

80  
29



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES<sup>1</sup>  
FAC. DE QUIMICA

## DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD EN FLUIDOS

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO  
P R E S E N T A :  
**EMILIA SOLEDAD LUCARIO**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1991



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. INTRODUCCION	1
2. CONCEPTOS GENERALES DE FLUIDOS	3
2.1 Fluido	3
2.2 Esfuerzo cortante ( $\tau$ )	3
2.3 Reología	4
2.4 Viscosidad	5
2.5 Velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ )	6
2.6 Viscosidad dinámica ( $\mu$ )	7
2.7 Viscosidad cinemática ( $\nu$ )	8
2.8 Viscosidad aparente ( $\mu_a$ )	8
2.9 Clasificación de fluidos	9
2.9.1 Fluido newtoniano	9
2.9.2 Fluido no newtoniano	9
2.9.2.1 Fluido dependiente del tiempo	10
Fluido tixotrópico	10
Fluido reopéctico	11
2.9.2.2 Fluido independiente del tiempo	11
Fluido plástico de Bingham	11
Fluido pseudoplástico	13
Fluido dilatante	14
2.9.2.3 Fluido viscoelástico	15
2.10 Clasificación de flujo	15
2.10.1 Flujo laminar	15
2.10.2 Flujo turbulento	16
2.11 Descripción física del fluido analizado	17
3. VISCOSIMETROS	20
3.1 Definición	20
3.2 Viscosímetros utilizados	25
3.2.1 Viscosímetro rotacional	25
3.2.1.1 Brookfield	26

3.2.1.2	Reómetro Baroid	31
3.2.2	Viscosímetro capilar	33
3.2.2.1	Tubo de vidrio - Cannon Fenske	34
4.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	42
4.1	Ensayos efectuados	42
4.1.1	Densidad aparente en polvos finos	42
4.1.2	Densidad en la mezcla de caolín-agua	43
4.1.3	Gravedad específica	45
4.1.4	Determinación de la viscosidad	46
5.	RESULTADOS	56
6.	CONCLUSIONES	81
	BIBLIOGRAFIA	84

## 1. INTRODUCCION

La Reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los fluidos, estos desde el punto de vista reológico se clasifican en elásticos, viscoelásticos y viscosos, existiendo dentro de cada uno diferentes tipos.

El comportamiento de los fluidos y su flujo tienen gran importancia en la ingeniería de proceso, debido a que gran parte de los materiales se encuentran en forma de fluidos y su almacenamiento, bombeo y control durante el proceso requieren de condiciones particulares.

En el bombeo de un fluido, una característica importante para definir sus condiciones, es la determinación de la viscosidad. Esta propiedad, es la que distingue a un fluido de un sólido por el tipo de respuesta que presentan al ser sometidos a un esfuerzo.

El flujo de un fluido, ya sea solo o con partículas y a través de conductos circulares es uno de los aspectos más comúnmente encontrados en el campo de la ingeniería, por lo que es

relevante conocer sus características reológicas.

El presente trabajo se realizó para ver la posibilidad de determinar la viscosidad dinámica de un fluido, compuesto por una suspensión de agua con caolín, que se comporta de manera semejante a un lodo de drenaje. Usando dos tipos de viscosímetros uno rotacional y otro de tubo capilar y así poder determinar cual de los dos viscosímetros es el más adecuado para caracterizar al fluido antes mencionado, haciendo variaciones de concentración, tiempo y temperatura.

El conocimiento de la viscosidad ayuda a calcular el número de Reynolds, con éste y las características de la tubería se puede determinar el factor de fricción que interviene en la fórmula de Darcy Weisbach para obtener la pérdida de carga que se tiene a lo largo de una conducción y por tanto con ella seleccionar la potencia del equipo de bombeo que se requiere para transportar el fluido, por ejemplo, agua sola o con caolín. Además con el valor del número de Reynolds se puede saber si el régimen del escurrimiento es laminar o turbulento.

## 2. CONCEPTOS GENERALES DE FLUIDOS

### 2.1 Fluido

Es una sustancia que al fluir sufre una deformación continua cuando se somete a un esfuerzo cortante ( $\tau$ ) por muy pequeño que éste sea, independientemente de su viscosidad. Cuando en un fluido el movimiento de sus moléculas es mayor que la atracción molecular, origina que no tenga forma propia, sino que adopte la del recipiente que lo contenga, al dejar de aplicar la fuerza de corte, la deformación cesa y al no existir fuerzas internas que tiendan a hacer que las partículas del fluido regresen a sus posiciones relativas el fluido conserva la configuración adquirida.

### 2.2 ESFUERZO CORTANTE ( $\tau$ )

Se define como la relación entre la fuerza aplicada (F) por unidad de área (A) donde actúa dicha fuerza para causar el movimiento del fluido.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

El esfuerzo cortante ( $\tau$ ) es una deformación laminar y puede ser considerado como un proceso en el cual un conjunto de láminas planas, paralelas, e infinitamente delgadas, como se muestra en la fig 1.a, se deslizan cada una por encima de otra.

La deformación laminar también puede presentarse en diferentes geometrías como las que se presentan en la fig 1.b, c y d

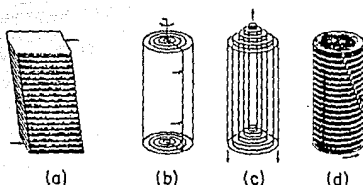


Fig 1 Deformación laminar en diferentes geometrías

Los cortes mostrados en las figs 1b y 1c son muy importantes en Reología, puesto que representan los tipos de flujo encontrado en los viscosímetros rotacional y tubo capilar, respectivamente; en cambio los mostrados en las figs 1a y 1d son los que más comunmente se emplean para determinar los módulos de sólidos durante la deformación debida al esfuerzo cortante ( $\tau$ ). En la fig 1c se presenta el tipo de flujo establecido en una tubería circular.

### 2.3 Reología

Es el estudio de la deformación en la forma y el flujo de un fluido bajo la influencia de un esfuerzo. La deformación de un fluido puede dividirse en dos aspectos, a saber



#### a. Deformación reversible espontánea (elasticidad)

Es un parámetro que caracteriza reológicamente a los sólidos y en la cual el trabajo usado para mantener el flujo y deformar a un cuerpo perfectamente elástico es disipado en forma de calor y mecánicamente no es recuperable. La elasticidad corresponde a una energía mecánicamente recuperable por lo que el cuerpo recupera su forma original cuando la fuerza deja de ser aplicada sobre él.

#### b. Deformación irreversible (flujo viscoso ó fricción)

Este caso caracteriza reológicamente a los fluidos en los que hay una conversión de la energía mecánica en calor, por lo que el trabajo empleado en mantener el flujo se disipa y no es posible recuperarlo, así el líquido no recupera su forma original y continua fluyendo a un bajo la influencia de esfuerzos extremadamente pequeños en magnitud.

### 2.4 Viscosidad

Es una medida de la resistencia al flujo ó de la deformación de un fluido al actuar sobre él un esfuerzo cortante ( $\tau$ ) que da lugar a fuerzas que se oponen al movimiento. Como resultado de la interacción y cohesión de sus moléculas, la presencia de partículas en un fluido incrementa su viscosidad.

Viscosidad según Newton ( $\mu$ ). Se caracteriza cuando el esfuerzo tangencial que actúa entre dos láminas de igual área (A) separadas una distancia (dy), y que se desplazan con una velocidad (dv) es proporcional al gradiente transversal de velocidades  $dv/dy$ . A la constante de proporcionalidad se le conoce como viscosidad absoluta o dinámica ( $\mu$ ) y se aplica para flujo laminar.

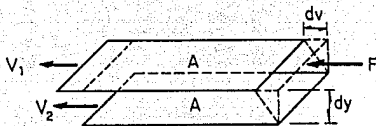


Fig 2 Definición de viscosidad

Matemáticamente lo anterior se expresa como

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

que se denomina como la ecuación reológica del fluido.

donde

F fuerza, en dina

A área, en  $\text{cm}^2$

V velocidad, en  $\text{cm/s}$

y distancia, en  $\text{cm}$

$\mu$  viscosidad, en poise

$\tau$  esfuerzo cortante, en  $\text{dina/cm}^2$

## 2.5 Velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ )

También se le conoce como el gradiente de velocidad o gradiente transversal de velocidad  $\left( \frac{dv}{dy} \right)$  en el cual las capas intermedias se mueven cada una con respecto a las otras, debido al esfuerzo cortante aplicado ( $\tau$ ).

Existe una relación única para todos los fluidos entre el esfuerzo cortante aplicado ( $\tau$ ) y la velocidad de corte dada ( $\dot{\gamma}$ ). La ecuación que describe esta relación está dada por

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} = \frac{\tau}{\mu} \quad (3)$$

donde

$\dot{\gamma}$  velocidad de corte, en  $s^{-1}$

## 2.6 Viscosidad dinámica ( $\mu$ )

Es la relación entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ )

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

La viscosidad dinámica, mide la resistencia al flujo de un fluido, cuando hay transferencia de momento y transporte, debida a dos causas

La primera es la fuerza de cohesión que existe entre las moléculas del fluido las cuales dificultan el desplazamiento entre ellas.

La segunda es la cantidad de movimiento entre las capas del fluido que no se mueven a la misma velocidad.

Por lo anterior, la viscosidad es función de la temperatura (T) y la presión (p) factor casi siempre despreciable para líquidos y de efecto menor para la mayoría de los gases y vapores.

Para un flujo no-newtoniano que circula en una tubería, es posible definir una viscosidad efectiva  $\mu_e$ , la cual se define como

$$\mu_e = \frac{\tau_w}{8 \frac{V}{D}} \quad (5)$$

donde

- $\mu$  viscosidad dinámica, en poise
- $\tau_w$  radio del esfuerzo en la pared de la tubería, en dina/cm<sup>2</sup>
- V velocidad de flujo, en cm/s
- D diámetro, en cm
- $\mu_e$  viscosidad efectiva, en poise

## 2.7 Viscosidad cinemática ( $\nu$ )

Se define como la relación entre la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) y la densidad ( $\rho$ ) de un fluido, a la misma temperatura

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (6)$$

donde

- $\nu$  viscosidad cinemática, en cm<sup>2</sup>/s
- $\rho$  densidad del fluido, en g/cm<sup>3</sup>

Experimentalmente su valor se determina mediante viscosímetros de tubo capilar, donde el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) está dado por una diferencia de nivel del fluido, es decir, es una medida de la resistencia del flujo bajo la acción de la gravedad, y el tiempo de flujo de un volumen fijo de fluido es directamente proporcional a ésta viscosidad cinemática ( $\nu$ ).

## 2.8 Viscosidad aparente ( $\mu_a$ )

Se utiliza para predecir y correlacionar los datos de flujo en tuberías, es aplicado a curvas no lineales de esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), es obtenida de la pendiente de la línea formada por la unión de los puntos en la curva con el origen y no es constante para diferentes velocidades y esfuerzos.

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (7)$$

donde

$\mu_a$  viscosidad aparente, en poise

## 2.9 Clasificación de fluidos

Los fluidos pueden ser clasificados de acuerdo con su comportamiento bajo la acción del esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y su respectiva velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), mismos que se definirán a continuación

### 2.9.1 Fluido newtoniano

Su comportamiento reológico se describe mediante la ley de la viscosidad de Newton, que establece una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado ( $\tau$ ) y la velocidad de corte inducida ( $\dot{\gamma}$ ), ver ec 4.

La constante de proporcionalidad es la viscosidad ( $\mu$ ) que es independiente de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), ver fig 3.

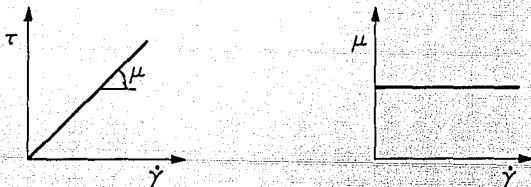


Fig 3 Comportamiento reológico de un fluido newtoniano

### 2.9.2 Fluido no newtoniano

En este caso el fluido no cumple con la ley de viscosidad de Newton, por lo que no hay una relación lineal entre el

esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), es decir, la viscosidad ( $\mu$ ) no permanece constante sino que es función de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ).

A su vez, de acuerdo al comportamiento de esfuerzo cortante ( $\tau$ ) - velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) existen dos tipos de fluido: uno que es dependiente del tiempo en que se aplica el esfuerzo y el otro independiente de éste.

### 2.9.2.1 Fluido dependiente del tiempo

Las propiedades reológicas de éste tipo de fluido cambian con el tiempo en el que actúa el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ).

Dentro de ésta clasificación se encuentran el tixotrópico y el reopéctico.

#### a) Fluido tixotrópico

La viscosidad ( $\mu$ ) disminuye conforme pasa el tiempo en que actúa el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) permanece constante, ver fig 4.

Ejemplos de éste tipo de fluidos se tienen en una solución de polímeros, la manteca o la pintura.

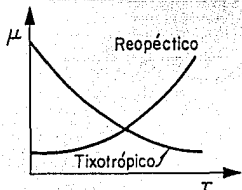


Fig 4 Representación gráfica del comportamiento reológico de fluidos dependientes del tiempo

## b) Fluido reopéctico

En un fluido reopéctico la viscosidad ( $\mu$ ) y el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) se incrementan con el tiempo, cuando la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) es constante, ver fig 4.

Ejemplos de estos fluidos son la bentonita y el yeso.

