

00362

2ej.
11

VISCOSIMETRO DE CILINDROS COAXIALES

(DISEÑO Y CONSTRUCCION)

MA. DEL PILAR SEGARRA ALBERU

**TESIS DE MAESTRIA EN CIENCIAS (FISICA)
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE CIENCIAS
MEXICO D.F. 1989**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

I N D I C E

RESUMEN

CAPITULO I

Viscosidad (importancia y métodos de medición)

1.1	Definición de viscosidad	1
1.2	Flujo laminar y turbulento	6
1.3	Número de Reynolds	7
1.4	Comportamiento no-newtoneano	8
1.5	Modelos no newtoneanos	11
	Modelo de Ostwald-de Weale	11
	Modelo de Eyring	12
	Modelo de Bingham	12
1.6	Importancia de la viscosidad	13
1.7	Medición de la viscosidad	15
1.8	Viscosímetros capilares	17
1.9	Viscosímetros tipo Stokes	21
1.10	Viscosímetros oscilantes	23
1.11	Viscosímetros giratorios	24
	Viscosímetro de cono y plato	24
	viscosímetro de cilindros coaxiales	25
Anexo	Tabla y figuras	28

CAPITULO II

Viscosímetro de cilindros giratorios

2.1	Descripción teórica	34
	A.- Flujo entre las paredes laterales de dos cilindros coaxiales	34
	B.- Corrección por longitud finita de los	

	cilindros	37
	C.- Corrección por terminar el cilindro interior en cono	41
2.2	Consideraciones prácticas	47
	A.- Construcción montado y alineación	48
	B.- Condiciones de estabilidad	49
	C.- Corrección del efecto de borde	52
	D.- Variación del esfuerzo cortante y razón de corte	56
	E.- Velocidad de rotación	57
	F.- Control Térmico	58
	G.- Medición de la torca	58

CAPITULO III

Diseño y construcción de un viscosímetro de cilindros coaxiales

3.1	Descripción general	60
3.2	Cilindros coaxiales	62
3.3	Efecto de borde	63
3.4	Razón de corte	65
3.5	Control térmico	66
3.6	Control de velocidad	68
3.7	Medición de la torca	69
3.8	Constante del aparato	69
3.9	Diseño experimental	71
	A.- Montaje	71
	B.- Desarrollo	72
Anexo	Figuras	73

CAPITULO IV

Resultados y evaluación

4.1	Pruebas de calibración	78
4.2	Constante de calibración	79
4.3	Evaluación	81
	A.- Pruebas de reproducibilidad	81
	B.- Precisión	82
	C.- Intervalo de funcionamiento	82
	D.- Facilidad de utilización	84
	E.- Costo	84

4.4	Proposiciones.....	84
Anexo	Figuras.....	87
BIBIOGRAFIA		95
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS		100
LISTA DE SIMBOLOS		102

RESUMEN

La viscosidad, como la difusión y la conductividad térmica, es una propiedad de transporte en los fluidos.

Fue definida originalmente por Newton como una medida del flujo de material ante una fuerza aplicada, o bien como la resistencia que presentan todos los fluidos al cambio de velocidad. Si el esfuerzo cortante aplicado al material es proporcional al gradiente de la velocidad local, el fluido es newtoneano y la constante de proporcionalidad es la viscosidad, si los fluidos no obedecen esta relación lineal se llaman no-newtoneanos.

Las medidas de viscosidad se emplean para controlar la calidad durante la producción o monitorear y/o controlar un proceso. Permiten el estudio de tratamientos químicos, mecánicos y térmicos, efecto de aditivos o del proceso de una reacción de maduración. En macromoléculas naturales la viscosidad proporciona información respecto a tamaño, forma, grado de ramificación, entrecruzamiento o degradación de moléculas solubles. En mecánica de fluidos, la viscosidad es el enlace entre la teoría y el experimento, ya que, por ser un coeficiente característico del material debe obtenerse experimentalmente para ser utilizado en las relaciones de transporte.

Para medir la viscosidad en fluidos newtoneanos hay dos métodos principales:

- 1.- Determinación directa de la relación esfuerzo

cortante - razón de corte. En este método se sujeta a toda la muestra a una razón de corte conocida y se mide el esfuerzo cortante; los viscosímetros utilizados son por lo general de cilindros coaxiales o de cono-plato.

2.- Inferencia indirecta de la relación del esfuerzo cortante con la razón de corte, por observaciones del gradiente de presión y razón del flujo volumétrico en un tubo recto o viscosímetro capilar. En estos instrumentos la razón de corte no es constante, sino que varía de cero en el centro del tubo, a un máximo en las paredes del mismo, por lo que la interpretación de los resultados no es fácil.

El objetivo de este trabajo es diseñar y construir un viscosímetro de cilindros coaxiales, por considerarlo el más apropiado físicamente para reproducir el flujo de Couette.

El trabajo se ubica haciendo una presentación de la viscosidad, explicando su importancia y describiendo diferentes tipos de viscosímetros. Se efectúan los cálculos que proporcionan una descripción teórica de los viscosímetros de cilindros giratorios y se enlistan algunos puntos prácticos que deben tomarse en cuenta en la construcción de estos viscosímetros. Utilizando los datos anteriores se diseña un prototipo considerando: magnitud de los cilindros, configuración del cilindro interior, conveniencia de que el cilindro exterior sea el rotor y forma de detectar la torca. Se evalúa el prototipo utilizando líquidos de calibración y comprobando reproducibilidad de resultados.

CAPITULO I

VISCOSIDAD

(importancia y métodos de medición)

1.1 Definición de viscosidad

La descripción del movimiento de un fluido ideal está completamente caracterizada a través de 5 variables: las tres componentes de la velocidad y dos variables termodinámicas. Por esta razón, se requieren 5 ecuaciones independientes para resolver el sistema. Se utilizan por lo general las ecuaciones de Euler, la ecuación de continuidad y la ecuación adiabática (Landau, 1959).

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} = -v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial (\rho v_i)}{\partial x_k} \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -v_k \frac{\partial S}{\partial x_k} \quad (1.3)$$

donde ρ es la densidad, v_i las componentes de la velocidad, p la

presión y S la entropía local.

Sin embargo, en el movimiento de un fluido real hay disipación debida a la irreversibilidad termodinámica del proceso. Esta irreversibilidad ocurre siempre en mayor o menor grado a causa de la fricción interna (viscosidad) y la conductividad térmica del fluido. Para obtener las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido viscoso (real), es necesario añadir algunos términos a la ecuación de movimiento de un fluido ideal. Esto aumenta el número de incógnitas para el mismo número de ecuaciones. La ecuación de continuidad es válida para todos los fluidos, sean o no viscosos, pero la ecuación de Euler debe ser modificada en el caso viscoso.

Además de la forma utilizada en 1.1 la ecuación de Euler puede escribirse como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) = - \frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial x_k} \quad (1.4)$$

donde Π_{ik} es el tensor de flujo de densidad de momento. Representa una transferencia reversible completa de momento, debido simplemente al transporte mecánico de diferentes partículas del fluido de un lugar a otro y a la presión que actúa sobre el fluido. La viscosidad (irreversible) transfiere el momento de puntos donde la velocidad es mayor, a puntos donde es menor. Por lo tanto para obtener la ecuación de movimiento de un fluido viscoso es necesario añadir al momento de flujo "ideal", un término ($-\sigma'_{ik}$) que proporcione la transferencia irreversible de momento.

El tensor de flujo de densidad de momento en un fluido viscoso es:

$$\Pi_{ik} = p \delta_{ik} + \rho v_i v_k - \sigma'_{ik} \quad (1.5)$$

o bien

$$\Pi_{ik} = -\sigma_{ik} + \rho v_i v_k \quad (1.6)$$

con

$$\sigma_{ik} = -p\delta_{ik} + \sigma'_{ik} \quad (1.7)$$

donde σ'_{ik} = tensor viscoso y σ_{ik} = tensor de esfuerzos que proporciona la parte irreversible del flujo de momento, o sea, que no se debe a la transferencia directa del momento por la masa del fluido en movimiento.

Siguiendo la formulación presentada por Landau (1959), se establece a continuación la forma general del tensor viscoso para un fluido isotrópico simple.

Los procesos con fricción interna, ocurren en un fluido únicamente cuando las diferentes partículas del mismo se mueven a distinta velocidad, de forma que existe un movimiento relativo entre las diferentes partes del fluido. Por lo tanto el tensor viscoso debe depender de las derivadas espaciales de la velocidad. Si el gradiente de velocidad es pequeño, puede suponerse que la transferencia de momento debida a la viscosidad, sólo dependa de las primeras derivadas de la velocidad. Con la misma aproximación, puede suponerse que σ'_{ik} es una función lineal de las derivadas $\partial v_i / \partial x_k$. No puede haber términos independientes en el tensor viscoso ya que éste debe hacerse cero para \bar{v} igual a constante y cuando todo el fluido rota con velocidad uniforme por no existir fricción interna en este tipo de movimiento. En rotación uniforme con velocidad angular $\bar{\omega}$, \bar{v} es igual al producto vectorial $\bar{\omega} \times \bar{r}$.

Como las sumas

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i}$$

son una combinación lineal de las derivadas $\partial v_i / \partial x_k$ y se hacen

cero para $\bar{v} = \bar{\omega} \times \bar{r}$, el tensor viscoso debe contener solamente esta combinación simétrica de las derivadas.

Por lo tanto

$$\sigma'_{ik} = \alpha \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) + \beta \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (1.8)$$

es la ecuación constitutiva que distingue a un fluido de otro. Con base en lo anterior σ'_{ik} puede escribirse en forma general para un fluido newtoniano como:

$$\sigma'_{ik} = \eta \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right] + \zeta \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \quad (1.9)$$

La expresión entre paréntesis tiene la propiedad de hacerse cero bajo contracción con respecto a ik y representa a los esfuerzos viscosos producidos por la rapidez de deformación cortante en un fluido, mientras que el otro término está relacionado con los cambios de volumen en el mismo.

Nótese que en la forma generalizada de la ley de la viscosidad de Newton, ésta aparece como una propiedad de transporte más. Las constantes η y ζ de la ecuación 1.9 se llaman coeficientes de viscosidad cortante y volumétrica respectivamente, son positivas y son función de la presión y temperatura. La viscosidad volumétrica es idénticamente cero para un gas monoatómico ideal (Bird, 1977); para líquidos incompresibles se hacen cero los términos $\partial v_l / \partial x_l$ que implican en sí, un cambio de volumen en el tiempo. Los líquidos incompresibles no existen realmente, pero en la mayoría de los fluidos la viscosidad volumétrica es muy pequeña comparada con la viscosidad cortante y puede despreciarse en todas aquellas pruebas en que no se esté trabajando directamente con la compresibilidad. En este trabajo se hace la simplificación de

considerar incompresibles a los fluidos y por lo tanto se desprecia el término correspondiente a la viscosidad volumétrica.

Utilizando la expresión explícita para σ'_{ik} , la ecuación de movimiento de un fluido viscoso puede por lo tanto expresarse como:

$$\rho \left[\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} + \left[\frac{1}{3} \eta + \zeta \right] \frac{\partial^2 v_k}{\partial x_k \partial x_i} \quad (1.10)$$

o bien,

$$\rho \left[\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1.11)$$

si el fluido puede considerarse incompresible.

La expresión 1.11 se conoce como la ecuación de Navier-Stokes y lleva implícitas las siguientes suposiciones: los coeficientes de viscosidad son constantes, el fluido es newtoneano e incompresible. La viscosidad debe obtenerse experimentalmente ya que es un coeficiente característico del material.

Si el fluido no es newtoneano es necesario escribir la ecuación fenomenológica que relacione a σ'_{ik} con la rapidez de deformación, introduciendo con ello otros coeficientes de transporte.

La viscosidad fue definida originalmente por Newton como una medida del flujo de material ante una fuerza aplicada, o bien como la resistencia que presentan todos los fluidos al cambio de velocidad. Si el esfuerzo cortante aplicado al material es proporcional al gradiente de la velocidad local, el fluido es newtoneano y la constante de proporcionalidad es la viscosidad. La ecuación 1.9 es una generalización de la ley de viscosidad de Newton, los fluidos que no obedecen esta relación se llaman no-

newtoneanos.

De acuerdo a su definición, en el sistema CGS, la viscosidad tiene dimensiones de dina-seg / cm², o bien, de gm / cm-seg, esta unidad es el Poise (P). La viscosidad del agua a temperatura ambiente es aproximadamente 0.01 poise o 1 centipoise (cP. o bien cps). En el sistema SI las dimensiones son N-seg / m² o Pascal-segundo (Pa S) que es diez veces mayor que el Poise. En muchos métodos de medición no se determina directamente la viscosidad, sino el cociente de la viscosidad entre la densidad del líquido, llamada viscosidad cinemática

$$\nu = \eta / \rho$$

En el sistema CGS las unidades de viscosidad cinemática son cm²/seg o Stoke (St); en el SI son m²/seg. A η se le llama viscosidad dinámica para distinguirla de la viscosidad cinemática ν (Cheng,1981).

En los fluidos newtoneanos el coeficiente de la viscosidad es función de la temperatura, y la densidad (presión). La viscosidad de un líquido disminuye generalmente al aumentar la temperatura, mientras que la viscosidad de un gas siempre aumenta con la temperatura (Yuan,1967).

1.2 Flujo laminar y turbulento

Cuando se tiene un fluido en movimiento la velocidad varía, por lo general, punto a punto para cada tiempo. La distribución particular de las velocidades depende de la naturaleza del flujo que a su vez es una función de la geometría del contenedor y de las propiedades físicas del fluido. Un flujo puede clasificarse como laminar o turbulento.

Los términos flujo laminar y flujo puramente viscoso se usan

como sinónimos para indicar que el material fluye en láminas o capas, en oposición al flujo turbulento, en el que las componentes de la velocidad tienen fluctuaciones al azar que se imponen sobre sus valores medios. Cuando se inserta una corriente de humo o tinta en un flujo laminar, trazará una línea delgada que esta compuesta siempre por las mismas partículas de fluido. En un flujo turbulento la línea de humo se confunde rápidamente y se mezcla con las partículas del fluido a medida que éste fluye, formando gran cantidad de nubes y filamentos que se van dispersando (Hughes, 1970).

A medida que la velocidad aumenta, el flujo cambiará de laminar a turbulento, pasando por un régimen de transición. Los dos tipos de flujo ocurren en la naturaleza, pero el turbulento parece ser el más usual.

1.3 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que caracteriza cualitativamente el tipo de flujo viscoso y se expresa como

$$Re = \rho \frac{UL}{\eta} \quad (1.12)$$

donde L es la longitud característica del sistema y U la velocidad característica. Este número está definido como el cociente de la presión dinámica ρU^2 y del esfuerzo cortante $\eta U/\rho$, o bien como el cociente de las fuerzas de inercia entre las de fricción, por lo que indica aproximadamente la variación de la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza de viscosidad o de fricción.

El número de Reynolds es un parámetro importante para la viscosidad ya que como puede verse en la ecuación 1.12 es inversamente proporcional a la viscosidad siendo lo demás

constante. Por lo tanto a viscosidades grandes corresponden números de Reynolds pequeños y viceversa; o lo que es lo mismo cuanto mayor sea el número de Reynolds, tanto menor es la viscosidad y tanto más se aproxima el movimiento al de un fluido ideal desprovisto de viscosidad.

El valor del parámetro es menor para flujos laminares que para turbulentos.

1.4 Comportamiento no-newtoneano

Si para los fluidos newtoneanos se grafica en coordenadas cartesianas el esfuerzo cortante σ contra la razón de corte $\dot{\gamma}$, se obtiene una recta, cuya pendiente es igual al coeficiente de la viscosidad dinámica. Si al variar la razón de corte la viscosidad no es constante, el fluido es no-newtoneano, la mayor parte de sistemas de alto peso molecular, soluciones y fundidos así como fluidos de fases múltiples (coloides, suspensiones, emulsiones, pastas, etc.) caen bajo esta categoría (Cheng, 1981). Para los fluidos no-newtoneanos, las gráficas del esfuerzo cortante contra la razón de corte deben obtenerse experimentalmente (Holland, 1973). La figura 1.1¹ muestra las relaciones existentes entre esfuerzo cortante y razón de corte para sólidos y fluidos.

El término de viscosidad no tiene sentido para un fluido no newtoneano a menos que se le relacione con una razón de corte específica. Una medida no puede caracterizar a un material no-newtoneano, únicamente proporciona una viscosidad aparente para un esfuerzo cortante, razón de corte y temperatura

¹ Para no quitar continuidad al texto, las figuras aparecen al final de cada capítulo.

particulares (Howard, 1969).

Para los fluidos no-newtoneanos la viscosidad aparente μ_a se define como

$$\sigma = \mu_a \dot{\gamma} \quad (1.13)$$

La viscosidad aparente obtenida con un tipo de viscosímetros no está relacionada con la obtenida con otro tipo y por lo tanto no puede ser comparada (Cheng, 1981). En esta misma línea Barbee (1973) indica que los resultados obtenidos con un viscosímetro capilar en muestras de sangre no se pueden comparar con los obtenidos con un viscosímetro de cilindros coaxiales o de cono y plato.

Cuando la viscosidad aparente decrece al aumentar la razón de corte el fluido se llama pseudoplástico y dilatante cuando aumenta al aumentar la razón de corte (Fig. 1.2).

El plástico de Bingham es otro tipo de fluido no-newtoneano. Una gráfica en coordenadas cartesianas de σ contra $\dot{\gamma}$ muestra una recta que intercepta en σ_0 al eje del esfuerzo cortante. σ_0 es el esfuerzo de cesión que debe ser superado antes de que el material fluya (Fig. 1.2). Un material del tipo "plástico de Bingham" contiene, en reposo, una estructura tridimensional con suficiente rigidez para resistir cualquier esfuerzo menor al de cesión. Cuando el esfuerzo aplicado es mayor que el de cesión el sistema se comporta como un fluido newtoneano. En un plástico Bingham se llama coeficiente de rigidez a la pendiente de la curva.

Los pseudoplásticos, dilatantes y plásticos Bingham son ejemplos de fluidos no-newtoneanos que no presentan una dependencia en el tiempo, esto es, que la viscosidad aparente depende solamente de la razón de corte en cada instante y no en el tiempo que ha durado su aplicación. Sin embargo para algunos fluidos, la viscosidad aparente cambia con el tiempo que dura la aplicación del esfuerzo cortante. Estos fluidos se conocen como

materiales no-newtoneanos dependientes del tiempo.

Los fluidos que muestran en el tiempo una disminución limitada en la viscosidad bajo un esfuerzo cortante se llaman tixotrópicos. En los fluidos tixotrópicos se da un rompimiento progresivo de su estructura al ser sometidos a un esfuerzo cortante constante, eventualmente se llega a un punto de equilibrio dinámico donde el rompimiento de estructura se balancea con una reconstrucción simultánea. De esta forma al aplicar un esfuerzo constante se obtiene un mínimo para la viscosidad aparente. El comportamiento tixotrópico puede esquematizarse como una curva de histéresis en la gráfica esfuerzo cortante-razón de corte, si la razón de corte se incrementa progresivamente hasta un cierto punto donde se inicia la disminución. Muchos fluidos muestran un comportamiento tixotrópico añadido al pseudoplástico o dilatante.

De lo expuesto en el párrafo anterior puede inferirse que la tixotropía es una propiedad transitoria, y así es, ya que la mayoría de los fluidos tixotrópicos recuperan su viscosidad original si se les deja en reposo por un tiempo suficientemente grande. Algunos fluidos se recuperan de forma inmediata al cesar el esfuerzo cortante y otros pueden tardar varias horas. Un buen ejemplo de fluido tixotrópico es la salsa "catsup" que no caerá hasta que haya sido agitada. Una vez que se la deja reposar recupera su consistencia. Otro ejemplo son las pinturas que no gotean, donde al comprador se le presenta un producto semisólido que fluirá fácilmente al aplicarle un esfuerzo cortante por medio de la brocha, convirtiéndose en un fluido de baja viscosidad por un periodo suficientemente largo para permitir su aplicación con facilidad y que se borren las marcas de la brocha, pero que pasado un cierto tiempo revierte a una forma altamente viscosa que resiste chorreaduras (Murray, 1979).

Los fluidos que muestran un aumento en viscosidad bajo un

esfuerzo constante se llaman reopécticos. En este tipo de materiales los esfuerzos cortantes pequeños facilitan la formación de la estructura, después de un cierto límite se da un rompimiento, lo que proporciona un máximo en la viscosidad a una razón de corte constante. La mayoría de los fluidos reopécticos, regresan rápidamente a su estructura original al cesar el esfuerzo cortante. Este tipo de materiales son raros y carecen de importancia industrial.

Otro grupo importante de fluidos no-newtoneanos son los viscoelásticos. Estos presentan propiedades viscosas y elásticas. En un sólido perfectamente elástico, el esfuerzo correspondiente a una deformación es independiente del tiempo (Fig.1.1), en contraste con los materiales viscoelásticos donde el esfuerzo se disipa gradualmente.

1.5 Modelos no-newtoneanos

Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas o "modelos" para expresar la relación que existe en estado estacionario entre σ_{ij} y $\partial v_i / \partial x_k$. A continuación se presentan algunos modelos que describen los datos experimentales con suficiente exactitud. Todas las ecuaciones contienen parámetros empíricos positivos cuyo valor numérico puede determinarse correlacionando datos experimentales de σ_{ij} contra $\partial v_i / \partial x_j = \dot{\gamma}$, a temperatura y presión constantes (Bird, 1960).

El modelo más simple y el más usado es la ley de potencias o Modelo de Ostwald-de Waele.

Modelo de Ostwald-de Waele

La ecuación constitutiva de este modelo de dos parámetros puede escribirse como:

$$\sigma = K (\dot{\gamma})^n \quad (1.14)$$

donde K = el coeficiente de consistencia, con unidades de $(N\text{-seg})^n/m^2$, y n cantidad adimensional, son constantes características en cada polímero o mezcla polimérica. Para los fluidos pseudoplásticos $n < 1$ y para los dilatantes $n > 1$. En el caso de los fluidos newtoneanos $n = 1$ y K = al coeficiente de viscosidad dinámica (Holland, 1973).

La mayor parte de los fluidos macromoleculares son pseudoplásticos y es frecuente que para éstos el valor de n oscile de 0.15 a 0.6.

Modelo de Eyring

El modelo de dos parámetros, expresado en la siguiente ecuación, esta derivado de la teoría de Eyring; fue el primer intento de obtener una ecuación molecular para la viscosidad no-newtoneana (Bird, 1977).

$$\sigma = A \operatorname{arc} \sinh \left[-\frac{1}{B} \dot{\gamma} \right] \quad (1.15)$$

Predice un comportamiento pseudoplástico para valores finitos de σ pero tiende asintóticamente a la ley de la viscosidad de Newton con $\eta = A / B$ cuando σ se aproxima a cero (Bird, 1960).

