

# TRANSFERENCIA DE MOMENTUM

MI31A-Fenómenos de Transporte en Metalurgia  
Extractiva

Prof. Tanai Marín

16 Abril 2007

Clase #9

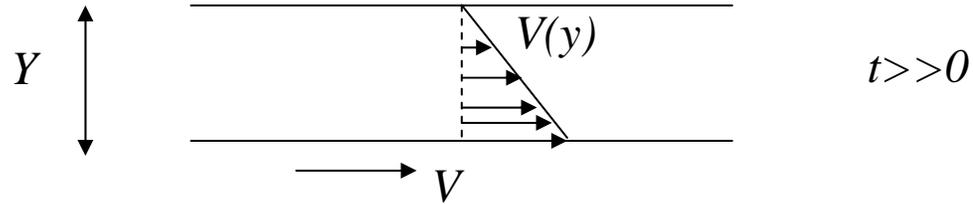
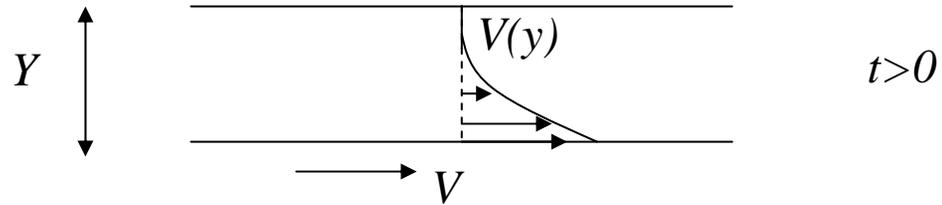
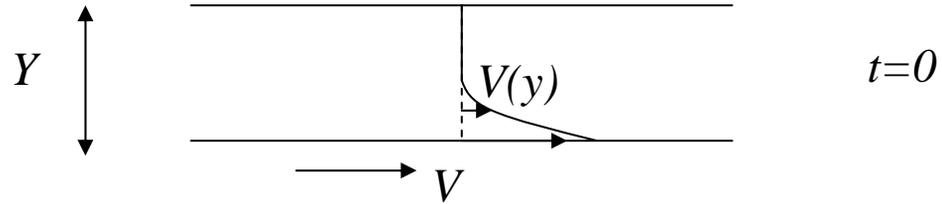
# Flujo de Fluidos Viscosos

- Para fluidos con bajo peso molecular, la propiedad física que caracteriza la resistencia a fluir es la viscosidad
- Transporte molecular de momentum: transporte viscoso, relacionado con  $\mu$
- Transporte convectivo de momentum: debido al movimiento del seno del fluido, relacionado con  $\rho$ .

# Ley de Newton de Viscosidad

- Supongamos dos placas paralelas de área  $A$ , separadas por una distancia  $Y$ .
- En el espacio entre ellas, hay un fluido (líquido o gas).
- Inicialmente el sistema está en reposo, pero en  $t=0$ , la placa inferior se pone en movimiento en la dirección  $x$  a una velocidad constante  $V$ .

# Ley de Newton de Viscosidad



# Ley de Viscosidad de Newton

- Una vez que se logra el estado estacionario, es necesario aplicar una fuerza constante  $F$  para mantener la velocidad  $V$  de la placa. Se cumple la siguiente relación:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y}$$

- donde  $\mu$  es la viscosidad del fluido en  $\text{kg}/(\text{m s})$  o  $(\text{Pa s})$