### 2.9.2.2 Fluido independiente del tiempo

Sus propiedades reológicas no cambian durante la aplicación del esfuerzo cortante ( $\tau$ ). En este tipo de fluido se encuentran, el fluido plástico de Bingham, el pseudoplástico y el dilatante.

#### a) Fluido plástico de Bingham

Para iniciar su flujo se requiere vencer un esfuerzo cortante inicial ( $\tau_y$ ); una vez que dicho esfuerzo ha sido excedido, éstos fluidos muestran una relación lineal entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ).

Al valor inicial mínimo de esfuerzo cortante ( $\tau$ ), se le llama punto de cedencia ó límite de fluidez ( $\tau_y$ ).

Por fluidez ( $\phi$ ) se entiende el recíproco de la viscosidad ( $\mu$ )

$$\phi = \frac{1}{\mu} \quad (8)$$

Este tipo de fluidos son muy rígidos, debido a que resisten una fuerza dada pero, cuando se deforman se comportan como fluidos newtonianos, teniéndose un valor aparente de viscosidad ( $\mu_a$ ) que disminuye al aumentar la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ). Por este motivo se les conoce como fluidos de esfuerzo ligero y su comportamiento se representa mediante la

ecuación siguiente

$$\tau = \eta (\dot{\gamma}) + \tau_y \quad \tau > \tau_y \quad (9)$$

donde

$\eta$  coeficiente de rigidez, análogo a la viscosidad ( $\mu$ ) de un fluido verdadero, en poise  
 $\tau_y$  límite de fluidez, en dina/cm<sup>2</sup>

La ecuación anterior puede ser representada en un diagrama de esfuerzo verdadero como el mostrado en la fig 5, en el cual se tiene una línea recta cuya pendiente representa el coeficiente de rigidez ( $\eta$ ) y su intersección con el eje del esfuerzo cortante ( $\tau$ ) representa el valor del esfuerzo mínimo producido ( $\tau_y$ ).

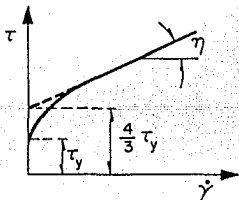


Fig 5 Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte para un fluido plástico de Bingham

Entre los fluidos que se comportan de esta manera están los lodos de perforación, la margarina, la mezcla de chocolate, las grasas, los jabones, la pulpa de madera y los lodos de drenaje.



## b) Fluido pseudoplástico

Se denomina fluido pseudoplástico cuando el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) se incrementa con la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) mostrando una curva de flujo cuya inclinación disminuye con el incremento de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) hasta que esta limita la inclinación y la viscosidad aparente ( $\mu_a$ ) disminuye al aumentar la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) como se muestra en la fig 6.

La ecuación exponencial de Ostwald de Waele, llamada ley de potencia, representa este fenómeno, la cual está dada por

$$\tau = K \left( \frac{dV}{dy} \right)^n \quad n < 1 \quad (10)$$

$$\tau = K (\dot{\gamma})^n \quad (11)$$

donde

K índice de consistencia, en  $(\text{dina s/cm}^2)^n$

n índice de comportamiento del flujo, adimensional

Ejemplos de éstos fluidos son la mayonesa, la suspensión de almidón, la suspensión de detergente y las pinturas.

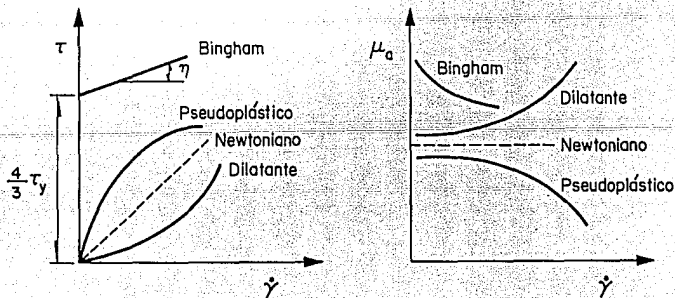


Fig 6 Representación gráfica del comportamiento reológico de fluidos independientes del tiempo.

### c) Fluido dilatante

En este tipo de fluido el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) aumenta con la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) mostrando un comportamiento no lineal. De forma similar, la viscosidad aparente ( $\mu_a$ ) aumenta con la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), esta propiedad ha hecho que a este tipo de fluido se le denomine esfuerzo pesado, ver fig 6.

El fluido dilatante es muy raro y puede describirse mediante la ley de potencia.

$$\tau = K \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad n > 1 \quad (12)$$

Ejemplos de éstos fluidos son la harina de maíz en agua, la arena de playa húmeda y las suspensiones con alto contenido de polvos en agua.

Al dibujar los puntos que representan el comportamiento de los fluidos pseudoplásticos y dilatantes en papel logarítmico se obtiene una recta como la mostrada en la fig 7 y cuya ecuación es la siguiente

$$\ln \tau = n \ln \dot{\gamma} + \ln K \quad (13)$$

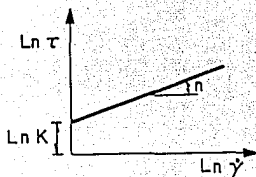


Fig 7 Representación gráfica en coordenadas logarítmicas de la ecuación de la ley de potencia.

Así, el valor del índice de consistencia (K) es obtenida de la intersección de la recta con el eje del esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y el índice de comportamiento del flujo (n) es la pendiente de la recta, el cual es una medida del grado de desviación del comportamiento de un fluido newtoniano.

### 2.9.2.3 Fluido viscoelástico

Es aquel que presenta tanto propiedades viscosas como elásticas. Hay una recuperación elástica de la deformación que se presenta durante el flujo, parte de esa deformación se recupera al eliminar el esfuerzo a que han estado sometidos.

En éste tipo de fluidos se pueden encontrar la masa de harina, los betunes, y ciertos polímeros fundidos.

## 2.10 Clasificación del flujo

En función de la velocidad del flujo, del diámetro de la tubería y de la densidad y viscosidad del fluido, el escurrimiento dentro de una tubería se define como laminar, transición o turbulento y pueden ser caracterizados considerando la ecuación del número de Reynolds.

$$Re = \frac{D V \rho}{\mu} \quad (14)$$

donde

Re número de Reynolds, adimensional

V velocidad promedio del fluido es igual al gasto entre el área (A) de la sección transversal de la tubería, que es igual a  $\pi D^2/4$ .

### 2.10.1 Flujo laminar

En éste caso el fluido tiende a escurrir sin mezclado lateral

y las capas adyacentes se resbalan unas sobre las otras, no hay corrientes cruzadas perpendiculares en la dirección del flujo, por lo tanto se lleva a cabo a velocidades bajas.

En un flujo laminar si se coloca agua con colorante se notará que la velocidad de flujo del agua es baja, la coloración es regular y forma una línea, ver fig 8, y no hay mezclado lateral del fluido. Numéricamente este flujo se define cuando el número de Reynolds es menor de 2,100 para tubería circular recta.

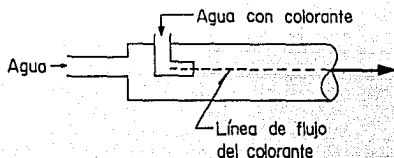


Fig 8 Experimento de Reynolds para flujo laminar

### 2.10.2 Flujo turbulento

Se presenta cuando las velocidades del flujo son altas, formándose remolinos y como consecuencia hay un mezclado lateral. Al aumentar la velocidad de un fluido se llega a un cierto límite, donde el colorante se dispersa, ver fig 9. El número de Reynolds para esta condición es mayor de  $10^5$ .

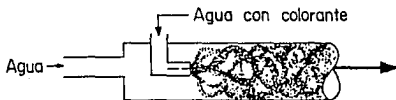


Fig 9 Experimento de Reynolds para flujo turbulento

La velocidad a la que se presenta el cambio de flujo laminar a

turbulento en una tubería se llama velocidad crítica ( $v_c$ ) y su valor es función del diámetro del tubo ( $D$ ), de la densidad ( $\rho$ ) y de la viscosidad ( $\mu$ ) del fluido, al dibujar el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) contra la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) se tiene

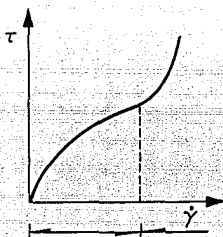


Fig 10 Curva de flujo general

## 2.11 Descripción física del fluido analizado

En las pruebas que se hicieron se utilizó una mezcla de caolín con agua.

La palabra caolín o kaolín, procede de Kao-Ling, nombre de la montaña situada cerca de Jau-Chau-Fu en China, de donde se extrajo por primera vez el mineral. El caolín puede definirse como una arcilla derivada de la descomposición de los minerales aluminosos como son: el cuarzo, feldespato o ceniza volcánica y mica. Es un sistema disperso de fragmentos minerales formado por silicatos de alumina hidratada, cuyo tamaño es inferior a dos micras. Este sistema es plástico cuando está húmedo y duro cuando ha sido calcinado.

Por su composición química, el caolín queda incluido dentro de

los silicatos, a los cuales corresponde la fórmula empírica  $Al_2O_3(2SiO_2)nH_2O$ . Así, las diferentes especies de caolín son, la caolinita, la nacrita, la dickita, la halosita y la endelita.

Las distintas especies difieren en el arreglo de las capas sucesivas en que se disponen los cristales.

El caolín, y en general todas las arcillas, se extraen principalmente por operación a cielo abierto, incluyendo extracción hidráulica, aunque también se hace mediante minado bajo tierra.

Las especificaciones oficiales para caolines varían según el uso que se les vaya a dar, pues cada uno aprovecha una o más propiedades del caolín que pueden ser por su solubilidad, pérdida por calcinación, pérdida por secado, potencial de hidrógeno, por ciento de componentes químicos, solubilidad, tamaño de partícula, velocidad de sedimentación, etc.

El constituyente esencial del caolín es la caolinita que es un silicato de aluminio hidratado, de composición química definida, que generalmente se encuentra en forma de cristales muy pequeños de color blanco, aunque la mayoría de los caolines industriales contienen asociados otros minerales como son: el silicio, aluminio, hierro, titanio, calcio, magnesio, sodio, potasio y manganeso.

#### Clasificación de arcillas

-Arcillas primarias o residuales son arcillas que se encuentran en sus puntos originales o puntos de formación.

-Arcillas secundarias o sedimentarias se encuentran en puntos

diferentes a los originales en los que fueron formados.

#### **Clasificación de la industria hulera**

a) Arcillas duras - producen altos módulos de elasticidad y soportan tensiones altas y tienen buena resistencia a la abrasión.

b) Arcillas blandas - producen bajos módulos de elasticidad, bajas tensiones y baja resistencia a la abrasión.

#### **Usos de caolín**

Se emplea en la manufactura de porcelana, alfarería, ladrillo, cemento portland, mortero refractario, yeso, relleno para papel, aislantes eléctrico y de calor, clarificado de líquidos, agente hemoliente y secante. En medicina se emplea para control de la diarrea en dosis de 15 a 60 g.

### **3. VISCOSIMETROS**

#### **3.1 Definición**

Son instrumentos que sirven para medir experimentalmente las propiedades reológicas de un fluido, simple o complejo.

Utilizan métodos que tienen una base matemática sólida pero compleja, es decir, son muy laboriosos y difíciles de usar experimentalmente, sin embargo, las mediciones no son afectadas por el tipo de instrumento empleado para su determinación, ni de la cantidad de muestra y geometría del aparato. Por tanto, es posible comparar los datos medidos con otros reportados en la literatura aún cuando estos se hayan obtenido con diferentes instrumentos y/o cantidad de muestra. Procediendo de esta manera se tiene una idea más clara de las propiedades del material bajo estudio.

Los instrumentos que se utilizan con éste tipo de método requieren de dos condiciones, una consiste en que el flujo sea laminar y la otra en que no haya variación de temperatura.



A continuación se describen algunos de los muchos viscosímetros que existen en el mercado.

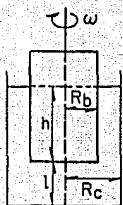
a) Viscosímetro rotacional. En este aparato las variables que se miden son el torque y la velocidad angular con lo cual el fluido es sometido a una velocidad de corte constante, lo que permite la medición del esfuerzo cortante obteniendo así, la curva de flujo y por ende el cálculo de la viscosidad.

a.1) Viscosímetro de cilindros coaxiales. Se coloca el líquido en el espacio anular comprendido entre dos cilindros coaxiales, un cilindro permanece en reposo mientras que al otro se le aplica un esfuerzo constante, midiendo con ello la viscosidad del fluido, ver fig 11.a.1.

