



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN VISCOSÍMETRO DE CILINDROS  
CONCENTRICOS**

**TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**PRESENTA:**

**RODOLFO CASTRO GONZÁLEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**M.I. GERARDO ANTONIO RUÍZ BOTELLO  
ING. EDUARDO BERNAL VARGAS**



**MÉXICO, DF.**

**2007**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis esta 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.

## Agradecimientos.

---

### **A mis padres**

Hasta este momento he pensado como decirles que les agradezco el hecho de haberme recibido en el seno de su familia y darme tanto amor y alentarme a alcanzar mis metas, en este instante en el que estoy pensando como decirles que los amo y agradecerles todo cuanto han hecho por mi, creo que la mejor manera de decírselos es dedicándoles este trabajo y todo cuanto he hecho en la vida.

A Marcial Castro Valentín quien es la persona más honesta y recta que he conocido en esta vida, su firmeza al momento de educar a un hijo y todo ese amor al enseñarle que en la vida las cosas cuestan y mostrar que aun cuando las cosas parecen difíciles a un hay una esperanza y esa esperanza eres tú mismo, gracias papá.

A Francisca González Castro se que eres la persona más grande que conoceré en esta vida, por tu forma de ser y por tu incansable amor hacia los nosotros tus hijos y tu esposo que eres el motor de nuestro hogar quien nos impulsa a salir adelante aun cuando mi padre no siempre pudo estar con nosotros, tu siempre mostraste un enorme carácter y nos educaste de la mejor manera dándonos así las armas para defendernos de la vida en todos los aspectos por lo que hoy te quiero decir, gracias mamá.

### **A mis hermanos**

Andrés Castro González, sabes siempre he dicho que te amo y lo mejor es que te admiro eres el mejor hermano para todos nosotros eres siempre tan serio y tan callado que parece que para escucharte se necesita estar ligado a ti en el alma y creo que eso tu y yo lo tenemos somos la parte que nos falta el uno del otro, quiero que sepas que le doy gracias a dios por que siempre has estado con migo en los momentos buenos y malos y creo que este trabajo nunca se hubiera terminado si no es por ti y todo ese tiempo que me has regalado del tuyo para vivir mi vida, gracias hermano.

Blanca Estela Castro González, que decirte niña eres la luz de mis ojos te veo y creo que estoy vivo y necesito hacer muchas cosa en esta vida para agradecerle a dios, por permitirme ser tu hermano, sabes que siempre estaremos juntos y te apoyare en todo lo que quieras hacer, creo que el solo hecho de darme a mis dos sobrinos Diego y Nicolás te debo todo mi esfuerzo y solo me resta decirte que tu eres una parte importante por la cual este trabajo ha terminado bien, te quiero, gracias hermana.

José Alberto Castro González, el menor de mis hermanos, sabes necesito decirte que te amo y creo que lo sabes aun cuando, siempre te regaño quiero que sepas que lo hago para que no cometas los mismos errores que yo he cometido pero claro también se que tienes que equivocarte sino de que forma lo entenderías, pero aun con todo eso eres la personita más linda que en mi vida ha llegado esa inocencia que posees nunca dejes que se vaya de tu vida por que es lo que te hace único y es lo que me enseñas día a día, necesito decirte que este trabajó es también tuyo, gracias hermano.

## Agradecimientos.

---

Al Ing. Eduardo Bernal Vargas y al M.I. Gerardo Antonio Ruíz Botello, por el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de este trabajo a quienes les agradezco haberme dirigido para llevar a un buen fin el proyecto.

Al Dr. Gabriel Ascanio Gasca quien sin aun conocerme me brindo el apoyo que yo necesitaba para desarrollar este trabajo y me ha enseñado que aun cuando cometes errores lo mejor es aprender de ellos, siendo durante este tiempo la persona que se ha preocupado por mi desarrollo tanto académico como humano, gracias.

Y la verdad esta parte no sería agradecimientos sin mencionar a las personas que han estado a mi lado todo este tiempo que podría decir gracias amigos creo que todos ustedes saben que los quiero, admiro y respeto.

A Psi. Blanca Estela Tovar Segura, te quiero agradecer el hecho de estar a mi lado desde mi infancia y ser esa persona tan buena y generosa como lo eres tu, te agradezco todo cuanto has hecho por mi y mi familia y si hubiera podido escoger a una hermana mayor esa serias tu.

Eduardo, Miguel, Oliver, Sofía, Abigail, Anai, Emma, Leticia, Lorena, Mónica y Alberto, creo que este sueño comenzó junto a ustedes y esto es también para ustedes, gracias.

Juan Andrés, Héctor David, Landy, Jennifer, Jorge, Agustín, Saúl, Ricardo, Antonio, Alma Delia, Gladis y Diter, mis amigos del CCH-OTE.

Enrique, Sandra, Jesús, Servando, Adrián, Luis Miguel, Miguel Cueto, Miguel Ángel, Mario, Rene, Omar, Iván, David, Felipe, Sinué, Oscar, Guadalupe, Gerardo, amigos de la Facultad de Ingeniería.

Francisco Javier, Juan Carlos, Antonio e Jaime Igmarr, mis compañeros del laboratorio les agradezco todos los consejos que me han dado.

Añaid, Claudia, Roció, Lizet, Karina, Alberto, Daniel, Paola, Cesar, Javier, Pedro, Dante, Arturo, Oswaldo, Francisco, Martín, Salvador, Jimmy, Luvín, Maribel, Hortensia, Denisse, Berta, Aristeo, Catalina, Josefina, Pilar, Aslyn, Rafael, Desiderio, Giovanni, Maria Elena e Isabel

Lizet Lezama Juárez te agradezco haberme acompañado todo este tiempo en el cual empecé este proyecto, el haber llegado a mi vida fue algo muy importante por lo cual tome la decisión de terminar este proyecto, solo me resta decir que te amo y también este trabajo es para ti.

