

como newtoniano, y entonces $\mu = \eta$.
 Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas o modelos pa
 ra expresar la relación que existe, en estado estacionario, en-
 tre τ_{yx} y $\dot{\gamma}$ (10). Todas las ecuaciones tienen parámetros empíri-
 cos, cuyo valor numérico puede determinarse correlacionando los
 datos experimentales de τ_{yx} frente a $\dot{\gamma}$ a temperatura y presión
 constante, ver apéndice C.
 Por otro lado, la Ley de Hooke establece que la deformación
 de un cuerpo es proporcional al esfuerzo aplicado, donde la
 constante de proporcionalidad es el módulo de elasticidad de Young.

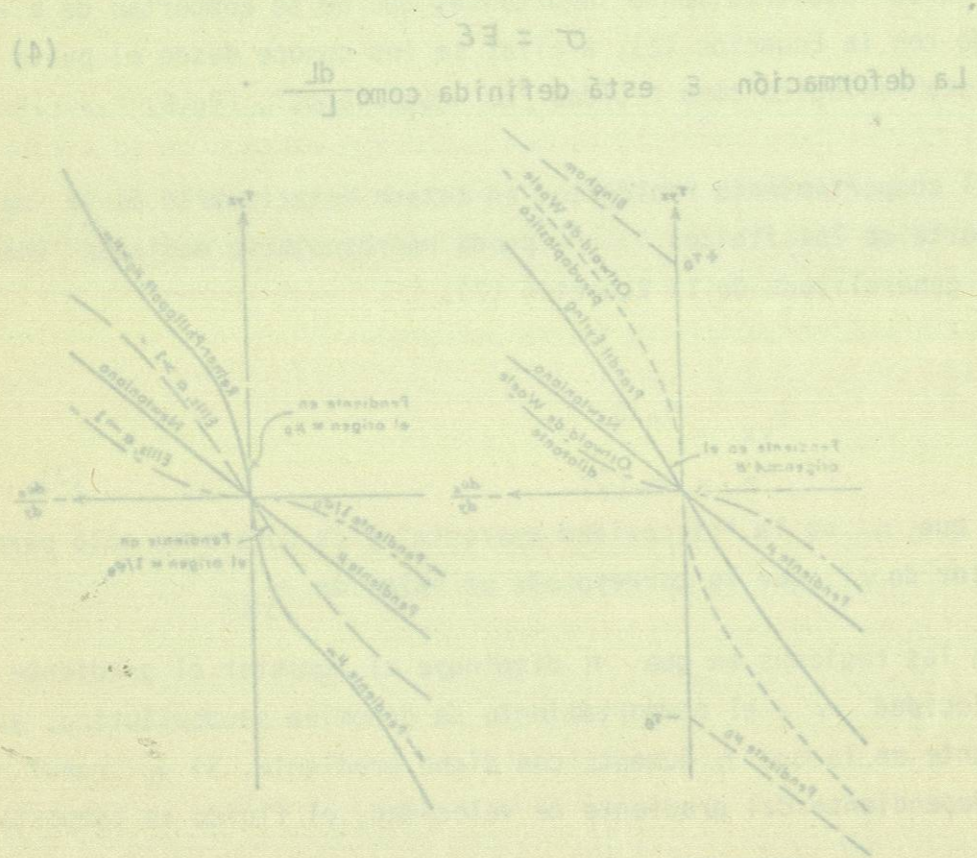


Fig. 6.- Resumen de modelos no-newtonianos en estado estacio-
 nario (con fines comparativos se indica también el
 modelo newtoniano). (10).

En general existen dos formas diferentes para efectuar la me-
 didión de la viscosidad del vidrio, una para valores bajos de vis-
 cosidad (10^{7-8} poise) y otra para valores altos (10^{7-8} poise).
 Estas dos formas de medición son cualitativamente distintas en -
 cuanto al tipo de flujo empleado para efectuar la medición de la
 viscosidad a partir de la relación entre esfuerzo y deformación.

La primera forma de medición (baja viscosidad) se basa en la
 generación de flujo simple de corte (fig.7a), donde la viscosidad
 de corte está dada por

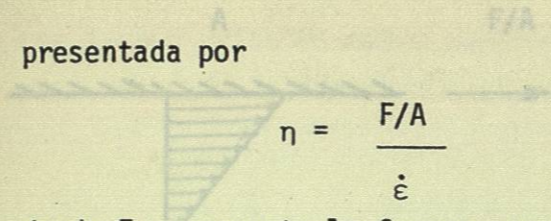
$$\mu = \frac{\tau_{yx}}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

donde τ_{yx} representa el esfuerzo de corte y $\dot{\gamma}$ el gradiente de
 velocidad.

Experimentalmente el flujo simple de corte se puede conseguir
 mediante; el flujo couette, que implica la rotación de un cilin-
 dro dentro de otro y en cuyo anulo se encuentra la muestra, o -
 bien mediante la inmersión de una esfera en un medio de vidrio fun-
 dido (principio de Stokes) y relacionando el tiempo de descenso ó
 ascenso de esta esfera con la viscosidad. En ambos casos el flujo
 generado es flujo de corte.