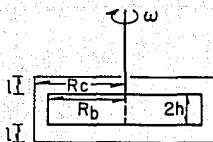
a.2) Viscosímetro de disco giratorio. Un disco circular bajo la acción de un esfuerzo constante, se sumerge dentro de un fluido y gira con una velocidad angular constante sobre el eje perpendicular al plano del disco. La viscosidad se calcula relacionando el torque y la velocidad angular, ver fig 11.a.2

b) Viscosímetro de cono y plato. Es un cono con un ángulo vertical grande colocado sobre un plato horizontal, la muestra se coloca entre el cono y el plato. Este diseño ofrece la ventaja que todo el material está sometido a una misma velocidad de corte. Las mediciones de velocidad angular y torque dan la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación, ver fig 11.a.3

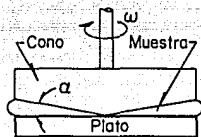
c) Viscosímetro de doble cono. El líquido llena el espacio entre dos conos con el mismo eje y vértice, uno de los conos está en reposo y el otro gira alrededor de su eje, ver fig 11.a.4



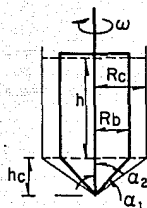
1. Cilindros coaxiales



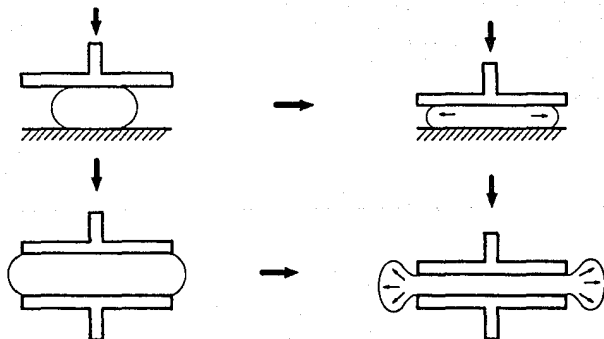
2. Disco giratorio



3. Cono y plato



4. Doble cono



5. Placa paralela o plastómetros

Fig 11.a Diferentes tipos de viscosímetros

d) Viscosímetro de placa paralela ó plastómetro. Se aplica una fuerza constante que es aplicada perpendicularmente a dos placas circulares paralelas una de las cuales es fija y se mide el desplazamiento de la otra placa, ver fig 11.a.5

e) Viscosímetro de tubo capilar. Consiste de un bulbo superior donde la muestra fluye a uno inferior por gravedad, así, el fluido está sometido sólo a la presión atmosférica y a su carga hidráulica. Midiendo el tiempo que tarda el fluido en pasar de un bulbo al otro puede calcularse la viscosidad cinemática y con la densidad se obtiene la viscosidad dinámica, ver fig 11.b.1

f.) Viscosímetro de tipo pistón y extrusor. Son de flujo forzado, en que un pistón o un extrusor desplazan el fluido dentro del capilar, ver fig 11.b.2

g) Viscosímetro de orificio. El fundamento teórico fué derivado de la ley de Hagen-Poiseuille, que dice, que el tiempo que tarda un cierto volumen de fluido en pasar a través de un capilar es proporcional a la viscosidad del fluido, ejemplo el viscosímetro Saybolt Universal, ver fig 11.b.3

h) Viscosímetro de esfera descendente. Es de flujo oscilatorio, en un tubo cilíndrico que contiene la muestra se introduce una esfera de metal ó vidrio midiendo el tiempo de desplazamiento de la esfera a través del fluido el cual va a ser proporcional a la viscosidad del fluido, ver fig 11.b.4

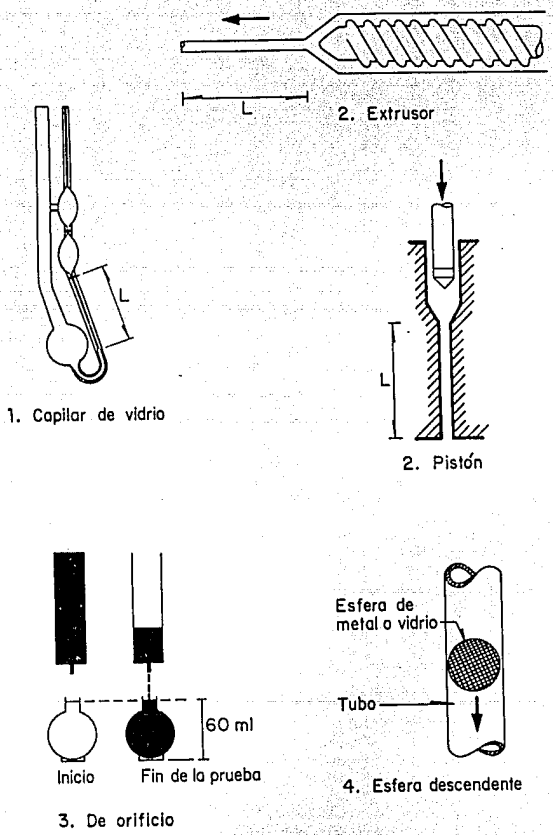


Fig 11.b Diferentes tipos de viscosímetros

### 3.2 Viscosímetros utilizados

Los viscosímetros empleados en este trabajo experimental fueron el rotacional y el capilar, los cuales se describen a continuación.

#### 3.2.1. Viscosímetro rotacional

Consiste en dos cilindros coaxiales, uno de los cuales rota y el otro es estacionario; la curva de flujo se obtiene de una serie de mediciones del torque ( $M$ ), [que es el impulso rotativo ó fuerza de torsión] en el cual la resistencia a la rotación se le conoce como aceleración angular ( $\omega$ ). La velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) es determinada con base en la velocidad de rotación del cilindro móvil y de la geometría del sistema; y el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) es determinado como una función del torque medido ( $M$ ).

La relación entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) es la misma, esto es, que siempre tienen la misma relación funcional, así el fluido es cortado entre dos cilindros verticales coaxiales donde las determinaciones experimentales se pueden realizar de tal forma que se tenga siempre la relación entre la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) y el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) sin interesar cual de los dos cilindros sea el que gire o cual esté inmóvil, ambos casos se describen más adelante.

En un viscosímetro rotacional el estudio de las propiedades de flujo está basado en las suposiciones siguientes

- El flujo es estacionario, laminar e isotérmico.
- El fluido es incompresible.
- Las trayectorias del flujo son circulares sobre el plano horizontal y perpendiculares a los ejes de rotación.

- No existe deslizamiento entre los cilindros y el fluido, es decir, la velocidad del fluido en el cilindro fijo es cero y en el rotacional es la velocidad de ésta (no hay pérdida de velocidad).
- No existen efectos de pared, ni esfuerzos normales.
- El comportamiento del fluido no depende del tiempo.

Bajo las condiciones anteriores, el fluido situado entre dos cilindros donde el torque aplicado ( $M$ ), en cualquier punto entre el rotatorio y el fijo, es la fuerza ( $F$ ) que causa que el fluido gire, dan origen a dos tipos de viscosímetros que se describen en seguida.

### 3.2.1.1 Descripción del viscosímetro Brookfield

En este viscosímetro el cilindro interior rota y el exterior es fijo

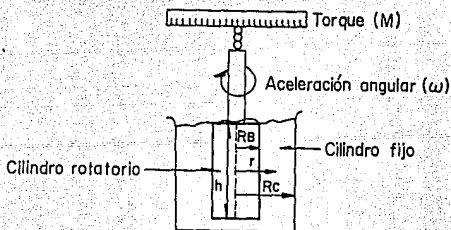


Fig 12 viscosímetro cilíndrico coaxial

donde

- $M$  fuerza de torsión (torque), energía recibida por el instrumento, en dina \* cm
- $\omega$  velocidad angular del cilindro, en rad
- $R_B$  radio del cilindro rotatorio o aguja, en cm

$R_c$  radio del cilindro fijo o recipiente, en cm  
 $h$  altura efectiva del cilindro rotatorio, en cm  
 $r$  posición radial, distancia del centro de rotación, en cm

El viscosímetro Brookfield, es accionado por un motor General Electric de tipo inducción sincrónica, el cual hace girar al elemento inmerso llamada aguja (cilindro móvil), ver fig 13

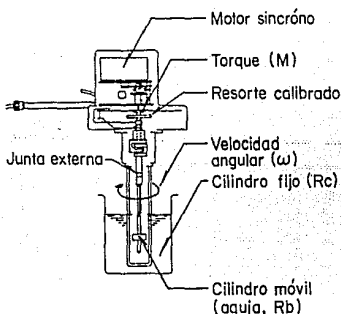


Fig 13 Viscosímetro rotacional Brookfield

La aguja es fijada por una junta externa al motor sincrónico a través de un resorte calibrado, la aguja se introduce dentro de un cilindro fijo que es el que contiene la muestra, de esta forma se mide el torque (M) necesario para rotar la aguja en la muestra a una aceleración rotacional constante obteniéndose así la resistencia viscosa de la muestra, la cual se opone a la fuerza del motor y es detectada por el movimiento del resorte, el cual se registra en la carátula del viscosímetro.

Así, un incremento en la viscosidad ( $\mu$ ) es indicado por un

aumento en la deflexión del resorte. Este resorte es precalibrado de fábrica y no puede ser intercambiable.

Las mediciones se efectúan usando la misma aguja a diferentes aceleraciones para detectar y evaluar las propiedades reológicas del fluido.

## Calculos

### 1. Caracterización reológica general

En este tipo de viscosímetro la fuerza de torsión externa ( $M$ ) en la flecha, está dada por

$$M = F * d \quad (15)$$

pero la fuerza es igual a

$$F = \tau * A \quad (16)$$

Sustituyendo la ec 16 en la ec 15, se tiene que

$$M = \tau * A * d \quad (17)$$

Lo que es lo mismo que

$$M = \tau * A * r \quad (18)$$

El area lateral del cilindro fijo es

$$A = 2 \pi r h \quad (19)$$

Sustituyendo la ec 19 en la ec 18, se obtiene que

$$M = \tau * 2\pi r h * r$$



$$M = \tau * 2\pi r^2 h \quad (20)$$

Tomando en cuenta la configuración geométrica presentada en la fig 12, el torque se expresa como

$$M = \tau_v 2\pi R b^2 h \quad (21)$$

donde

$\tau_v$  esfuerzo cortante en la pared del cilindro, en dina/cm<sup>2</sup>

El esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en un flujo laminar está dado por

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (22)$$

Pero  $v = \omega * r$  (23)

Por lo tanto  $dv = \omega dr + r d\omega$

El término  $dr = 0$ , ya que  $r$  es constante, así

$$\frac{dv}{dy} = r \frac{d\omega}{dr} \quad (24)$$

Al relacionar las ecs 24 y 22 se puede expresar el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) como una función del cambio de la velocidad angular ( $\omega$ ) con respecto a la posición radial ( $r$ ), obteniéndose la siguiente ecuación

$$\tau = \mu \left( r \frac{d\omega}{dr} \right) \quad (25)$$

Tomando en cuenta la resistencia que presenta el fluido a la fuerza de torsión en términos de la posición radial y relacionando las ecs 25 y 20 se tiene que

$$M = 2 \pi r^2 h \mu \left( r \frac{d\omega}{dr} \right) \quad (26)$$

Al despejar  $d\omega$  su valor es igual a

$$d\omega = \frac{M}{2\pi h \mu} \left( \frac{1}{r^3} \right) dr \quad (27)$$

Integrando la ec 27 para los límites apropiados de  $r$  y  $\omega$  que definen la velocidad angular ( $\omega$ ) y  $R_B$  y  $R_C$  para la posición radial ( $r$ ) se obtiene

$$\int_0^{\omega} d\omega = \frac{M}{2\pi h \mu} \int_{R_B}^{R_C} \frac{dr}{r^3} \quad (28)$$

Resolviendo la ecuación anterior se tiene que la velocidad angular ( $\omega$ ), llamada ecuación de Margules, es igual a

$$\omega = \frac{M}{4\pi h \mu} \left[ \frac{1}{R_B^2} - \frac{1}{R_C^2} \right] \quad (29)$$

La ec 27 fué integrada por Bingham con los límites de posición radial ( $r$ ) y velocidad angular ( $\omega$ ) para un fluido tipo Bingham y obtuvo que

$$\omega = \frac{1}{\mu} \left( \frac{M}{4\pi h} \right) \left( \frac{1}{R_B^2} - \frac{1}{R_C^2} \right) - \frac{\tau_y}{\mu} \ln \frac{R_C}{R_B} \quad (30)$$

y lo mismo hizo para un pseudoplástico llegando a

$$\omega = (n) \left( \frac{M}{2\pi R_B^2 h K} \right)^{1/n} \left[ 1 - \left( \frac{R_B}{R_C} \right)^{2/n} \right] \quad (31)$$

Para calcular el esfuerzo cortante ( $\tau$ ), en dina/cm<sup>2</sup> y la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), en s<sup>-1</sup> se consideran las ecuaciones anteriores, así despejando a la viscosidad ( $\mu$ ) de la ec 29, se obtiene que ésta es igual a

$$\mu = \frac{M}{4\pi h \omega} \left( \frac{1}{R_B^2} - \frac{1}{R_C^2} \right) \quad (32)$$

Despejando de la ec 20 al esfuerzo cortante ( $\tau$ ), se obtiene que es igual a

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 h} \quad (33)$$

Sustituyendo las ecs 32 y 33 en la ec 22 y despejando  $\frac{dV}{dy}$  que es igual a  $\dot{\gamma}$ , se llega a

$$\dot{\gamma} = \frac{2\omega R_C^2 R_B^2}{r^2 (R_C^2 - R_B^2)} \quad (34)$$

La viscosidad, en poise, es igual a

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (35)$$

La velocidad angular, en rad/s, se calcula con

$$\omega = \left( \frac{-2\pi}{60} \right) N \quad (36)$$

### 3.2.1.2 Reómetro Baroid

En este viscosímetro el cilindro interior es fijo y el cilindro exterior rota.