Modelo de Bingham

Ninguna lista de modelos empíricos esta completa sin el modelo de Bingham para fluidos con un esfuerzo de cesión σ_0 . La viscosidad es finita cuando el esfuerzo aplicado es mayor que:

$$\begin{aligned} \sigma &= -\mu \dot{\gamma} + \sigma_0 & \text{si } |\sigma| > \sigma_0 \\ \dot{\gamma} &= 0 & \text{si } |\sigma| < \sigma_0 \end{aligned} \quad (1.16)$$

Toda sustancia que se comporta de acuerdo con este modelo de dos parámetros se denomina "plástico de Bingham". Permanece rígida mientras el esfuerzo cortante es menor que el esfuerzo de cesión σ_0 , pero fluyen como un newtoneano cuando el esfuerzo cortante sobrepasa este límite (Bird,1977). Se ha encontrado que este modelo es suficientemente preciso para suspensiones finas y pastas (Bird,1960).

El comportamiento reológico de los modelos anteriores está esquematizado en la figura 1.2. Es necesario tener presente que estas ecuaciones no son más que fórmulas empíricas de ajuste de curvas, y por consiguiente es aventurado extrapolarlas fuera del intervalo de datos experimentales utilizados en su obtención. Los parámetros de estos modelos son funciones de la temperatura, presión, composición y muchas veces del intervalo de $\dot{\gamma}$ para el que se ajustó la ecuación; por lo tanto al dar los valores de los parámetros reológicos deben especificarse cuidadosamente las condiciones en las que han sido determinados.

1.6 Importancia de la viscosidad

Por qué hacer medidas de viscosidad? La respuesta está en la experiencia de miles de personas que han hecho tales medidas, mostrando que puede obtenerse mucha información útil sobre el comportamiento o funcionamiento de varios productos, así como medidas predictivas de este comportamiento. También puede servir para conocer los efectos producidos en el material por el procesamiento, cambio en la formulación o envejecimiento. Una razón frecuente para realizar medidas de viscosimetría puede encontrarse en el área de control de calidad para mantener una consistencia constante de remesa en remesa. Otra razón es que la viscosidad proporciona información sobre el comportamiento de

fluidos en procesos industriales (Brookfield,1983).

Se ha sugerido que la reología es el método más sensible para la caracterización de materiales, ya que el comportamiento del flujo responde a propiedades como peso molecular o distribución de peso molecular. Esta relación es útil en la síntesis de polímeros, ya que permite distinguir diferencias relativas sin hacer medidas más complicadas de peso molecular. Las medidas reológicas también son prácticas en el seguimiento de reacciones químicas de procesos de degradación o de polimerización (Kilp,1976). Tales medidas se emplean para comprobar la calidad durante la producción, monitorear y/o controlar un proceso. Las medidas reológicas permiten el estudio de tratamientos químicos, mecánicos y térmicos, efecto de aditivos o del proceso de una reacción de maduración. Son también una forma de predecir y controlar un sin número de propiedades de los productos, rendimiento final y comportamiento de los materiales. En macromoléculas naturales y sintéticas la viscosidad proporciona información respecto a tamaño, forma, grado de ramificación, entrecruzamiento o degradación de macromoléculas solubles (Billmeyer,1971).

Debe señalarse que en la mayoría de los casos la viscosidad se utiliza como una característica indirecta de lo que realmente se desea medir: composición, tamaño de partículas, peso molecular, consistencia, textura, grosor de recubrimiento, etc. La razón para hacer esto es que la viscosidad puede medirse con más facilidad que esos parámetros. Sin embargo, para que sea útil se requiere que exista una correlación adecuada entre la viscosidad y la característica que realmente se desea conocer (Tily,1983). Además de utilizar la viscosimetría como método independiente para la caracterización de polímeros se usa muchas veces en conexión con otras técnicas (Kilp,1976).

Finalmente, en mecánica de fluidos, la viscosidad es un enlace

entre la teoría y la experimentación, por ser un coeficiente característico del material, que debe obtenerse experimentalmente para ser utilizado en la relación constitutiva que nos dice cómo es el transporte de momento en el sistema (cf.1.1).

1.7 Medición de la viscosidad

La viscosidad puede variar de 10^{-6} a 10^{22} poises (Tily,1983) por lo que se han desarrollado un gran número de técnicas experimentales para cubrir este intervalo. Como este parámetro depende fuertemente de la temperatura, resulta indispensable para tener una buena precisión en su determinación, que los viscosímetros estén sumergidos en un baño térmico de temperatura constante regulada a ± 0.02 °C (Flory,1953). En algunos aceites viscosos es común observar cambios hasta de un 10% en la viscosidad, por grado centígrado (Pipkin,1972), sin embargo, en el agua el cambio es de sólo 0.8% por grado centígrado (Zangger,1975). En las especificaciones para estandarización se señala que la temperatura debe controlarse dentro de ± 0.01 °C y conocerse a ± 0.005 °C para obtener una alta precisión y exactitud en las medidas de viscosidad (Cheng,1981).

La medida absoluta de la viscosidad depende de la precisión con que pueda medirse el esfuerzo cortante y la razón de corte (Ec. 1.13). La instrumentación práctica comprende, en consecuencia, métodos donde se utilizan fluidos en movimiento y se mide la fuerza resultante o bien se emplea una fuerza motriz para registrar el flujo obtenido. En ambos casos se usan expresiones matemáticas que relacionan fuerzas y flujos con valores de esfuerzos cortantes y razones de corte (Tily,1983).

Algunos aparatos son adecuados para determinar la viscosidad absoluta, ya que ésta se obtiene por medidas dimensionales

derivadas de la geometría del aparato, y por otros parámetros experimentales como la velocidad angular y el tiempo. En tales aparatos no es necesaria la calibración. Existen otros viscosímetros donde sólo es posible efectuar medidas relativas de viscosidad después de una cuidadosa calibración, que puede realizarse comparando los resultados obtenidos con los de otro viscosímetro ya calibrado o con valores de viscosidad en fluidos de calibración. El viscosímetro capilar de vidrio se emplea, generalmente, para esta confrontación por su facilidad de manejo (Zimm,1962) y por ser el utilizado por las organizaciones nacionales de estandarización para los fluidos newtoneanos. No existen estándares de viscosidad cuando ésta se refiere a fluidos no-newtoneanos. En la práctica se emplean fluidos newtoneanos, a una temperatura precisa, como estándares de viscosidad o líquidos de calibración (Cheng,1980), esto es suficiente en la mayoría de las aplicaciones donde se pretende tener únicamente resultados comparativos o tendencias de los materiales. El requerimiento básico en este tipo de medidas es la reproducibilidad de los resultados bajo las mismas condiciones de operación y que el aparato entregue datos confiables dentro de un cierto intervalo de viscosidades (Tily,1983).

Las formas más comunes de los viscosímetros de laboratorio se describen en los siguientes apartados, después de enumerar los intervalos de funcionamiento de los diferentes métodos de medición (Tabla 1.1). La tabla de intervalo útil de medida está basada en la que presenta Van Krevelen (1976), se han modificado algunos límites de acuerdo a la información encontrada en otras fuentes (Billmeyer,1971; Dipippo,1966; Geils,1977; Harrington,1916; Kestin,1959; Marriens,1955; Rand,1964).

1.8 Viscosímetros capilares

El primer método adoptado para medir la viscosidad y el más utilizado aún en la actualidad, consiste en medir el flujo a través de un tubo capilar que debe tener un cociente longitud-diámetro mayor o igual a 14 (Cheng,1980). La viscosidad se obtiene utilizando una relación entre la razón de flujo y la caída de presión. Si el flujo es laminar y estacionario, la ecuación

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \left[-\Delta P \right] \quad (1.17)$$

proporciona la correspondencia entre el flujo volumétrico (Q), el gradiente de la presión (Δp), la cuarta potencia del radio del tubo (r^4) la longitud del mismo (l), la densidad ρ y la viscosidad η . Esta relación conocida como ley de Poiseuille fue verificada experimentalmente por Hagen y un poco más tarde por el mismo Poiseuille. La medida de la presión debe realizarse después de una cierta distancia dentro del tubo, ya que ésta se requiere para que el flujo adquiriera una distribución parabólica de las velocidades (Yuan,1967). Para asegurar la existencia del flujo laminar se emplea un capilar, puesto que el diámetro pequeño contribuye a disminuir el número de Reynolds (Holman,1981). En teoría, utilizando la relación de Hagen-Poiseuille, puede obtenerse la constante del viscosímetro a partir de sus dimensiones. Sin embargo la incertidumbre que se obtiene por este método es generalmente grande, por lo que la mayoría de las medidas de viscosidad hechas en capilares están referidas al valor del agua destilada a 20 grados centígrados.

Los viscosímetros capilares son los de mayor aceptación debido a su simplicidad de manejo aunado a la facilidad de construcción, sensibilidad y reproducibilidad de resultados (Kilp,1976). Son operados por peso muerto o presión de gas, o bien a desplazamiento constante. Pueden construirse para cubrir el intervalo de

esfuerzos cortantes encontrados en las operaciones de fabricación (Billmeyer, 1971). Las viscosidades se derivan del tiempo que tarda en pasar el menisco de una solución entre dos puntos preestablecidos por la geometría del viscosímetro que se esté utilizando (Kilp, 1976). Para un fluido determinado debe escogerse un viscosímetro que dé tiempos de flujo mayores a 100 segundos con la finalidad de poder desprestigiar correcciones de energía cinética (Shaw, 1977).

Los viscosímetros capilares tienen la desventaja de que la razón de corte no puede modificarse, ni queda especificada con precisión. El flujo dentro del capilar es tal que el esfuerzo cortante varía de cero en el centro a un máximo en las paredes. Esto significa que sólo se puede especificar un esfuerzo cortante promedio que se determina con la constante del aparato y que disminuye al variar la altura del fluido. La viscosidad obtenida no tiene significado teórico si se están estudiando partículas asimétricas. Se han construido viscosímetros capilares que tienen varios bulbos a diferentes alturas, con la finalidad de variar la razón de corte promedio, otros se controlan externamente con presión de aire u otro gas, sin embargo, por las razones expuestas anteriormente el viscosímetro capilar no debe utilizarse para estudios precisos de dependencia con la razón de corte; no se recomiendan para fluidos no-newtonianos (Cheng, 1980).

Los viscosímetros capilares son muy sensibles a cambios en el diámetro del capilar (ec. 1.17), por lo que no son adecuados para medir la viscosidad de sustancias que se adhieren a las paredes. Por ejemplo, un tubo capilar de 2 mm de diámetro con un depósito en la pared de sólo 0.02 mm (2% de reducción en el diámetro) conlleva un error de 7.8%.

Los tipos más comunes de viscosímetros capilares son los de Ostwald-Frense y Ubbelohde (Fig. 1.3). La presión que mueve al líquido en cualquier momento a través del capilar es proporcional

a su densidad. Con este tipo de viscosímetros puede obtenerse una comparación exacta entre la viscosidad de una solución y la del solvente. Para estas medidas de viscosidad relativa puede utilizarse simplemente la ecuación:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2} \quad (1.18)$$

o bien

$$\eta = K\rho t \quad (1.19)$$

que proporciona una relación útil entre la viscosidad y el tiempo de flujo. El subíndice dos representa al fluido de referencia o calibración y K es la constante de calibración del instrumento.

El viscosímetro de Ostwald es un aparato que funciona a un volumen constante que debe ser medido con precisión. En el de Ubbelohde el fluido que sale del capilar se almacena en un bulbo separado del depósito principal del líquido, por lo que el viscosímetro de Ubbelohde opera independientemente del volumen del fluido en el aparato (Collins,1973), por esta razón, puede cambiarse fácilmente la concentración, lo que permite hacer con facilidad medidas a diferentes concentraciones por diluciones sucesivas. Comercialmente existen ambos tipos de viscosímetros. Cannon los fabrica con volúmenes de 10 ml. o 1 ml. con variedad de diámetros en el capilar para poder seleccionar los tiempos de flujo. Una fuente de error en las medidas con los viscosímetros capilares es el registro manual del tiempo que tarda el menisco de la solución en pasar entre las dos marcas. Para eliminar esta fuente de error se construyen actualmente viscosímetros automáticos con detectores optoelectrónicos (Kilp,1976; Mazza, 1984).

La precisión que puede obtenerse, en la práctica, con los viscosímetros capilares depende del valor de la viscosidad del

líquido, así como de sus propiedades físico-químicas. Para muestras con pesos moleculares relativamente bajos, la reproducción de resultados es de 0.2% para viscosidades bajas, aumentando a 0.3 o 0.35% para viscosidades más altas. La reproducibilidad varía de 0.25 a 1.5% respectivamente (Cheng, 1980).

Otro tipo de viscosímetros empleados ampliamente en las industrias petroquímica, de pintura y pegamentos, son los de orificio o tubo corto; donde la relación longitud diámetro es menor o igual a 10 según Van Wazer (1963) o de 13 a 4 según Cheng (1980).

Dentro de esta clasificación están los viscosímetros Saybolt Universal y Furol, fabricados en los Estados Unidos; el Redwood I y II de la Gran Bretaña, Engler de Alemania y Barbey de Francia (Barr, 1931; Van Wazer, 1963; Holman, 1981). Su flujo no obedece la ley de Hagen-Poiseuille, por lo que no existe una relación simple con la viscosidad. El tiempo de flujo, medido generalmente en segundos, es una expresión arbitraria de la viscosidad y se reporta comúnmente como segundos del viscosímetro, i.e.: segundos Saybolt, segundos Redwood, etc. Para convertir estas medidas a unidades absolutas, se deriva una fórmula empírica para cada instrumento. La ecuación tiene por lo general la forma:

$$\eta = K_1 \rho t + K_2 \frac{\rho}{t} \quad (1.20)$$

Como el tubo capilar es corto, no se desarrolla un flujo laminar estable, por lo que es indispensable aplicar una corrección a la expresión de los viscosímetros capilares. Obsérvese que la forma de la ecuación es similar, sin embargo, el coeficiente K_1 no es una constante, por lo que muchas veces es necesario calibrar el instrumento para diversos intervalos de flujo.

Los viscosímetros de este tipo consisten en un depósito graduado con un tubo corto, que puede tener o no, un control

térmico y en algunos casos, un frasco graduado para recibir la muestra. La figura 1.4 presenta un esquema del viscosímetro de Saybolt.

El método de operación es aproximadamente el mismo para todos: se llena el viscosímetro con el líquido que se va a examinar, ajustándolo a una altura definida. Cuando se tiene la temperatura deseada se abre una válvula en la base de la copa y se procede al drenado del cilindro a través de un tubo capilar corto. Se registra el tiempo necesario (t) para descargar un volumen preestablecido de fluido (50 ml en el viscosímetro de Redwood, 60 ml en el de Saybolt y 200 ml en el de Engler) o bien el volumen colectado en un tiempo dado (10 min en el viscosímetro de Barbey).

1.9 Viscosímetros tipo Stokes

De los viscosímetros que se basan en la ley de Stokes los más comunes son los de esfera descendente o rodante y los de cilindro descendente. Son particularmente útiles en fluidos muy viscosos (Cheng, 1980).

El viscosímetro de esfera, consta de un tubo de vidrio o metal sellado en los extremos, que contiene la muestra y de una esfera de radio poco menor que el radio del tubo y de mayor densidad que el fluido a medir (Fig. 1.5). Los parámetros que se pueden modificar en este viscosímetro son: relación de diámetros esfera-tubo (aunque en general estos diámetros son comparables), ángulo de inclinación del tubo y recorrido de la esfera. Existe la posibilidad de utilizar esferas de diferente densidad (Carreira, 1968). La viscosidad se obtiene midiendo el tiempo que tarda la esfera en recorrer cierta distancia del tubo, a una inclinación dada con un fluido a temperatura constante.

Con una esfera de radio r y una velocidad constante U se

determina una viscosidad aparente:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_s - \rho_f) g = 6 \pi U r \mu_a \quad (1.21)$$

donde ρ_s y ρ_f son las densidades de la esfera y del fluido respectivamente y g es la aceleración de la gravedad (Munro, 1979).

Alternativamente se puede utilizar la expresión

$$\eta = \frac{Kt}{d} (\rho_s - \rho_f) \quad (1.22)$$

donde d es la distancia recorrida por la esfera y t el tiempo que tarda en recorrerla.

Existen viscosímetros de Stokes para trabajar a presiones moderadamente altas [500 kbar.] (Carreira, 1968) y a altas temperaturas [1000 °C.] (Geils, 1977) ya que este viscosímetro presenta la ventaja de poder funcionar totalmente sellado. En estas aplicaciones los tubos del viscosímetro no pueden ser ópticamente transparentes y hay que recurrir a algún método no óptico para medir el tiempo que tarda la esfera en recorrer una distancia preestablecida.

Las dificultades que presenta este viscosímetro son que al variar el ángulo de inclinación del tubo, la esfera pasa de un régimen de deslizamiento a una rotación con deslizamiento, otro problema es que las medidas deben hacerse cuando la esfera haya alcanzado su velocidad terminal (Geils, 1977) y la última dificultad es que la razón de corte varía con la viscosidad (Tily, 1983). Las determinaciones son por regla general de viscosidad relativa.

Se ha encontrado que en aceites de 100 y 1000 St de viscosidad la concordancia entre los viscosímetros de esfera descendente y los de tubo capilar es por lo menos de 1%. La máxima precisión

que puede obtenerse con el viscosímetro de Stokes es de $\pm 0.5\%$ (Cheng, 1980).

1.10 Viscosímetros oscilantes

Uno de los métodos más precisos para medir la viscosidad es el del viscosímetro oscilante. Consiste en medir el amortiguamiento del periodo de oscilación de un elemento que vibra a una frecuencia desde unos cientos de Hertz a ultrasonido, dependiendo del diseño (Tily, 1983). El elemento vibrante puede ser un cable, un diapasón, una cuchilla delgada, una esfera o un disco que se encuentran suspendidos dentro del fluido por un resorte elástico (Holman, 1981), un péndulo de torsión o un campo magnético oscilante. El movimiento del cuerpo se retarda por el arrastre viscoso del líquido. Las oscilaciones pueden ser torsionales o longitudinales, la ventaja de las últimas es que existe una relación simple entre la viscosidad y el amortiguamiento (White, 1969).

Los viscosímetros oscilantes se usan para medidas absolutas (Marriens, 1955; Kestin, 1959), son particularmente útiles para medir la viscosidad a altas presiones como en los gases, o para altas temperaturas como en las sales fundidas. Actualmente estos viscosímetros son los que proporcionan mayor precisión. En la figura 1.6 se muestra de manera esquemática el viscosímetro de disco oscilante.

Estos aparatos son sumamente precisos y complejos en su manejo, por lo que no son prácticos para realizar medidas rápidas.

1.11 Viscosímetros giratorios

Los viscosímetros giratorios utilizan un elemento que rota dentro del fluido cuya viscosidad debe ser determinada. La velocidad de rotación puede ser fija o variable de acuerdo al diseño. La razón de corte se establece a partir de la velocidad angular, de las dimensiones y geometría de la parte giratoria. El esfuerzo cortante se obtiene de la torca ejercida por el fluido en el elemento de medición (Tily,1983). Algunas de las geometrías utilizadas son: cilindros coaxiales, dos conos de diferente ángulo, cono y plato, platos paralelos o una combinación de estos. Todos estos viscosímetros pueden utilizarse con fluidos newtoneanos o no-newtoneanos ya que es posible calcular la razón de corte y el esfuerzo cortante para obtener las gráficas de viscosidad (Cheng,1980).

En la práctica, el flujo de Couette nunca se obtiene exactamente pero se aproxima bastante con los viscosímetros anteriores si el espacio entre las superficies sólidas es pequeño. A velocidades angulares grandes, el flujo de Couette con líneas curvas es poco apropiado para estudios viscosimétricos, debido a que el campo de presión ocasionado por la aceleración centrípeta se hace importante produciéndose flujos secundarios y finalmente turbulencias (Harris,1977).

En estos viscosímetros giratorios se utilizan muchas veces fórmulas aproximadas que dependen, para su validez, de que el espacio entre las superficies sólidas sea pequeño.

Viscosímetro de cono y plato

Un viscosímetro rotante comunmente utilizado para líquidos no-newtoneanos muy viscosos, es el de cono-plato o viscosímetro de

Weissenberg (Bird,1960). Este viscosímetro está construido fijando perpendicularmente y en contacto, el vértice de un cono con un plato estacionario (Fig.1.7). Cuando el cono es muy obtuso (θ menor a 4 grados) y rota a una velocidad constante, los gradientes de velocidad son los mismos en todos los puntos de la muestra (Shaw,1977). En el viscosímetro cono-plato la razón de corte es proporcional a la velocidad del cono y se calcula simplemente como la velocidad angular del cono (radianes/segundo), dividida por el ángulo del cono (radianes). El esfuerzo cortante se obtiene del valor de la torca medida en un resorte de torsión o algo similar (Collins,1973). Cabe subrayar que la razón de corte puede variarse ampliamente modificando la velocidad angular, o bien, las dimensiones del cono.

La fórmula simplificada para este aparato es:

$$\eta = \frac{3 T \operatorname{sen} \theta}{2 \pi r^3 \omega} \quad (1.22)$$

donde: T = torca (dina-cm), θ = ángulo entre cono y plato, ω = velocidad angular del cono, plato o cono y plato (rad/seg) y r = radio del cono (cm). El problema principal en este viscosímetro es la posibilidad de un error de montaje.

Viscosímetro de cilindros coaxiales

En el viscosímetro de cilindros coaxiales (Couette) el fluido está contenido en el pequeño espacio que queda entre los dos cilindros coaxiales, cualquiera de los dos cilindros puede rotar. Si gira el cilindro exterior manteniéndose estacionario el interior, el aparato se denomina viscosímetro de Couette-Hatschek o Couette-Mc.Michael (Fig.1.8). Si el que rota es el interior, se llama viscosímetro de Stromer (Bird,1966). El viscosímetro de Zimm-Crotter (1960) para DNA es una modificación de este último.

El viscosímetro de Couette puede describirse de la siguiente manera: se hace rotar el cilindro exterior, de radio R_2 a una velocidad angular constante (ω_2) respecto al cilindro interior estacionario. El estator (cilindro interior) se encuentra suspendido de un resorte o cable de torsión. El movimiento se transmite por el fluido al cilindro interior produciendo una deformación torsional en el elemento de torsión. La torca medida resulta de las fuerzas de corte del fluido que resisten al movimiento del cilindro exterior. Las fuerzas de corte existen tanto en las superficies circulares de los cilindros, como entre sus bases (Yuan, 1967). Se supone que el fluido se mueve en círculos concéntricos alrededor del eje común de los cilindros. Esta suposición es válida cuando la diferencia entre los radios de los cilindros tiende a cero.

