cortante que se requiere para originar un gradiente de velocidad unidad.



# COMPORTAMIENTO Y MODELOS REOLÓGICOS

Reogramas de fluidos alimentarios:

- a) Newtonianos y no newtonianos independientes del tiempo,
- b) No newtonianos dependientes del tiempo



# COMPORTAMIENTO NEWTONIANO

- Los fluidos Newtonianos muestran una relación lineal entre  $\sigma$  y  $\dot{\gamma}$ . Para un fluido newtoniano, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de cambio de la velocidad con la distancia, es decir al gradiente de velocidad:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \eta \frac{d v}{d y}$$

- donde  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad, aunque generalmente se le denomina simplemente viscosidad.

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$



# COMPORTAMIENTO NO NEWTONIANO:

- El comportamiento reológico de este tipo de fluidos queda completamente caracterizado por una simple relación entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación a una determinada temperatura. Esto es debido a que la viscosidad sólo depende del gradiente velocidad.
- Este grupo de fluidos engloba tres comportamientos diferenciados: Plástico, Pseudoplástico y Dilatante.



# LEY DE LA POTENCIA DE OSTWALD:

- Esta ecuación relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación según la expresión:

$$\sigma = K(\dot{\gamma})^n$$

- siendo K el índice de consistencia y n el índice de comportamiento al flujo.
  - Valores de  $n < 1$  comportamiento de fluidos pseudoplásticos,**
    - Zumos de naranja, derivados de tomate, zumos de frambuesa, soluciones de carboximetilcelulosa, yema de huevo entre otros muchos productos.
  - $n > 1$  la ley de Ostwald comportamiento de fluidos dilatantes,**
    - mieles de eucaliptos, suspensiones de almidón y crema de cacahuete.

# ECUACIÓN DE BINGHAM:

- Este es un modelo utilizado para describir el comportamiento plástico, en él aparece un umbral de fluencia que debe superarse para que el alimento empiece a fluir. La expresión de Bingham es la siguiente:

$$\sigma = \sigma_0 + \eta \dot{\gamma}$$

(donde  $\sigma_0$  es el umbral de fluencia y  $\eta$  es la viscosidad plástica. )

- Este modelo se ha aplicado en el estudio del comportamiento de suero de puré de albaricoque, zumos naturales de manzana, geles de pectina.

# ECUACIÓN DE HERSCHEL-BULKLE:

$$\sigma = \sigma_0 + K_H (\dot{\gamma})^n$$

- Este modelo puede considerarse como una generalización de la ley de la potencia en la que se incluye:

Un nuevo parámetro que es el umbral de fluencia ( $\sigma_0$ ).

$K_H$ , es el índice de consistencia y

$n$ , es el índice de comportamiento al flujo.

- Esta ecuación se ha utilizado en el estudio reológico de zumos de naranja, purés de albaricoque, clara de huevo, zumos de kiwi. Los parámetros reológicos de bastantes alimentos semilíquidos se ajustan a esta ecuación de Herschel-Bulkley.

# MODELO DE CASSON:

$$(\sigma)^{0,5} = K_{oc} + K_c (\dot{\gamma})^{0,5}$$

- Este modelo se utiliza mucho para calcular los valores del umbral de fluencia.
- ( $K_{oc}$ ) ha sido tomado como umbral de fluencia en numerosos trabajos.
- Este modelo se ha utilizado en el estudio del comportamiento de chocolate fundido, clara de huevo, derivados de tomate.



# EFECTO DE LA TEMPERATURA

- Para estudiar el efecto que produce la temperatura sobre el comportamiento reológico de los fluidos, se utiliza una ecuación tipo Arrhenius:

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

- expresión en la que  $\eta_0$  es un parámetro, R la constante de los gases,  $E_a$  la energía de activación al flujo y T la temperatura absoluta.
- Para ello se linealiza la ecuación de Arrhenius, tomando logaritmos, y al representar  $\ln(\eta)$  frente al inverso de la temperatura absoluta  $1/T$ , se obtiene una recta, a partir de cuya pendiente es posible determinar el valor de la energía de activación al flujo.

# EFEECTO DE LA CONCENTRACIÓN

- Es sabido que soluciones con altos contenidos en sólidos solubles presentan una mayor viscosidad que las diluidas. Para poder evaluar el efecto que produce, este contenido en sólidos, sobre la viscosidad de los fluidos se han utilizado diversos tipos de ecuaciones. Sin embargo, las más utilizadas han sido una de tipo potencial y otra exponencial:

$$\eta = \eta_1(C)^a \qquad \eta = \eta_2 \exp(bC)$$

- en las que C es el contenido de sólidos del fluido y  $\eta_i$ , a y b son parámetros a determinar, a partir de los datos de variación de la viscosidad con la concentración, a una determinada temperatura.