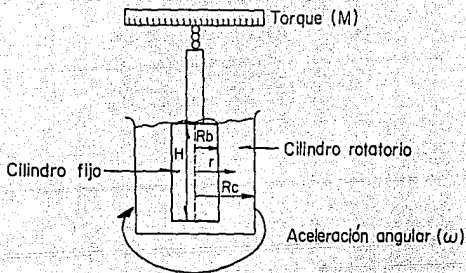


Fig 14 Viscosímetro cilíndrico coaxial

En este tipo de viscosímetro el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) es una función de la superficie del radio del cilindro fijo ( $R_b$ ) y de la resistencia del resorte e independiente de las propiedades reológicas del fluido. Entonces, el factor de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y el torque ( $M$ ) es únicamente una constante del instrumento. La velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) es una función de la velocidad angular ( $\omega$ ) del cilindro rotatorio y de las propiedades del fluido (excepto para fluidos newtonianos), esto hace que su determinación sea complicada y a menudo sea necesario el empleo de varios cilindros fijos de dimensiones diferentes.

## Cálculos

### 1. Determinación de viscosidad

El reómetro Baroid es un viscosímetro rotacional con el cual se puede determinar solamente uno ó dos puntos de viscosidad ( $\mu$ ).

Este instrumento es accionado por una manija que conduce la aguja a través de una caja de velocidades de precisión. Así,

las velocidades de 300 y 600 rpm son seleccionadas por el cambio de palanca.

Por lo que las ecuaciones que se usan las proporciona el fabricante y son las siguientes

$$\mu = \text{lect } 600 - \text{lect } 300 \quad (37)$$

$$\tau_y = \mu - \text{lect } 300 \quad (38)$$

donde

$\mu$	viscosidad plástica , en poise
$\tau_y$	esfuerzo de fluencia , en lb/100 ft
lect 600	lectura a una aceleración de 600 rpm
lect 300	lectura a una aceleración de 300 rpm

## 2. Caracterización reológica

Los cálculos son similares a los que se hacen para el viscosímetro rotacional Brookfield, solamente que aquí se considera las características del cilindro que contiene la muestra, debido a que éste es el que rota.

### 3.2.2 Viscosímetro capilar

En este viscosímetro se mide la caída de presión ( $\Delta p$ ) cuando se hace fluir un líquido newtoniano o no newtoniano a cierta velocidad o gasto de flujo ( $q$ ) a través de un tubo recto de longitud ( $L$ ) y diámetro ( $D$ ), en un movimiento laminar bajo la acción de un esfuerzo. Este proceso se repite para diferentes velocidades de flujo ( $q$ ) ó velocidades promedio ( $\bar{V}$ ).

Se caracteriza por la elaboración del diagrama llamado pseudo-corte (falso esfuerzo) el cual es una representación

gráfica de la velocidad de corte promedio límite ( $\bar{\gamma}$ ) contra el esfuerzo cortante de la pared del tubo capilar ( $\tau_w$ )

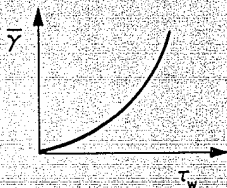


Fig 15 Gráfica de falso esfuerzo

En un viscosímetro de tubo capilar el estudio de las propiedades de flujo de fluidos está basado en las suposiciones siguientes

- La viscosidad ( $\mu$ ) del fluido no cambia en forma apreciable con la caída de presión ( $\Delta P$ ) en el tubo.
- El fluido es incompresible.
- No existen fuerzas externas sobre el fluido.
- La sección de prueba está alejada de los extremos de la tubería por lo que los efectos de entrada son despreciables.
- No hay deslizamiento entre el fluido y la pared, esto es, la velocidad del fluido en contacto con las paredes de la tubería, es cero.
- El flujo es estacionario, laminar e isotérmico.

### 3.2.2.1 Viscosímetro de tubo de vidrio

En este caso solo se utilizó el viscosímetro de tubo capilar tipo Cannon-Fenske, en donde la viscosidad ( $\mu$ ) del líquido se determina mediante la observación del movimiento del líquido que se introduce por un tubo capilar, ver fig 16, donde se



de líquido, que fluye bajo la acción de la gravedad a través del tubo capilar, éste se encuentra calibrado y debe operarse a una temperatura cuidadosamente controlada.

### Cálculos

Se hace circular el fluido a un gasto determinado ( $q$ ), mientras se mide la caída de presión ( $\Delta P$ ) resultante en la sección de prueba.

El fluido es forzado a circular a través de la sección de prueba bajo la acción de un gradiente de presión (esfuerzo), midiendo el gasto ( $q$ ) resultante de flujo.

De ambos, se tiene que el gasto ( $q$ ) es proporcional a la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) al igual que la caída de presión ( $\Delta P$ ) es función del esfuerzo cortante ( $\tau$ ), es decir

$$\dot{\gamma} = f(q) \quad (39)$$

$$\tau = f(\Delta P) \quad (40)$$

El viscosímetro de tubo capilar se basa en el flujo laminar a través de un tubo de sección transversal circular, haciendo uso de la ecuación de Poiseuille dada por

$$Q = \frac{1}{128} \frac{\pi \Delta P D^4}{\mu L} \quad (41)$$

Y despejando a la viscosidad de la ecuación anterior, ésta se expresa como

$$\mu = \left( \frac{1}{128} \right) \left( \frac{\Delta P}{QL} \right) \pi D^4 \quad (42)$$



La altura (h) del tubo capilar, se obtiene de modo aproximado, sustituyendo  $\rho gh$  por la diferencia de presión piezométrica, de la siguiente manera

$$\mu = \left( \frac{1}{128} \right) \left( \frac{\rho gh}{QL} \right) \pi D^4 \quad (43)$$

donde

- Q gasto del líquido que fluye por el tubo capilar, en ml
- D diámetro del tubo capilar, en cm
- L longitud del tubo capilar, en cm
- $\Delta P$  diferencia de presión ( $\rho gh$ ) en la longitud (L) del tubo capilar, en pascal

Rearreglando la ec 43 con las dimensiones del viscosímetro capilar tipo Cannon - Fenske, mostrado en la fig 16, se tiene que

$$\nu = \frac{\pi d^4 h t}{128 VL} - \frac{E}{t^2} \quad (44)$$

donde

- $\nu$  viscosidad cinemática, en centiStock (cSt)
- d diámetro del tubo capilar, en cm
- L longitud del tubo capilar, en cm
- h distancia promedio vertical entre el menisco superior e inferior, en cm
- V volumen del líquido que pasa a través del capilar, en  $\text{cm}^3$ . En este tipo de viscosímetro el volumen del bulbo de medida (C) es 3.1 ml, ver fig 16.
- E corrección por energía cinética, en  $\text{cSt/s}^2$
- t tiempo de flujo, en s

## 1. Cálculo de la viscosidad cinemática ( $\nu$ )

En la práctica, generalmente, la ec 44 es simplificada, ya que se supone que la corrección por energía cinética es insignificante. Agrupando todos los términos de dicha ecuación en una constante se tiene que ella se expresa como

$$\nu = ct \quad (45)$$

donde

c constante de calibración del viscosímetro, en cSt/s

## 2. Calibración del viscosímetro

Se usa un aceite ó líquido estándar y con ayuda de la ec 45 se calcula la constante del viscosímetro de prueba, la calibración se efectúa igual que como se describe el análisis de la muestra.

## 3. Corrección por energía cinética

El término  $E/t^2$  de la ec 44 es despreciable si el tiempo de flujo es mayor que 200 s.

Cuando las constantes de calibración del viscosímetro son menores o iguales a 0.05 cst/s, la corrección por energía cinética puede ser significativa si el tiempo de flujo es menor a 200 s y en este caso la ec 45 toma la forma siguiente

$$\nu = ct - \frac{E}{t^2} \quad (46)$$

$$E = \frac{1.66 * V^{3/2}}{L * (c * d)^{1/2}} \quad (47)$$

#### 4. Cálculo de la viscosidad dinámica ( $\mu$ )

Para obtener la viscosidad dinámica es necesario que la densidad ( $\rho$ ) se determine a la misma temperatura que se determinó la viscosidad cinemática por tanto se tiene que

$$\mu = \nu (\rho) \quad (48)$$

donde

$\mu$  viscosidad dinámica, en cp

$\rho$  densidad, en g/ml

#### 5. Caracterización reológica

Es posible caracterizar a un fluido no newtoniano independiente del tiempo con un viscosímetro de tubo capilar siguiendo el modelo de la ley de potencia y así predecir sus características en cualquier otro tipo de tubería. Esto se presenta siempre y cuando el fluido obedezca a la ley exponencial, representada por la ec 11 y considerando la proporcionalidad de las ecs 39 y 40 se tiene que

$$\frac{\Delta P}{4L} = K \left( 8 \frac{V}{D} \right)^n \quad (49)$$

Dibujando en coordenadas logarítmicas la ecuación anterior se transforma en

$$\ln \frac{\Delta P}{4L} = n' \ln 8 \frac{V}{D} + \ln K' \quad (50)$$

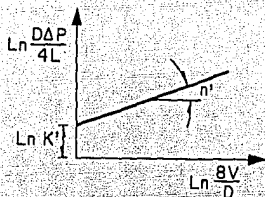


Fig 17 Comportamiento reológico de los fluidos pseudoplásticos y dilatantes en coordenadas logarítmicas

donde

$K'$  índice de consistencia que se obtiene al extrapolar la línea recta al eje de las ordenadas  $\left( \text{Ln} \frac{DAP}{4L} \right)$

$n'$  índice de comportamiento del flujo, que corresponde a la pendiente de la línea cuando los datos se dibujan en coordenadas logarítmicas, ver fig 17

$n' = 1$  fluido newtoniano y también  $K' = \mu$

$n' < 1$  pseudoplástico ó plástico de Bingham si la curva no pasa por el origen

$n' > 1$  fluido dilatante

Rearreglando la ec 9 para plásticos de Bingham en función del esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) se tiene que

$$\frac{D}{4L} \frac{\Delta P}{L} = \eta \left( 8 \frac{V}{D} \right) + 4/3 \tau_y \quad (51)$$

Para esta ecuación el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) es igual a  $\frac{DAP}{4L}$  y la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) a  $8 \frac{V}{D}$ , dibujando estos parámetros en coordenadas normales se obtiene el diagrama de pseudo-corte de plástico de Bingham, ver fig 18.

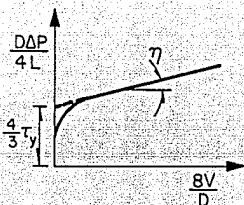


Fig 18 Comportamiento de un fluido plástico de Bingham

Extrapolando la línea recta al eje de las ordenadas  $\left( \frac{\Delta P}{4L} \right)$  se obtiene el esfuerzo de fluencia ( $\tau_y$ ) que es igual a  $\frac{4}{3}\tau_y$  y la pendiente de la recta es el coeficiente de rigidez ( $\eta$ ).

El coeficiente de rigidez ( $\eta$ ) y el esfuerzo de fluencia ( $\tau_y$ ), son independientes de las características de la medida del aparato y dependen unicamente de la naturaleza del fluido.

#### 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El objetivo del análisis experimental fue realizar un estudio sobre la viabilidad de determinar a nivel laboratorio la viscosidad dinámica de una mezcla de caolín en agua, usando dos tipos de viscosímetros, en régimen laminar.

##### 4.1 Ensayos efectuados

La mezcla del fluido consistió de agua y partículas de caolín, que pasaron la malla 325, a concentraciones de 10, 20, 22, 25, 30, 40 y 50 % en peso, a temperaturas de 15, 19, 20 y 25°C y a intervalos de una semana y 15 días por concentración. A continuación se describen las pruebas que se realizaron con esta mezcla y adicionalmente se hizo lo mismo con un aceite "x".

##### 4.1.1 Densidad aparente en polvos finos

Este método se basa en determinar el volumen aparente del polvo relacionado con el peso del mismo, y es válido para determinar cualquier valor de densidad aparente.

La técnica analítica se llevó a cabo por recomendación de la metodología aprobada por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Industria y Comercio (K-138).

Se pesan 40 g de muestra libre de humedad, pasada previamente por la malla No 60, con el fin de obtener una muestra lo más homogénea posible. La muestra anterior se transfiere a una probeta de 250 ml, se tapa con un tapón de hule y se introduce en una caja de golpeo. Se le dan 50 golpes haciendo recorrer a la probeta la distancia limitada por las dimensiones de la caja. Se golpea a intervalos de 2 s haciendo uso de un cronómetro y se lee el volumen ocupado por la muestra. Se continúa este procedimiento hasta que el volumen permanece constante, se mide y se obtiene el valor de la densidad al relacionar el peso contra el volumen.

#### 4.1.2 Densidad en la mezcla de caolín-agua

Se usaron dos procedimientos para determinar la densidad de la mezcla, de caolín-agua y un aceite "x" los cuales se mencionan a continuación.

##### a) Usando el principio de flotación con un densímetro

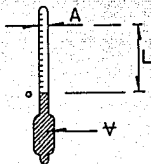


Fig 19 Densímetro

Es un tubo de vidrio cuya sección transversal tiene una área (A) cerrada en su extremo superior y en su extremo inferior remata en un bulbo lastrado de volumen ( $V_0$ ), esto es con el objeto de que su centro de gravedad sea lo más bajo posible y el densímetro flote verticalmente.

Se toman 150 ml de muestra y se filtra a través de un tamiz malla 200 para eliminar burbujas de aire, se pone la muestra a la temperatura de prueba y se adicionan 100 ml de muestra en una probeta la cual esta colocada en un baño de agua a la temperatura requerida. Se introduce el densímetro procurando que no pegue en las paredes de la probeta, es decir, debe flotar libremente. La lectura de la densidad se obtiene directamente del densímetro en el nivel del menisco que marca la muestra.