La fórmula simplificada de la viscosidad utilizada en este aparato es:

$$\eta = \frac{K \theta}{\omega h} \quad (1.23)$$

donde K es la constante del aparato obtenida normalmente haciendo una calibración con un líquido de viscosidad conocida; θ es la desviación angular del cilindro interior, ω es la velocidad del cilindro exterior y h es la altura efectiva del líquido en contacto con los dos cilindros. La ventaja del instrumento de Couette es que permite que el esfuerzo sea variado constantemente entre amplios límites (Jigerson, 1965).

Los viscosímetros de cilindros coaxiales encontrados en la literatura difieren mucho entre sí tanto en sus dimensiones como en su región de trabajo (Barr, 1931; Van Wazer, 1963).

Una modificación del viscosímetro tipo Couette, que lleva a un diseño sumamente simple, es eliminar completamente el cilindro exterior. El cilindro interior (rotor) se sumerge simplemente en un recipiente grande que contiene el fluido a ser probado. Los

viscosímetros de Brookfield, los de Viscometers UK Ltd. y de Ferranti son de este tipo.

El instrumento de Brookfield es uno de los más populares y ampliamente utilizado en la industria para medir viscosidad debido a que es portátil y fácilmente manejable. Las medidas se hacen en menos de 5 minutos cada una y puede cubrirse un amplio intervalo de viscosidades (0,5 a 20,000 poises) modificando la velocidad angular y el tamaño de los rotores (Collins,1973). Tiene la desventaja de que en su versión estándar utiliza 500 ml. de muestra. La razón de corte y el esfuerzo cortante no se pueden calcular fácilmente, pero resulta útil la aproximación de que 0.2 veces las revoluciones por minuto son igual a la razón de corte (Collins,1973). Murray (1979) afirma que en este tipo de viscosímetros las condiciones de flujo son generalmente tan complejas que si el líquido es no-newtoneano los resultados no son reproducibles y muchas veces no tienen significado aún como medidas arbitrarias de viscosidad.

Existen otros viscosímetros comerciales no incluidos en este trabajo por no considerarlos típicos. Los datos referente a ellos pueden encontrarse en los artículos de Cheng (1980) y Tilly (1983) o en los libros de Van Wazer (1963) y Barr (1931).

TABLA I. INTERVALO DE FUNCIONAMIENTO DE DIFERENTES VISCOSIMETROS

METODO	INTERVALO UTIL DE MEDIDA (POISES)
CAPILARES	
- pipeta capilar	10^{-2} - 10^3
- extrusión capilar	1 - 10^8
STOKES	
- esfera	10^{-1} - 10^5
- cilindro coaxial	10^5 - 10^{11}
OSCILANTES	10^{-7} - 10^4
COUETTE	
- placas paralelas	10^4 - 10^9
- cilindros giratorios	10^{-6} - 10^{12}
- cono y plato	10^{-1} - 10^{12}
OTROS	
- relajación de esfuerzos	10^3 - 10^{10}
- deslizamiento por tensión	10^5 - 10^{12}

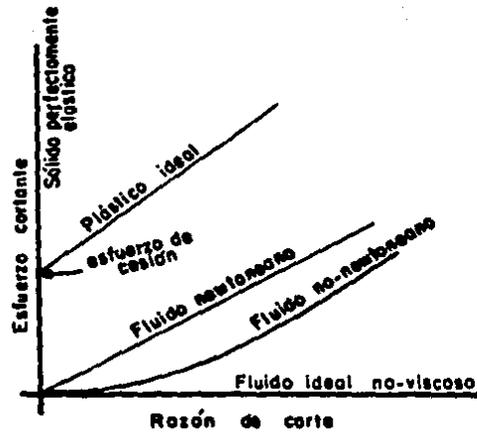


Fig. 1.1. - Diferencias distintivas en la relación entre esfuerzo cortante y razón de corte para sólidos y fluidos.

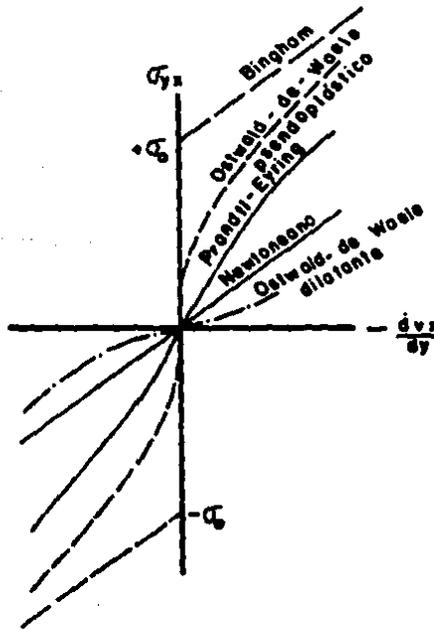


Fig. 1.2. - Gráfica de los modelos no-newtonianos. El newtoniano se incluye como referencia.

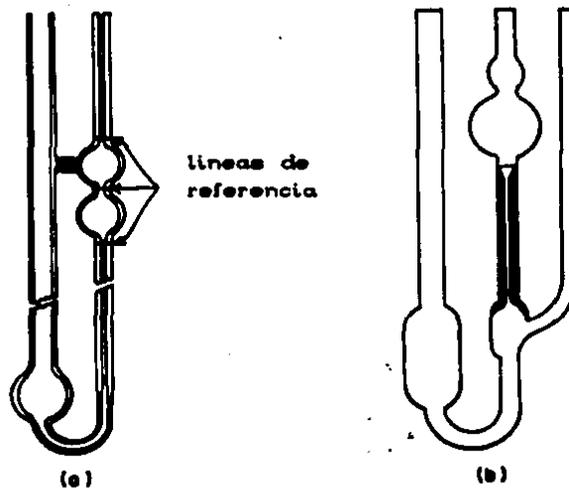


Fig./3.- Viscosímetros capilares mas usuales: a)Ostwald-Frenske, b)Ubbelode.

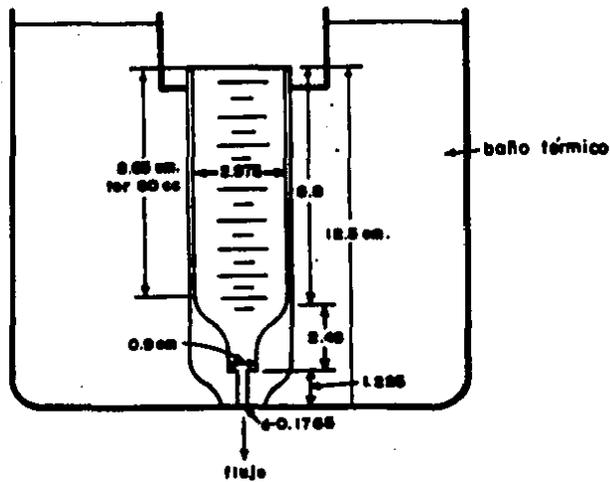


Fig./4.- Viscosímetro de Saybolt

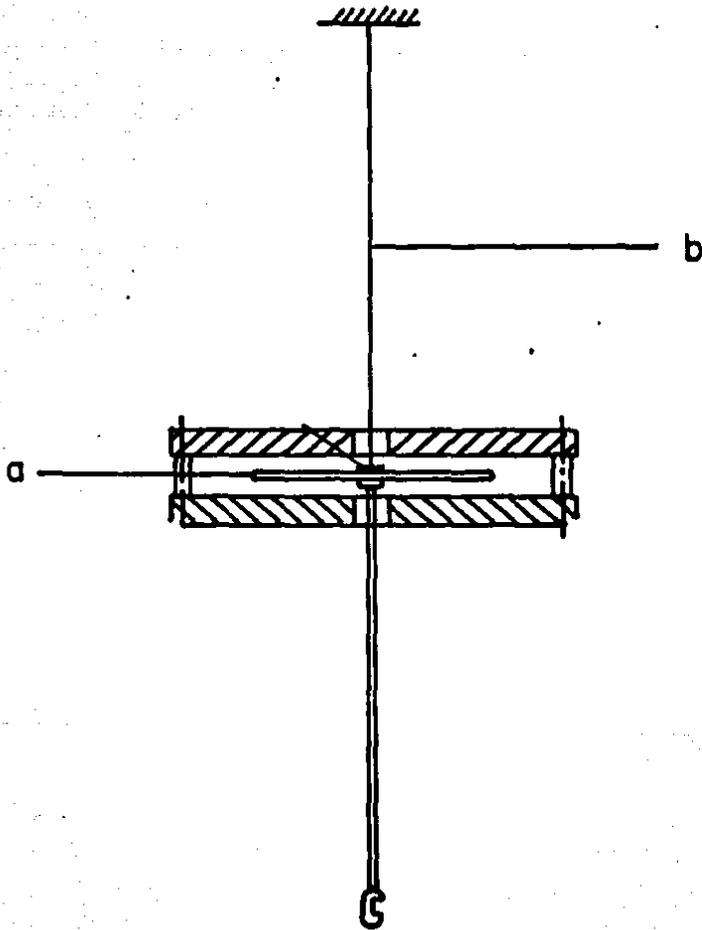


Fig 1.5 Esquema del viscosímetro de disco oscilante: a) disco, b) elemento oscilante.

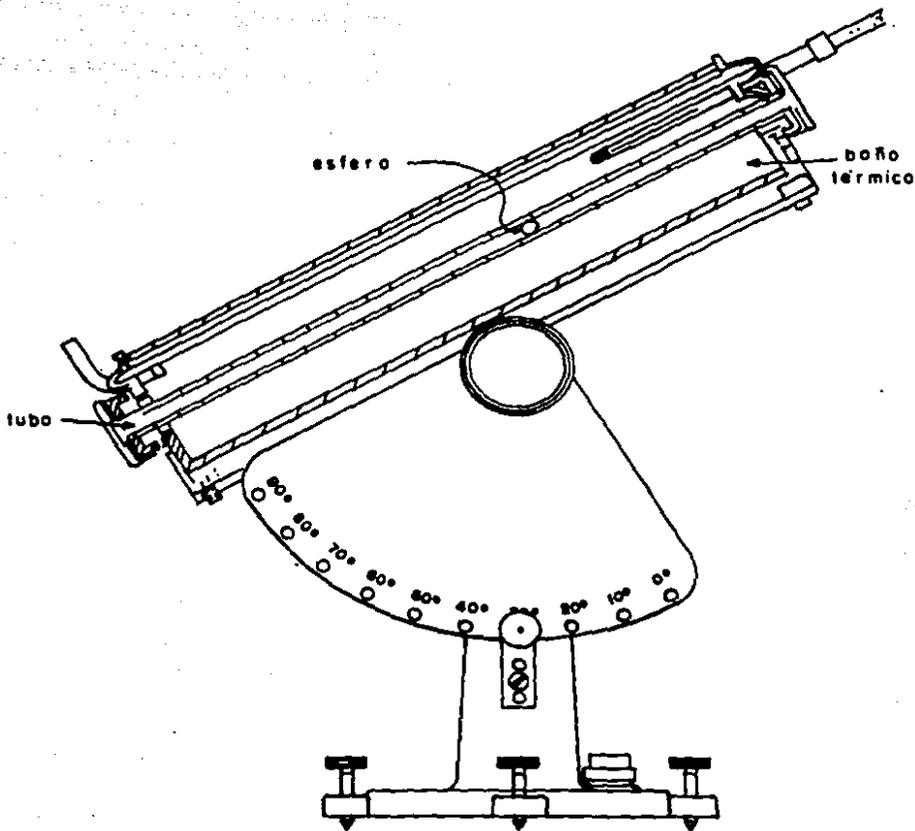


Figura 16

Viscosímetro de Stokes de esfera descendente. En el esquema puede observarse el tubo que contiene la muestra, la esfera de diámetro poco menor al del tubo, el baño térmico y el accesorio para modificar la inclinación del tubo.

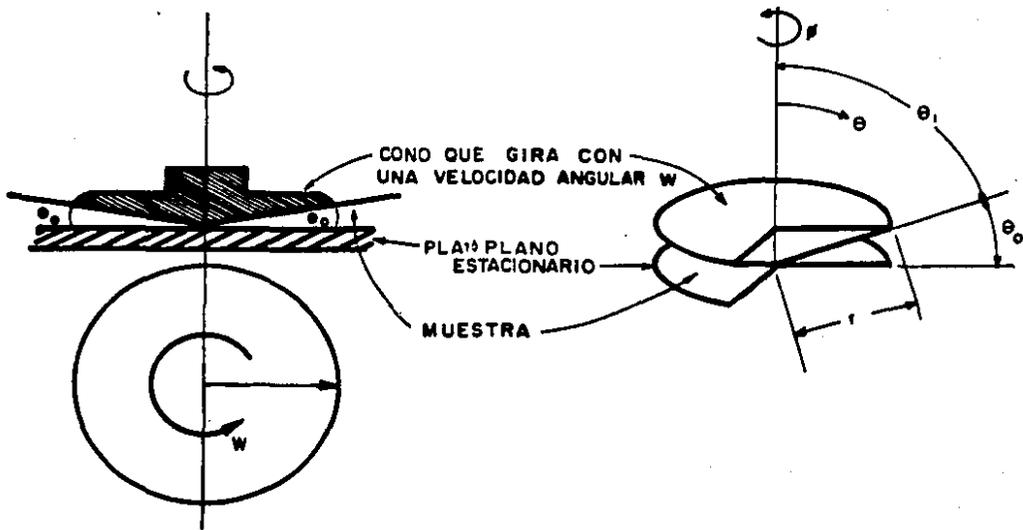


Fig. 7. - Viscosímetro de cono y plato

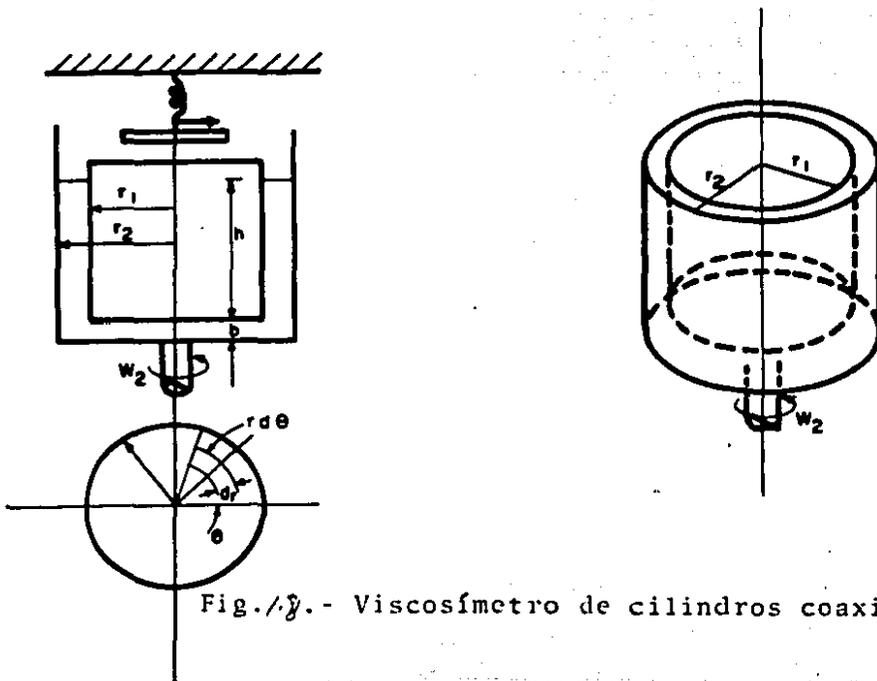


Fig. 8. - Viscosímetro de cilindros coaxiales

CAPITULO II

VISCOSIMETRO DE CILINDROS GIRATORIOS

De los viscosímetros descritos anteriormente, se escogió para realizar este estudio, el de cilindros coaxiales por parecernos uno de los modelos más versátiles. El intervalo de viscosidades que pueden medirse con este aparato es el más amplio de los existentes, como puede comprobarse en la tabla presentada en el capítulo anterior. La razón de corte y esfuerzo cortante se modifican al variar la velocidad del rotor o las dimensiones de los cilindros, lo que hace posible trabajar con sistemas no-newtoneanos (donde el coeficiente de viscosidad no es constante). Los fluidos no-newtoneanos pueden poseer propiedades de flujo dependientes del tiempo. Por estas razones el viscosímetro giratorio tipo Couette es el instrumento más apropiado para un estudio reológico completo de la mayoría de las dispersiones coloidales y soluciones poliméricas (Buchdahl, 1947).

El viscosímetro de cilindros giratorios reproduce el flujo de Couette con una buena aproximación si la distancia entre los cilindros es pequeña. Esto significa que los esfuerzos cortantes permanecen casi constantes entre los cilindros.

La figura 1.8 presenta un esquema de este aparato, que consta de dos cilindros de radios aproximados que giran sobre su eje con velocidades ω_1 y ω_2 . La zona de interacción entre los lados de los cilindros es h , llamada también altura efectiva.

2.1 Descripción teórica

A.- Flujo entre las paredes laterales de dos cilindros coaxiales

De acuerdo con los tratamientos existentes en la literatura, (Landau, 1959) se obtiene a continuación la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible, en el caso en que el fluido se encuentre en el espacio entre dos cilindros coaxiales que rotan con velocidades ω_1 y ω_2 . En esta ocasión no se consideran las bases de los cilindros que requieren de una corrección que se tratará más adelante.

Utilizando coordenadas cilíndricas con z en el eje de los cilindros, se tiene:

$$v_z = v_r = 0 \quad v_\phi = v_\phi(r) \quad p = p(r) \quad (2.1)$$

Para un fluido incompresible el tensor de los esfuerzos está dado por:

$$\sigma_{ik} = -p \delta_{ik} + \eta \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right] \quad (2.2)$$

que expresado en coordenadas cilíndricas y utilizando la relación (2.1) se reduce a:

$$\sigma_{r\phi} = \eta \left[\frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r} \right] \quad (2.3)$$

La ecuación de Navier-Stokes da, para este caso, dos ecuaciones en coordenadas cilíndricas

$$\rho \frac{v_{\phi}^2}{r} = \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2.4)$$

y

$$\frac{\partial^2 v_{\phi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\phi}}{\partial r} - \frac{v_{\phi}}{r^2} = 0 \quad (2.5)$$

de donde se obtiene el valor de v_{ϕ}

$$v_{\phi} = C_1 r + \frac{C_2}{r^2} \quad (2.6)$$

las constantes se obtienen imponiendo las condiciones de frontera

$$v_{\phi} = R_1 \omega_1 \quad \text{para} \quad r = R_1$$

$$v_{\phi} = R_2 \omega_2 \quad \text{para} \quad r = R_2$$

por lo que finalmente

$$v_{\phi} = \frac{(R_2^2 \omega_2 - R_1^2 \omega_1) r}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{(\omega_1 - \omega_2) R_1^2 R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2) r} \quad (2.7)$$

La razón de corte $\dot{\gamma} = dv/dr$ se obtiene de las ecuaciones 2.6 y 2.7

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = \frac{d}{dr} \left[C_1 r + \frac{C_2}{r} \right] \quad (2.8)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{R_2^2 \omega_2 - R_1^2 \omega_1}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{(\omega_1 - \omega_2) R_1^2 R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2) r^2}$$

Utilizando las ecuaciones 2.3, 2.6 y 2.7 se obtiene el esfuerzo cortante

$$\sigma_{r\phi} = \frac{-2\eta (\omega_1 - \omega_2) R_1^2 R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2) r^2} \quad (2.9)$$

Para calcular la fuerza por unidad de área que actúa sobre un cilindro, se multiplica $\sigma_{r\phi}$ por $2\pi r_i$; para la torca, se multiplica el resultado por la misma r_i . Por lo tanto, para un cilindro interior con una altura efectiva h se tiene:

$$T_{R_1} = (2\pi R_1 h) (R_1) (\sigma_{R_1\phi}) \quad (2.10)$$

$$T_{R_1} = \frac{-4\pi\eta R_1^2 R_2^2 h (\omega_1 - \omega_2)}{R_2^2 - R_1^2}$$

de donde podemos extraer la viscosidad en términos de cantidades que dependen de la geometría del aparato o pueden ser medidos.

$$\eta = - \frac{T_{R_1} (R_2^2 - R_1^2)}{4\pi R_1^2 R_2^2 h (\omega_1 - \omega_2)} \quad (2.11)$$

De los resultados anteriores hay que subrayar que al variar las dimensiones de los cilindros o la velocidad angular de los mismos se modifica la razón de corte y el esfuerzo cortante (ec. 2.8 y 2.9). Por otro lado, cuando los radios son aproximadamente iguales, el esfuerzo cortante es prácticamente constante en el anillo de fluido que está entre los cilindros.

Al definir la viscosidad en el capítulo I se empleó la relación

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

sin embargo, de la deducción anterior puede verse que en el

proceso experimental no es necesario calcular la razón de corte y el esfuerzo cortante, basta medir la torca transmitida a través del fluido desde el cilindro en movimiento al otro cilindro, como se aprecia en la ecuación 2.11.

B.- Corrección por longitud finita de los cilindros

En la práctica es preciso hacer correcciones a las ecuaciones de la torca (2.10) y viscosidad (2.11), debido a que hasta el momento no se ha tomado en cuenta la interacción en la base de los cilindros. Esta corrección queda incluida generalmente en la constante de calibración del instrumento para un cierto nivel de líquido (h).

Si los cilindros están colocados de forma que la distancia entre las bases es pequeña (Fig 1.8), la interacción entre ellas puede considerarse semejante a la producida por un viscosímetro de platos. A continuación se obtiene la expresión de la torca para un viscosímetro de platos que se utilizará para hacer la corrección de la ecuación 2.10.