## Agradecimientos.

---

Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, por brindarme las instalaciones y todas las facilidades para desarrollar este proyecto.

A la Facultad de Ingeniería por ser la mejor facultad de todo el campus de CU y haberme permitido formarme dentro de sus aulas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, quien me ha dado la dicha más grande de toda mi vida que es ser universitario y pertenecer a la mejor universidad de Ibero América y arraigar en mi ese orgullo y garra que solo poseen los alumnos de la UNAM.

	Introducción	
Capítulo 1	Antecedentes	
1.1	Parámetros reológicos	6
1.1.2	Conceptos básicos	6
1.1.3	Esfuerzo de corte	6
1.1.4	Gradiente de Velocidad	6
1.1.5	Viscosidad	7
1.1.6	Límite de fluidez	8
1.2	Fluidos	8
1.2.1	Fluidos newtonianos	8
1.2.1	Fluidos no newtonianos	8
1.3.1	Comportamiento no dependiente del tiempo	9
1.3.2	Plásticos generales	10
1.3.3	Comportamiento dependiente del tiempo	11
Capítulo 2	Definición del problema	
2.1	Requerimientos y especificaciones del viscosímetro	12
2.2	Consideraciones prácticas	12
2.3	Construcción, montaje y alineación	13
2.4	Condiciones de estabilidad	14
2.5	Corrección del efecto de borde	15
2.6	Variación del esfuerzo cortante y razón de corte	17
2.7	Velocidad de rotación	17
Capítulo 3	Viscosímetros comerciales	
3.1	Estudio de mercado	18
3.2	Ventajas y desventajas de los distintos viscosímetros	21
Capítulo 4	Viscosímetros rotatorios de cilindros coaxiales	
4.1	Viscosimetría	22
4.2	Condiciones para mediciones absolutas en la viscosidad	22
4.3	Viscosímetros de rotación	22
4.3.1	Tipos de viscosímetros de rotación	22
4.5	Sistemas	22
4.5.1	Sistema Searle	23

4.5.2	Sistema Couette	23
4.6	Tipos de sistemas de medición por cilindros coaxiales	24
4.6.1	Sistemas de medición con ranuras muy estrechas	25
4.6.2	Sistema de medición de ranura doble	25
4.6.3	Sistemas de medición estándar	25
4.6.4	Sistema de medición según Money-Ewart	26
Capítulo 5	<b>Propuesta de diseño conceptual del viscosímetro de cilindros coaxiales</b>	
5.1	Funcionamiento del prototipo	28
5.2	<b>Sistema de tres grados de libertad (sistema de posición del motor DC.)</b>	31
5.3	Componentes centrales del viscosímetro	32
5.3.1	Motor de DC	33
5.3.2	Cilindro interior (rotor)	34
5.3.3	Cilindro exterior (copa)	34
5.3.4	Rodamiento mecánico	35
5.3.5	Brazo de palanca	37
5.4	Sistema de posición de la celda de carga (motor-husillo-tuerca)	38
		39
Capítulo 6	Comentarios finales y conclusiones	
6.1	Conclusiones y comentarios	39
6.2	Trabajo futuro	40
Capítulo 7	Apéndice(s)	41
	Bibliografía	45

Fig.1.1 Flujo de un líquido entre dos placas planas paralelas bajo la influencia de un esfuerzo cortante.

Fig.1.2 Gráfico de viscosidad frente a gradiente de velocidad para distintos tipos de fluidos.

Fig. 1.3 Dispersiones del fluido en estado de reposo y al fluir.

Fig. 1.4 Curvas de fluidez para distintos tipos de fluidos

Fig. 3.1 Viscosímetros comerciales.

Fig. 3.2 Esfuerzo vs. Velocidad de corte.

Fig. 3.3 Viscosímetro de bola que cae.

Fig. 3.4 Viscosímetro de tubo capilar.

Fig. 3.5 Viscosímetros de cilindros coaxiales.

Fig. 3.6 Viscosímetro portátil.

Fig. 4.1 Perfiles de velocidad de flujo y de viscosidad en sistemas Searle y Couette.

Fig. 4.2 Cilindros coaxiales (a), cono-plato (b) y platos paralelos(c).

Fig. 4.3 Influencia de la relación de radios sobre el perfil de velocidades en un sistema de cilindros coaxiales tipo Searle.

Fig. 4.4 Diferentes sistemas de medición por cilindros coaxiales.  
Flujo laminar entre cilindros rotatorios.

Fig. 5.1 Diseño conceptual final del viscosímetro de cilindros coaxiales

Fig. 5.2 Sistema de tres grados de libertad

Fig. 5.3 Movimientos en “x, y y z”

Fig. 5.4 Componentes centrales

Fig. 5.5 Celda de carga

Fig. 5.6 Cilindro interior (rotor)

Fig. 5.7 Cilindro exterior (copa)

Fig. 5.8 Rodamiento rígido de bolas – SKF

Fig.5. 9 Sistema primario medición del par

Fig. 5.10 Sistema motor-husillo-tuerca permite el ajuste de la celda de carga

Fig.7.1 Explosivo general de ensamble

El hombre se ha encargado del estudio de las sustancias gracias a que ha aprendido que las propiedades le facilitarán y harán su vida más fácil en el momento de decidir la aplicación de dicha sustancia en diferentes campos de estudio y la industria así con ello ha desarrollado una ciencia la cual es la reología.

La ciencia que estudia la relación entre la fuerza, la deformación y el tiempo en sistemas sometidos a fuerzas externas es la *reología*.