La cantidad de muestra puede variar de acuerdo al tipo del densímetro, es decir, cuando el densímetro no se sumerge completamente en la muestra y no flota libremente, indica que es necesario más volumen de muestra o un densímetro más pesado o bien que ese tipo de muestra no se puede determinar por éste método.

#### b) Picnómetro



Fig 20 Picnómetro



El picnómetro es un matraz tipo Erlenmeyer el cual es calibrado desde fábrica, al que se le inserta un termómetro para controlar adecuadamente la temperatura de la muestra a analizar, debe estar perfectamente limpio y puesto a peso constante a temperatura de 103 - 105°C.

### Análisis experimental

Se toma un volumen de muestra, que va a depender del tamaño del picnómetro, en este caso fueron 10 ml, bien mezclada, se transfiere al picnómetro a la temperatura de prueba seleccionada y se pesa.

La densidad se obtiene con la ecuación siguiente

$$\rho = \frac{W_{m+p} - W_p}{V} \quad (52)$$

donde

$\rho$  densidad de la muestra, en g/ml

$W_{m+p}$  peso de la muestra + peso del picnómetro vacío, en g

$W_p$  peso del picnómetro vacío, en g

$V$  volumen de la muestra, en ml

#### 4.1.3 Gravedad específica

Primero se hace la calibración de la probeta de 100 ml, la cual debe estar limpia y puesta a peso constante a temperatura de 103 - 105°C, para ello se miden 100 ml de agua destilada en un matraz aforado a la temperatura de prueba; luego se transfiere a la probeta y se marca a donde llegue el menisco

del agua.

Posteriormente se toma 150 ml de muestra bien homogénea y se filtra en un tamiz malla 200, con el fin de eliminar impurezas, aglomerados y burbujas de aire. Se pone la muestra anterior a la temperatura de prueba, se transfiere a la probeta calibrada hasta la marca mencionada para el agua destilada y se pesa. Para obtener el dato de gravedad específica, se hace el cálculo siguiente

$$G_{esp} = \frac{W_m - W_v}{V} \quad (53)$$

donde

- $W_m$  peso de la muestra + peso de la probeta vacía, en g
- $W_v$  peso de la probeta vacía, en g
- $V$  volumen de la muestra, en ml

La cantidad de muestra va a depender de la capacidad de la probeta calibrada.

#### 4.1.4 Determinación de la viscosidad

Se hace la descripción del procedimiento utilizado para medir la viscosidad de las muestras de caolín-agua y de un aceite "x", en tres diferentes viscosímetros.

##### a) Análisis con el viscosímetro rotacional Brookfield

###### 1. Calibración del equipo

los números entre paréntesis señalan la ubicación de la parte

que se menciona.

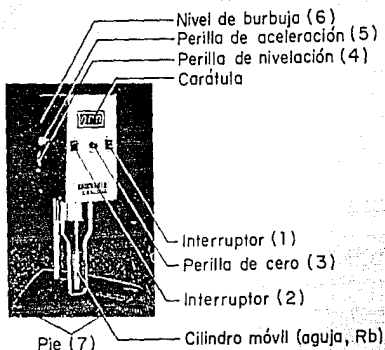


Fig 21 Viscosímetro rotacional Brookfield

-Se verifica el nivel de la burbuja (6), el cual debe de estar en el centro del punto de referencia que indica el equipo para asegurar el nivel del viscosímetro, si no está en el centro mover los tornillos que están en el pie (7) del viscosímetro hasta que quede nivelado.

-Se activa el encendido con el interruptor (2).

-Se coloca la perilla de aceleración (5) en la posición de 10 ó 12 rpm

-Se deja correr la lectura del viscosímetro hasta que la lectura que aparece en la carátula se estabilice o tenga una fluctuación no mayor que 0.1.

-Se ajusta a cero la lectura del viscosímetro con la perilla (3)

-Si se usa un graficador, éste debe colocarse en la posición No. cero al inicio del ensayo.

## 2. Medición de la muestra

La técnica de medición se realizó de acuerdo al manual de operación del equipo.

-Todas las muestras se mantienen en un baño de agua a la temperatura de prueba durante un mínimo de 30 min, antes de iniciar el análisis.

-Se colocan 500 ml de muestra, bien mezclada en un vaso de precipitado de 600 ml. Se coloca éste vaso en otro baño de agua a la temperatura de prueba y se ponen abajo del motor sincrónico del aparato de medición.

-Se selecciona la aguja adecuada, ver el inciso 3 descripción de la selección de la aguja, y se sumerge lentamente por la orilla del vaso de precipitado que contiene la muestra y se atornilla.

-Con la perilla de nivelación (4) del equipo se ajusta hasta que el nivel de la aguja marcada llegua a la superficie de la muestra

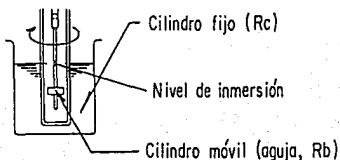


Fig 22 Nivel de inmersión de la aguja en la muestra a analizar

-Se enciende el motor con el interruptor (1) y se toma la lectura y/o se enciende el graficador.

### 3. Selección de la aguja

El viscosímetro está calibrado de fábrica por lo que es necesario tener una lectura en la carátula del equipo entre 10 y 100. Se debe tener presente que la precisión en la medición mejora conforme la lectura se aproxima a 100.

Si la lectura está por arriba de 100 se elige una aceleración más lenta y/o una aguja más pequeña.

Si la lectura es inferior de 10 se selecciona una aceleración alta y/o una aguja más grande.

Es decir que para algunas combinaciones dadas de aguja/aceleración el intervalo máximo viable es igual al factor de la aguja multiplicada por 100. El intervalo mínimo recomendado es igual al factor de la aguja multiplicada por 10.

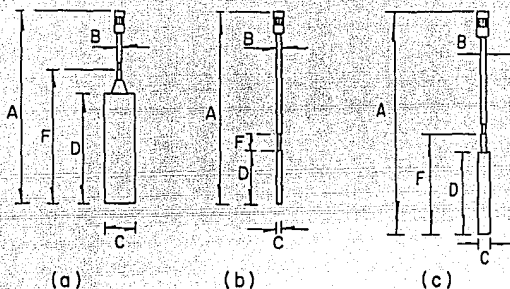
Para aclarar lo anterior supongase, por ejemplo, que se usa una aguja del No 2 a 12 rpm y su factor es de 300/N, ver fig 23 que al sustituir N por 12 rpm se tiene

$$\frac{300}{12} = 25$$

por lo tanto el factor de la aguja No 2 es de 25.

Así, el máximo intervalo de la combinación aguja-aceleración es 25 \* 100, dando un valor de 2,500 cp y el mínimo recomendado es 25 \* 10 es decir 250 cp. Por consiguiente si la viscosidad de la muestra se estimó que debería valer 4,000

cp ó 100 cp se seleccionará otra aguja.



Dimensiones de las agujas						
No.de aguja	Figura No.	C(cm)	D(cm)	F(cm)	Factor aguja	Radio (cm)
1	23.a	1.884	6.510	8.097	60/N	0.9421
2	23.a	1.025	5.395	6.665	300/N	0.5128
3	23.b	0.588	4.286	5.319	1200/N	0.2941
4	23.c	0.320	3.101	0.953	6000/N	0.1588

Nota: N = RPM  
 A(cm) = 11.5  
 B(cm) = 0.32

Fig 23 Tipos y dimensiones de agujas utilizadas

#### 4. Método para caracterizar el fluido

I. Se usa el método gráfico por ser el más fácil de manejar y cuya metodología se basa en lo siguiente

a) Se multiplican todas las lecturas obtenidas en el viscosímetro por el factor de la aguja utilizada, ver fig 23 y así se obtiene la viscosidad, en cp.

b) Para detectar el tipo de fluido.

Se construye una figura en la cual se relaciona la viscosidad ( $\mu$ ) en el eje de las Y y la velocidad angular de la aguja ( $\omega$ ), usando la misma aguja para todas las lecturas en el eje de las X. La forma de la curva indica el tipo de fluido.

c) Si es un fluido tipo Bingham.

Se dibuja la lectura del viscosímetro ( $\theta$ ) en el eje de las Y como una función de la velocidad angular ( $\omega$ ) en el eje de las X en un papel gráfico estándar, la línea obtenida es extrapolada al eje de las Y. El valor correspondiente de la lectura del viscosímetro representa el valor de esfuerzo mínimo producido ( $\tau_y$ ), en caso de ser un fluido newtoniano la línea al ser extrapolada llegará al origen.

d) Si es un fluido dilatante ó pseudoplástico.

Se dibuja en un papel tipo logarítmico la lectura del viscosímetro ( $\theta$ ) en el eje de las Y como una función de la velocidad angular ( $\omega$ ) en el eje de las X, el resultado debe ser una línea recta, cuya pendiente es el grado de desviación del comportamiento de un fluido newtoniano ( $n$ ) y la intercepción con el eje de las Y el valor del índice de consistencia ( $K$ ).

## II. Utilización de ecuaciones para la caracterización reológica

a) El esfuerzo cortante ( $\tau$ ), la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), y la viscosidad ( $\mu$ ) se calculan con las ecuaciones 33, 34 y 35 respectivamente.

b) Para detectar el tipo de fluido Newtoniano ó Bingham, se

dibuja la viscosidad ( $\mu$ ) en función de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) y el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) contra la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), en coordenadas normales.

c) Para fluidos dilatantes y pseudoplásticos, se dibuja en coordenadas logarítmicas el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ).

#### b) Análisis con el reómetro Baroid

1. El seguimiento del análisis fué hecho según lo recomienda el manual del equipo.

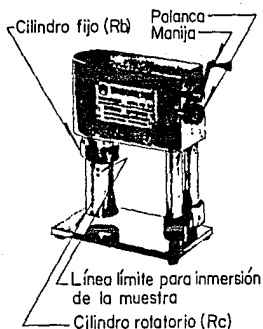


Fig 24 Reómetro Baroid

Antes de iniciar la prueba las muestras deben ser mantenidas en un baño de agua a la temperatura deseada durante un mínimo de 30 min.

Una muestra recientemente agitada y a la temperatura (T) deseada se coloca en un contenedor de 250 ml bajo los cilindros, fijo y rotacional, ver fig 24 los cuales son



inmersos exactamente en la línea límite indicada por el instrumento.

Se cambia el engranaje a una baja aceleración (300 rpm) y se hace girar la manija hasta que se tenga un valor estable que se lee en la carátula del equipo, ver fig 24, es decir, no debe haber variación en la lectura la cual va a depender de las características de la muestra y se anota el valor obtenido en dicha carátula.

Se modifica el engranaje a una alta aceleración (600 rpm) y se hace girar la manija hasta que de un valor estable en la carátula, ver fig 24. Se anota el valor que aparece en la carátula

#### 1. Método para caracterizar el fluido

I. Utilización de ecuaciones para la caracterización reológica.

El procedimiento se hace igual que para el viscosímetro rotacional Brookfield.

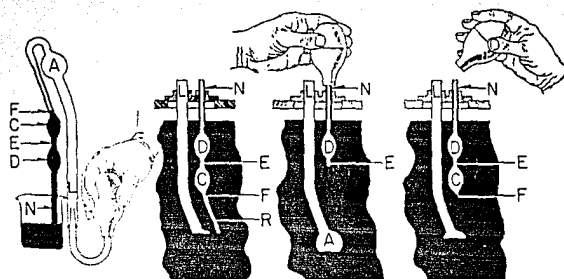
c) Determinación con el viscosímetro capilar tipo Cannon-Fenske

#### 1. Análisis de la muestra

Los viscosímetros de tipo capilar, generalmente, se adquieren ya calibrados, por lo que el llenado del mismo debe ser tal y como lo recomienda el fabricante, ver fig 25.

Las muestras deben mantenerse en un baño de agua en los límites adecuados de temperatura cuando menos 30 min antes de iniciar la prueba.

Se carga el viscosímetro con la muestra de la manera siguiente



Método de cargar la muestra

Se coloca en un baño a temperatura constante

Se ajusta la altura 5 mm arriba de la marca inicial

Se anota el tiempo de flujo desde la marca E a la F

Fig 25 Diagrama que muestra los pasos a seguir para el llenado del viscosímetro y determinación de la viscosidad

- Se verifica que el viscosímetro esté perfectamente limpio y seco.
- Se invierte el viscosímetro dentro del recipiente que contiene la muestra y se aplica una succión por el tubo (L) mediante una perilla con el tubo (N) inmerso en la muestra, hasta la marca de medida (F).
- Se coloca el viscosímetro verticalmente en un baño de temperatura constante y se sujeta el viscosímetro por el tubo vertical (L). El tiempo de exposición del viscosímetro con la muestra en el baño de temperatura constante no debe ser menor de 15 minutos antes de comenzar la medición.
- Se lleva lentamente la muestra hacia el bulbo (C) hasta la

marca (E) Debido a que el bulbo (D) se comunica con la atmósfera, el líquido en el capilar (R) comienza a correr al depósito (A).

-Se mide el tiempo en que baja el menisco del líquido de prueba desde la marca (E) hasta la marca (F) cuando la muestra fluye libremente. Si el tiempo de flujo es menor que 200 s, se selecciona un viscosímetro con un capilar de diámetro más pequeño y se repite la operación. El tiempo límite de máximo flujo es de 1,000s.

-Si el tiempo de flujo es menor a 200s se debe hacer una corrección por energía cinética, debido a que la distribución de velocidades a través del tubo capilar no es uniforme y va a depender de la velocidad de las partículas del fluido, así como de su energía interna, ver ec 47 por lo que en la ec 46 se efectúa una sustracción de esa energía de movimiento.