Supongamos que el flujo entre las 2 bases es tangencial pero dependiente de z .

$$v_{\phi} = v_{\phi}(r, z) = rf(z) \quad v_r = v_z = 0 \quad p = p(r, z)$$

siguiendo el procedimiento del inciso anterior se tiene que el tensor de los esfuerzos en coordenadas cilíndricas es:

$$\sigma_{r\phi} = -\eta \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{v_{\phi}}{r} \right] \right] \quad (2.12)$$

$$\sigma_{\phi z} = -\eta \left[\frac{\partial v_{\phi}}{\partial z} \right] \quad (2.13)$$

la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} (\rho v_{\phi}) = 0 \quad (2.14)$$

y las componentes de la ecuación de movimiento en términos del esfuerzo cortante son:

componente r
$$-\rho \frac{v_{\phi}^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r}$$

componente ϕ
$$0 = \eta \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \sigma_{r\phi}) + \frac{\partial \sigma_{\phi z}}{\partial z} \right] \quad (2.15)$$

componente z
$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

Para $v_{\phi} = r f(z)$ y utilizando (2.12), el esfuerzo cortante es:

$$\sigma_{r\phi} = -\eta \left[r \frac{\partial}{\partial r} (f(z)) \right] = 0 \quad (2.16)$$

y la ecuación 2.15 se reduce a:

$$0 = \frac{\partial \sigma_{\phi z}}{\partial z}$$

que implica que el esfuerzo cortante y por lo tanto la razón de corte son independientes de z. Entonces la expresión del esfuerzo cortante (2.15) puede integrarse para dar ω que a su vez proporciona la relación para v .

$$\sigma_{\phi z} = \text{cte} = \alpha \quad (2.17)$$

que junto con la ecuación (2.13) puede escribirse como:

$$-\frac{\alpha}{\eta} = \frac{\partial v_{\phi}}{\partial z} = C_1(r) \quad (2.18)$$

integrando se tiene:

$$v_{\phi}(r, z) \Big|_0^z = C_1(r) z \Big|_0^z$$

Suponiendo que $v_{\phi}(r, z) = rw(z)$ y utilizando las condiciones de frontera

$$v_{\phi} = r\omega_2 \quad \text{para } z = 0$$

$$v_{\phi} = r\omega_p \quad \text{para } z = b$$

se tiene:

$$\omega_p = \frac{C_1(r) b}{r} + \omega_2 \quad (2.19)$$

de donde puede obtenerse el valor de la constante $C_1(r)$

$$C_1(r) = \frac{r}{b} (\omega_p - \omega_2) \quad (2.20)$$

que al sustituirla en la relación del esfuerzo cortante (2.13) y utilizando la ecuación 2.18 se tiene:

$$\sigma_{\phi z} = -\eta \frac{r}{b} (\omega_p - \omega_2) \quad (2.21)$$

de donde finalmente puede obtenerse:

$$v_{\phi}(r, z) = \frac{z r}{b} (\omega_p - \omega_2) + r\omega_2 \quad (2.22)$$

El valor de la torca en la superficie inferior del cilindro

interior es:

$$T = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} \sigma_{z\phi} (r \, d\phi \, dr) \, r$$

$$T = - \frac{\pi\eta}{2b} R_1^4 (\omega_p - \omega_2) \quad (2.23)$$

La expresión anterior se suma a la ecuación 2.10 para obtener la corrección por la interacción entre las bases. Supongamos que únicamente gira el cilindro exterior con velocidad ω_2 y el interior se mantiene fijo ($\omega_1 = \omega_p = 0$)

$$T_{R_1} = \frac{4\pi\eta R_1^2 R_2^2 h \omega_2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{\pi\eta}{2b} R_1^4 \omega_2$$

$$T_{R_1} = 4\pi\eta R_1^2 \omega_2 \left[\frac{R_2^2 h}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{R_1^2}{8b} \right] \quad (2.24)$$

El error relativo en el cálculo de la viscosidad sin considerar esta corrección es:

$$\text{error relativo} = \frac{\frac{R_1^2}{8b}}{\frac{R_2^2 h}{R_2^2 - R_1^2}} = \frac{R_1^2 (R_2^2 - R_1^2)}{8b R_2^2 h} \quad (2.25)$$

para que el error sea pequeño es necesario que el numerador lo sea o que el denominador sea grande. Esto es, que los radios sean muy semejantes, o bien, que bh sea grande comparada con la

diferencia de los radios al cuadrado.

C.- Corrección por terminar el cilindro interior en cono

La suposición de que hay un flujo anular tangencial no es válida cerca de la base del viscosímetro. Para compensar este efecto de borde se construye la base del cilindro interior en forma de cono; el flujo en el fondo es entonces parecido al de un cono y plato (Bird, 1977). A continuación se obtendrán las ecuaciones que describen este flujo. En primer lugar supongamos que el vértice del cono hace contacto con la base del cilindro exterior, que será considerado en este caso como plato (Fig. 1.7). Utilizando coordenadas esféricas

$$v_{\phi} = v_{\phi}(r, \theta) \quad v_{\theta} = v_r = 0 \quad (2.26)$$

Empleando las condiciones anteriores el tensor de esfuerzos se reduce a:

$$\sigma_{\theta\phi} = -\eta \left[\frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{v_{\phi}}{\sin \theta} \right] \right] \quad (2.27)$$

$$\sigma_{\phi r} = -\eta \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{v_{\phi}}{r} \right] \right] \quad (2.28)$$

y las ecuaciones de movimiento

componente r
$$-\rho \frac{v_{\phi}^2}{r} = \frac{\partial p}{\partial r}$$

componente θ
$$-\rho \frac{v_{\phi}^2 \cot \theta}{r} = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \quad (2.29)$$

componente ϕ

$$0 = - \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \sigma_{r\phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\phi}}{\partial \theta} + \frac{2 \cot \theta}{r} \sigma_{\theta\phi} + \frac{\sigma_{r\phi}}{r} \right]$$

Si el flujo es suficientemente lento, de forma que los términos cuadráticos puedan despreciarse, las ecuaciones de Navier-Stokes se reducen a la componente ϕ (2.29).

Supongamos que la distribución de la velocidad es de la forma $v_\phi(r, \theta) = r f(\theta)$. De acuerdo a esta hipótesis la velocidad angular es independiente de r , por lo que

$$\sigma_{\phi r} = - \eta \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\phi}{r} \right) \right] = 0$$

Al hacerse $\sigma_{\phi r} = 0$ la componente ϕ de la ecuación de movimiento (2.29) se reduce a

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\phi}}{\partial \theta} = - 2 \sigma_{\theta\phi} \cot \theta$$

Integrando esta ecuación se obtiene:

$$\ln \sigma_{\theta\phi} = - 2 \ln \sin \theta + C$$

o bien

$$\sigma_{\theta\phi} = \frac{C_1}{\sin^2 \theta} \quad (2.30)$$

C_1 es una constante de integración que puede evaluarse a partir de la condición límite en $\theta = \pi/2$ (superficie del plato) donde es posible obtener fácilmente el valor de la torca. La torca se calcula multiplicando $\sigma_{\theta\phi}$ por el área diferencial $r dr d\theta$ y por el brazo de palanca r , e integrando este producto sobre la superficie del plato de radio r .

$$T_{\text{plato}} = 2\pi \frac{r^3}{3} \frac{C_1}{\sin^2 \theta} \quad (2.31)$$

por lo que

$$\sigma_{\theta\phi} = \frac{C_1}{\sin^2 \theta} = \frac{3T}{2\pi r^3 \sin^2 \theta} \quad (2.32)$$

Si el cono tiene una $\theta \cong \pi/2$, entonces $\sin \theta \cong 1$ y el esfuerzo cortante $\sigma_{\theta\phi}$ es prácticamente una constante:

$$\sigma_{\theta\phi} = \frac{3T}{2\pi r^3} \quad (2.33)$$

lo que constituye una de las ventajas principales del viscosímetro de cono y plato. En la práctica, el ángulo formado entre el plato y la superficie cónica ($\theta_0 = \pi/2 - \theta$) es muy pequeño, de 1/2 grado (Bird, 1960) a 4 grados (Bird, 1977), por lo que puede considerarse válida la aproximación hecha para obtener la expresión (2.33).

A partir de la ecuación constitutiva de Newton

$$\sigma = -\eta \dot{\gamma} \quad (2.34)$$

y utilizando la ecuación (2.27) se tiene

$$\dot{\gamma}_{\theta\phi} = \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{v_\phi}{\sin \theta} \right] \quad (2.35)$$

si $\theta \cong \pi/2$

$$\dot{\gamma}_{\theta\phi} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (v_\phi)$$

por lo que con una buena aproximación

$$\dot{\gamma} = -\frac{\omega}{\theta_0} \quad (2.36)$$

que es una constante.

Utilizando (2.34) junto con las relaciones (2.33) y (2.36)

puede obtenerse la viscosidad por medio de la torca, velocidad angular del cono, radio y ángulo del mismo

$$\frac{3T}{2\pi r^3} = -\eta \left[-\frac{\omega}{\theta_0} \right] \quad (2.37)$$

$$\frac{3T\theta_0}{2\pi r^3 \omega} = \eta$$

Empleando ahora las ecuaciones (2.27) y (2.32) se obtiene la relación entre $\sigma_{\theta\phi}$ y el gradiente de v_ϕ/r .

$$\sigma_{\theta\phi} = -\eta \left[\frac{\text{sen } \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{v_\phi}{\text{sen } \theta} \right] \right] = \frac{3T}{2\pi r^3 \text{sen}^2 \theta} \quad (2.38)$$

que al integrar proporciona la distribución de la velocidad angular

$$\frac{v_\phi}{r} = \frac{3T}{4\pi r^3 \eta} \left[\cot \theta + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1 + \cos \theta}{1 - \cos \theta} \right] \text{sen } \theta \right] + C_2 \text{sen } \theta \quad (2.39)$$

Si $v_\phi(r, \theta) = r\omega \text{sen } \theta$ se cumplen las condiciones de frontera

$$v_\phi = r\omega_p \quad \text{para } \theta = \pi/2$$

$$\text{y} \quad v_\phi = r\omega_1 \text{sen } \theta_1 \quad \text{para } \theta = \theta_1 \quad (2.40)$$

$$\text{entonces} \quad v_\phi(\pi/2) = r C_2 = r \omega_p \quad (2.41)$$

por lo que $C_2 = \omega_p$. En general $C_2 = 0$ ya que el plato suele estar en reposo

$$v_{\phi}(\theta_1) = \frac{3T}{4\pi\eta r^2} \left[\cot\theta_1 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \cos\theta_1}{1 - \cos\theta_1} \right) \text{sen}\theta_1 \right] + r \omega_p \text{sen}\theta_1 \quad (2.42)$$

Utilizando esta relación y la ecuación (2.40) se tiene:

$$\omega_1 r \text{sen}\theta_1 = \frac{3T}{4\pi\eta r^2} \left[\cot\theta_1 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \cos\theta_1}{1 - \cos\theta_1} \right) \text{sen}\theta_1 \right] + r \omega_p \text{sen}\theta_1 \quad (2.43)$$

de donde puede obtenerse la viscosidad a partir de parámetros medibles: ω_1 , ω_p , T , θ , R .

$$T = \frac{4\pi\eta R^3 \text{sen}\theta_1 (\omega_1 - \omega_p)}{3 \left[\cot\theta_1 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \cos\theta_1}{1 - \cos\theta_1} \right) \text{sen}\theta_1 \right]} \quad (2.44)$$

Para poder hacer la corrección, es necesario que la expresión para la torca entre los cilindros (2.10) y la detectada en el cono (2.43) se encuentren en el mismo sistema de coordenadas por lo que a continuación se procede a transformar la expresión (2.44) a coordenadas cilíndricas.

Utilizando las relaciones:

$$\rho = r \text{sen}\theta$$

donde ρ es la componente radial en coordenadas cilíndricas

$$\cot\theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} = \frac{\rho}{z}$$

$$\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \cos\theta_1}{1 - \cos\theta_1} \right) = \ln \left(\frac{\sqrt{\rho^2 + z^2} + z}{\rho} \right)$$

$$\text{sen } \theta = \frac{\rho}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

se tiene que la expresión 2.44 se transforma en:

$$T = \frac{4\pi\eta (\omega_1 - \omega_p) (\rho^2 + z^2)}{3 \left[\frac{1}{z} + \ln \left[\frac{\sqrt{\rho^2 + z^2} + z}{\rho} \right] \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + z^2}} \right]} \quad (2.45)$$

que ya es posible sumar con la correspondiente a la torca de los cilindros. Haciendo $\rho = R_1$ y $\omega_p = \omega_2$

$$T = -4\pi\eta R_1^2 \omega_2 \left[\frac{R_2^2 h}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{\left(1 + \frac{z^2}{R_1^2} \right)}{3 \left[\frac{1}{z} + \ln \left[\frac{\sqrt{R_1^2 + z^2} + z}{R_1} \right] \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + z^2}} \right]} \right]$$

si no se considera esta corrección el error es

$$\text{error} = \frac{\left(1 + \frac{z^2}{R_1^2} \right)}{3 \left[\frac{1}{z} + \ln \left[\frac{\sqrt{R_1^2 + z^2} + z}{R_1} \right] \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + z^2}} \right]} = \frac{R_2^2 h}{R_2^2 - R_1^2}$$

$$= \frac{\left[R_2^2 - R_1^2 \right] \left[1 + \frac{z^2}{R_1^2} \right]}{3 R_2^2 h \left[\frac{1}{z} + \ln \left[\frac{\sqrt{R_1^2 + z^2} + z}{R_1^2} \right] \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + z^2}} \right]} \quad (2.47)$$

Para minimizar el error es necesario que el numerador lo sea, esto es que la diferencia de los radios al cuadrado ($R_2^2 - R_1^2$) o bien z (altura del cono) lo sean. Si el denominador es grande, el error también puede resultar despreciable y esto se consigue con una h grande comparada con $R_2^2 - R_1^2$.

Supongamos ahora que en un aparato se combina el hecho de que el cilindro interior termina en cono y se encuentra a una distancia b de la base del cilindro exterior. Como puede verse esta situación corresponde a la suma de los casos descritos en los apartados anteriores.

2.2 Consideraciones prácticas

Para obtener el coeficiente de viscosidad utilizando la geometría de cilindros coaxiales giratorios, el viscosímetro debe tener un mecanismo de rotación con un control preciso de velocidad, así como la posibilidad de medir la torca por medio de un sistema calibrado, libre de fricción (Howard, 1969). Las pruebas se realizan en flujo laminar bajo condiciones de razón de corte, esfuerzo y temperatura definidas y medidas cuidadosamente (Porter, 1965).

El aparato se calibra usando los métodos convencionales: por comparación con otro aparato ya calibrado, o por medio de fluidos

estándares de viscosidad. El método de calibración más utilizado es el de los fluidos estándares, aunque según Cheng (1981), la exactitud que se obtiene con este método no es tan alta como comúnmente se cree, aún para líquidos newtoneanos. Los estándares de viscosidad son una serie de líquidos cuyas viscosidades han sido determinadas con mucha precisión y exactitud a una temperatura dada. Son, por lo general, aceites minerales sin aditivos y polisobutenos aunque cada vez se utilizan más los aceites de silicón.

La precisión de los viscosímetros de cilindros coaxiales depende mucho del fluido que se esté probando, ya que este viscosímetro se emplea en materiales industriales complejos y no es posible indicar niveles de precisión cuando los líquidos de calibración y las muestras de trabajo no tienen propiedades físicas similares (Cheng, 1981).

Debido a los métodos utilizados en la calibración, así como a los fluidos de prueba, las medidas de viscosidad pueden ser relativas o absolutas.

A.- Construcción, montaje y alineación

Todos los viscosímetros de precisión, usados comúnmente, necesitan trabajo de alta calidad en su construcción para lograr la exactitud requerida, así como gran habilidad del técnico que los opera (Snyder, 1969). Buchdahl (1947) indica los siguientes requerimientos mecánicos para la construcción de un viscosímetro de cilindros giratorios: a) simetría perfecta del cilindro rotante sobre su propio eje; b) alineación correcta del cilindro estacionario con respecto al giratorio, el eje de rotación de los dos cilindros debe ser idéntico y las superficies exactamente paralelas; c) estabilidad máxima del cilindro estacionario

acoplado con la mínima fricción estática.

Mallock (1896) señala que si los ejes de los cilindros son paralelos pero con una pequeña desviación de la coaxialidad, hay un error de segundo orden en el momento transmitido por el fluido. Sin embargo, se preocupa de corregir el problema de alineación utilizando cuatro juegos de tornillos para hacer coincidir los ejes. Los demás autores consultados no señalan la magnitud del error, se limitan únicamente a corregirlo utilizando diferentes métodos. Por ejemplo, Porter (1965) monta la unidad completa en una mesa corrediza en X-Y para facilitar la alineación de los cilindros y Mooney (1934) ajusta por medio de tornillos la altura del soporte interior, después de haber colocado un anillo espaciador de vidrio que garantiza la reproducibilidad en la colocación de los cilindros. En el diseño de Zimm (1962) no hay acoplamientos mecánicos ya que el centrado de los cilindros se hace por tensión superficial y el cilindro interior flota en el fluido de prueba.

El momento transmitido a través del fluido, de un cilindro a otro, es directamente proporcional a la superficie cortante del cilindro suspendido dentro del mismo. Por esta razón, en algunos diseños, el cilindro interior está completamente sumergido, de forma que pequeñas variaciones en la inmersión no afecten significativamente las lecturas (Robbins, 1979).

B.- Condiciones de estabilidad

Para reproducir el flujo de Couette en el viscosímetro de cilindros coaxiales es necesario que no existan turbulencias en éste. La aparición de la turbulencia marca el límite superior de la razón de corte que es posible obtener (Zimm, 1962). Por estas razones, es importante señalar las condiciones de estabilidad

encontradas en la literatura para este tipo de flujo.

En los experimentos realizados por Couette el cilindro interior se mantenía fijo mientras que el exterior rotaba. Se observó que el momento de arrastre que el fluido ejercía sobre el cilindro interior, era proporcional a la velocidad de rotación del cilindro exterior, hasta llegar a un valor crítico donde el arrastre aumentaba más rápidamente que la velocidad, esto es, una región donde la relación entre la velocidad de rotación y el arrastre viscoso dejaba de ser lineal. Este cambio fue atribuido al paso del flujo laminar estable a turbulento.

Mallock (1896) extendió sus experimentos para cubrir el hecho de que el cilindro interior rotara mientras el exterior se mantenía en reposo; en los experimentos hechos con este diseño encontró inestabilidad en el flujo aún a velocidades muy bajas. Utilizando un diseño similar al de Couette, Mallock observó que al variar la velocidad existía una zona a velocidades bajas donde el flujo siempre era estable, una zona a velocidades altas donde siempre era inestable y una zona de transición a velocidades intermedias que dependía de la forma en que se variara la velocidad. La zona de estabilidad se obtuvo aumentando primero la velocidad y disminuyéndola después (Mallock, 1896).

En un trabajo posterior Taylor (1923) realiza un estudio sobre la estabilidad del flujo entre cilindros coaxiales y encuentra que el flujo es completamente estable cuando el cilindro exterior gira a mayor velocidad que el interior y en la misma dirección, o bien, cuando el cilindro interior se mantiene en reposo. La velocidad máxima trabajada por Taylor en estos experimentos fue de 300RPM. La contradicción entre los resultados de Mallock y Taylor puede deberse a la mayor rigidez del aparato de Taylor, ya que la inestabilidad puede surgir debido a la flexibilidad de las paredes que rodean a un fluido en movimiento estable (Taylor, 1923), a las vibraciones del aparato que facilitan el progreso de la inestabilidad (Tamaki, 1920) o hacen aparecer

turbulencias en etapas tempranas del movimiento (Champion, 1960). Cuando la velocidad se acerca a la zona donde es posible que ocurra la inestabilidad, una pequeña perturbación del sistema basta para modificar el carácter del movimiento. La inestabilidad producida de esta manera no es necesariamente permanente, por lo que el movimiento puede volverse nuevamente estable (Mallock, 1896). Otro factor que puede explicar la diferencia de resultados, es la dimensión de los cilindros utilizados. En el aparato de Mallock la longitud de los cilindros era poco mayor que su diámetro, en cambio en el utilizado por Taylor para las pruebas de estabilidad, la longitud del mismo era aproximadamente 10 veces el diámetro del cilindro exterior.

En su histórico trabajo, Taylor encuentra una relación que puede predecir la estabilidad del flujo para dos cilindros que rotan en la misma dirección, con una pequeña diferencia de velocidades. En un trabajo actual, DiPrima (1981) presenta cuatro posibles transiciones al pasar del flujo de Couette al turbulento. En ambos casos hay una dependencia en las dimensiones del aparato: cociente de los radios y el cociente de la longitud de la superficie cortante entre la diferencia de los radios. Por lo tanto puede afirmarse que la velocidad a la que ocurre la turbulencia depende de las dimensiones del aparato (Zimm, 1962), que el movimiento es mucho más inestable cuando se rota el cilindro interior que cuando lo hace el exterior y finalmente que la tendencia a la inestabilidad aumenta con la distancia entre los cilindros. En esta misma línea Porter (1965) afirma que no puede producirse un flujo turbulento en películas de prueba de 2.5×10^{-4} cm aún a razones de corte de 2×10^6 seg^{-1} .

Entre los artículos revisados se encontró uno, que en la determinación de la viscosidad no trabaja ni con flujos laminares ni con turbulentos, sino más bien con flujos de estructura celular. La viscosidad se determina a partir de la medida de un

flujo periódico. En este caso $R_2 - R_1$ también es crítica y se recomienda como valor óptimo $1/2$ (Snyder, 1969).

De lo expresado anteriormente se puede concluir que las condiciones de estabilidad dependen de: 1) elección del rotor, 2) dimensiones del aparato, 3) velocidad de rotación y 4) posibilidad de evitar vibraciones que hacen aparecer turbulencias en etapas tempranas.

C.- Corrección del efecto de borde

Otra consideración importante en la medida de la viscosidad, es el efecto de borde ya que éste produce un aumento en la torca debido a la interacción entre las bases de los cilindros. En la parte teórica de este capítulo se mencionó que, en general, es necesario hacer correcciones a los cálculos para considerar el hecho de que los cilindros no son infinitos, o dicho de otra manera, para considerar el efecto de borde. En esa sección se presentaron dos posibles correcciones teóricas, y aquí se presentarán métodos encontrados en la literatura para minimizar experimentalmente el efecto de borde; estos procedimientos pueden agruparse bajo cinco rubros: 1) simulación de cilindros infinitos, 2) dimensiones del aparato, 3) geometría de los cilindros, 4) medir el efecto con métodos experimentales y 5) calibrar con un fluido de viscosidad conocida.

Para conseguir que el líquido de prueba sólo toque los cilindros en las caras laterales, Mallock (1888) utiliza, debajo del cilindro interior, un diafragma con aire de aproximadamente media pulgada de alto. En un intento de mejorar la simulación de cilindros infinitos sustituye, posteriormente, el fondo rígido, con el que empezó, por un ingenioso anillo de mercurio (Mallock, 1896). Desafortunadamente hay poca evidencia que demuestre que Mallock logró eliminar el efecto de borde por éste

método (Taylor, 1923). A pesar de la afirmación de Taylor, los viscosímetros de Mercier (Lindsley, 1947), Goodeve (1939) y los comerciales de Agfa y Haake (Van Wazer, 1963), atrapan aire bajo toda la base cóncava del cilindro interior, con la finalidad de eliminar el efecto de borde. La hipótesis que respalda este procedimiento es que la base del cilindro interior rota contra una capa de aire de muy baja viscosidad, por lo que la tracción sobre ésta puede considerarse despreciable. Con este método se logra eliminar el efecto de borde únicamente para aceites altamente viscosos (Van Wazer, 1963)

Un diseño totalmente distinto, empleado para simular cilindros infinitos, eliminando el efecto de borde, es reducir por métodos mecánicos el movimiento del líquido arriba y abajo del cilindro interior. Esto se logra al utilizar en ambos extremos del cilindro interior, un tercer cilindro de protección del mismo radio y rigidez del interior y colocado en perfecta alineación, a una distancia pequeña del interior (0.025cm en el trabajo de Harrington, 1916). Con esto, lo que se logra de hecho es un cilindro más largo, al que sólo se le mide la torca en la parte central. El primero en utilizar este diseño fue Couette (1890).