Dependiendo de los valores que tome la viscosidad μ para di-
 ferentes valores de $\dot{\gamma}$ que le corresponde un valor de τ_{yx} , el fluj-
 do será clasificado como Newtoniano si μ es constante y No Newto-
 niano si $\mu \neq cte$, en estado estacionario.

La segunda forma de medición (alta viscosidad) se basa en la
 generación de flujo uniaxial extensional que es cualitativamente
 diferente al anterior (fig.7B) y la viscosidad extensional es re-



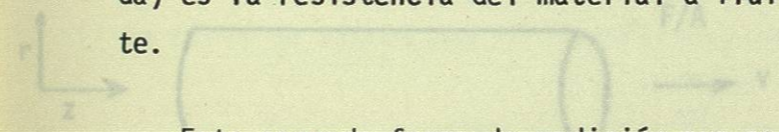
presentada por

$$\eta = \frac{F/A}{\dot{\epsilon}} \tag{6}$$

donde F representa la fuerza necesaria para estirar un cilindro de área de sección transversal A, a una velocidad V y $\dot{\epsilon}$ representa el gradiente de velocidad extensional, definido como

$$\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \frac{d}{dt} \ln \frac{L}{L_0} \tag{7}$$

La viscosidad extensional de un material es la propiedad del material que indica la resistencia del mismo a fluir en flujo extensional, de la misma forma que la viscosidad (comúnmente conocida) es la resistencia del material a fluir en flujo simple de corte.



Esta segunda forma de medición que es la que nos compete, se originó como una respuesta a los problemas encontrados al intentar aplicar los métodos de medición anteriormente descritos para la determinación de la viscosidad del vidrio a relativas bajas temperaturas (alta viscosidad). Así pues, el método de la esfera descendente requería enormes tiempos de descenso o bien no se garantizaba una travesía rectilínea, similarmente el método de cilindros concéntricos generaba problemas de resistencia al desgaste de los mismos.

Fig 7.- a) Flujo simple de corte, b) Flujo extensional

El flujo extensional difiere del flujo simple de corte desde su cinemática hasta las propiedades materiales involucradas y solo

En general existen dos formas diferentes para efectuar la medición de la viscosidad del vidrio, una para valores bajos de viscosidad (10^{-8} poise) y otra para valores altos (10^{-8} poise). Estas dos formas de medición son cualitativamente distintas en cuanto al tipo de flujo empleado para efectuar la medición de la viscosidad a partir de la relación entre esfuerzo y deformación.

La primera forma de medición (baja viscosidad) se basa en la generación de flujo simple de corte (fig. 7a), donde la viscosidad de corte está dada por

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{\dot{\gamma}_{xy}} \tag{a}$$

donde τ_{xy} representa el esfuerzo de corte y $\dot{\gamma}_{xy}$ el gradiente de velocidad.

Experimentalmente el flujo simple de corte se puede conseguir mediante el flujo cónico, que implica la rotación de un cilindro dentro de otro y en cuyo anillo se encuentra la muestra, o bien mediante la inmersión de una esfera en un medio de vidrio fundido (principio de Stokes) y relacionando el tiempo de descenso de esta esfera con la viscosidad. En ambos casos el flujo generado es flujo de corte.

Dependiendo de los valores que tome la viscosidad η para diferentes valores de $\dot{\gamma}$ que le corresponde un valor de τ_{xy} , el flujo será clasificado como newtoniano si η es constante y no newtoniano si η varía con el estado estacionario.

La segunda forma de medición (alta viscosidad) se basa en la generación de flujo uniaxial extensional que es cualitativamente diferente al anterior (fig. 7b) y la viscosidad extensional es re-

presentada por

$$\tau_{xy} = \mu \frac{dv_x}{dy}$$

donde F representa la fuerza necesaria para estirar un cilindro de área de sección transversal A , a una velocidad v y $\dot{\epsilon}$ representa el gradiente de velocidad extensional, definido como

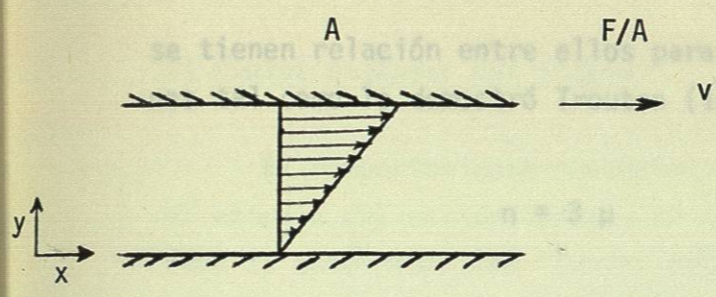
$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{d \ln L}{dt}$$

(7)

La viscosidad extensional de un material es la propiedad del material que indica la resistencia del mismo a fluir en flujo extensional, de la misma forma que la viscosidad (comúnmente conocida) es la resistencia del material a fluir en flujo simple de corte.