Idealmente, se distinguen dos tipos de sistemas: los fluidos y los sólidos. Los fluidos ideales se deforman de modo no reversible (fluyen) y la energía de deformación se disipa en forma de calor, no recuperándose la forma original al desaparecer la fuerza aplicada (comportamiento puramente viscoso). Los sólidos ideales se deforman elásticamente y la energía de deformación se recupera totalmente cuando desaparece la fuerza, obteniéndose la forma original (comportamiento puramente elástico).

Los sistemas reales no son ni sólidos ni fluidos ideales. Así, los sólidos reales pueden ser deformados irreversiblemente bajo la aplicación de una fuerza suficientemente grande y entonces también fluyen.

Muy pocos líquidos se comportan de una forma ideal y la mayoría presentan un comportamiento reológico según el cual deben clasificarse entre líquidos y sólidos. Son tanto elásticos como también viscosos y por ello se les denomina viscoelásticos.

Los sólidos se pueden estirar aplicándoles un esfuerzo de tracción, quedando sometidos a una tensión normal. Pero también son deformables mediante esfuerzos de cizalla (tangenciales). Por el contrario, los líquidos solo se dejan someter a esfuerzos de cizalla.

Actualmente, la reología juega un papel muy importante tanto en el ámbito técnico como científico, permitiendo caracterizar mecánica y estructuralmente líquidos y pastas ideales como: mezclas de polímeros, pinturas, suspensiones cerámicas, productos alimentarios, farmacéuticos, cosméticos, etc.

La necesidad de investigación en reología es cada vez más evidente para poder comprender mejor el comportamiento de las sustancias y con ello facilitar su caracterización y manipulación. [1]

El proyecto por presentar abarca todos los ámbitos en los cuales se busca como objetivo caracterizar sustancias mediante un viscosímetro de cilindros coaxiales.

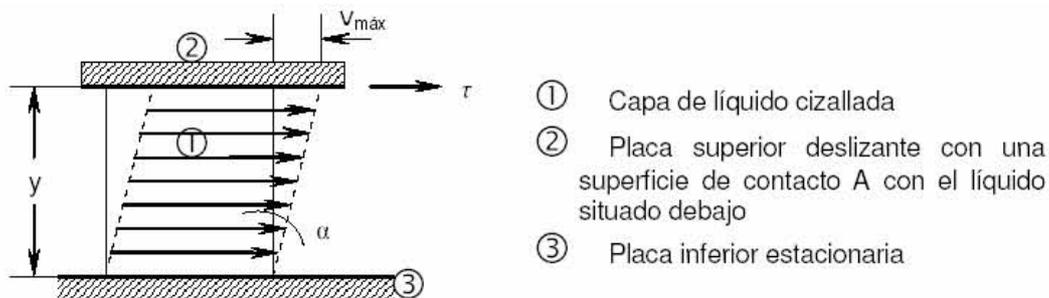
## 1.1 Parámetros reológicos

### 1.1.1 Conceptos básicos

La ley elemental que describe el comportamiento de un líquido ideal fue expresada matemáticamente por Newton mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

Donde la constante de proporcionalidad  $\eta$  es la viscosidad del material, el modelo de flujo de un líquido entre dos placas planas paralelas suficientemente grandes Fig. (1), es útil para describir magnitudes como el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y el gradiente de velocidad o velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) que se definirán a continuación. [1]



**Fig.1.1- Flujo de un líquido entre dos placas planas paralelas bajo la influencia de un esfuerzo cortante.**

### 1.1.2 Esfuerzo de corte

Cuando en el modelo de la fig. 1.1 se aplica una fuerza  $F$  a la placa superior con la superficie  $A$  en la dirección indicada, el líquido contenido en la ranura entre las placas comienza a fluir. El cociente entre la fuerza  $F$  y la superficie de contacto  $A$  con el líquido se define como esfuerzo de corte. La velocidad de flujo del líquido, que se obtiene por medio del esfuerzo cortante, se determinará a través de la resistencia interna que opone el líquido contra el fluir, es decir, a través de la viscosidad  $\eta$ .

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1.2)$$

### 1.1.3 Gradiente de Velocidad

El esfuerzo de corte ( $\tau$ ) obliga al líquido a fluir en la ranura obteniéndose una caída de velocidades entre ambas placas, que será diferente según el líquido que se trate. La velocidad máxima de flujo  $V_{\max}$  se obtiene en la superficie límite superior  $A$ . Hasta la superficie límite inferior que está en contacto con la placa estacionaria, la velocidad de flujo decrece oblicuamente respecto a la ranura y entre dos placas hasta una  $V_{\min} = 0$ .

El gradiente de velocidad se define según la relación:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} [s^{-1}] \quad (1.3)$$

Un gradiente de velocidad lineal oblicuo respecto al ancho de la ranura (y) se describe según la siguiente ecuación:

$$\dot{\gamma} = \frac{V \max}{y} [s^{-1}] \quad (1.4)$$

### 1.1.4 Viscosidad

Como se ha comentado anteriormente, la viscosidad es la resistencia que opone el material a su movimiento relativo interno. Es una medida del rozamiento interno de las moléculas del fluido.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [Pa / s] \quad (1.5)$$

La viscosidad puede depender básicamente de estos cinco parámetros [3,4]:

-Constitución físico-química de la sustancia a medir: la existencia de ramificaciones en el material disminuye la viscosidad; la viscosidad es directamente proporcional a la masa molecular.

-Temperatura: en general, al aumentar la temperatura la viscosidad disminuye. La dependencia entre viscosidad y temperatura se ajustan normalmente a la relación de Arrhenius:

$$\eta = A e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (1.6)$$

Donde A es una constante pre-exponencial,  $E_a$  es la energía de activación para el flujo viscoso, R es la constante de los gases ideales y T es la temperatura en Kelvin [K].