-Si dos mediciones no difieren en más de 0.2% se usa el promedio para calcular la viscosidad cinemática.

## 2. Método para caracterizar el fluido

I. Utilización de ecuaciones para la caracterización reológica, de acuerdo a las dimensiones del equipo.

a) Para detectar el tipo de fluido, se dibuja la viscosidad ( $\mu$ ) en función de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) y el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) contra la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), en coordenadas normales.

b) Para fluidos dilatantes y pseudoplásticos, se dibuja en coordenadas logarítmicas el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ).

## 5. RESULTADOS

### a. Resumen

La mezcla que se utilizó para hacer la medición de la viscosidad dinámica en un viscosímetro de tubo capilar, reómetro Baroid y viscosímetro Brookfield, esta formada por agua y partículas de caolín, las cuales pasaron la malla 325, con una densidad de 1.1429 g/ml.

Para este tipo de mezcla de caolín-agua la caracterización reológica a concentraciones de 10, 20, 22, 25, 30 y 40 % en peso, se hizo con los datos obtenidos en el viscosímetro de tubo capilar por ser los más completos y confiables.

Con el viscosímetro de tubo capilar la determinación se dificulta a concentraciones a partir de 40% en peso debido a que se presenta el fenómeno de sedimentación en la parte final del tubo capilar y por consecuencia el tiempo de flujo aumenta más de lo debido, cabe mencionar que para que las pruebas en éste tipo de viscosímetro sean representativas y verdaderas el tiempo de flujo para cualquier diámetro de tubo capilar no

debe ser menor a 200 s ni mayor de 1,000 s. Sin embargo, hubo la necesidad de hacer mediciones con un tiempo de flujo menor a 200 s, mismas que se corrigieron por efectos de energía cinética.

El viscosímetro Baroid es menos preciso que el de tubo capilar porque se obtienen solamente lecturas sin decimales, aunado a que la determinación de viscosidad solo es posible hacerla con dos diferentes aceleraciones rotacionales; sin embargo, a pesar de este inconveniente, es posible hacer comparaciones con los resultados obtenidos en el viscosímetro de tubo capilar, mismos que se explicarán más adelante.

También se utilizó el viscosímetro cilíndrico Brookfield. Debido a que no se tenía experiencia en la interpretación de los resultados que da éste viscosímetro, se hicieron pruebas con un aceite "x", para ver el comportamiento que este fluido presentaba y poder así interpretar, los resultados con la mezcla de caolín-agua.

## b. Análisis de resultados

### b.1 Aceite "x".

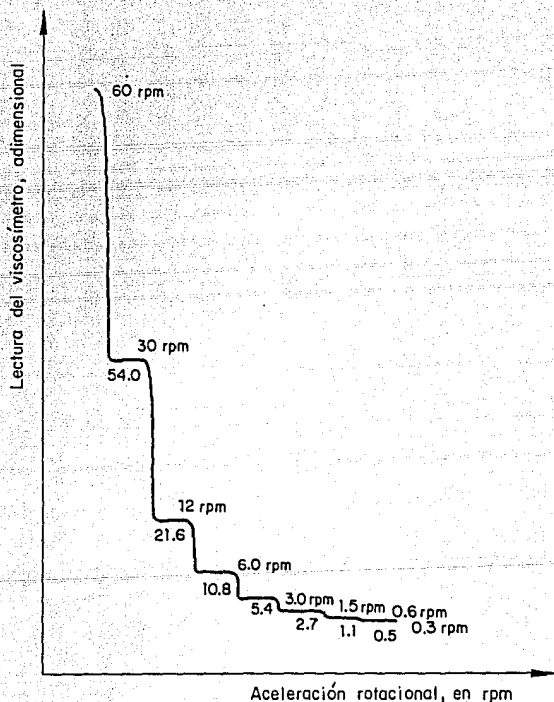
#### 1. Usando un viscosímetro rotacional tipo Brookfield

##### 1.1 Caracterización del aceite "x" por el método gráfico

El registro uno es obtenido de la medición de viscosidad efectuada en un aceite "x", utilizando una aguja del No. 1 a diferente aceleración rotacional.

Donde se observa que no hay variación de las líneas del

registro conforme pasa el tiempo, es decir es independiente del tiempo.



Registro 1 Lecturas realizadas en un viscosímetro Brookfield, usando un aceite "x" con temperatura a 21°C

Vaciando los datos del registro anterior en la tabla No. 1 y siguiendo los cálculos adecuados para llevar a cabo la

caracterización por el método gráfico descrito anteriormente, ver 4.1.4 (I), se tiene que

TABLA 1 Resultados obtenidos con un aceite "x" a 21°C, usando el viscosímetro Brookfield

A.R, en rpm	Lectura del viscosímetro	Factor de la aguja No.1*	Viscosidad, en cp	Velocidad an- gular, en s <sup>-1</sup>
0.3	0.5	200	100	0.0314
0.6	1.1	100	110	0.0628
1.5	2.7	40	108	0.1571
3.0	5.4	20	108	0.3142
6.0	10.8	10	108	0.6283
12.0	21.6	5	108	1.2566
30.0	54.0	2	108	3.1416
60.0	-	1	-	6.2832

A. R = Aceleración Rotacional

\* ver fig 23

Con los datos anteriores se obtienen las figs 26 y 27.

La fig 26 muestra que el aceite "x" se comporta como un fluido newtoniano por la línea obtenida, esto es que la viscosidad es constante conforme aumenta la velocidad angular.

Los dos puntos obtenidos inicialmente son debidos a que si el equipo registrara dos o tres números decimales es posible que se hubiera tenido el valor exacto de la viscosidad, así los valores de 100 y 110 pueden considerarse que son un promedio del valor real.

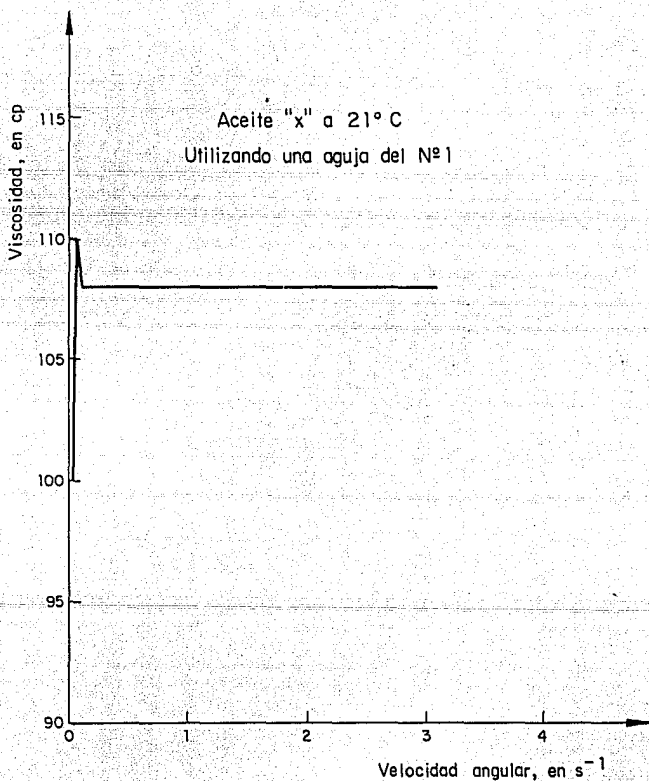


Fig 26 Valores de viscosidad en función de la velocidad angular medida con un viscosímetro Brookfield por el método gráfico



En la fig 27 se hace proporcional la lectura del viscosímetro con el esfuerzo cortante y la velocidad angular con la velocidad de corte obteniéndose una línea recta que al extrapolar al eje de las y se confirma que el fluido es newtoniano, obteniéndose una viscosidad promedio de 107.14 cp.

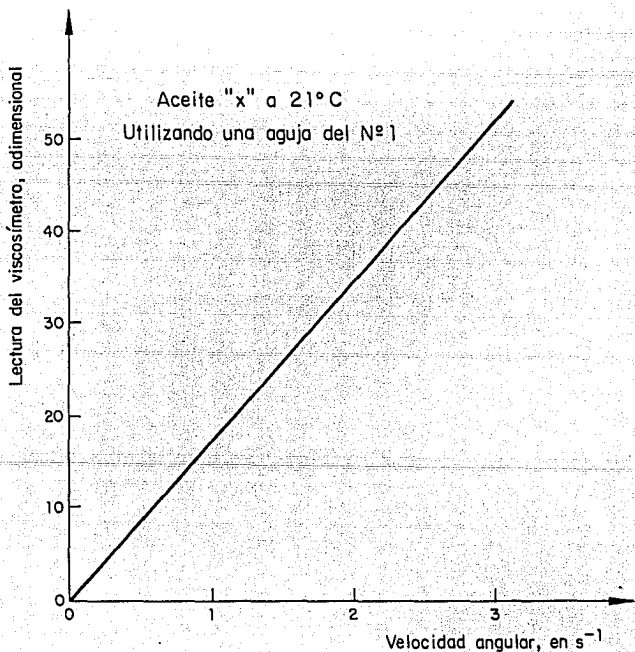


Fig 27 Resultados reológicos usando un viscosímetro Brookfield por el método gráfico

Cabe mencionar que el método gráfico no da valores de viscosidad exactos, es solamente para caracterizar reológicamente el fluido y darse una idea de por donde anda el valor de viscosidad del fluido a analizar.

### 1.2 Caracterización del aceite "x" con la utilización de las ecuaciones descritas en 4.1.4 (II)

La tabla No. 2 es obtenida sustituyendo los valores obtenidos durante la experimentación y características de los cilindros fijo y rotacional en las ecs 33, 34 y 35

Tabla 2 Resultados reológicos obtenidos con un aceite "x" en un viscosímetro rotacional tipo Brookfield

Torque, en dina * cm	Esfuerzo cortante, en dina/cm <sup>2</sup>	Velocidad de corte, en s <sup>-1</sup>	viscosidad, en cp
336.85	7.46	0.07	106.57
741.07	16.41	0.13	126.23
1818.99	40.28	0.33	122.06
3637.98	80.57	0.66	122.08
7275.96	161.14	1.33	121.16
14551.92	322.27	2.66	121.15
36379.80	805.68	6.64	121.34
-	-	13.28	-

Con los datos de la tabla anterior se obtiene las figs 28 y 29 que son similares a las figs 26 y 27 obtenidas por el método gráfico, confirmandose así que el aceite "x" es un fluido newtoniano.

Entre ambos métodos hay una diferencia de la viscosidad promedio del 10% siendo para este método de 120.08 cp, debido a que en el método gráfico no se considera las dimensiones de

los cilindros fijos y rotacional por lo que para un análisis exacto es conveniente utilizar el método de ecuaciones y tener un buen control de la temperatura.

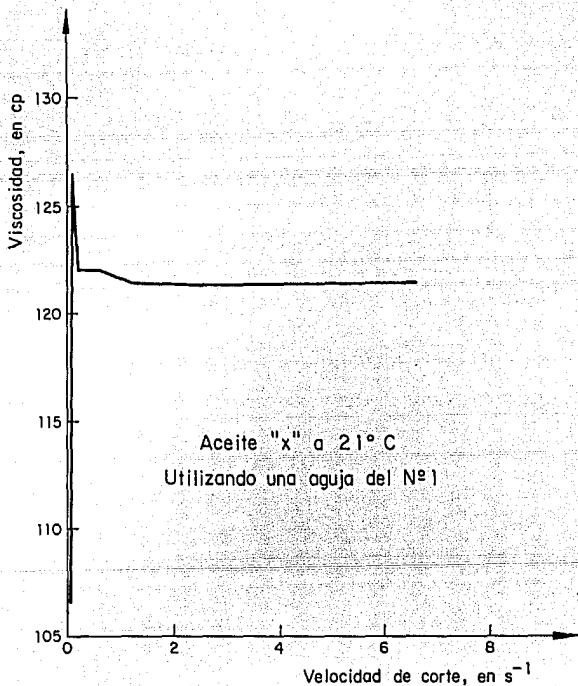


Fig 28 Valores de viscosidad en función de la velocidad de corte medida con un viscosímetro Brookfield por el método de ecuaciones

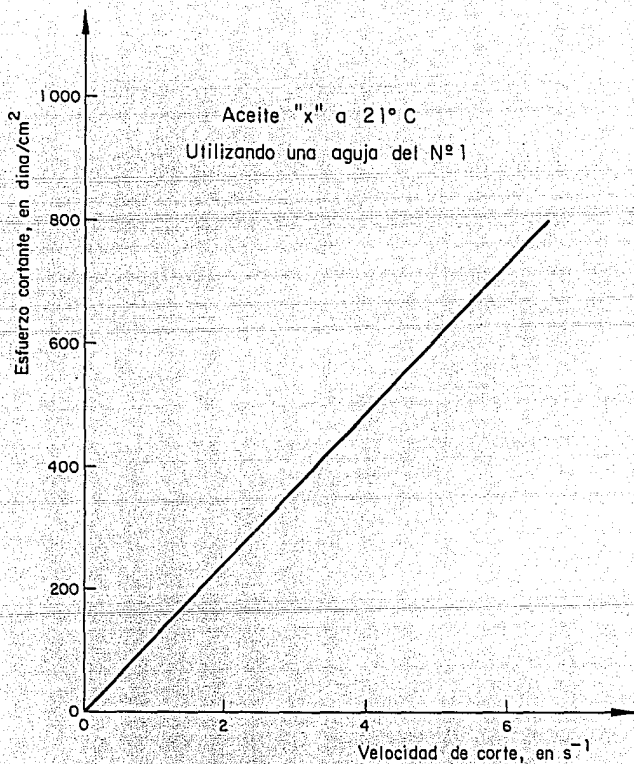


Fig 29 Resultados reológicos usando un viscosímetro Brookfield por el método de ecuaciones

2. Usando un viscosímetro de tubo capilar tipo Cannon-Fenske.

La siguiente tabla muestra el promedio de tres datos obtenidos experimentalmente con dos diferentes diámetros de tubo capilar, utilizando las ecs 45 y 48.