Esta segunda forma de medición que es la que nos compete, se originó como una respuesta a los problemas encontrados al intentar aplicar los métodos de medición anteriormente descritos para la determinación de la viscosidad del vidrio a relativas bajas temperaturas (alta viscosidad). Así pues, el método de la esfera descendente requiere enormes tiempos de descenso o bien no se garantiza una travesía rectilínea, similarmente el método de cilindros concéntricos genera problemas de resistencia al desgaste de los mismos.

El flujo extensional difiere del flujo simple de corte desde su cinemática hasta las propiedades materiales involucradas y solo



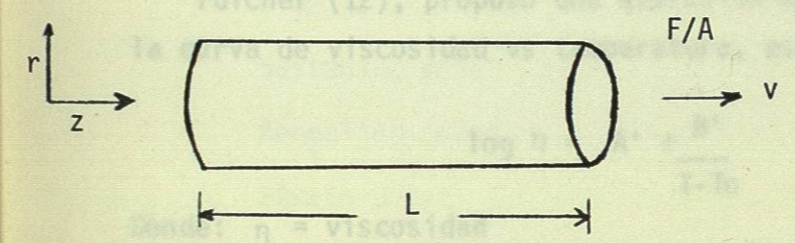
$$\tau_{xy} = \mu \frac{dv_x}{dy}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy} \quad (8)$$

(2)

Esta relación nos permite obtener los resultados obtenidos por las dos formas de medición anteriormente descritas, en esta forma de viscosidad de los materiales.

La Fig. 8a, muestra una curva típica de viscosidad vs temperatura para el vidrio, en la cual podemos observar que la viscosidad cambia uniformemente con la temperatura, en contraste con los materiales cristalinos, en los cuales la viscosidad cambia abruptamente en la temperatura de fusión.

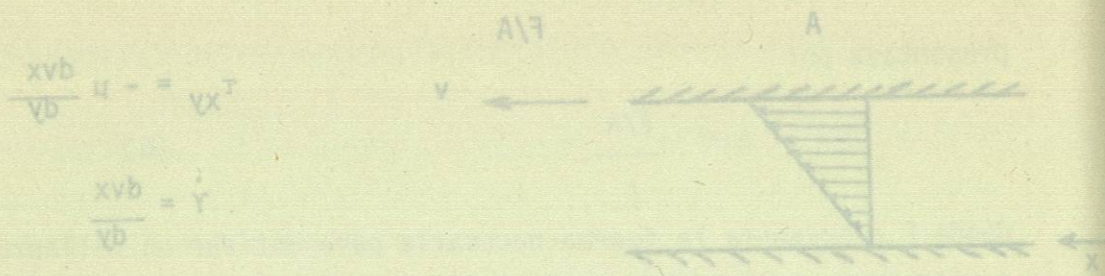


$$F/A = \eta \dot{\epsilon}$$

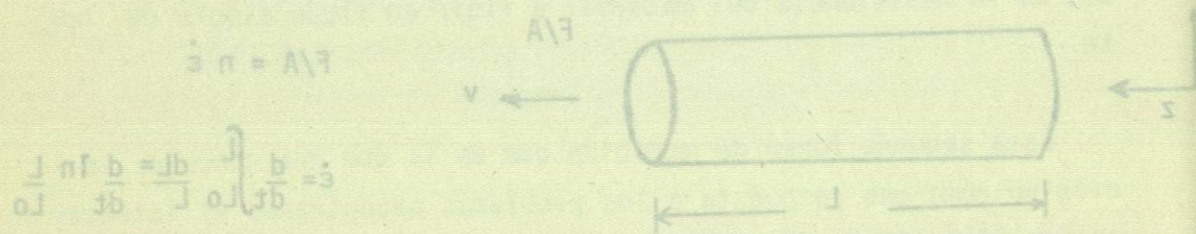
$$\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \frac{d}{dt} \ln \frac{L}{L_0}$$

(b)

Fig 7.- a) Flujo simple de corte, b) Flujo extensional uniaxial.



(c)



(d)

Fig. 7.- a) Flujo simple de corte, b) Flujo extensional

se tienen relación entre ellos para el caso de fluidos Newtonianos tal como lo demostró Trouton (11).

El comportamiento reológico del vidrio es importante para el estudio del estado $\eta = 3\mu$ sin embargo en la práctica lo que se hace es determinar los "puntos estándar" de la fabricación de vidrio (8)

Esta relación nos posibilita comparar los resultados obtenidos por las dos formas de medición anteriormente descritas, en estudios de viscosidad de los materiales.

La Fig. 8a, muestra una curva típica de viscosidad vs temperatura para el vidrio, en la cual podemos observar que la viscosidad cambia uniformemente con la temperatura, no ocurriendo esto con los materiales cristalinos, en los cuales la viscosidad cambia abruptamente en la temperatura de fusión.

Fulcher (12), propuso una expresión matemática para modelar la curva de viscosidad vs temperatura, esta es.

$$\log \eta = A' + \frac{B'}{T - T_0}$$

Donde: η = viscosidad

A', B' = constantes

T_0 = temperatura de referencia

T = temperatura

Es claro que el concepto de "puntos estándar" es de gran utilidad para indicar la manejabilidad del vidrio, pero de ninguna manera (rigurosamente hablando) nos representa una propiedad material del mismo.