-Presión: tiene influencia sólo a altas presiones. Los líquidos son compresibles bajo altas presiones. Con la presión se eleva la resistencia intermolecular. Así, elevaciones de la presión provocan aumentos de viscosidad.

-Gradiente de velocidad: influye decisivamente y puede significar tanto un aumento como una disminución de la viscosidad.

-Tiempo: Este parámetro es importante para aquellos líquidos cuya cinética reológica sea relativamente lenta. Puede significar un aumento o una disminución de la viscosidad con el tiempo dependiendo de la historia reciente de las deformaciones del material.

### 1.1.5 Límite de fluidez

Aparentemente algunos materiales no presentan flujo alguno cuando se les aplica un esfuerzo inferior a un esfuerzo umbral, distinto de cero y característico de la sustancia.

Esto, matemáticamente, implica que la viscosidad, para un esfuerzo por debajo de este valor umbral, es infinita. En estos casos se dice que el material presenta límite de fluidez  $\tau_0$ .

En determinadas situaciones, la existencia de este límite de fluidez es un factor positivo. Por ejemplo, cuando se debe agitar una suspensión para evitar la sedimentación, se puede cesar la agitación durante un tiempo sin que se formen sedimentos debido a que la viscosidad en reposo es muy alta.

## 1.2 Fluidos

### 1.2.1 Fluidos newtonianos

Los líquidos compuestos por moléculas simples de bajo peso molecular (tales como agua, alcohol, soluciones de azúcar, etc.) tienen un comportamiento puramente viscoso y el gradiente de velocidad que se obtiene es directamente proporcional al esfuerzo de corte aplicado. Los fluidos que siguen este comportamiento se denominan newtonianos. Es decir, como su propio nombre indica, se trata de sustancias que siguen la ecuación de Newton (1.1). Por tanto, su curva de fluidez es una línea recta que se asciende con un ángulo  $\alpha$  y pasa por el origen de coordenadas. Cada punto en esta recta define un par de valores  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$ . Cuando uno de estos valores es dividido por el otro, se obtiene un valor de viscosidad  $\eta$ .

Como la curva de fluidez es recta, todos los cocientes de los pares de los valores  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$  que pertenecen a dicha curva son constantes. Esto significa que  $\eta$  es independiente del gradiente de velocidad  $\dot{\gamma}$ . [2]

### 1.2.2 Fluidos no newtonianos Corregir sucesivamente y el índice

Los fluidos no newtonianos son aquellos que no cumplen la relación de newton (1.1) de proporcionalidad directa y lineal entre el esfuerzo de cizalla y el gradiente de velocidad. Hay una gran mayoría de líquidos cuyo comportamiento reológico no se ajusta al de líquido newtoniano. Estos líquidos suelen ser sistemas dispersos (emulsiones, pinturas, plásticos, alimentos, etc.) [2]

En este tipo de fluidos, la relación entre  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$  puede ser muy variada e incluso llega a depender, en algunos casos, de la historia reciente del fluido. Al dejar de ser lineal esta relación, el concepto de viscosidad pierde su carácter de propiedad intrínseca del fluido y depender del valor de  $\dot{\gamma}$ .

Se distinguen dos grandes tipos de fluidos no newtonianos:

-Independientes del tiempo: la relación entre  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$  es independientemente de la historia reciente de las deformaciones del material.

-Dependientes del tiempo: su comportamiento está influido por su historia reciente de las deformaciones del material.

### 1.2.3 Comportamiento no dependiente del tiempo

Las distintas relaciones entre  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$  están reagrupadas en ecuaciones representativas que muestran los distintos tipos de comportamiento reológico o tipos de flujo existentes. [6]

-Plásticos de Bingham

Para estos fluidos, la relación entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad es lineal, pero tienen un límite de fluidez, es decir, la curva de fluidez no pasa por el origen. La ecuación que expresa este tipo de comportamiento es:

$$\tau = \tau_o + \eta\dot{\gamma} \quad (1.7)$$

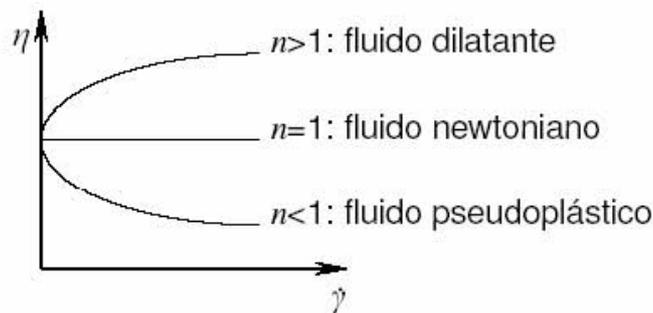
-Pseudoplásticos y dilatantes

Tanto los fluidos pseudoplásticos como los dilatantes siguen un comportamiento potencial entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad. Por esto se dice que siguen la ley de potencia o ley de Oswald-de Waele:

$$\tau = \eta\dot{\gamma}^n \quad (1.8)$$

En la ecuación (1.8),  $n$  es el índice de comportamiento.

La fig. 1.2 muestra este concepto



**Fig. 1.2 Gráfico de viscosidad frente a gradiente de velocidad para distintos tipos de fluidos.**

Los fluidos pseudoplásticos disminuyen su viscosidad al aumentar el gradiente de velocidad. Muchos productos líquidos que aparentan ser homogéneos están formados realmente por varios componentes (partículas, cadenas moleculares, etc.). En estado de reposo estos componentes tienden a mantener su estado altamente desordenado. Ello origina una gran resistencia interna frente a un flujo forzado, es decir una alta viscosidad.

Con un gradiente de velocidad creciente, las partículas contenidas en el líquido se orientan en la dirección del flujo. Gracias a este alineamiento de partículas y moléculas estas pueden deslizarse mejor, un respecto a otras y esto se traduce en un menor rozamiento interno o viscosidad.