# Ley de Viscosidad de Newton

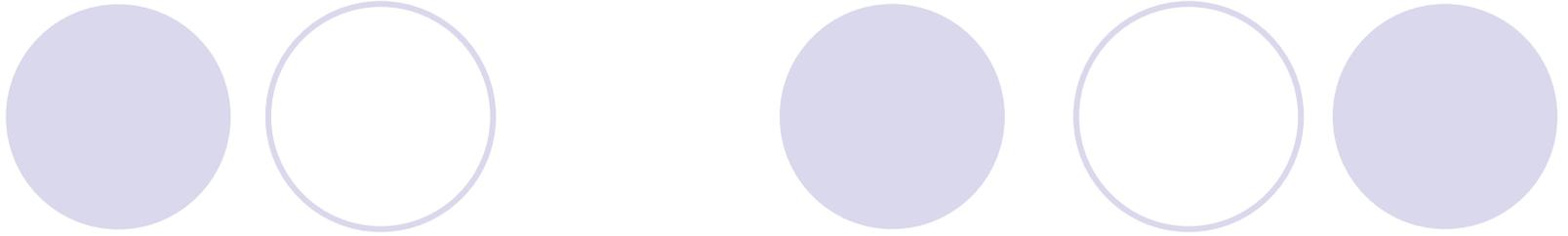
- Del ejemplo anterior, se deriva la ley de Newton de viscosidad:

$$\tau = -\mu \frac{dv_x}{dy}$$

- donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte aplicado o fuerza por unidad de área.
- $\tau$  tiene unidades de  $\text{kg}/(\text{ms}^2)$  o  $\text{N}/\text{m}^2$

# Ejemplo

- Dos placas paralelas, distantes a 0.25 m y con aceite lubricante entre ellas. Calcule la fuerza requerida para mover la placa superior que tiene un área de 1 m<sup>2</sup> a una velocidad de 1 m/s cuando la viscosidad del aceite es de 0.1 Ns/m<sup>2</sup>.



- Es clara la similitud entre la ley de viscosidad de Newton y la ley de conductividad de Fourier:

$$\tau = -\mu \frac{dv_x}{dy}$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}$$

- En ambos casos, las constantes  $m$  o  $k$  representan la resistencia al flujo de momentum o calor por transporte molecular.

# Viscosidad – rangos típicos

<b>Fluido</b>	<b>Viscosidad [mPa s]</b>
Gases	0.01 – 0.1
Agua	0.3 – 1.75
Metales Líquidos	0.5 – 5
Sales Fundidas	1 – 5
Matas fundidas	1 – 4
Nitratos y Carbonatos	5 – 20
Aceites	100 – 5000
Escorias, Lava	300 – 10000

# Viscosidad

- En el caso del aire, la viscosidad aumenta con la temperatura, de  $1.72 \times 10^{-5}$  Pa s a  $0^\circ\text{C}$  a  $2.2 \times 10^{-5}$  Pa s a  $100^\circ\text{C}$ . a presión constante, la viscosidad del aire está dada por:

$$\mu_{\text{aire}} = (-1.0585 + 0.16803\sqrt{T(K)}) \cdot 10^{-5} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

# Viscosidad

- En el caso del agua, la viscosidad disminuye con la temperatura, de  $1.75 \times 10^{-3}$  Pa s a  $0^\circ\text{C}$  a  $0.279 \times 10^{-3}$  Pa s a  $100^\circ\text{C}$ . La viscosidad del agua está dada por:

$$\mu_{\text{agua}} = \exp(0.6885 - 0.10024 \cdot T(^{\circ}\text{C})^{0.65}) \cdot 10^{-3} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

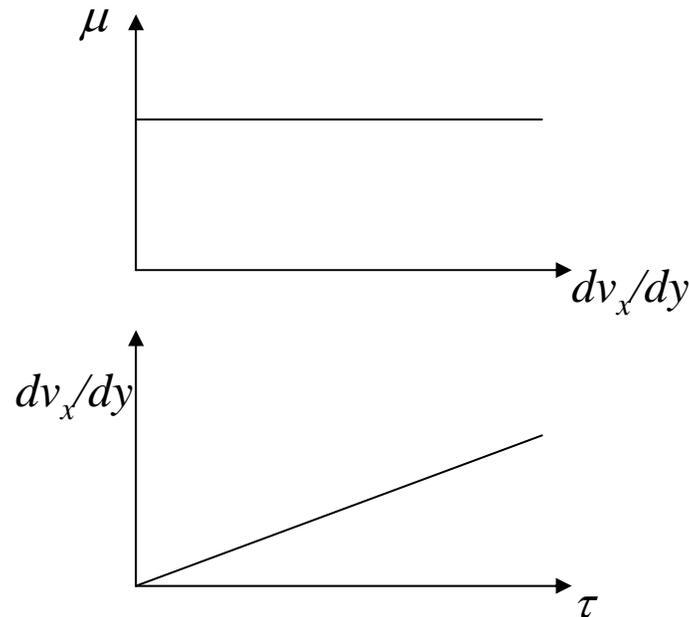
# Factores de los que depende la viscosidad