# EFECTO COMBINADO TEMPERATURA-CONCENTRACIÓN

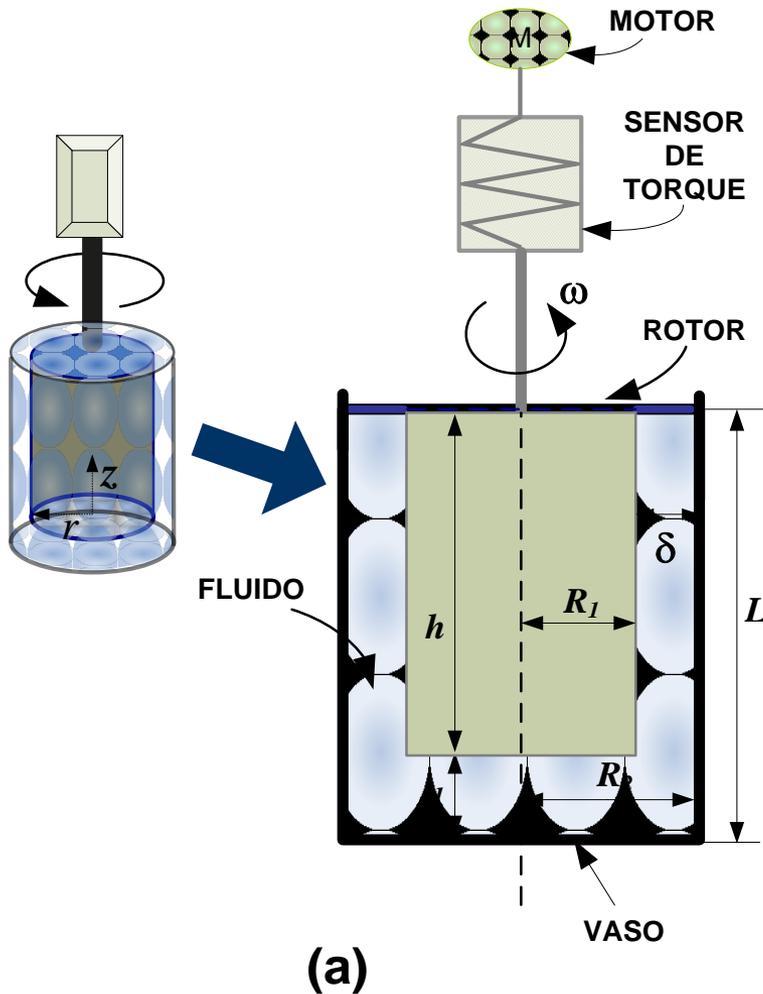
- Desde el punto de vista ingenieril es interesante poder encontrar una sola expresión que correlacione el efecto que la temperatura y concentración ejercen sobre la viscosidad.
- Las ecuaciones que generalmente se utilizan son:

$$\eta_a = \alpha_1 (C)^{\beta_1} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad \eta_a = \alpha_2 \exp\left(\beta_2 C + \frac{E_a}{RT}\right)$$

- en la que  $\eta_a$  es la viscosidad para fluidos newtonianos, y la viscosidad aparente o índice de consistencia para no newtonianos. Los parámetros  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  son constantes, mientras que  $C$  es la concentración y  $T$  la temperatura absoluta.