Para la mayoría de casos, esta disminución de la viscosidad es reversible y tras un cierto tiempo, a partir de cuando cesa el esfuerzo de corte, los líquidos recuperan su viscosidad original. En la fig. 1.3 se muestran distintos tipos de líquidos y cómo se orientan bajo un flujo determinado.



**Fig. 1.3** Dispersiones del fluido en estado de reposo y al fluir.

Los fluidos dilatantes presentan el comportamiento contrario a los pseudoplásticos. Se trata de sustancias que muestran un aumento de la viscosidad al aumentar el gradiente de velocidad. La dilatación en líquidos es muy poco frecuente.

### 1.2.4 Plásticos generales

Los plásticos generales tienen características de plásticos de Bingham y de fluidos que sigue la ley de potencia. Representan una de las clases más amplias de fluidos y la ecuación que los representa es la siguiente:

$$\tau = \tau_o + \eta\dot{\gamma}^n \tag{1.9}$$

Por tanto, se trata de líquidos pseudoplásticos que poseen adicionalmente un límite de fluidez.

En su mayoría son dispersiones que en estado de reposo forman una red intermolecular de fuerzas de cohesión (por ejemplo, enlaces polares o fuerzas de Van der Waals). Estas fuerzas evitan, en estado de reposo, un cambio de posición de elementos de volumen y dan a la sustancia un carácter de cuerpo sólido de viscosidad casi infinita. Cuando las fuerzas externas aplicadas pueden sobrepasar las fuerzas de unión de la red, se sobrepasa el límite de fluidez, la estructura se desmorona y la sustancia fluye.

No obstante, a pesar que la ecuación (1. 9) es suficientemente general, en principio, para describir el comportamiento de la mayoría de fluidos, a veces se utilizan otras ecuaciones. En la tabla 1 se recoge una muestra de dichas ecuaciones.

Tabla 1. Ecuaciones modelo para fluidos no newtonianos

Modelo	Ecuación
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + \eta^{1/2} \cdot \dot{\gamma}^{1/2}$
Cross	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}}$
Carreau-Yasuda	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a]^{1-n/a}}$

\*  $\eta_\infty$  : Viscosidad cuando el gradiente de velocidad tiende a infinito.

$\eta_0$  : Viscosidad cuando el gradiente de velocidad tiende a cero.

$\lambda$  : Constante de tiempo.

En la fig. 1.4 se muestran todos los comportamientos de fluidez explicados hasta este punto.

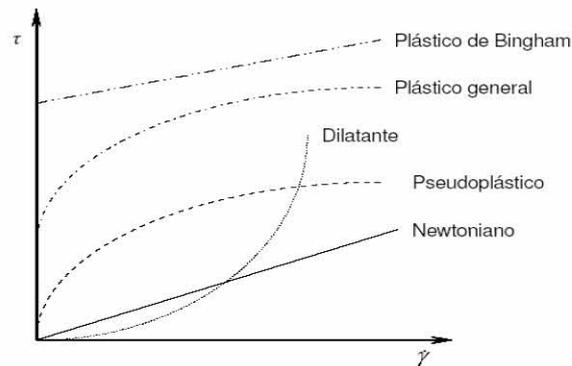


Fig. 1.4 Curvas de fluidez para distintos tipos de fluidos

### 1.2.5 Comportamiento dependiente del tiempo

#### Tixotropía

Hasta ahora se ha considerado que los valores de  $\tau$  eran únicamente dependientes del gradiente de velocidad. Sin embargo, es muy frecuente observar que, para muchos fluidos, el valor de  $\tau$  va cambiando con respecto al tiempo a pesar de que, en ese momento, el valor del gradiente de velocidad se mantiene constante. En estos casos se dice que el material presenta tixotropía. [3]

Este fenómeno se debe a que al cambiar el gradiente de velocidad cambia también la estructura del material (véase la Fig.1.3), y esta acomodación no suele ser instantánea. En caso que lo sea, entonces el material no es tixotrópico.

En definitiva, se pueden resumir estos conceptos definiendo a la tixotropía como una medida de la cinética de adaptación de la estructura de un material a los cambios de gradiente de velocidad. Su manifestación más directa está en la variación de viscosidad del material en función de la historia de las deformaciones previas al material. [4]

## **2. Definición del problema**

### **2.1 Requerimientos y especificaciones del viscosímetro**

Se diseña un viscosímetro el cual sea robusto en sus geometrías y en sus elementos pero en el momento de entrar en acción tenga un adecuado funcionamiento, posea una sensibilidad en un rango aceptable respecto a los viscosímetros comerciales lo cual nos permitirá medir la viscosidad confiablemente

Obtener el diseño conceptual de la parte mecánica de un viscosímetro, así como caracterizar el instrumento, una vez realizadas las partes mecánicas, someterlo a varias pruebas tanto en su funcionamiento dinámico como estático, de todos los elementos individuales y en conjunto.

Constara de elementos comerciales en su mayoría de fácil adquisición, tanto los componentes principales y los complementos de los mismos serán cotizados y adquiridos en el mercado nacional, para que en el instante de cuando se requiera conseguir algún repuesto sea de la forma mas rápida y sencilla para el cliente que requiera dichas refacciones.

En cuanto al uso tendrá aplicaciones realmente exigentes trabajara en medios poco agradables debido a que se espera sea empleado para las pruebas de línea, que no requiere que este dispositivo pueda estar en constante mantenimiento, que aun cuando las condiciones de operación no sean las mas optimas se tendrá en cuenta que este equipo no deje de proporcionar lecturas adecuadas en cuanto al valor de la viscosidad del fluido en cuestión.