- En general la viscosidad es función de la Temperatura y presión, de la misma forma que la conductividad térmica
- Además depende de la composición del fluido y
- En algunos casos, depende de la velocidad de corte ( $dv_x/dy$ )

# Fluidos Newtonianos

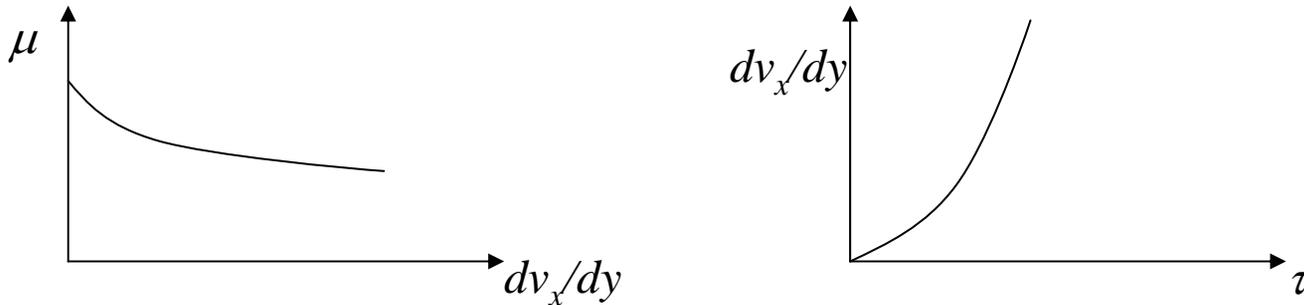
- Para una presión, temperatura y composición dadas, la viscosidad permanecerá constante, independiente de la velocidad de corte aplicada. Por lo tanto se cumple

$$\tau = -\mu \frac{dv_x}{dy}$$



# Fluidos No-Newtonianos

- Para estos fluidos, la razón  $\tau/S$  no es constante.



- Se clasifican dependiendo de su comportamiento: pseudo elásticos, dilatantes, plásticos

# Viscosidad cinemática

- En muchas situaciones es conveniente definir la viscosidad cinemática,  $\nu$ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

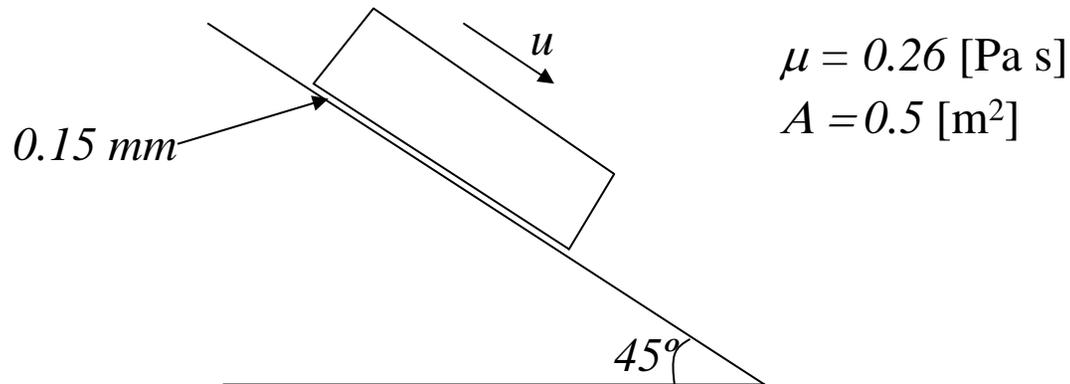
- $\nu$ , tiene unidades de  $\text{m}^2/\text{s}$ , al igual que la difusividad térmica  $\alpha$ .