Otra alternativa de corrección a este problema la discute Lindsley (1947) y consiste en utilizar un cilindro interior sin base, es decir hueco. Sin embargo, el mismo argumenta que han observado un efecto prácticamente igual al encontrado en los cilindros normales. Yendo un poco más allá, Merrill (1954) diseña un aparato en el que un rotor gira dentro de una copa sin bases. El fluido puede inyectarse constantemente entre los cilindros, o bien mantenerse en ese espacio por tensión superficial.

Las expresiones derivadas en el capítulo II muestran que para hacer despreciable la corrección conviene utilizar un cilindro interior largo y de radio pequeño, con una diferencia mínima entre los radios del rotor y el estator. Esto concuerda con los datos

encontrados en la literatura: en el trabajo publicado por Taylor en 1923 afirma, que si el radio del cilindro interior es mucho menor que la mitad del exterior, los efectos producidos por el borde del aparato empiezan a ser apreciables y difíciles de eliminar, de forma que el movimiento inicial deja de ser igual al de dos cilindros infinitos. Por lo anterior, es conveniente que $(R_2 - R_1)$ sea mucho menor que R_2 o R_1 ; esto es, que el espacio entre los cilindros sea pequeño comparado con los radios. También es posible minimizar apreciablemente el efecto de borde, colocando el cilindro interior a una distancia fija de la base del exterior, donde ya no es apreciable la contribución de la torca. Sin embargo, según Howard (1969) los efectos de borde no pueden eliminarse de una forma práctica a menos que $(R_2 - R_1)/R_2$ sea pequeño. Buchdahl (1947) sugiere que la relación entre la longitud de la superficie cortante y el espacio existente entre los cilindros debe ser aproximadamente 100. DiPrima (1981) afirma que para valores de $h / (R_2 - R_1) \geq 20$ (h es la longitud de la superficie cortante) los efectos de borde son pequeños y que para la mayoría de los casos prácticos, el flujo de Couette es una aproximación adecuada. En algunos estudios, como los relacionados con la estabilidad del flujo, basta que la zona de observación esté suficientemente alejada de los bordes, por lo que se trabaja en la zona central del aparato procurando al mismo tiempo que los cilindros sean tan largos como sea posible (Taylor, 1923).

La configuración de los extremos del cilindro interior tiene un efecto definitivo sobre la medida de la torca. Howard (1969) presenta un modelo en el que los extremos del cilindro (rotor en este caso), terminan en cono con la finalidad de evitar que quede aire atrapado bajo el mismo, ya que esto produce errores impredecibles en la medida de la torca. Mooney (1934) trata de evitar el efecto de borde haciendo que todas las superficies de los cilindros contribuyan homogéneamente en la torca total, para lograr esto, mantiene constante el espacio entre las bases de los

cilindros y la zona lateral haciendo que tanto el cilindro interior como el exterior, terminen en cono, con ángulos ligeramente distintos. Se suelen utilizar conos de muy poca altura, con un ángulo en el vértice de aproximadamente 180° . Con esta configuración, la razón de corte ejercida sobre el líquido que se encuentra en el fondo es esencialmente la misma que la lateral. Traxler (1942) y Buchdahl (1947) también se deciden por esta configuración, terminando en cono la parte superior e inferior del cilindro interior. Aún mas, para minimizar la importancia del efecto de borde, Buchdahl combina los otros factores haciendo que la longitud de la superficie cortante sea grande comparada con la diferencia de los radios.

Aunque se haya tratado de minimizar el efecto de borde, la corrección debida a él aún puede ser de importancia, por lo que conviene medir el efecto experimentalmente para poder incluir la corrección en los cálculos de viscosidad. Esto se hace variando la altura del líquido sobre la superficie cortante y calculando, de esta forma, la altura efectiva que incluye ya el efecto de borde. Puede realizarse utilizando varios cilindros interiores del mismo radio pero diferente altura. Para cada cilindro se utiliza la misma velocidad angular y se mide la torca. Se grafican las alturas contra los cocientes torca/velocidad angular, obteniéndose una recta. La intersección en el eje X de la recta torca vs. velocidad angular, para torca igual a cero da un valor negativo de h que corresponde al aumento aparente de la altura debido al efecto de borde. Esto mismo puede hacerse con un solo cilindro interior llenando el viscosímetro a diferentes alturas, lo que implica un cambio en el volumen de prueba o bien utilizando un volumen constante y sumergiendo el cilindro a diferentes profundidades. El resultado de las tres formas es prácticamente el mismo, si para el último caso se utiliza una separación entre las bases de los cilindros mayor que su zona de interacción; esto ocurre cuando la distancia es mayor o igual al radio del cilindro

interior (Lindley, 1947; Van Wazer, 1963).

Finalmente, la constante de calibración del viscosímetro puede incorporar el efecto de borde para fluidos newtoneanos, si el aparato se calibra con líquidos de viscosidad conocida. Este método es el más empleado debido a que es preciso y muy fácil de implementar, pero tiene el inconveniente de que la constante varía con la viscosidad y densidad del fluido empleado, por lo que se recomienda utilizar varios líquidos con características similares a los fluidos de prueba (Cheng, 1981).

D.- Variación del esfuerzo cortante y razón de corte.

Una de las razones por las que el viscosímetro de cilindros coaxiales tiene gran aceptación, es que el esfuerzo cortante y la razón de corte pueden variarse con cierta facilidad, modificando los radios de los cilindros o sus velocidades (2.8 y 2.9).

El esfuerzo cortante (ec. 2.9) está relacionado con el radio y longitud del cilindro interior y un cambio en sus dimensiones implica una variación en el área sobre la que actúa la torca (Howard, 1969). Sin embargo, debe señalarse que la fuerza cortante medida, es realmente la fuerza que actúa en la superficie del cilindro estacionario. Por lo general el cilindro exterior no se modifica mientras que el interior puede intercambiarse por otros con distintos radios o longitudes. Como la fuerza cortante es casi constante a través del anillo de fluido cuando $R_1/R_2 \cong 1$ está justificado referirse a una razón de corte promedio y obtener las diferentes razones de corte variando la velocidad de rotación.

Para los fluidos no-newtoneanos la viscosidad no permanece constante al variar la razón de corte. Al cociente de un esfuerzo cortante entre una razón de corte, a una temperatura determinada, se le conoce como viscosidad aparente. Por lo anterior se ve la

importancia que tiene, este tipo de viscosímetro en el estudio de los fluidos no-newtonianos.

E.- Velocidad de rotación

Como se vio en los incisos anteriores, al variar la velocidad de rotación se modifica fácilmente la razón de corte, por esto casi todos los modelos permiten esta variación. Los métodos utilizados para girar el rotor son muy distintos, sin embargo todos los autores buscan un buen control de velocidades, esto es, estabilidad en el giro.

Las velocidades angulares encontradas en la literatura son muy amplias y dependen del esfuerzo cortante o razón de corte que se desee producir, de las dimensiones del aparato (especialmente la diferencia de los radios de los cilindros) y del material de prueba.

Al disminuir r aumenta el gradiente de velocidad crítica; sin embargo, el rotor debe girar a velocidades proporcionalmente más altas para producir gradientes de velocidad similares a cuando se tienen radios mayores. Si la velocidad del rotor se aproxima a 700RPM las dificultades de alineación y estabilidad se hacen insuperables (Champion, 1960). La comparación entre los resultados de dos aparatos puede hacerse cuando estos son similares en geometría y velocidad. La similitud en velocidad se obtiene si al dividir la velocidad entre el coeficiente de viscosidad cinemática el cociente es igual en ambos casos (Taylor, 1923).

Para asegurar la estabilidad de rotación es conveniente que el grosor de la pared del cilindro exterior sea grande para que tenga suficiente masa ($\approx 1/2$ " en el trabajo de Buchdahl, 1947).

F.- Control térmico

En el capítulo primero se insistió varias veces en la importancia de tener un buen control térmico, con una precisión de al menos ± 0.01 °C para que los resultados de viscosidad sean significativos. El coeficiente de viscosidad puede variar hasta 20% por grado centígrado. Si la temperatura esta controlada a ± 0.02 °C, el coeficiente de viscosidad es preciso sólo a $\pm 0.4\%$. Todos los autores se preocupan de este asunto y lo resuelven de diferentes formas, desde el mero hecho de medir la temperatura a la que se está realizando el experimento (Taylor, 1923), hasta utilizar diferentes métodos de control como: 1) camisa de agua en el cilindro exterior (Mooney, 1934); 2) camisa de agua y muestra pequeña para lograr un buen control térmico (Robbin, 1979); 3) camisa de agua en el cilindro exterior y cilindro interior hueco, lleno también de agua a igual temperatura, para evitar cualquier cambio brusco de la misma en el fluido (Mallock, 1888); 5) camisa de aceite que puede calentarse por medio de una resistencia incluida dentro de ella (MacMichael, 1915); 6) cuarto de temperatura constante, donde las variaciones registradas no sean nunca superiores a una centésima de grado (Harrington, 1916).

G.- Medición de la torca

Para medir la torca, el estator se suspende, por lo general, de un hilo de torsión o una suspensión elástica. La deflexión se mide por el método usual de espejo, telescopio y escala, o bien, acoplado directamente al elemento de torsión un indicador que barre una escala.

Mallock (1888) encontró que las fuerzas que tienden a girar el cilindro interior, pueden representarse por la suma de dos términos, uno varía linealmente con la velocidad y el otro con el

cuadrado de la velocidad. El último es pequeño comparado con el primero, aún a velocidades altas. La proporción entre los dos términos depende del cociente de la longitud de los cilindros, entre el ancho del anillo; el término cuadrático disminuye (comparado con el otro término) al aumentar el cociente.

CAPITULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN VISCOSIMETRO DE CILINDROS COAXIALES

3.1 Descripción general

El aparato que se presenta a continuación (Fig. 3.1) se diseñó teniendo en cuenta las condiciones y restricciones teóricas presentadas en el capítulo II.

De las dos alternativas de rotor (cilindro interior o exterior), que presenta el viscosímetro de cilindros coaxiales, se ha elegido rotar al cilindro exterior, ya que en este caso la turbulencia ocurre a razones cortantes más altas. En este diseño, el rotor y el estator son de radios similares porque cuando el cociente de los radios se aproxima a la unidad, los esfuerzos cortantes en el espacio entre los cilindros permanecen prácticamente constantes.

En el capítulo II se dijo que para medir la viscosidad no se determinaban, en general, ni la razón de corte ni el esfuerzo cortante, sino que se utilizaban otras variables que pudieran medirse más fácilmente. En la ecuación (2.11) se ve que es posible expresar la viscosidad, como una función de la torca y las velocidades angulares, por lo que cualquier modificación en el

aparato que altere estas magnitudes, implicará un cambio en el intervalo de funcionamiento del viscosímetro. partir de las ecuaciones (2.9 y 2.10) del capítulo anterior, conocemos que el esfuerzo cortante está relacionado con el área del estator sobre la que se aplica la torca para rotarlo. Por esta razón, conviene que el cilindro interior sea intercambiable, ya que da la capacidad de alterar fácilmente el esfuerzo cortante. De la misma manera es posible observar que la razón de corte promedio se modifica al variar la velocidad angular, por lo que en este diseño la velocidad angular puede cambiarse de forma continua entre 9 y 90 RPM.

La otra magnitud importante a determinar es la torca transmitida por el fluido al estator. En general la medición de la torca se hace utilizando un hilo o muelle de torsión, sin embargo, los cables de torsión no se prestan para trabajar sobre un amplio intervalo de razones de corte (Eisenberg, 1954). Para ampliar el intervalo de torcas accesibles es necesario utilizar varios cables (Goodeve, 1939). El cambiar el hilo de torsión, ajustar y calibrar el aparato, son operaciones tardadas y tediosas. Los cables de torsión que se utilizan con más frecuencia en la literatura, están hechos de cuarzo, platino y tungsteno, y su costo es alto. Por estas razones se decidió emplear en este prototipo, diferencias de masa, como medida de la torca; utilizando para ello un juego de poleas y una balanza digital.

Tomando en cuenta las dimensiones del aparato, la precisión con que ha sido posible determinar las diferentes magnitudes, las velocidades angulares que se pueden obtener con el motor utilizado y las torcas medibles por diferencia de masa, se calcula que el intervalo de funcionamiento teórico de este viscosímetro es de 1000 a 30,000 cps (Fig. 3.2). El volumen de muestra que se debe utilizar es de 22 ml. Como se dijo en los párrafos anteriores, este intervalo puede modificarse si se cambia el estator por otro

de dimensiones distintas. El cambio afectaría también el volúmen de muestra utilizada.

3.2 Cilindros coaxiales

El rotor está hecho de un tubo de cobre de 28.58 ± 0.025 mm ($1 \frac{1}{8} \pm 1/256$ ") de diámetro exterior, 11.91 ± 0.025 mm ($15/32 \pm 1/256$ ") de radio interior y 140 ± 0.025 mm ($5 \frac{1}{2} \pm 1/256$ ") de alto. La pared de este tubo es gruesa (2.38 ± 0.025 mm, $3/64 \pm 1/256$ "), con el objeto de aumentar la estabilidad térmica de la muestra y evitar deformaciones que perjudicarían la uniformidad del flujo entre los dos cilindros. En la base inferior tiene una pestaña que conecta con el vástago del motor. En el centro de la base interior tiene una pequeña entrante que sirve para anclar y centrar el eje del estator.

El estator es un cilindro de aluminio terminado en cono como en ambos extremos. Esta geometría tiene como objeto suavizar el cambio en las líneas de corriente, al pasar de las paredes laterales del cilindro hacia las bases. También ayuda a evitar la retención de burbujas en la parte inferior del estator, ya que éstas alteran la medida de la viscosidad. El ángulo en el vértice del cono es de aproximadamente 50° .

Con el fin de disminuir al máximo las pérdidas por fricción, se ha colocado una varilla rectificadora de 3.175 ± 0.025 mm ($1/8 \pm 1/256$ ") que termina en ambas puntas con un balín y que pasa por el eje del estator. Este eje tiene la finalidad de facilitar el armado del viscosímetro, asegurar la coaxialidad de los dos cilindros, evitar la nutación y mantener al estator a una distancia constante de 12.5 ± 0.025 mm ($16/32 \pm 1/256$ ") de la base del rotor, minimizando así el efecto de borde debido a la interacción entre las bases.

El cilindro interior tiene las siguientes dimensiones: 11.2 ± 0.025 mm ($7/16 \pm 1/256$ ") de radio, 50 ± 0.025 mm ($1 \frac{31}{32} \pm 1/256$ ") de largo en la sección recta, más 12.25 ± 0.025 mm ($31/64 \pm 1/256$ ") de altura en la sección cónica de cada lado, lo que hace una altura total de 74.5 ± 0.025 mm ($2 \frac{15}{16} \pm 1/256$ "). El volumen total del estator, sin los apoyos, es de 23 cm^3 .

3.3 Efectos de borde

Otra consideración importante en el diseño del viscosímetro de cilindros coaxiales son los efectos de borde, ya que como se vio en el capítulo II los cilindros no son infinitos y por lo tanto existe un arrastre debido a las bases del cilindro interior. Es evidente que por lo menos el efecto de borde debido al extremo superior del cilindro interior puede eliminarse fácilmente, haciendo que el fluido de prueba no lo cubra. Sin embargo, esto hace crítico el volumen de muestra utilizado, por su fuerte dependencia en h .

En el presente diseño se cubren gran parte de las consideraciones mencionadas en el capítulo II sobre los efectos de borde: i) el estator termina en cono en ambos extremos; ii) se encuentra apoyado en 2 puntos a manera de áncora, por medio de un eje, para que exista la menor fricción posible, se garantice una coaxialidad entre los cilindros y una distancia constante entre la base del rotor y el extremo inferior del estator; iii) la diferencia de los radios ($R_2 - R_1$) es pequeña comparada con: el radio del cilindro exterior, la longitud de la superficie cortante y la distancia entre la base del rotor y el vértice inferior del estator (Tabla 3.1); iv) para evitar que pequeñas variaciones en la profundidad de inmersión afecten significativamente las medidas, el cilindro interior se sumergió totalmente en el fluido, quedando todo el estator como superficie de corte, por lo que es

posible considerar como constante esta variable, v) el instrumento se calibró con estándares de viscosidad, para incluir dentro de la constante del aparato los efectos debidos a los bordes de los cilindros.

TABLA 3.1
VALORES DEL VISCOSIMETRO DE CILINDROS COAXIALES COMPARADOS CON LA
DIFERENCIA DE LOS RADIOS.

CONSTANTE (X)	SIMBOLO Y MAGNITUD	VALOR COMPARATIVO $\frac{R_2 - R_1}{X}$
DIFERENCIA DE RADIOS	$R_2 - R_1 = 0.71 \text{ mm}$	1
RADIO DEL CILINDRO INTERIOR	$R_1 = 11.20 \text{ mm}$	0.067
RADIO DEL CILINDRO EXTERIOR	$R_2 = 11.91 \text{ mm}$	0.050
LONGITUD DE LA SUPERFICE CORTANTE (ESTATOR)	$h = 50 \text{ mm}$	0.014*
DISTANCIA ENTRE LA BASE DE ROTOR Y EL VERTICE DEL ESTATOR	$b = 12.5 \text{ mm}$	0.057

* DiPrima (1981) utiliza el inverso de esta magnitud para asignar un valor a partir del cual los efectos de borde son despreciables: $h/(R_2 - R_1) \geq 20$, en este caso $1/0.014 = 70.4$.

La tabla 3.2 presenta el intervalo dentro del que es posible variar el radio del estator de forma que se cumplan las condiciones propuestas por DiPrima y Champion. El valor utilizado en este diseño se localiza en la zona central de las posibilidades.

TABLA 3.2

VALORES POSIBLES DEL ESTATOR PARA $R_2 = 11.91\text{mm}$ y $h = 50\text{mm}$.

R_1	$R_2 - R_1$	$h / (R_2 - R_1)$
9.41mm	2.5mm	20 ⁽²⁾
11.2 mm ⁽¹⁾	0.71mm	70.42
11.78mm	0.13mm ⁽³⁾	384.61

(1) valor utilizado en este trabajo, (2) Diprima, 1981, (3) Champion, 1980

3.4 Razón de corte

Al fijar las dimensiones de los cilindros, el rotor y la posición donde se mide o calcula la razón de corte, queda ésta determinada por medio de la siguiente relación, obtenida a partir de la ecuación (2.8b):

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \omega_2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}$$

Esta relación nos indica que una simple variación de la velocidad angular, modifica la razón de corte a la que opera el viscosímetro, lo que lo hace un aparato ideal para analizar fluidos no newtoneanos.

La razón de corte mínima que se está utilizando en este trabajo es de 16.29seg^{-1} para 9 RPM, y la máxima de 162.9seg^{-1} para 90 RPM.

3.5 Control térmico

El funcionamiento correcto de cualquier viscosímetro depende de que la temperatura en la muestra sea constante, ya que el coeficiente de viscosidad de todos los fluidos depende en mayor o menor grado de ésta. Es de esperar que la temperatura del fluido de prueba aumente al someterlo a esfuerzos y razones cortantes para medir su viscosidad, lo que alteraría la validez de esta medida. El aumento en la temperatura depende de la temperatura en la frontera del sistema, la geometría y velocidad del mismo, así como de las propiedades del fluido y del tiempo que dure el muestreo. Cuando la distancia entre las superficies cortantes es grande, se presenta mayor dificultad para remover el calor generado en la muestra que cuando la distancia es pequeña, por lo que se produce un mayor aumento en la temperatura.

Con el fin de mantener al mínimo este posible aumento en la temperatura, se diseñó el viscosímetro de manera que tenga un buen intercambio de calor de la muestra hacia el baño térmico. Esto se hizo de la siguiente manera: a) el tamaño de la muestra es pequeña (22 ml), b) el cilindro exterior está hecho de cobre (alto coeficiente de conductividad térmica, $4.01 \text{ W cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$ a $25 \text{ } ^\circ\text{C}$) y tiene paredes gruesas, c) el rotor se encuentra sumergido en una camisa térmica conectada a su vez con un baño térmico recirculante. El revestimiento térmico que rodea al rotor es un cilindro hueco, hecho de latón y sellado en ambas bases; tiene un volumen de un litro, por él se hace circular continuamente, agua proveniente de un baño con control térmico a $\pm 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$. El agua se inyecta en la parte inferior de la funda térmica a través de una llave y sale de ésta por un desagüe en la parte superior. Para evitar fugas del baño térmico hacia el motor, se utilizó una válvula selladora de tipo industrial.

Se hizo una estimación del posible aumento de temperatura en

la muestra con las condiciones actuales del prototipo, utilizando el procedimiento presentado por Van Wazer (1963) para viscosímetros de cilindros coaxiales, con una diferencia de radios pequeña. Para ello se utilizó la relación:

$$\Delta T = \frac{\eta v_{R_2}^2}{12 JK}$$

donde v_{R_2} es la velocidad lineal del rotor, J es el equivalente mecánico del calor y K es la conductividad térmica del fluido.

Como no se cuenta con el dato de la conductividad térmica para el fluido de calibración, se utilizaron en el cálculo los datos de mínima y máxima conductividad térmica, para aceites, encontrados en la literatura. El cálculo se realizó con los siguientes datos:

	mínima	máxima
conductividad térmica de aceites [cal seg ⁻¹ cm ⁻¹ °K ⁻¹]	3.159 × 10 ⁻⁴	4.242 × 10 ⁻⁴
velocidad lineal [cm seg ⁻¹] (10 a 60 RPM)	1	7.5
viscosidad [poises]	9.5	304

Se obtuvo:

$$\Delta T_{\text{mínima}} = 4.458 \times 10^{-9} \text{ °K}$$

$$\Delta T_{\text{máxima}} = 1.078 \times 10^{-1} \text{ °K}$$

Utilizando la relación y los cálculos anteriores, se puede ver que el aumento en la temperatura es despreciable para fluidos como

agua o anticongelantes aun a velocidades grandes. Fluidos tales como aceites para motor, melazas, aceites de calibración, etc., tendrán un aumento apreciable de temperatura sólo a velocidades altas; si el fluido tiene una viscosidad de 50000 cps o mayor se puede esperar un aumento considerable en la temperatura aun a velocidades bajas.