El cual nos preste grandes ventajas sobre sus competidores en el mercado, sea en el marco dinámico en sus prestaciones deberá ser mayor y mejor en cuanto a sus homólogos que son los que miden la viscosidad mediante el aumento y disminución de la demanda de corriente, empresas las cuales necesitan datos estimados en un rango aceptable en el campo o sea en la práctica y ejercicio diario de la caracterización de sustancias. [4]

### **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. Las pruebas se realizan en flujo laminar bajo condiciones de razón de corte, esfuerzo y temperatura definidos y medidos cuidadosamente.

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, la exactitud que se obtiene con este método no es tan alta como comúnmente se cree, aún para líquidos newtonianos. Los estándares de viscosidad son una serie de líquidos cuyas viscosidades han sido determinadas con mucha

precisión a una temperatura dada. Son por lo general, aceites minerales sin aditivos y polisobutenos, aunque se utilizan más los aceites de silicón.

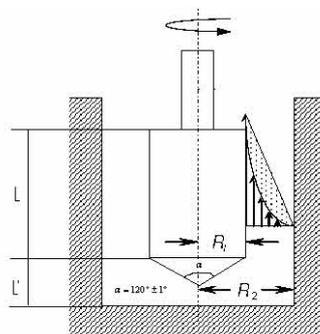
La precisión de los viscosímetros de cilindros coaxiales depende mucho del fluido que se esté probando, ya que este viscosímetro se emplea en materiales industriales complejos y no es posible indicar niveles de precisión cuando los líquidos de calibración y las muestras de trabajo no tienen propiedades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

Debido a los métodos utilizados en la calibración, así como a los fluidos de prueba, las medidas de viscosidad pueden ser relativas o absolutas. [4]

### 2.3 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 la habilidad del técnico que los opera.

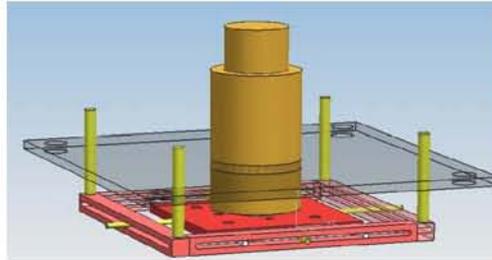
Los siguientes requerimientos mecánicos para la construcción de un viscosímetro de cilindros giratorios deben ser atendidos: a) simetría perfecta del cilindro rotante sobre su propio eje, b) alineación correcta del cilindro estacionario con respecto al giratorio; el eje de rotación de los dos cilindros debe ser idéntico y las superficies exactamente paralelas, c) estabilidad máxima del cilindro estacionario acoplado con la mínima fricción estática, se muestran en la siguiente figura.



**Fig.2.1 Relación de radios**

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, de acuerdo a algunos autores, se puede 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, se puede montar la unidad completa en una mesa corrediza en X-Y (Fig.2.2) para facilitar la alineación de los cilindros y ajustar por medio de tornillos la altura del soporte interior.

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 (Fig.2.1) Por esta razón, en algunos diseños, el cilindro interior esta completamente sumergido, de forma que pequeñas variaciones en la inmersión no afecten significativamente las lecturas.[2]



**Fig. 2.2 Unidad corrediza en X-Y**

## 2.4 Condiciones de estabilidad

Para reproducir el flujo de Couette donde el cilindro interior, también llamado rotor, gira con un número de revoluciones constante o variable 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.

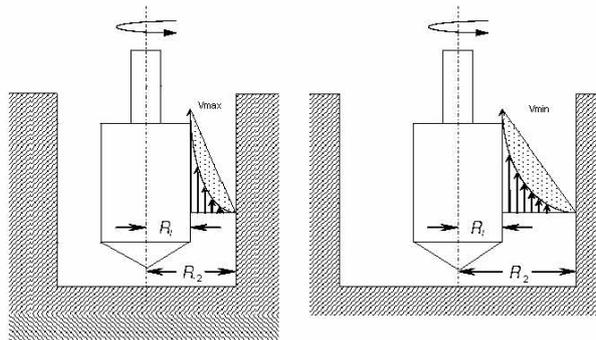
En los experimentos realizados por Couette el cilindro interior se mantiene fijo mientras que el exterior rota. Se observó que el momento de arrastre que el fluido ejercía sobre el cilindro interior, era proporcional a la velocidad de rotación del cilindro exterior, hasta llegar a un valor crítico donde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

En los experimentos hechos con este diseño encontró inestabilidad en el flujo aún a velocidades muy bajas. Utilizando un diseño muy similar se observó que al variar la velocidad existía una zona a velocidades altas donde siempre era inestable y una zona de transición a velocidades intermedias que dependía de la forma en la cual se variara la velocidad.

La zona de estabilidad se obtuvo aumentando primero la velocidad y disminuyéndola después.

En un trabajo posterior se realizó 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 300 rpm. Las vibraciones del aparato facilitan el progreso de la inestabilidad o hacen aparecer turbulencias en etapas tempranas del movimiento.

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. Otro factor que puede explicar la diferencia de resultados, es la dimensión de los cilindros utilizados. La longitud de los cilindros era poco mayor que su diámetro, en cambio en los utilizados para las pruebas de estabilidad, la longitud del mismo era aproximadamente 10 veces el diámetro del cilindro exterior.[2]



**Fig.2.2 Estabilidad por espesor de pared**

Entre los artículos revisados se encontró uno, que en la determinación de las viscosidades no trabaja ni con flujos laminares ni con turbulentos, sino con flujos de estructura celular. La viscosidad se determinará a partir de la medida de un flujo periódico. En este caso la diferencia de radios entre el cilindro interior y el cilindro exterior ( $R_2 - R_1$ ) también es crítica y se recomienda como valor óptimo  $\frac{1}{2}$ .