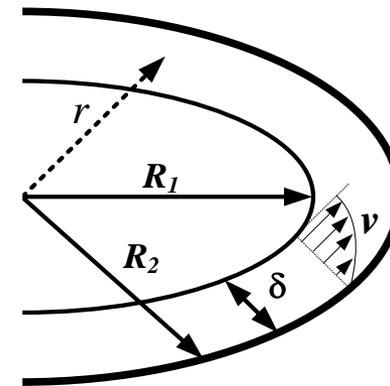


# MEDICION DE LOS PARAMETROS REOLOGICOS



$$\tau = \frac{T}{2\pi R_1^2 L}$$

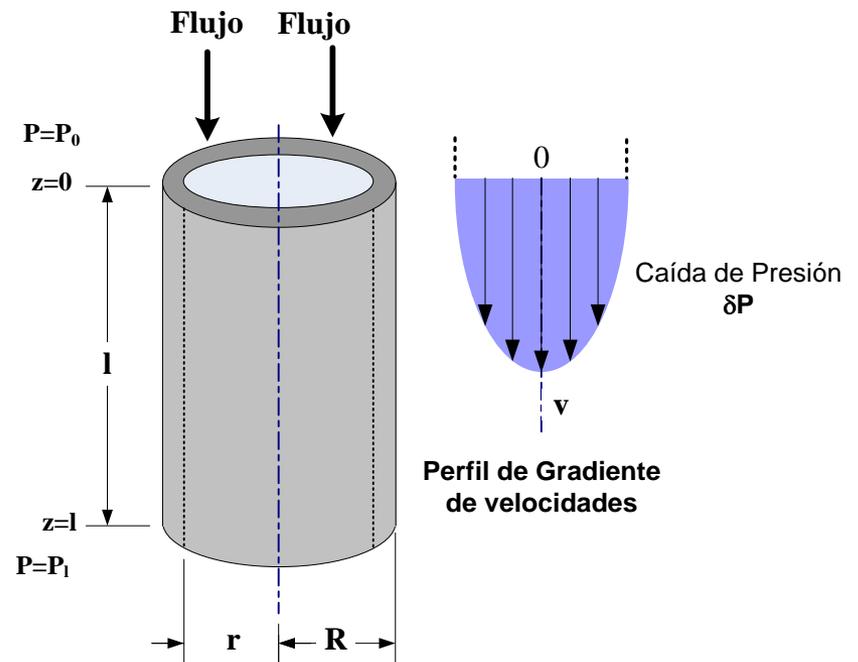
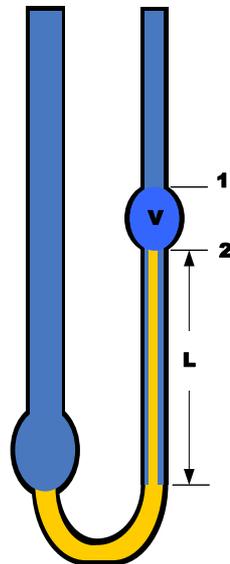
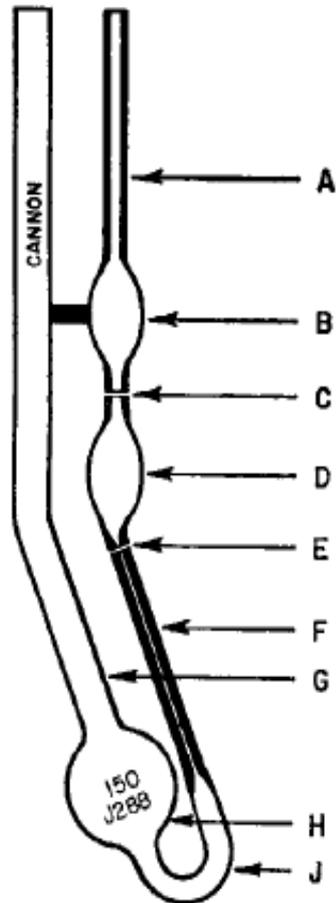
$$\dot{\gamma} = \left( -\frac{dv}{dr} \right) = \frac{\omega R_1}{\delta}$$



(b)