3.6 Control de velocidad

Para un funcionamiento correcto del viscosímetro, se requiere que el rotor gire constantemente a la velocidad escogida dentro de un cierto intervalo. Por ello se eligió, después de probar varios motores, uno de 12 V de corriente directa y torca alta, como los utilizados en los limpiadores de coche. Este motor funciona de forma lineal de 3 a 15 V como puede verse en la gráfica (Fig. 3.3). Dependiendo de la forma en que se conecte, funciona en tres intervalos distintos de velocidad. En este trabajo se emplea la conexión que permite tener velocidades más bajas (9 a 60 RPM), o bien la que entrega hasta 90 RPM, con lo que se tiene la posibilidad de variar la velocidad un orden de magnitud. Esto permite trabajar fluidos con viscosidades máximas de 30,000 cps.

No se incluyó un control de velocidad para el motor, por no considerarlo necesario, ya que este gira a velocidad constante para un voltaje determinado. Para conocer la velocidad de giro del motor se acopló un disco con 60 divisiones que proporciona, por medio de un "optoswitch" y un contador de frecuencias, las revoluciones por minuto a las que el motor gira, con una incertidumbre de ± 1 RPM.

Con la finalidad de evitar el frenado por falta de coaxialidad, entre el eje del motor y la chumacera que conecta a

éste con el rotor, se utilizó un acoplador ajustable tipo americano (Fig. 3.4).

3.7 Medición de la torca

La torca y la velocidad angular son las variables experimentales con las que se obtiene el valor de la viscosidad del fluido de prueba, por esta razón es importante conocerlas con precisión.

La medida de la torca se obtuvo por diferencias de masa, colocando una polea de 1.905 ± 0.0025 cm. en el eje superior del estator. Por medio de un hilo de seda trenzado, se unió la polea a una pesa colocada sobre una balanza digital. Este método es rápido y cómodo, además permite detectar fácilmente un cambio de torca. El diámetro de la polea y la aceleración de la gravedad pasan a formar parte de la constante de calibración del aparato. Este sistema permite medir un intervalo amplio de torcas, teniendo como límite la capacidad de la balanza.

Se utilizó hilo de seda trenzado porque no se estira al someterlo a tensión y por lo tanto da mejores resultados que otros materiales.

3.8 Constante del aparato

De acuerdo con los desarrollos del capítulo II, la expresión más simple para medir la viscosidad en términos de la torca y la velocidad angular en el viscosímetro de cilindros coaxiales es:

$$T = K \eta \omega_2$$

donde $K\eta$ corresponde a la pendiente de la recta. En primera

aproximación la cantidad K está dada por:

$$K = \frac{8\pi^2 R_1^2 R_2^2 h}{60 (R_2^2 - R_1^2)}$$

Si la velocidad angular se mide en RPM y se utilizan los valores de la tabla 3.3 para obtener esta constante, se tiene:

$$K = 62.54$$

TABLA 3.3

DIMENSIONES DEL APARATO

CONSTANTE	SÍMBOLO Y MAGNITUD
Radio del cilindro interior	$R_1 = 11.2 \text{ mm.}$
Radio del cilindro exterior	$R_2 = 11.91 \text{ mm.}$
Generatriz del cono	$R_c = 16.35 \text{ mm.}$
Longitud de la superficie cortante	$h = 50 \text{ mm.}$
Altura de los conos	$h_c = 12 \text{ mm.}$
Separación entre las bases del rotor y el estator	$b = 11.65 \text{ mm.}$
Angulo del cono	$\theta = 47.21^\circ$
Volúmen del estator	23 cm^3
Volúmen de la muestra	22 cm^3

Si dentro de la constante se incluyen la aceleración de la gravedad y el radio de la polea, a primera aproximación, tenemos:

$$\text{masa} = K' \eta \nu_2$$

donde

$$K' = \frac{8\pi^2 R_1^2 R_2^2 h}{60 g r_p (R_2^2 - R_1^2)}$$

$$K' = 0.03544$$

o bien

$$K'' = 28.214$$

3.9 Diseño experimental para las pruebas iniciales de calibración

A.- Montaje

Para realizar las pruebas de calibración del presente viscosímetro, se utilizó el montaje esquematizado en la figura 3.5.

El viscosímetro se llena con 22 ml de muestra. Si el fluido es muy viscoso es necesario hacerlo por partes, a fin de que no queden atrapadas burbujas de aire que alteran los resultados. Se ponen aproximadamente 8 ml de muestra, luego se acomoda el estator de forma que quede apoyado en el hueco que hay en el centro de la base del rotor, se añade después el fluido restante y se pone a rotar para que salgan todas las burbujas, al mismo tiempo que la muestra va adquiriendo la temperatura a la que se desea realizar la prueba. La temperatura se estabiliza en aproximadamente una hora, para 25 °C, con la ayuda de un baño térmico recirculante de 25 litros de capacidad.

El motor que hace girar al rotor está conectado a una fuente de corriente directa de 15 volts, 10 amperes. La velocidad del motor se mide por medio de un frecuencímetro conectado al optoswitch.

Sobre el eje del estator se coloca una polea a la que se sujeta el hilo de seda que tiene en su otro extremo una pesa; esta descansa sobre una balanza digital. Se utilizaron dos balanzas con capacidad de 300g y 1500g respectivamente, y con una precisión de 0.05g. Una segunda polea, con un mínimo de rozamiento, hace

posible el cambio de dirección de la fuerza.

B.- Desarrollo

El prototipo descrito se calibró utilizando estándares de viscosidad de Brookfield. En los aceites de calibración el fabricante proporciona únicamente la viscosidad de la muestra a 25 °C, no da la incertidumbre de ésta ni de la temperatura. No da la densidad, ni ningún otro dato que describa el aceite de calibración.

Los aceites empleados se encuentran dentro del intervalo de funcionamiento calculado para el aparato (Fig. 3.2). Cada muestra se midió varias veces a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.05$, aprovechando todo el intervalo de velocidades. Para cada velocidad angular se tomó la diferencia de masa (\approx torca) correspondiente.

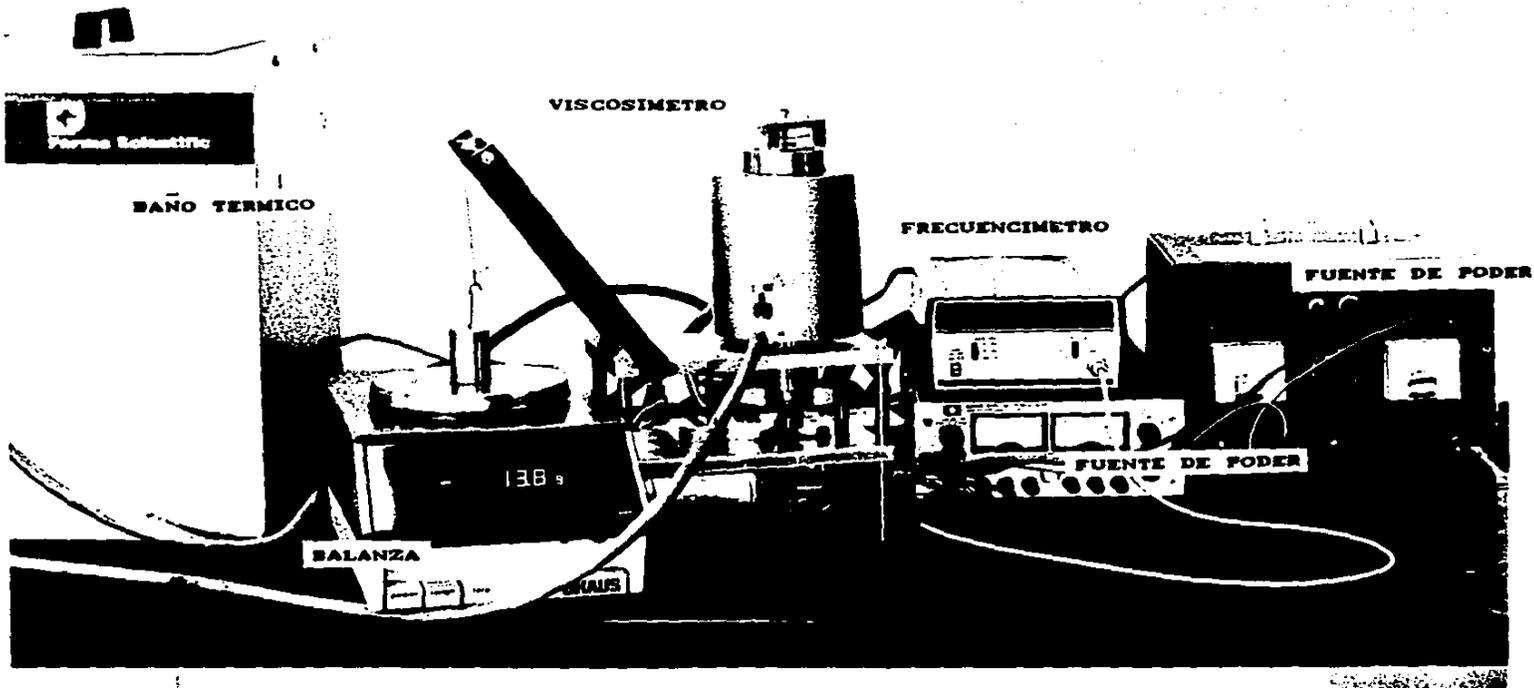


Fig 3.1 Fotografía del prototipo del viscosímetro de cilindros coaxiales construido para este trabajo. Se muestra el montaje necesario para realizar las medidas de viscosidad.

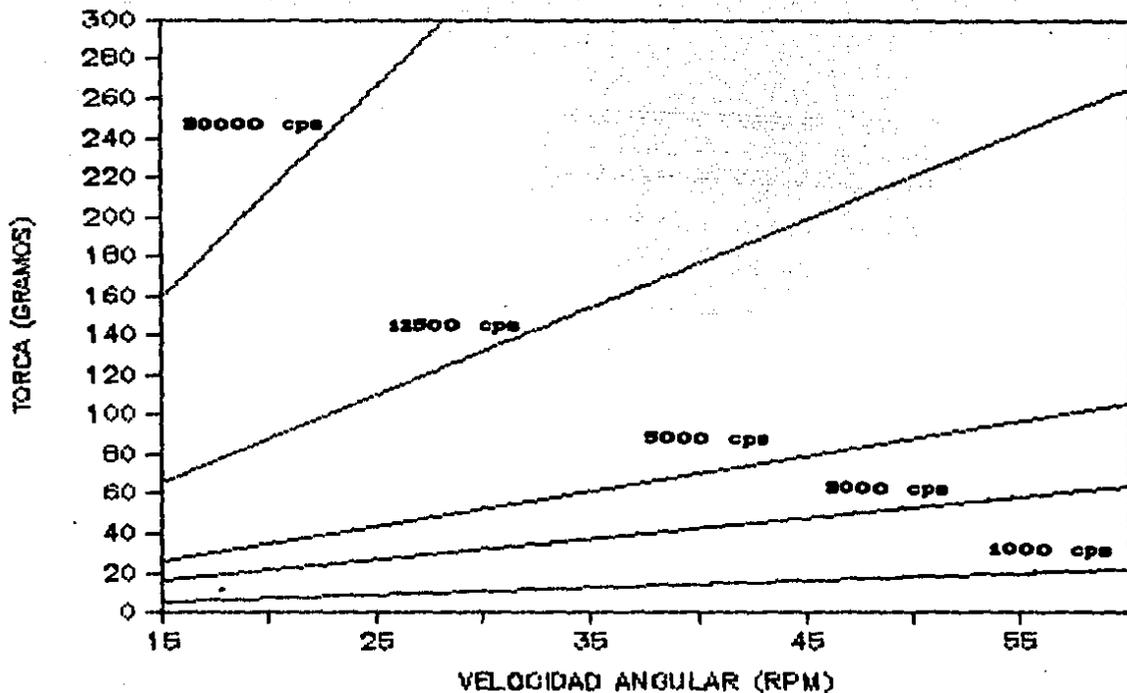


Fig. 3.2 Muestra el intervalo teórico de funcionamiento del viscosímetro. Las rectas graficadas corresponden a los valores de los estándares de viscosidad.

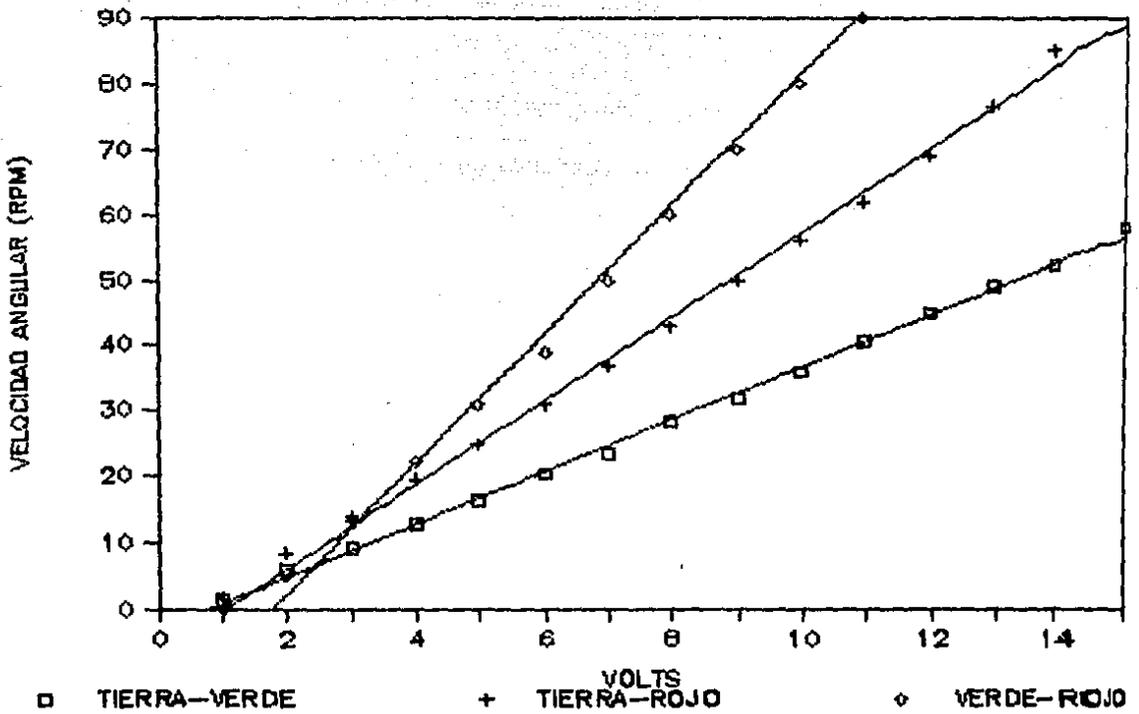


Fig. 3.3 Respuesta del motor utilizado en el prototipo, observe que el motor responde linealmente ante variación de voltaje en las tres conexiones.

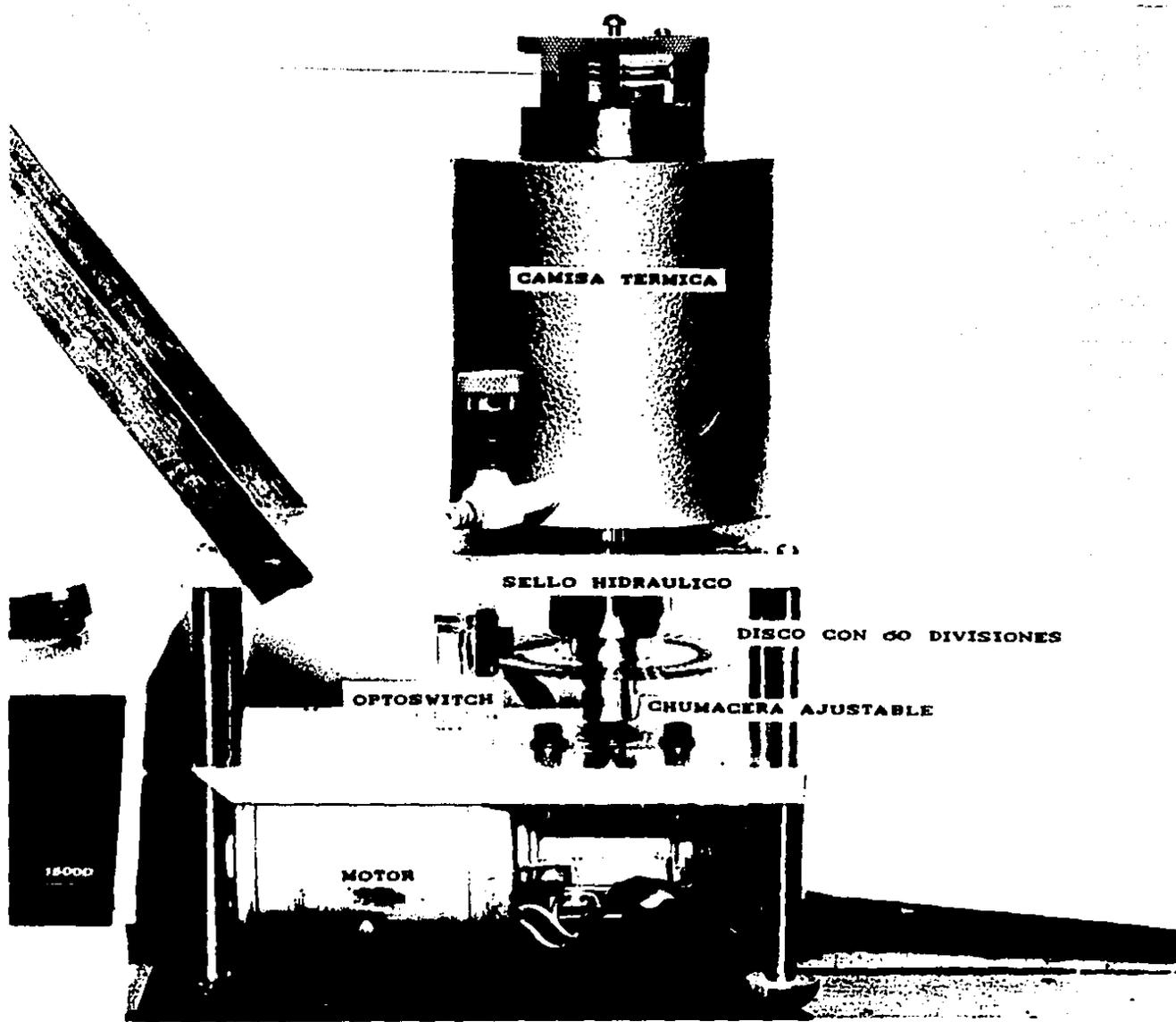


Fig 3.4 Detalle del aparato

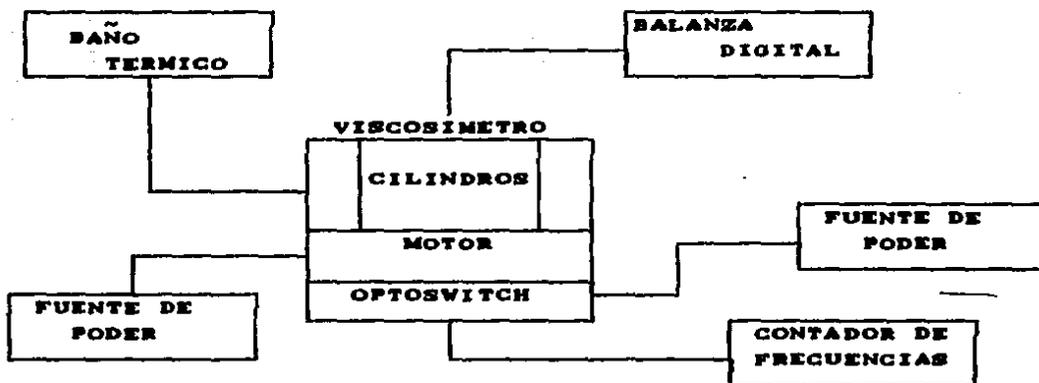


Fig. 3.5 Diagrama de bloques que muestra el viscosímetro y equipo de apoyo para las pruebas de calibración.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y EVALUACION

4.1 Pruebas de calibración

Una vez construido el aparato, se realizaron las pruebas de calibración descritas en el capítulo anterior y se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación.

Se trabajó con los estándares de 4,820 y 13,000 cps a 25 °C, utilizando velocidades de 5 a 75 RPM. La figura 4.1 muestra los resultados experimentales obtenidos. Se graficaron directamente las variables experimentales por lo que en el eje X se tienen RPM y en el Y, gramos en vez de dinas-centímetro. Al graficar se observó que los datos correspondientes a menos de 20 RPM y más de 55 RPM se alejaban de la linealidad del intervalo central, debido probablemente a que en estas velocidades se está forzando el motor, por lo que las oscilaciones de la velocidad son más frecuentes. La mayor reproducibilidad se observó en 30 y 35 RPM. Para los cálculos se utilizó el intervalo de 20 a 45 RPM.

A pesar de desconocer el comportamiento de los aceites de calibración con la temperatura, se varió ésta de 10 a 50 °C, con la finalidad de calcular, a partir del ajuste por mínimos cuadrados de estos datos, el correspondiente a 25 °C. Las figuras 4.2 y 4.3 presentan la conducta de los aceites de 4820 y 13000 cps

a 3 temperaturas distintas. Se graficaron los resultados a 40 °C en vez de 50 °C para tener variaciones de temperatura simétricas respecto a 25 °C.

Con las pendientes del ajuste de los datos experimentales correspondientes a cada temperatura, se construyó la figura 4.4, que muestra el comportamiento de la pendiente (\cong viscosidad), con esta variable. Como era de esperarse, cada aceite reacciona de forma diferente ante variaciones de temperatura, pero como en todo fluido, al disminuirla hay un aumento en la viscosidad. En el caso de estos patrones de calibración, la variación de la viscosidad con la temperatura es lineal. La pendiente obtenida con este método, para 25 °C difiere en 0.03% para el patrón de 4820 y en 0.38% para el de 13000, del promedio obtenido directamente.

A partir del análisis de las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se puede ver que para una variación de temperatura de 10 °C la pendiente de ajuste (\cong a la viscosidad) varía 17% para el aceite de 4820 y 20.3% para el de 13000. Esta variación es pequeña comparada con la que experimentan otros fluidos, ya que como se recordará, en el capítulo I inciso 1.7, se mencionó que es común encontrar, en algunos aceites, cambios hasta de un 10% en la viscosidad por grado centígrado.

4.2 Constante de calibración

La viscosidad se obtiene dividiendo la pendiente de la recta entre una constante de calibración. Se utilizó la constante teórica calculada en el capítulo III, el resultado se comparó con el valor del estándar proporcionado por el fabricante. La diferencia entre los 2 valores es de 10.6% para el patrón de 4820 y de 19.75% para 13000 cps, debido a que la constante teórica no toma en cuenta los efectos de borde, ni las pérdidas por fricción.

Quando se calibra un viscosímetro con estándares, la constante de calibración varía con la viscosidad y con la densidad. La viscosidad que se obtiene es relativa, aunque esté dada en cps (Cheng, 1981).