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.[5]

### 2.5 Corrección del efecto de borde

Otra consideración importante en la medida de la viscosidad, es el efecto de borde ya que este produce un aumento en la torca debido a la interacción entre las bases de los cilindros. 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 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 fluido de viscosidad conocida.

Para conseguir que el líquido de prueba sólo toque a los cilindros en las caras laterales se utiliza debajo del cilindro interior, un diafragma con aire de aproximadamente 13 mm 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.

Desafortunadamente hay poca evidencia que demuestre que se logró eliminar el efecto de borde por éste método. Los viscosímetros comerciales de AGFA, Haake y Brookfield atrapan aire bajo toda la base cóncava del cilindro interior, por lo que la tracción sobre esta puede considerarse despreciable. Con este método se logra eliminar el efecto de borde únicamente para aceites altamente viscosos. [3]

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); con esto lo que se logra 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.

Otra alternativa de corrección a este problema consiste en utilizar un cilindro interior sin base, es decir hueco, sin embargo se ha observado un efecto prácticamente igual al mencionado en los cilindros normales. Yendo un poco más allá, puede desarrollarse 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 cinco muestran que para hacer apreciable la corrección conviene utilizar un cilindro interior largo y de radio pequeño, con una diferencia mínima entre los radios del rotor y la copa. Esto concuerda con los datos encontrados en la literatura: se 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 la diferencia de radios sea mucho menor que cualquiera de los radios interior y exterior, 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 los efectos de borde no pueden eliminarse de una forma práctica a menos que  $(R_2 - R_1)/R_2$  sea pequeño; Para valores de  $h/(R_2 - R_1) \geq 20$  donde  $h$  es la longitud de la superficie cortante, los efectos de borde son pequeños y 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.

La configuración de los extremos del cilindro interior tiene un efecto definitivo sobre la medida de la torca. Hay un modelo en el que los extremos del cilindro rotor 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.

Así se trata de evitar el efecto de borde, haciendo que todas las superficies de los cilindros contribuyan homogéneamente en el par total. Para lograr esto, se mantiene constante

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 casi  $180^\circ$ . Con esta configuración, la razón de corte ejercida sobre el líquido que se encuentra en el fondo es esencialmente la misma que la lateral.

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 el par, se grafican las alturas contra los cocientes par/velocidad angular, obteniéndose una recta. La intersección en el eje x de esa recta, cuando el valor del par igual a cero, se obtiene un valor negativo de la altura 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 indica un cambio en el volumen de prueba o bien utilizando un volumen constante y sumergiendo el cilindro a diferentes profundidades. El resultado producido por las tres formas de medición es prácticamente el mismo.

Finalmente, la constante de calibración del viscosímetro puede incorporar el efecto de borde para fluidos newtonianos, 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 la densidad del fluido empleado, por lo que se recomienda utilizar varios líquidos con características similares a los fluidos de prueba.[6]

## **2.6 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.

El esfuerzo cortante 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 el par. 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 del 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-newtonianos 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 viscosímetros en el estudio de los fluidos no-newtonianos. [4]

### **2.7 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 velocidad, esto es estabilidad en el giro.

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

Al disminuir el radio de los cilindros 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 700 rpm, las dificultades de alineación y estabilidad se hacen presentes, 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 la mayoría de los casos. [4]

3 Estudio de mercado

3. Tipos de viscosímetros comerciales

Los viscosímetros pueden ser divididos en instrumentos de control de calidad y en instrumentos para investigación y desarrollo. Los instrumentos para control de calidad son aquellos que no poseen una geometría de corte controlada, lo cual significa que la velocidad de corte no está definida. Esto significa que la viscosidad medida no es la viscosidad absoluta, la cual es una propiedad intrínseca del material independiente del tipo de instrumento utilizado para la medición.

Los instrumentos de control de calidad son más robustos y simples y adecuados para el control de procesos industriales. Los instrumentos para investigación y desarrollo poseen una geometría de corte controlada lo cual significa que la velocidad de corte puede ser controlada y variada para obtener datos de viscosidad más exactos en un rango más amplio. Alguna de las geometrías comunes de este tipo se puede ver en la figura 3.1