TABLA 3 Resultados obtenidos con un aceite "x" a 21°C. en un viscosímetro de tubo capilar

Densidad, en g/l	Tiempo de flujo, en s	Viscosidad cinemática, en cst	Viscosidad dinámica, en cp
0.96*	506.80	126.70	121.63
0.96**	254.40	127.20	122.11

\* diámetro del tubo capilar 1.27 mm

\*\* diámetro del tubo capilar 1.52 mm

El promedio de la viscosidad obtenida en el viscosímetro tipo Cannon-Fenske fue de 121.87 cp siendo un valor cercano a la medida con el viscosímetro Brookfield.

La diferencia entre un valor y otro puede deberse al registro del tiempo de flujo durante la experimentación, al control de la temperatura y el llenado del viscosímetro con la muestra a analizar.

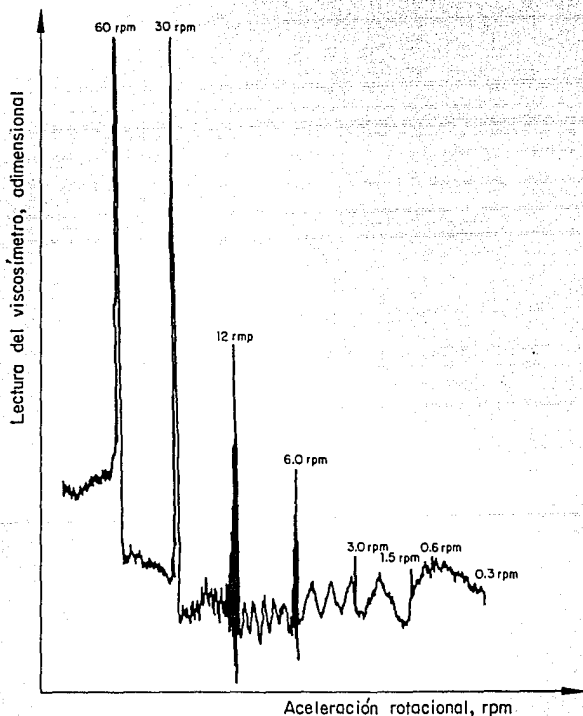
### 2.1 Caracterización del aceite "x".

Para caracterizar el fluido se hace uso de la ecs 49, 50 y 51, sin embargo, en este caso no se hizo debido a que solamente se utilizó dos diferentes diámetros de tubo capilar.

### b.2 Mezcla de caolín-agua

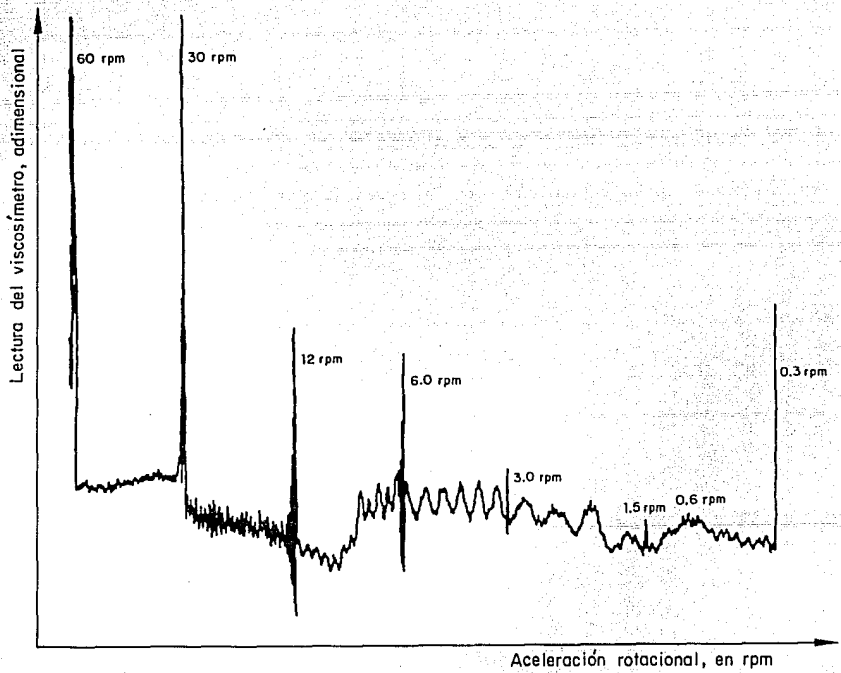
1. Usando un viscosímetro rotacional tipo Brookfield.

Los registros No. 2 y 3 muestran el comportamiento obtenido con una concentración del 15% y 10% en peso respectivamente y a temperatura de 20°C.



Registro 2 Lectura realizadas en un viscosímetro Brookfield usando una mezcla de caolín-agua con concentración del 15% en peso

Registro 3 Lecturas realizadas en un viscosímetro Brookfield usando una mezcla de caolín-agua con concentración del 10% en peso



Aunque las pruebas se hicieron a concentraciones de 20%, 22%, 25%, 30%, 40% y 50%; a temperaturas de 15°C, 19°C, 20°C y 25°C y agujas del No. 1, 2, 3 y 4, solo se muestran los registros antes mencionados con la aguja No. 1, para demostrar que los valores encontrados no fueron satisfactorios, esto pudo haberse debido a que como el caolín no es completamente soluble en agua y además las partículas son menores a 0.24 micras ello ocasiona que se tenga una suspensión no homogénea y como consecuencia de ello las partículas pueden llegar a formar flóculos de tamaño pequeño y grande provocando que la medición sea difícil y por consiguiente se tenga variación en la lectura cuando éstos flóculos chocan con la aguja de medición. Por lo que se concluye que este tipo de viscosímetro no es bueno para el tipo de muestra analizada.

## 2. Usando un viscosímetro rotacional tipo Baroid.

La viscosidad obtenida en este equipo se hizo solamente a dos diferentes aceleraciones por minuto que son a 300rpm y 600rpm, debido a que el equipo solamente trabaja a esas dos aceleraciones, por ello tampoco se hace la caracterización reológica.

El reómetro Baroid no es útil para hacer una caracterización reológica de forma muy fácil ya que sería necesario utilizar cilindros exteriores de diferentes medidas ya que éste es el que rota y esto ocasiona utilizar más tiempo, por lo que solamente sirve para determinar la viscosidad del fluido.

Los datos mostrados en la siguiente tabla son promedios del análisis experimental hechos durante un mes y obtenidos con la ec 37.



TABLA 4 Resultados obtenidos con una mezcla de caolín-agua, utilizando el Reómetro Baroid

Temp, en °C	ST, en t	Viscosidad plástica, en cp			
		1.	2.	3.	4.
15	10	2	2	2	3
15	40	9	10	12	13
15	50	14	16	18	17
19	20	3	3	3	4
19	22	4	4	3	3
20	25	4	5	4	4
20	30	5	6	6	6
25	10	1	2	2	1
25	40	8	9	10	9
25	50	13	15	17	16

1., 2., 3., y 4. son promedios de las semanas de experimentación.

### 3. Usando un viscosímetro de tubo capilar.

Los datos de viscosidad que se muestran en la tabla 5 son promedios obtenidos del experimento de una semana por cada diferente diámetro de tubo capilar.

Antes de hacer las corridas por semana se hicieron pruebas para determinar que diámetros de tubo capilar era el que debería usarse para las diferentes concentraciones con su respectiva temperatura.

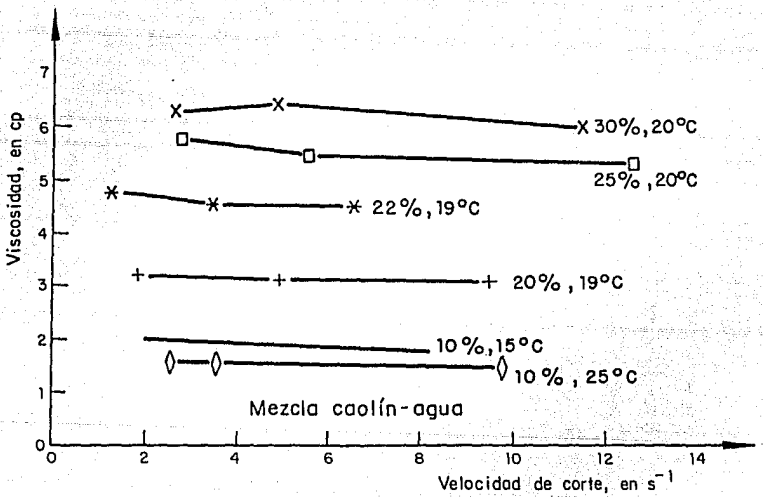
TABLA 5 Valores medidos de la viscosidad dinámica (cp) para una mezcla de caolín-agua. Viscosímetro de tubo capilar

		1.	2.	3.
Temp, en C	ST, en %	Diámetro de tubo capilar, en mm		
		0.30	0.44	0.63
15	10	1.9917	1.9102	1.7551
25	10	1.5604	1.5452	1.4709
15	40	0.78	1.01	1.92
		82.6566	175.8881	880.6334
25	40	64.0495	153.8801	502.5887
19	20	0.44	0.63	0.78
		3.1975	3.1175	3.0643
19	22	4.7844	4.4958	4.4731
20	25	0.63	0.78	1.01
		5.7281	5.4178	5.2800
20	30	6.2521	6.4039	5.9760

1., 2. y 3. son promedios de las semanas de experimentación

Los cálculos de la viscosidad dinámica se efectuaron con la fórmula de gasto en régimen laminar basados en la ecuación de Poiseuille y con ella se obtiene la fig 30.

Fig 30 Valores de la viscosidad medida con un viscosímetro de tubo capilar



La fig 30 muestra que la viscosidad decrece conforme se incrementa la velocidad de corte, esto puede ser debido a que cuando la velocidad de corte se incrementa los flóculos tienden a romperse causando una reducción de la viscosidad.

En este caso es muy importante homogeneizar la muestra adecuadamente ya que si no se controla hay una dispersión de datos muy marcada.

El efecto de la temperatura es muy importante en la obtención de la viscosidad ya que de los datos obtenidos al 10% a 15°C y 25°C, ver fig 30, se deduce que a mayor temperatura la viscosidad disminuye y por consiguiente la velocidad de corte es mayor y sucede lo contrario cuando se mantiene la misma temperatura y se aumenta la concentración, la viscosidad crece con un descenso en la velocidad de corte.

### 3.1 Caracterización reológica de la mezcla de caolín-agua.

Sustituyendo los valores que caracterizan al viscosímetro de tubo capilar y el tiempo de flujo obtenido durante la experimentación, en las ecs 49, 50 y 51 se obtienen las tablas 6 y 7.

TABLA 6 Valores medidos de DAP/4L (pascal) para una con mezcla caolín-agua. Viscosímetro de tubo capilar

		1.º	2.º	3.º
Temp. en °C	ST en ¢	Diámetro de tubo capilar, en mm		
		0.30	0.44	0.63
15 25	10	80.0577	117.4213	168.1259
	10	80.0611	117.4188	168.1259
15 25	40	0.78	1.01	1.92
		207.4634	268.6348	510.6756
	40	207.4371	268.6272	510.6361
19 19	20	0.44	0.63	0.78
		117.2894	167.9371	207.9221
	22	117.2713	167.9135	207.7994
20 20	25	0.63	0.78	1.01
		167.8380	207.7994	269.0736
	30	167.7483	207.6943	268.9336

1.º, 2.º y 3.º son promedios de las semanas de experimentación

TABLA 7 Valores medidos de  $8V/D$  ( $s^{-1}$ ) para una mezcla de caolín-agua, en un viscosímetro de tubo capilar

		1.º	2.º	3.º
Temp, en °C	ST en t	Diametro de tubo capilar, en mm		
		0.30	0.44	0.63
15	10	2.0109	2.8564	8.1342
25	10	2.5593	3.5328	9.7058
		0.78	1.01	1.92
15	40	0.3996	0.4147	0.5227
25	40	0.5193	0.4748	0.9222
		0.44	0.63	0.78
19	20	1.8358	4.9320	9.4553
19	22	1.2389	3.4506	6.5408
		0.63	0.78	1.01
20	25	2.7845	5.5482	12.5616
20	30	2.6346	4.8392	11.4517

1.º, 2.º y 3.º son promedios de las semanas de experimentación

Con los datos obtenidos en las tablas 6 y 7 se obtiene la fig 31.