# Viscosidad cinemática

Fluido	$\mu$ [kg/(m s)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]
Hidrogeno	$8.9 \times 10^{-6}$	0.084	$1.06 \times 10^{-4}$
Aire	$1.8 \times 10^{-5}$	1.19	$1.51 \times 10^{-5}$
Gasolina	$2.9 \times 10^{-4}$	679	$4.27 \times 10^{-7}$
Agua	$1.0 \times 10^{-3}$	990	$1.01 \times 10^{-6}$
Alcohol	$1.2 \times 10^{-3}$	795	$1.51 \times 10^{-6}$
Mercurio	$1.5 \times 10^{-3}$	12900	$1.16 \times 10^{-7}$
Lubricante	0.26	932	$2.79 \times 10^{-4}$
Glicerina	1.5	1260	$1.19 \times 10^{-3}$

# Ejemplo

- Un bloque de 30 kg se desliza a velocidad constante por un plano inclinado sobre una delgada capa de aceite. Calcule la velocidad en estado estacionario.



# Ejemplo – Solución

- En estado estacionario, el bloque se mueve con velocidad constante, por lo que la fuerza de gravedad es opuesta por el esfuerzo de corte

$$F = m \cdot g \cdot \sin \theta = A \cdot \tau$$

$$\tau = \frac{m \cdot g \cdot \sin \theta}{A}$$

- El gradiente de velocidad en la capa de aceite puede asumirse como lineal, según la ley de Newton de

viscosidad:  $\tau = -\mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\Delta u}{\delta} \Rightarrow u = \frac{\tau \delta}{\mu}$

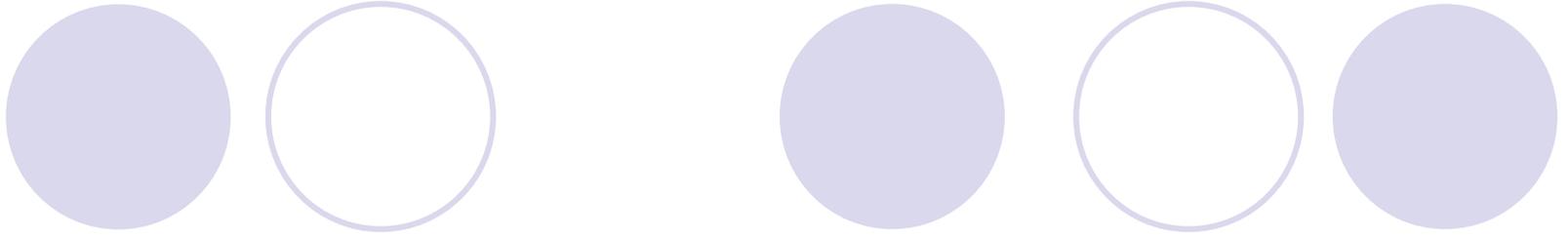
- Resolviendo:  $u = \frac{m \cdot g \cdot \sin \theta \cdot \delta}{\mu \cdot A} = 0.24 \left[ \frac{m}{s} \right]$

# Flujo Laminar y Turbulento

- Número de Reynolds:

$$Re = \frac{Lu\rho}{\mu}, = \frac{Du\rho}{\mu}$$

- En flujo dentro de cañerías, se cumple que:
  - Flujo laminar:  $Re < 2100$
  - Flujo turbulento:  $Re > 4000$



- En flujo sobre una placa, se cumple que:
  - Flujo laminar:  $Re < 3 \cdot 10^5$
  - Flujo turbulento:  $Re > 3 \cdot 10^6$