Cálculo de la constante experimental

Para calcular esta constante se utilizó

$$T = m \nu_2 \quad (4.1)$$

donde m es la pendiente de la relación lineal, T la torca y ν_2 la velocidad angular en RPM. Por otro lado, debido a la forma como se están midiendo las torcas, se tiene:

$$T = mgr \quad (4.2)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, r es el radio de la polea colocada sobre el estator y m corresponde a la masa, la variable medida experimentalmente. En el capítulo 2 (ec. 2.10) se dijo que:

$$T = K\eta\nu_2 \quad (4.3)$$

donde K es una constante. Como se está graficando RPM vs. gramos, la constante absorbe los factores $2\pi/60$ de la velocidad angular y el valor del radio por la aceleración de la gravedad, correspondiente a la torca. Por lo tanto, utilizando las ecuaciones 4.1 y 4.3

$$K = \frac{\text{pendiente}}{\text{viscosidad}}$$

Para la muestra de 4820 cps, la pendiente promedio para 25 °C es 1.5922 (Fig 4.1 y 4.4), en el intervalo de velocidades de 20 a 45 RPM. La constante obtenida en este caso es:

$$K = 0.03303$$

por ser más fácil de manejar, se calculó y utilizó para las comparaciones la inversa de la constante

$$K^{-1} = 30.27$$

Usando este valor, se tiene que el patrón de 4820cps a 25 °C varía de 6460 a 2800cps para temperaturas de 10 a 50 °C.

El valor de la constante se comparó con el obtenido a partir del ajuste de pendientes en los experimentos a diferentes temperaturas. La pendiente calculada para 25 °C es 1.5962, por lo tanto, $K^{-1} = 30.20$. La diferencia entre las constantes de calibración obtenidas por los dos métodos anteriores es de 0.23%.

Se hizo lo mismo para el aceite de 13000 cps y se obtuvo: $K^{-1} = 31.63$ de los promedios de la muestra a 25 °C y 31.51 a partir del ajuste de pendientes para diferentes temperaturas. La diferencia de las constantes, para la muestra de 13000 cps es de 0.38%. El intervalo de viscosidad es de 16950 a 9610cps para temperaturas de 10 a 40 °C.

El promedio de las constantes anteriores es $K^{-1} = 30.90$, y el error máximo respecto a las constantes experimentales es de 4.3%. Sin embargo, como se dijo anteriormente, la constante de calibración depende de la viscosidad de la muestra, por lo que el promedio sólo sirve para indicar el valor aproximado de la misma. Un cálculo más preciso debe hacerse con la constante correspondiente a cada intervalo.

4.3 Evaluación

A.- Pruebas de reproducibilidad

Con el fin de evidenciar la repetición de los datos, éstos se tomaron aumentando la velocidad angular, disminuyéndola y tomando

las medidas en forma desordenada, sobre diferentes muestras de la misma viscosidad. Los resultados obtenidos presentan una buena reproducibilidad, como se puede ver en la figura 4.5 donde se utilizan símbolos diferentes para cada corrida. No se sobrepusieron los ajustes correspondientes porque interferían con los datos experimentales oscureciendo la información. La diferencia máxima entre las pendientes de estos experimentos y el promedio, es de 2%.

La figura 4.6 presenta la variación de las constantes obtenidas, en diferentes pruebas, para los dos aceites de calibración, respecto a la constante promedio. Esta gráfica sirve para visualizar la reproducibilidad de los resultados en esta prueba inicial de calibración, ya que el error máximo obtenido es de 4.3%, a pesar de estar comparando muestras con dos constantes experimentales distintas. Obsérvese que los datos correspondientes a 13000 cps están preferentemente en la parte positiva de la gráfica y los de 4820 en la negativa.

B.- Precisión

No se encontró la máxima precisión que puede obtenerse en este viscosímetro, ya que suele ser utilizado para fluidos complejos. La calibración con estándares puede dar una alta confiabilidad sólo si los fluidos de prueba y de calibración son newtoneanos y tienen una densidad similar. (Cheng, 1981). Las pruebas realizadas con el patrón de 4820 cps muestran un error máximo de 2.5%.

C.- Intervalo de funcionamiento

Los resultados anteriores muestran que el viscosímetro que se describe en este trabajo funciona entre los 2800 y 16950 cps, falta probarlo para viscosidades menores y mayores. En el capítulo III se mencionó que el intervalo de funcionamiento calculado para

el aparato era de 1000 a 30000 cps; con las torcas medidas, en las pruebas realizadas, se puede afirmar que es posible trabajar hasta 30900 cps utilizando una diferencia de masa de 450 g y velocidades de 20 a 45 RPM. La figura 4.7 presenta las rectas teóricas que se obtendrían trabajando, con este prototipo a 500, 1000, 3000, 5000, 12500 y 30000 cps. Trabajando únicamente con 20 RPM se podría llegar hasta 69500 cps, con la diferencia de masa anterior. Para este cálculo se usó la relación de la torca (ec. 4.2 y 4.3) y se despejó la viscosidad de forma que

$$\frac{\text{masa } K^{-1}}{\nu_2} = \eta \quad (4.4)$$

Debido a las pérdidas por rozamiento, en el límite inferior, se pueden medir confiablemente viscosidades a partir de 1550cps, que corresponden a una masa de 10 g en el intervalo de velocidades que se está trabajando.

La figura 4.8 puede servir como una referencia rápida para obtener el valor aproximado de la viscosidad, sin necesidad de realizar operaciones. Sobre el eje X se lee la torca medida en gramos, con este valor y el de la velocidad angular que se haya utilizado en el experimento, se lee el valor de la viscosidad sobre el eje Y. La gráfica fue construida con el valor promedio de la constante de calibración. Para tener mayor confiabilidad en los resultados conviene realizar al menos dos pruebas a diferentes velocidades.

En el inciso 3.5 del capítulo anterior se calculó el posible aumento de temperatura para muestra de 950 y 30,400 cps. Durante una prueba de funcionamiento se utilizó un termopar, calibrado a décimas de grado, para monitorear la temperatura en la muestra de 950 cps. Como era de esperarse, no se detectó ninguna diferencia.

D.- Facilidad de utilización

Por la forma en que el viscosímetro está construido, el armado del aparato se realiza con facilidad. Todas las piezas encajan perfectamente; el centrado de los cilindros está dado por los puntos de apoyo, por lo que la coaxialidad de los cilindros no depende de la forma como se haya nivelado el viscosímetro. Ya que el armado del aparato es siempre igual, por construcción, las medidas obtenidas con él son muy reproducibles.

El llenado del aparato debe hacerse por partes. Si se sigue esta recomendación, quedarán atrapadas pocas burbujas de aire y su eliminación será relativamente fácil.

La rapidez con la que pueden tomarse los datos depende del tiempo en el que se logra la velocidad deseada, ya que los cambios en la torca se detectan directamente en la balanza.

E.- Costo

El costo de este prototipo es alto, ya que fue hecho especialmente y requirió de una gran cantidad de pruebas. Sin embargo, los materiales con los que se construyó no son costosos y varias piezas del viscosímetro pueden estandarizarse a las medidas de tubos y varillas encontradas comunmente en el mercado. El rotor y el estator requieren de un trabajo mecánico de alta precisión.

4.4 Proposiciones

Con el objeto de probar la eficacia del aparato construido, se realizaron las pruebas de calibración antes mencionadas. Es importante hacer hincapié en que esta calibración es preliminar y de ninguna manera está completa, pero permite una valoración

inicial. Es necesario realizar una calibración que cubra todas las normas de estandarización (BS 188,1977) y permita determinar con precisión las constantes del aparato. Se sugiere utilizar los aceites elaborados por National Physical Laboratory (NPL) ya que proporcionan una información más adecuada de las características del estandar, como viscosidad a diferentes temperaturas, estabilidad de la muestra con el tiempo y densidad. Esta última característica es muy importante, puesto que la constante de calibración varía con ella y es imprescindible tomarla en consideración.

Durante la realización de este trabajo surgieron varias ideas o líneas de investigación que podrían completar o mejorar el trabajo realizado.

1.- El diseño actual del viscosímetro requiere mucho equipo de apoyo para poder trabajar con él. Con la finalidad de disminuir este equipo y por tanto facilitar la utilización del aparato convendría cambiar el motor de limpiadores que se está usando, por un motor de pasos, conectado a línea a través de un circuito electrónico que permita modificar la velocidad en forma rápida, dando al mismo tiempo una alta reproducibilidad. Esta única modificación sustituye la fuente de poder que alimenta al motor actual, el optoswich con su fuente correspondiente y el contador de frecuencias, por un solo módulo.

2.- Con la finalidad de automatizar un poco la toma de datos y poder discriminar fácilmente el error de los mismos; convendría conectar una graficadora X,Y a la salida de la balanza y del circuito propuesto en el inciso 1. Este montaje permitiría además hacer pruebas de cesión y tixotropismo en fluidos no-newtoneanos.

3.- En la calibración presentada en este trabajo se utilizó un solo estator. Es conveniente trabajar con otros de dimensiones distintas para: a) modificar el intervalo de funcionamiento del aparato, b) calcular experimentalmente el efecto de borde (inciso

2.2).

4.- Dado que el aumento en la temperatura en el fluido no es grande (ver inciso 3.8), se pueden trabajar, en algún caso, muestras a temperatura ambiente, sin la necesidad de utilizar un baño térmico recirculante. Sin embargo, puesto que la viscosidad depende de la temperatura, es imprescindible indicar su valor al reportar los resultados de cualquier experimento.

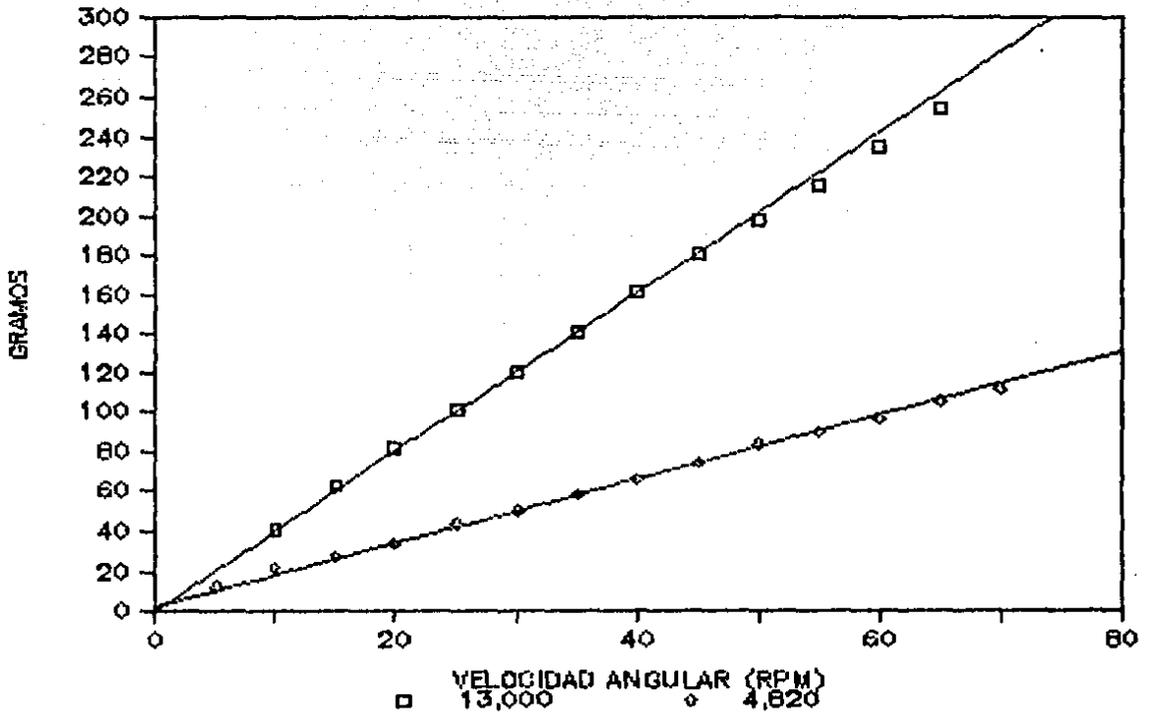


Fig. 4.1 Resultados experimentales con los ajustes correspondientes, para los aceites de calibración de 13000 y 4820 cps. Obsérvese que los puntos de los extremos se alejan ligeramente de las rectas de ajuste.

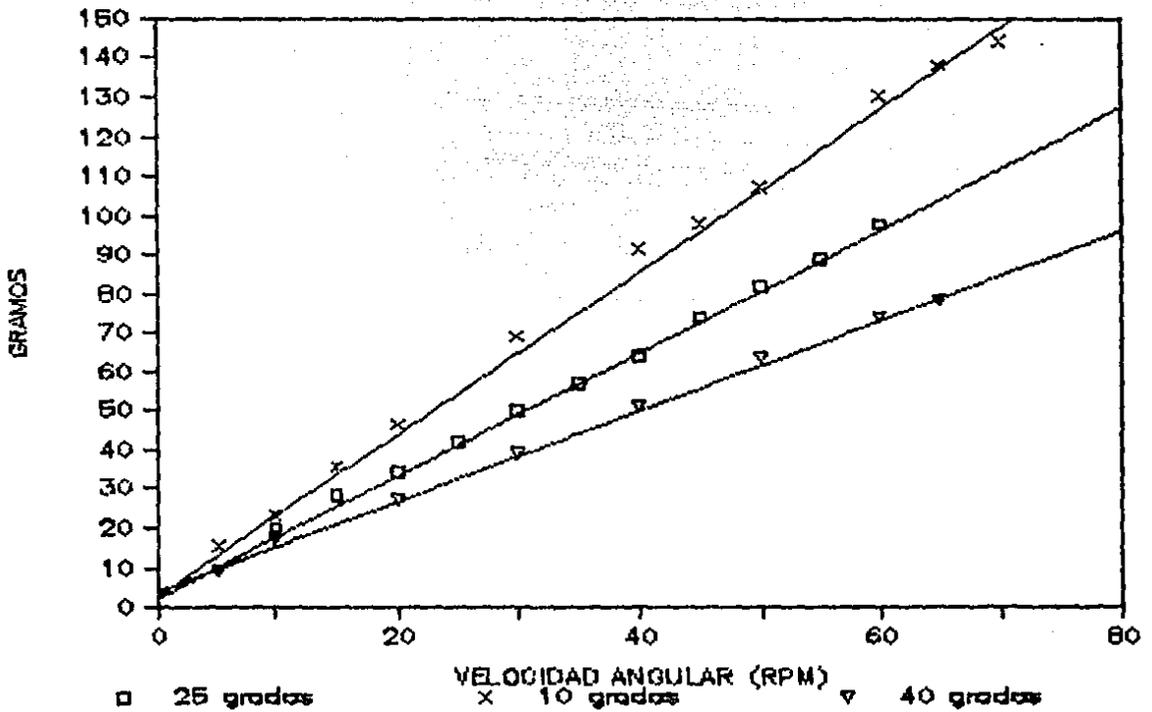


Fig. 4.2 Conducta del aceite de calibración de 4820 cps a tres temperaturas. Los datos se ajustaron por mínimos cuadrados.

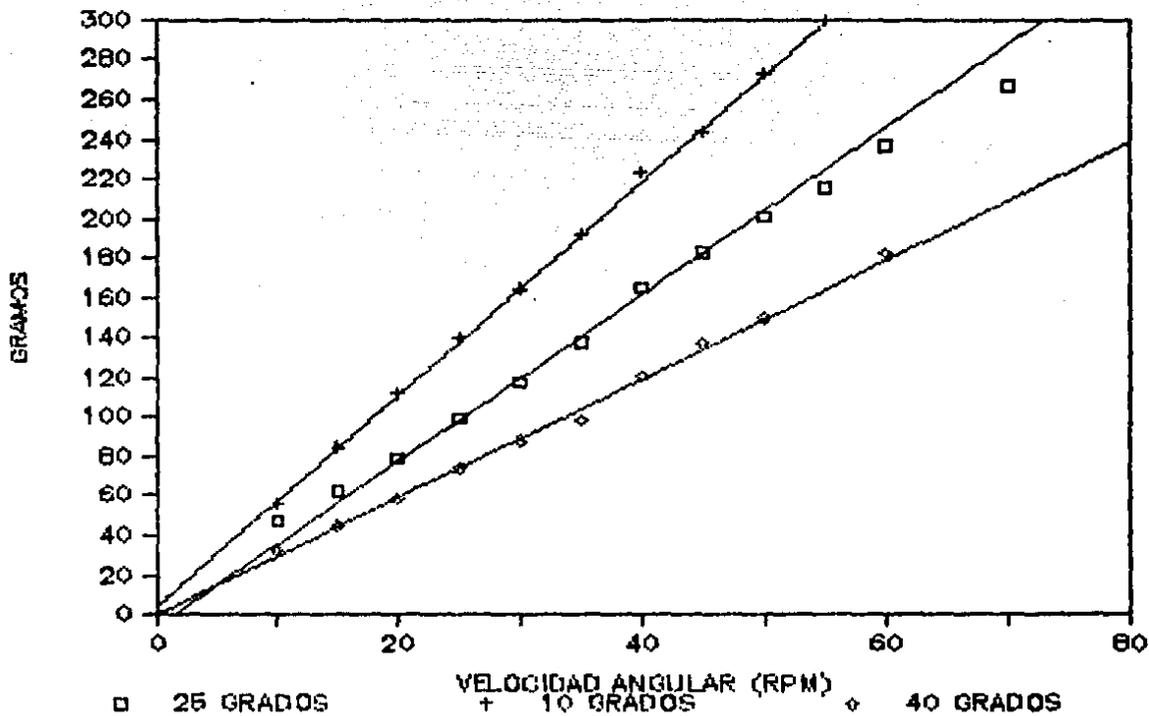


Fig. 4.3 Conducta del aceite de calibración de 13000 cps a tres temperaturas. Los datos se ajustaron por mínimos cuadrados.

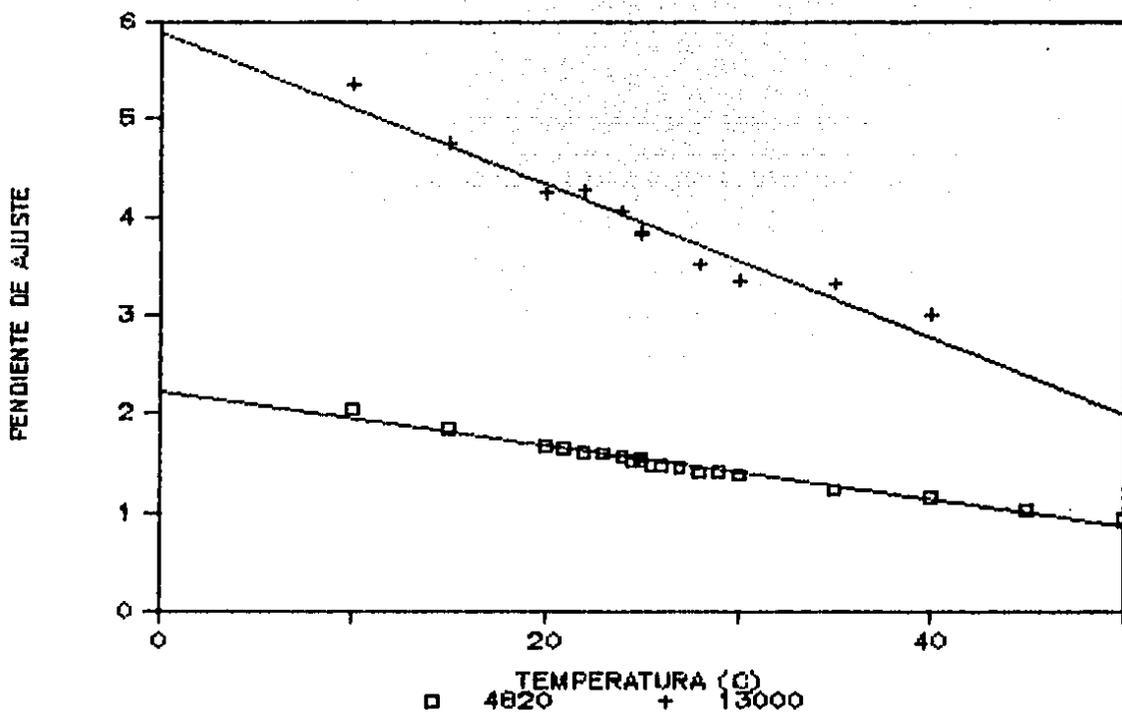


Fig. 4.4 Respuesta de los aceite de calibración ante variaciones de temperatura. Cada punto corresponde a la pendiente (\cong viscosidad) del ajuste, por mínimos cuadrados de los datos experimentales.

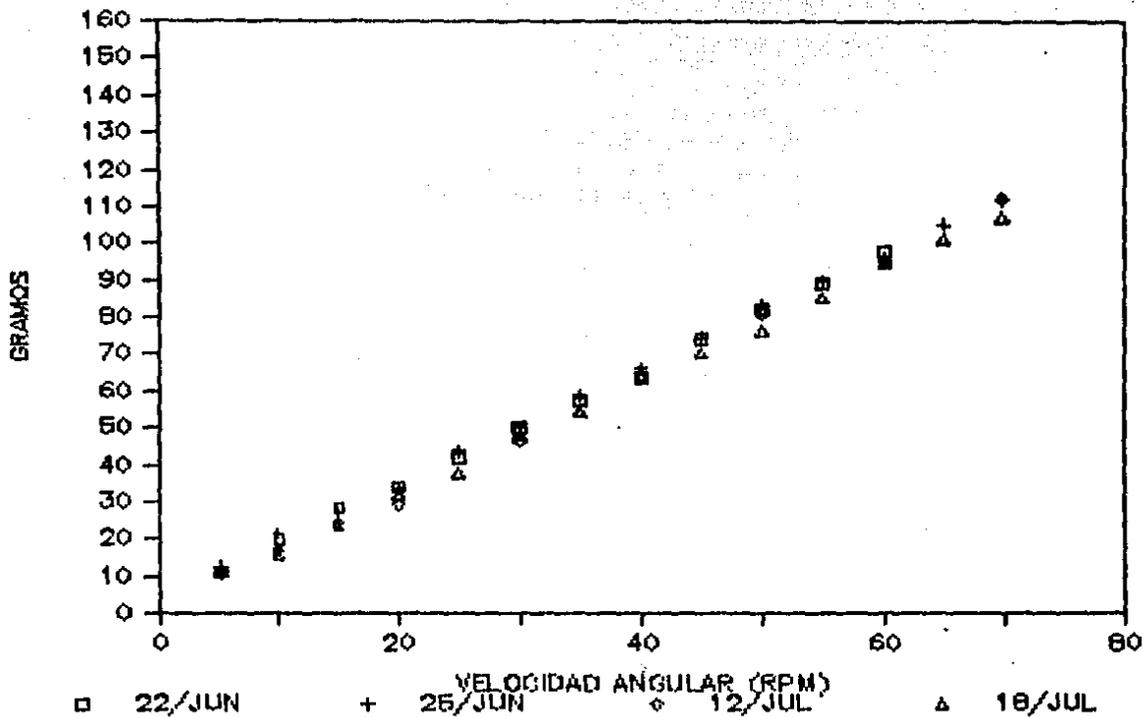


Fig. 4.5 Datos experimentales para diferentes muestras del estándar de 4820 cps a 25 °C.