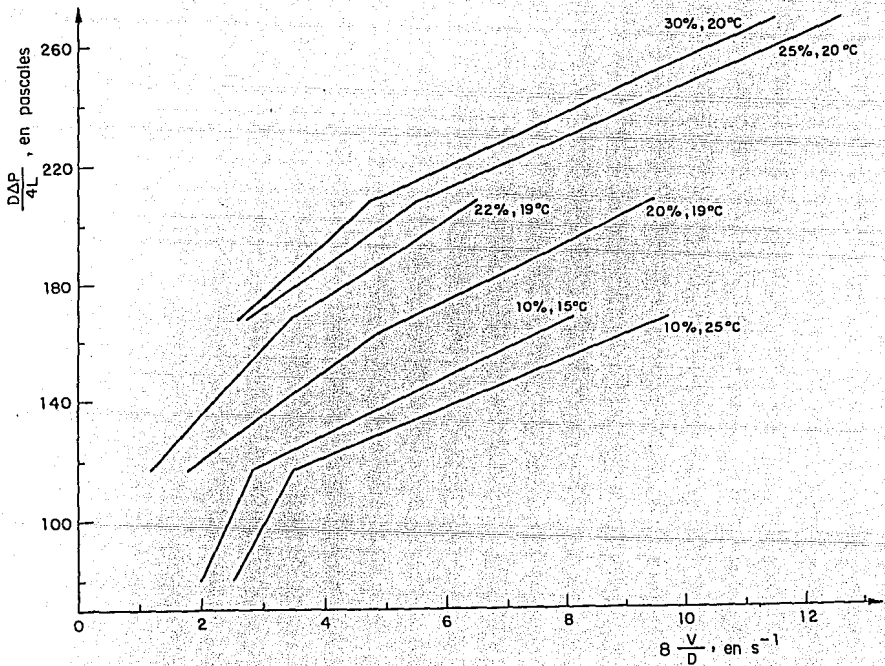


Fig 31 Resultados reológicos, usando un viscosímetro de tubo capilar para la mezcla de caolín-agua, con diferentes temperaturas y concentraciones.

De la fig 31 se observa que para las concentraciones de 20%, 22%, 25% y 30% la forma de la curva muestra que se trata de un fluido no newtoniano del tipo pseudoplástico y por ello el modelo de la ley de potencia dado por la ec 49, representa más adecuadamente la relación de esfuerzo cortante ( $\Delta P/4L$ ) - velocidad de corte ( $8V/D$ ), ya que dicha relación presenta un flujo no lineal para un esfuerzo dado.

Para la concentración de 10% a temperaturas de 15°C y 25°C, se dificulta la experimentación debido a que las pocas partículas de caolín presentes se sedimentan mucho más rápido, lo que ocasiona que el tiempo de flujo varíe mucho de un experimento a otro.

Gráficoando en coordenadas logarítmicas los datos de las tablas 6 y 7 se obtiene la fig 32, la cual muestra que para las concentraciones de 20%, 22%, 25% y 30% da una línea recta cuya pendiente para cada una de ellas es menor a 1, ver la tabla 8 lo cual confirma la pseudoplasticidad del fluido, aunque para la concentración de 10% a 15°C y 25°C no presenta una línea recta haciendo un ajuste por mínimos cuadrados la pendiente es menor a la unidad como se muestra en la tabla 8 en donde n es el índice de comportamiento del fluido y es igual a la pendiente de la recta en coordenadas logarítmicas; por otra parte la ordenada de esta recta es el índice de consistencia que para las concentraciones mencionadas su valor es cercano a su viscosidad, ver tabla 8.

Para la concentración de 40% a 15 y 25°C se puede considerar que esta mezcla se comporta como un fluido dilatante dado que su índice de comportamiento es mayor que la unidad, ver tabla 8 Sin embargo, sería necesario hacer más pruebas con esta concentración ya que su índice de consistencia es muy bajo comparando con lo que físicamente presenta la muestra a la concentración de 40 % en peso.



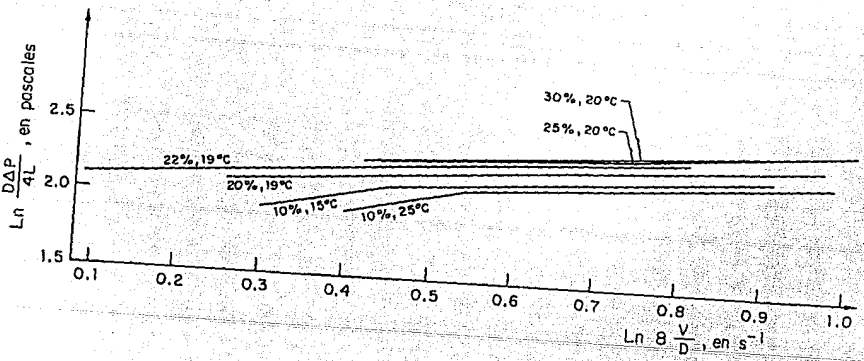


Fig 32 Resultados reológicos, usando un viscosímetro de tubo capilar para la mezcla de caolín-agua, con diferentes temperaturas y concentraciones

**TABLA 8** Resultados reológicos obtenidos con ayuda de la fig 32. Viscosímetro de tubo capilar

Temp, en °C	ST, en %	n, Adimensional	K, en Pascal
15	10	0.4878	1.7948
15	40	3.1468	3.5991
15	50	-	-
19	20	0.3503	1.9784
19	22	0.3446	2.0379
20	25	0.3134	2.0851
20	30	0.3196	2.0933
25	10	0.5083	1.7360
25	40	1.1826	2.7383
25	50	-	-

También se hicieron pruebas de gravedad específica y densidad a cada una de las concentraciones, obteniéndose la tabla 9 y 10.

En la tabla 9 se muestra los valores obtenidos de gravedad específica para una mezcla de caolín-agua con concentraciones de 10, 20, 22, 25, 30, 40 y 50 % en peso, las cuales aumentan conforme se incrementa los sólidos totales y va desde 1.033 para la concentración de 10 % en peso hasta 1.302 para 50 % en peso.

TABLA 9 Valores medidos de la gravedad específica para una mezcla de caolín-agua

Temp, en °C	ST, en ‰	Gravedad específica, adimensional			
15	10	1.033	1.052	1.050	1.065
15	40	1.258	1.259	1.269	1.271
15	50	1.293	1.298	1.296	1.301
19	20	1.128	1.131	1.130	1.129
19	22	1.133	1.135	1.134	1.135
20	25	1.171	1.181	1.169	1.174
20	30	1.201	1.197	1.200	1.198
25	10	1.060	1.035	1.048	1.046
25	40	1.257	1.261	1.265	1.274
25	50	1.301	1.302	1.204	1.302

La medición de densidad se hizo con el picnómetro ya que el densímetro no fué útil para concentraciones mayores de 40 ‰, obteniendo un valor de 1.040 para una concentración de 10 ‰ en peso a 1.329 para 50‰, ver tabla 10. La presencia de los sólidos modifica la viscosidad al aumentar la concentración y al disminuir la temperatura, como se muestra en las tablas 4 y 5, los valores que aparecen en esas tablas fueron obtenidos con un reómetro Baroid y un viscosímetro de tubo capilar respectivamente.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

TABLA 10 Valores medidos de la densidad para una mezcla de caolín-agua

Temp, en °C	ST, en †	Densidad, en g/ml			
15	10	1.043	1.042	1.040	1.041
15	40	1.278	1.279	1.279	1.278
15	50	1.319	1.320	1.321	1.320
19	20	1.121	1.121	1.121	1.121
19	22	1.132	1.132	1.132	1.132
20	25	1.163	1.163	1.163	1.163
20	30	1.201	1.201	1.199	1.200
25	10	1.040	1.043	1.042	1.041
25	40	1.287	1.281	1.285	1.283
25	50	1.320	1.331	1.329	1.318

## 6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos puede decirse que las condiciones en que se realice la medición son muy importantes para la determinación de la viscosidad dinámica y como consecuencia para el resto de las propiedades reológicas, como son, por el esfuerzo cortante, la velocidad de corte, el índice de comportamiento del fluido, el índice de consistencia; es decir el valor de la viscosidad será una función del grado de homogenización que se logre dar a la muestra, la temperatura y la concentración de sólidos, de esta manera los datos obtenidos serán útiles para resolver, por ejemplo, los problemas del flujo en tuberías que conducen mezclas de líquido con partículas, de entre esos problemas se pueden mencionar el diámetro de la tubería y como consecuencia de éste la velocidad del escurrimiento, la longitud de la tubería de transporte, la pérdida de energía y la potencia de la bomba.

Las diferencias encontradas entre los diferentes viscosímetros utilizados son las siguientes

## Viscosímetro rotacional-cilíndrico

- Se mide el torque y la velocidad angular.
- El fluido está sujeto a una rapidez de corte constante lo que permite la medición del esfuerzo cortante obteniendo la curva de flujo y por ende el cálculo de la viscosidad.
- Las lecturas pueden ser hechas por periodos largos de tiempo, lo cual permite el análisis cuantitativo de fluidos cuyo comportamiento es dependiente del tiempo.
- La construcción del dispositivo es muy compleja.
- Su costo es muy grande.
- Debe estar perfectamente calibrado.
- Para hacer un análisis representativo debe colocarse en sitios alejados de cualquier vibración.

## Reómetro Baroid

- Se mide el torque y la velocidad angular.
- El fluido está sujeto a una rapidez de corte constante lo que permite la medición del esfuerzo cortante obteniendo la curva de flujo y por ende el cálculo de la viscosidad.
- Las lecturas no pueden ser hechas por periodos largos de tiempo debido a las características del equipo por lo tanto no es posible hacer un análisis cuantitativo de fluidos no newtonianos dependientes del tiempo.
- La construcción del dispositivo es menos compleja que la del viscosímetro Brookfield
- Su costo es menor que el Brookfield, pero mayor que el viscosímetro de tubo capilar.
- Debe estar perfectamente calibrado.
- Para hacer un análisis representativo debe colocarse en sitios alejados de cualquier vibración.

## Viscosímetro capilar

- Se mide el gasto volumétrico y la caída de presión.
- La curva de flujo puede obtenerse a partir de los datos de gasto volumétrico y caída de presión.
- Los datos obtenidos con este aparato pueden aplicarse en la solución de problemas reales de flujo en tubería.
- Puede cubrir un rango mayor de esfuerzo cortante y velocidad de corte que el viscosímetro Brookfiel y reómetro Baroid.
- Su construcción es muy sencilla.
- Su costo es muy bajo comparado con los dos viscosímetros mencionados.
- Su operación es muy simple.

Por todo lo anterior se concluye que el viscosímetro de tubo capilar tiene un intervalo mucho más amplio de operación que los otros dos viscosímetros utilizados, es preciso y útil para efectuar las mediciones de viscosidad dinámica del fluido de caolín-agua, siendo éste un fluido no - newtoniano independiente del tiempo, del tipo pseudoplástico para concentraciones de 10, 20, 22, 25 y 30 % en peso y tipo dilatante para la concentración de 40 % en peso y que obedecen a la ecuación exponencial de la ley de potencia.

## BIBLIOGRAFIA.

1. Alves, G.E., Boucher, D.F. and Pigford, R.L. (1952): "Pipe-line design for non-newtonian solutions and suspensions", Chemical Engineering Progress, vol 48, No 8.
2. Annual Book of ASTM standards (1980) parte 23 D-56-D1660.
3. Back, A.L. (1959): "Readings of rotational viscometers", Rubber AGE, january.
4. Bain, A.G. and Bonnington, S.T. (1970): "The hydraulic transport of solids by pipeline", Pergamon Press.
5. Caldwell, D.H. and Babbitt, H.E. (1939): "Laminar flow of sludges in pipes with special reference to sewage sludge", bulletin vol XXXVII No. 12, University Illinois.
6. DGN Métodos aprobados por la Dirección General de Normas Secretaría de Industria y Comercio
7. Gay, E.C., Nelson, P.A. and Armstrong, W.P. (1969): "Flow properties of suspensions with high solids concentration", AICHE Journal, vol 15, No 6.
8. Perry, R.H. and Chilton, C.H. (1973): "Fluids and particle dynamics", Chemical Engineers Handbook, Mc Graw Hill, Kogakusha fifth edition.
9. Rabinóvich, E.Z. (1987): "Hidráulica", Editorial MIR, Moscú
10. Seguire, E.S. (1986): "Instrument review: Brookfield", The Manufacturing Confectioner, january
11. Sellegren, A. (1982): "Rheological analysis of



- industrial slurries", an investigation of the pipeline transportation characteristics of two limestone products, serie A No. 105 Dept. of Water Resources Engineering.
12. Sellgren, A. (1987): "Some temperature effects on slurry rheology in cold regions", Department of Water Resources Engineering, S-951
  13. Shaw, A.M. (1950): "Measure viscosity at pumping velocity", Chemical Engineering, january.
  14. Shaw, D.I. (1979): "Introduction to colloid and surface chemistry", Butterworths & Co 2a edition
  15. Slkdar, S.K. and Oré, F. (1979): "Viscosity measurement of non-newtonian slurry suspensions using rotating viscometers", Ind Eng Chem Process., vol 18 No 4.
  16. Sotelo A.G. (1980): "Hidráulica general, Fundamentos", vol I, editorial Limusa S.A.
  17. Van Wazer, J.R., Lyons, J.W., Kim, K.Y. and Colwell, R.E. (1963): "Viscosity and flow measurement", Laboratory Handbook of Rheology, Interscience Publishers Monsanto Chemical Company St Louis Missouri.
  18. Wasp E.J., Kenny, J.P. and Gandhi, R.L. (1977): "Solid-liquid flow slurry pipeline transportation", Transtech Publications.
  19. Wilkinson, W.L. (1960): "Non-newtonian fluids", vol 1, Pergamon Press.
  20. William, A.H. (1976): "Rheology of power law fluids", Ind Eng Chem, vol 15, No 3.