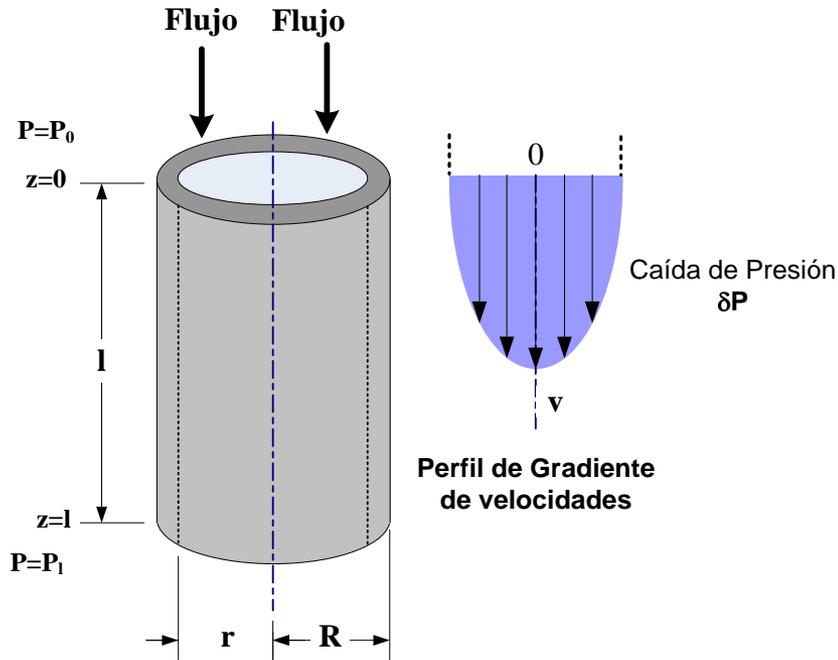
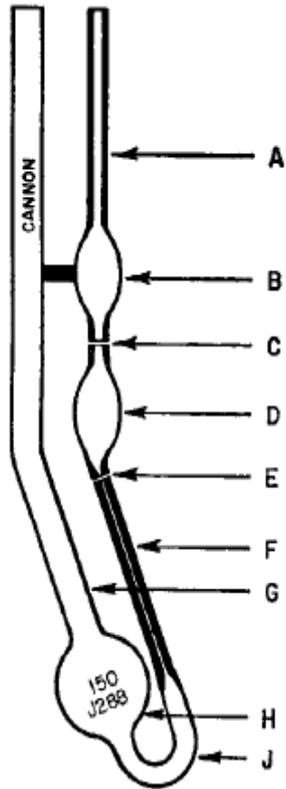
Viscosímetro de Cilindros Concéntricos. a) Esquema del aparato, b) perfil de velocidad a través del líquido.

# MEDICION DE LOS PARAMETROS REOLOGICOS



## VISCOSÍMETRO CAPILAR

# MEDICION DE LOS PARAMETROS REOLOGICOS

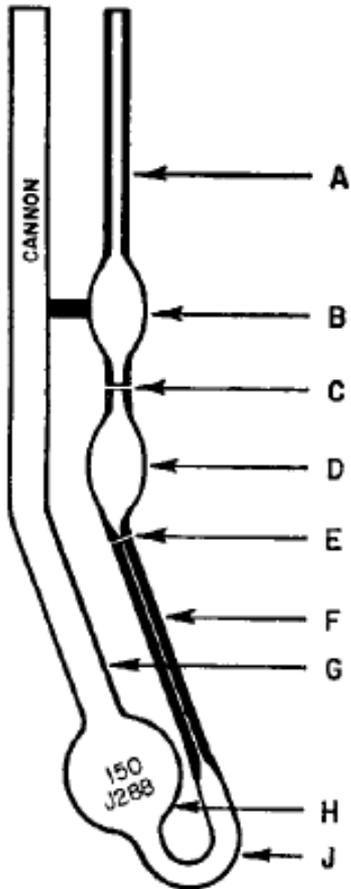


**RABINOWITSCH-MOONEY**  $\dot{\gamma} = \frac{3 + b}{4} \left( \frac{4q}{\pi R^3} \right)$

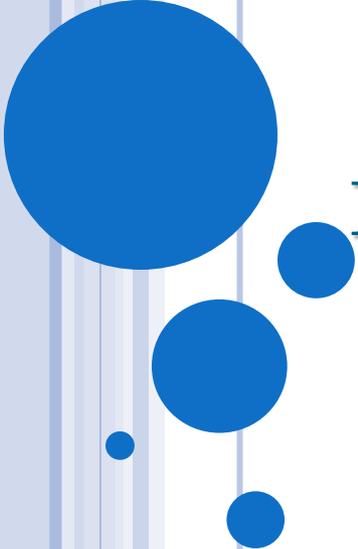
$$b = \frac{d \log(4q/\pi R^3)}{d \log(\Delta P R / 2L)}$$



# MEDICION DE LOS PARAMETROS REOLOGICOS



TIPO Tamaño Universal	TEMPERATURA		Rango de viscosidad Cinemática [cSt]
	40°C mm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> , [cSt/s]	100°C mm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> , [cSt/s]	
Nro. 25	0.002097	0.002091	0.5 a 2
Nro. 75	0.009083	0.009038	1.6 a 8
Nro. 100	0.01656	0.016448	3 a 15
Nro. 200	0.1058	0.1053	20 a 100



# **REOLÓGICA DE FLUIDOS**

**Ing. Williams Castillo Martínez**

**[williamsscm@hotmail.com](mailto:williamsscm@hotmail.com)**