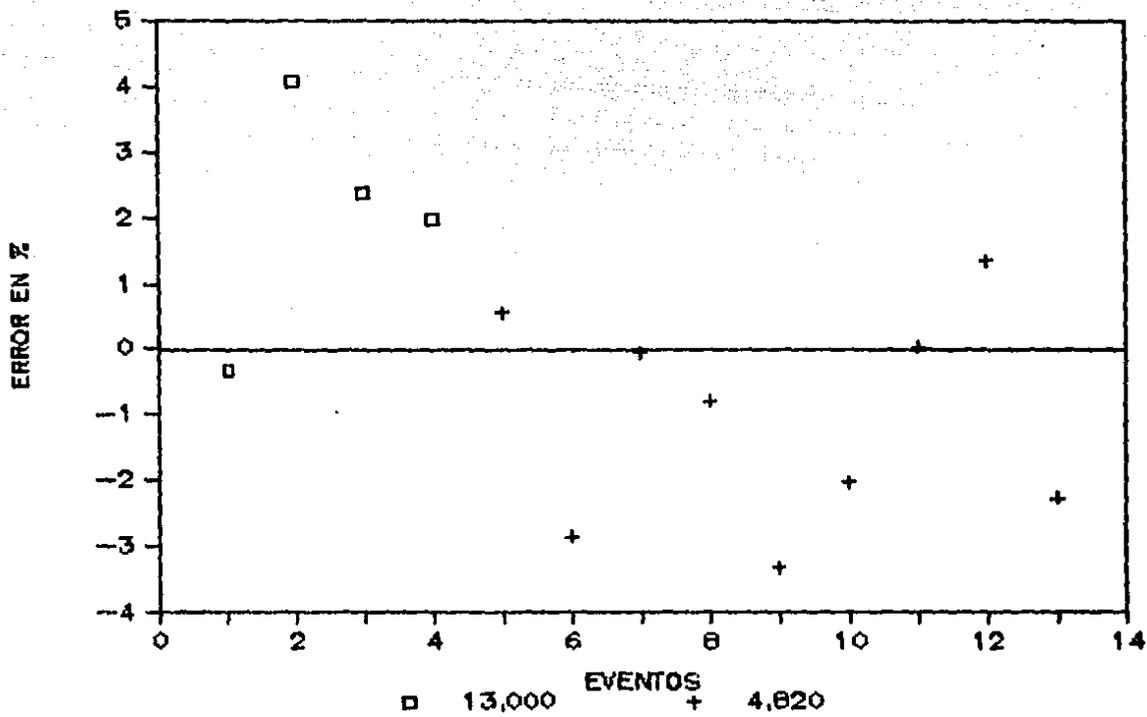


Fig. 4.6 Desviación en porcentaje de las constantes de calibración, respecto al promedio.

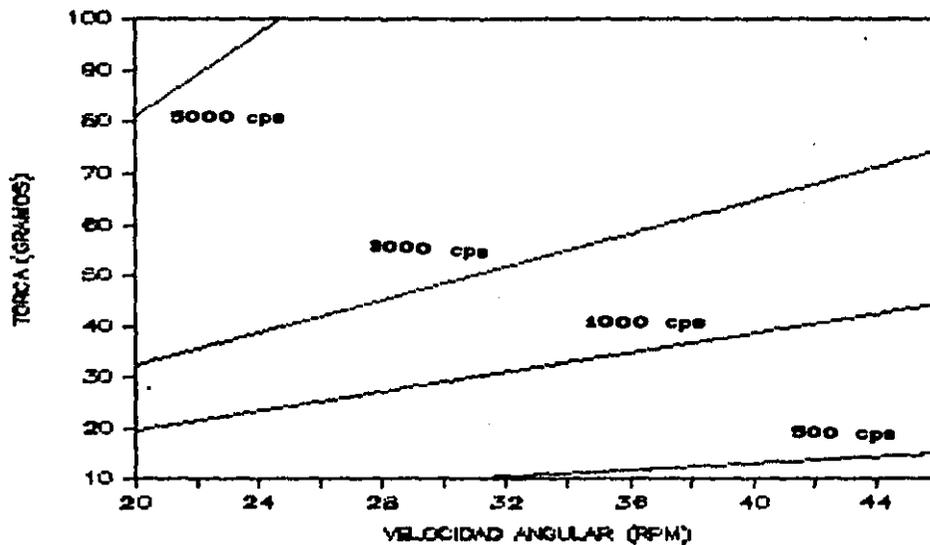
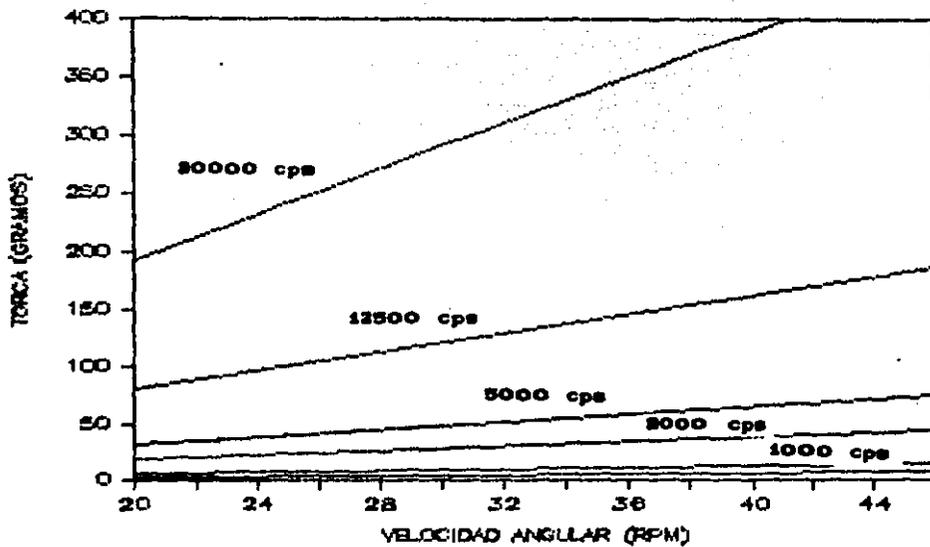


Fig. 4.7 (A) Intervalo de funcionamiento del viscosímetro. Como no es posible obtener información de las rectas en la parte inferior de la gráfica, se hizo un cambio de escala para (B). La línea de 500 cps está en el límite de funcionamiento del aparato, por lo que no se considera confiable.

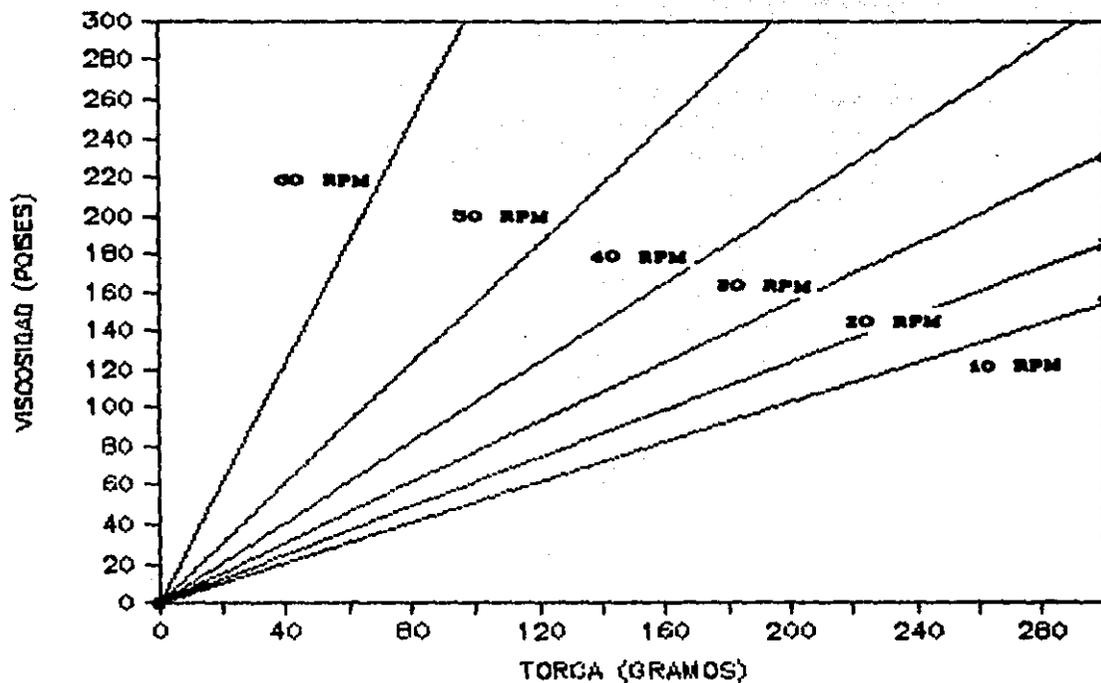


Fig. 4.8 Gráfica de calibración para obtener el valor aproximado de la viscosidad sin necesidad de realizar cálculos.

BIBLIOGRAFIA

- BARBEE, J.H. (1973); *The effect of temperature on the relative viscosity of human blood*; *Biorheology*, Vol. 10, 1-5.
- BARR, G. (1931); *A monograph of viscometry*; Oxford University Press, London.
- BILLMEYER, J.W. (1971); *Textbook of Polymer Science*; second edition; Wiley-Interscience; USA.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N., (1960); *Transport phenomena*; Wiley International Editions; USA.
- BIRD, R.B., ARMSTRONG, R.C., HASSAGER, O., (1977); *Dynamics of polymeric liquids, Vol. I, Fluid Mechanics*; John Wiley and Sons, Inc.; USA.
- BLOCK, H. GREGSON, E.M., IDNS, W.D., POWELL, G., SINGH, R.P., WALKER, S.M., (1978); *The measurement of birefringent, viscous and dielectric properties of liquids under shear*; *Journal of Physics E: Sci. Instrum.*, Vol. 11, 251-255.
- BS 188, (1977); *Methods for determination of the viscosity of liquids*; British Standards Institution.
- BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES, INC., (1983); *More solutions to sticky problems, a guide to getting more from your brookfield viscometer*; Brookfield, USA.
- BUCHDAHL, R., CURADO, J.G., BRADDICKS, R., (1947); *A variable speed rotational viscosimeter*; *Rev. Sci. Instrum.*, Vol 18, 168-172.
- CARREIRA, M., BECERRO, E., (1968); *Teoría del viscosímetro del tubo inclinado y bola rodante*; *Anales de Química*.

- CHAMPION, J.V., (1960); *The measurement of flow anisotropy in pure liquids*; Proc. Phys. Soc., Vol. 75 (3), 421-433.
- CHENG, D.C-H., (1981); *Viscosity (Parts 1,2,3): Measurement and Control*, Vol. 14, 73-37, 112-118, 159-163.
- COLLINS, E.A., BARES, J., BILLMEYER, F.W., (1973); *Experiments in polymer science*; Wiley Interscience; USA.
- COUETTE, M.M., (1890); *Etudes sur le frottement des liquides*; Ann. de Chim. et Phys., Vol. 21, 433-510.
- DARBON, J.E., (1985); *The NPL reference oils for viscosity*; Measurement and Control, Vol. 18, 226-232.
- DIPIPPO, R., KESTIN, J., WHITELAW, J.H., (1966); *A high-temperature oscillating-disk viscometer*; Physica, Vol. 32, 2064-2080.
- DIPRIMA, R.C., (1981); *Transition in flow between rotating concentric cylinders* in Proceedings of Symposium on Transitions and turbulence (Meyer R.E., ed.), Academic Press, U.S.A.
- EISENBERG, H. (1957); *Viscosity of dilute solutions of preparations of deoxyribonucleic acid at low and medium rate of shear*; Journal of Polymer Science, Vol. 25, 257-271.
- FLORY, P.J., (1953); *Principles of polymer chemistry*; Cornell University Press; USA.
- FLUDE, M.J.C., DARBON, J.E., (1982); *Viscosity measurement by means of falling spheres compared with capillary viscometry*; J. Phys. E.: Sci. Instrum., Vol. 15, 1313-1321.
- GEILS, R.H., KEEZER, R.C., (1977); *Small-volume, inclined, falling-ball viscometer*; Rev. Sci. Instrum., Vol. 48 (7), 783-785.
- GOODEVE, C.F. (1939); *An instrument for the measurement of anomalous viscosity*; Journal of Scientific Instruments, Vol. 16, 19-27.
- HARRINGTON, E.L., (1916); *A redetermination of the absolute value of the coefficient of viscosity of air*; Phys. Rev., Vol. 8 (6), 738-751.
- HARRIS, J., (1977); *Rheology and non-newtonian flow*; first edition; Longman; UK & USA.
- HOLLAND, F.A., (1973); *Fluid flow for chemical engineers*; Edward Arnold Publishers Ltd.; Great Britain.

HOLMAN, J.P., (1981); *Experimental methods for engineers*; third edition; McGraw-Hill International Book Company; Japan.

HOWARD, D.W., (1969); *Brookfield develops reliable measurement of chocolate viscosity*; *The Manufacturing Confectioner*, Vol. 49 (10), 48-50.

HUGES, W.F. Y BRIGHTON, J.A. (1970); *Teoría y problemas de dinámica de fluidos*; McGraw-Hill, Colombia.

JIRGENSON, B., (1962); *Natural organic macromolecules*; Pergamon Press; German Democratic Republic.

JIGERSON, B. y STRAUMANIS, M.E., (1962); *Compendio de química coloidal*, Primera edición, C.E.C.S.A., México.

KESTIN, J., LEIDENFROST, W. (1959); *The effect of moderate pressures on the viscosity of five gases en Thermodynamic and transport properties of gases, liquids and solids*, (Toulaekian, Y.S. ed.) The American Society of Mechanical Engineers, MacGraw Hill, USA.

KILP, T., HOUVENAGHEL-DEFOORT, B., PANNING, W., GUILLET, J.E., (1976); *Automatic recording capillary viscometer for the study of polymeric reactions*; *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 47, 1496-1502.

LANDAU, L.D., LIFSHITZ, E.M., (1959); *Fluid mechanics*; Pergamon Press Ltd., USA.

LINDSLEY, Ch.H., FISCHER, E.K., (1947); *End effect in rotational viscometers*; *Journal of Applied Physics*, Vol. 18, 988-996.

MAC.MICHAEL, R.F. (1915); *A new direct-reading viscosimeter*; *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 7 (11), 961-963.

MALLOCK, A., (1888); *Determination of the viscosity of water*; *Proceedings of the Royal Society, London*, Vol. 45, 126-132.

MALLOCK, A. (1896); *Experiments on fluid viscosity*; *Transactions of the Royal Society, London A.*; Vol. 187, 41-56.

MARRIENS, P., VAN PAEMEL, O., (1955); *Theory and experimental verification of the oscillating disk method for viscosity measurements in fluids*; *Appl. Sci. Res. A*, Vol. 5, 441-424.

MAZZA, R.J., WASHBOURN, D.H., (1984); *The use of fiber optics in viscometry*; *J. Phys. E: Sci. Instrum*, Vol. 17, 552-554.

MERRIL, E.W. (1954); *A coaxial cylinder viscometer for the study of fluids under high velocity gradients*; Journal of Colloid Science, Vol. 9 (1), 7-19.

MOONEY, M. y EWART, R.H., (1934); *The conicylindrical viscometer*; Journal of Applied Physics, Vol. 5, 350-354.

MUNRO, R.G., PIERMARINI, G.J., BLOCK, S., (1979); *Wall effects in a diamond-anvil pressure-cell falling-sphere viscometer*; Journal of Applied Physics; Vol. 50 (5), 3180-3184.

MURRAY, P., (1979); *Viscosity measurement made easy even with difficult liquids*; Control and Instrumentation; July/August 43.

PIPKIN, A.C., TANNER, R.I., (1972); *A survey of theory and experiment in viscometric flows of viscoelastic liquids*; Mechanics Today, Vol. 1, 262-321.

PORTER, R.S., KALAVER, R.F., JOHNSON, J.F., (1965); *Recording high shear viscometer for measurement at shear rates near 10 sec*; The Review of Scientific Instruments, Vol. 36 (12), 1846-1850.

RAND, P.W., LACOMBE, E., HUNT, H.E., AUSTIN, W.H., (1964); *Viscosity of normal human blood under normothermic and hypothermic conditions*; Journal of Applied Physiology, Vol. 19 (1), 117-122.

ROBBINS, J.W., (1979); *A quick, reliable method for measuring yield value, plastic viscosity and MacMichael viscosity of chocolate*; The Manufacturing Confectioner; Vol 59, (5).

SHAW, D.J., (1977); *Introducción a la química de superficies y coloides*; Segunda edición; Editorial Alhambra, S.A.; España.

SHEELY, M.L., (1931); *Glycerol viscosity tables*; Industrial and Engineering Chemistry, Vol 24 (9), 1060-1064.

SNYDER, H.A., (1969); *Rotating cylinder viscometer*; The Review of Scientific Instruments, Vol. 40 (8), 992-997.

TAMAKI, K., HARRISON, W.J.-M.A. (1920); *On the stability of the steady motion of viscous liquid contained between two rotating coaxial circular cylinders*; Transactions Cambridge Philosophical Society; Vol. 22, 425-437.

TAYLOR, G.I. (1923); *Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders*; Transactions of the Royal Society, A; Vol. 223, 289-343.

TILLY, P.J. (1983); *Viscosity Measurements (I, II)*; Measurement and Control, Vol. 16, 111-115, 137-139.

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

- Fig. 1.1** Diferencias distintivas en la relación entre esfuerzo cortante y razón de corte para sólidos y flúidos.
- Fig. 1.2** Gráfica de los modelos no-newtoneanos.
- Fig. 1.3** Esquema de viscosímetros capilares.
- Fig. 1.4** Esquema del viscosímetro de Saybot.
- Fig. 1.5** Esquema del viscosímetro de disco oscilante
- Fig. 1.6** Esquema del viscosímetro de Stokes.
- Fig. 1.7** Esquema del viscosímetro de cono y plato
- Fig. 1.8** Esquema del viscosímetro de cilindros coaxiales
- Fig. 3.1** Fotografía del viscosímetro de cilindros coaxiales
- Fig. 3.2** Intervalo teórico de funcionamiento del viscosímetro.
- Fig. 3.3** Respuestá del motor utilizado en el prototipo.
- Fig. 3.4** Detalle del aparato mostrando la conexión entre el motor y el cilindro exterior.
- Fig. 3.5** Diagrama del viscosímetro y equipo de apoyo.
- Fig. 4.1** Gráfica de resultados experimentales con los ajustes correspondientes, para los aceites de calibración de 13000 y 4820 cps.
- Fig. 4.2** Conducta del aceite de calibración de 4820 cps a tres temperaturas.
- Fig. 4.3** Conducta del aceite de calibración de 13000 cps a tres temperaturas.

TRAXLER, R.N., ROMBERG, J.W., SCHWEYER, H.E., (1942); *Rotary viscometer for determination fo high consistencies*; Industrial and Engineering Chemistry, Anal. Ed.; Vol. 14 (4), 340-344.

VAN KREVELEN, D.W., (1976); *Properties of polymers*; Second edition; Elsevie Scientific Publishing Co.; The Neatherlands.

VAN WAZER, J.R., LYONS, W., KIM, K.Y., COLWELL, R.E., (1963); *Viscosity and flow measurement, a laboratory handbook of rheology*; Interscience Publishers, USA.

WHITE, M.S., SOLOMONS, C., (1969); *Linear oscillation viscometer*; Rev. Sci. Instrum., Vol. 40, 339-345.

YUAN, S.W., (1967); *Fundations of fluid mechanics*; Prentice-Hall, Inc.; USA.

ZANGGER, R., BELL, D., (1975); *Viscosity measurement*; Control and Instrumentation, Feb., 28-31.

ZIMM, B.H., CROTHERS, D.M., (1962); *Simplified rotating cylinder viscometer for DNA*, Proc.N.A.S., Vol. 48, 905-911.

- Fig. 4.4** Respuesta de los aceite de calibración ante variaciones de temperatura.
- Fig. 4.5** Datos experimentales para diferentes muestras del estándar de 4820 cps a 25 °C.
- Fig. 4.6** Desviación en porcentaje de las constantes de calibración, respecto al promedio.
- Fig. 4.7** Intervalo experimental de funcionamiento del viscosímetro.
- Fig. 4.8** Gráfica de calibración

TABLAS

- Tabla 1.1** Intervalo de funcionamiento de diferentes viscosímetros.
- Tabla 3.1** Comparación de los valores del viscosímetro, con la diferencia de sus radios.
- Tabla 3.2** Valores posibles del radio del estator en este diseño.
- Tabla 3.3** Dimensiones del aparato.

LISTA DE SIMBOLOS

α	constante
β	constante
δ_{ij}	delta de Dirac
∂	derivada parcial
Δ	gradiente
ϕ	ángulo
$\dot{\gamma}$	razón de corte
η	coeficiente de viscosidad cortante, viscosidad dinámica
μ_a	viscosidad aparente
ν	viscosidad cinemática
π	pi
Π_{ik}	tensor de flujo de densidad de momento
θ	ángulo
ρ	densidad
σ	esfuerzo cortante
σ_{ik}	tensor de esfuerzos
σ'_{ik}	tensor viscoso
ω	velocidad angular en revoluciones por minuto
ω_1	velocidad angular del cilindro interior (estator)
ω_2	velocidad angular del cilindro exterior (rotor)
ω_p	velocidad angular del plato en el viscosímetro de cono-plato
ξ	coeficiente de viscosidad volumétrica
A	constante

B	constante
b	separación entre las bases de los cilindros
C_i	constante
d	distancia
d	distancia de recorrido de la esfera en el viscosímetro de Stokes
f	función
g	aceleración de la gravedad
h	longitud cortante o altura del líquido
J	equivalente mecánico del calor
K	constante de calibración, coeficiente de consistencia de un material
K	conductividad térmica del fluido
L	longitud característica
ℓ	longitud del tubo capilar
n	constante
p	presión
Q	flujo volumétrico
R_1	radio del cilindro interior
R_2	radio del cilindro exterior
R_c	generatriz del cono
Re	número de Reynolds
r	radio
S	entropía
T	torca
t	tiempo
U	velocidad característica
v_i	componente de la velocidad lineal
v_{R_2}	velocidad lineal del rotor
x	coordenada cartesiana
x_i	componente de distancia
y	coordenada cartesiana
z	coordenada cartesiana, altura del cono