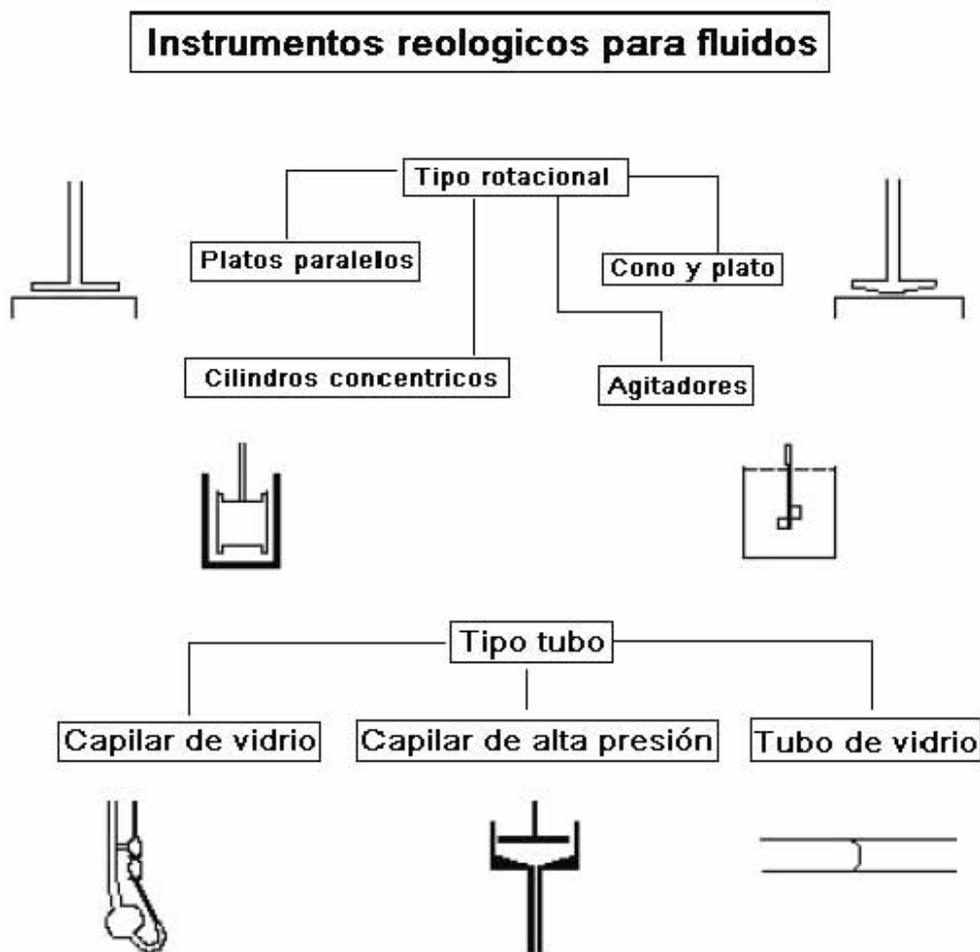


Fig. 3.1 Viscosímetros comerciales

El cono y plato es uno de los diseños más populares, pues este aplica una velocidad de corte uniforme a toda la muestra; caso muy diferente al de geometría de platos paralelos que presenta una variación de velocidad de corte en la dirección radial. Ambas geometrías pueden sufrir efectos de borde que distorsionan las mediciones de viscosidad. Sin embargo es importante destacar que esta distorsión es mucho más importante en el caso de la geometría cono y plato. Estos efectos de borde incluyen flujos secundarios en el espacio donde se ubica la muestra y movimientos de la muestra fuera del área de contacto donde se encuentra, como consecuencia de fuerzas centrífugas.

Este tipo de efectos constituye un problema real, especialmente en aquellos compuestos que pierden consistencia por efecto de la temperatura. Además el escaso espesor de muestra en el centro del cono puede ser una limitación. Por esta razón, el diseño de cono y plato se limita a valores bajos y medios de velocidad de corte ( $0.1 - 1000 \text{ seg}^{-1}$ ), mientras que el diseño de platos paralelos puede alcanzar velocidades de corte mayores. ( $20,000 - 30,000 \text{ seg}^{-1}$ ). Otra geometría común es la de cilindros concéntricos también conocida como de copa y aguja.

Si la distancia entre los dos cilindros concéntricos es pequeña ( $R_1/R_2 > 0.95$ ) la velocidad de corte será uniforme a través de toda la muestra. En este tipo de viscosímetros los efectos de fuerzas centrífugas son menos importantes que en el caso de la geometría del viscosímetro de cono y plato, el cual es más sensible a dichas fuerzas.

El intervalo de velocidad de corte cubierto por este tipo de equipos es muy amplio ( $0.01 - 100,000 \text{ seg}^{-1}$ ). Un tipo diferente de reómetro es el capilar. En este tipo de reómetros el fluido es forzado a pasar en un orificio demasiado pequeño. Uno de los problemas más frecuente de este tipo de viscosímetros es que la fuerza de corte aplicada no es uniforme y la medición de la viscosidad debe ser corregida por varios factores, como aquellos relacionados con el efecto de entrada y salida del capilar, deslizamiento en las paredes y una reología no newtoniana. Los reómetros capilares permiten alcanzar velocidades de corte extremadamente altas ( $100,000 - 2,000,000 \text{ seg}^{-1}$ ).

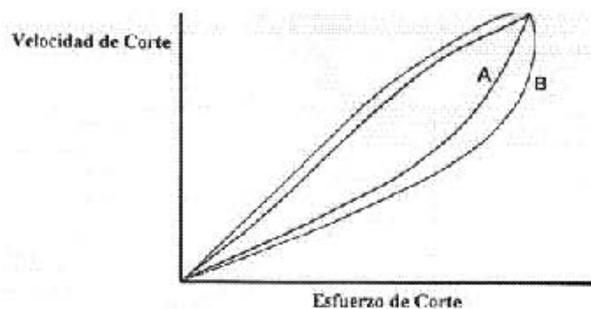
En el caso de las pinturas la formulación experimenta ó sufre una variada gama de velocidades de corte, desde aquellas que son extremadamente pequeñas (sinéresis, nivelación) hasta las relacionadas con los diferentes tipos de aplicación (pincel, rodillo, spray, etc.) Esto indica que difícilmente se pueda cubrir todo el intervalo de velocidades de corte utilizando sólo un reómetro.

**La tabla 3.1 muestra las características de los viscosímetros.**

Nombre	Geometría	Velocidad de Corte (seg-1)
Brookfield	Disco rotativo	Indefinida (0.1-.50)
Haake	Cono y plato	0.1-20,000
Physica	Platos paralelos	0.1-20,000
Ferranti-Shirley	Cilindros concéntricos	0.1-20,000
Rheometrics	Cilindros concéntricos	0.1-20,000
Hercules	Cilindros concéntricos	1,000-50,000
Anton parr	Capilar	1,000-2,000,000
ACAV	Capilar	1,000-2,000,000
Eklund	Capilar	1,000-2,000,000

El viscosímetro Brookfield es ampliamente utilizado para mediciones a bajas velocidades de corte. Este equipo es un clásico ejemplo de un reómetro para control de calidad. Es económico, fácil de usar pero no tiene una velocidad de corte definida. Por otro lado los fabricantes de Brookfield recomiendan el uso de muestras grandes (600 centímetros cúbicos) para minimizar el efecto de las paredes del recipiente donde se aloja el material. El efecto de las paredes será peor a altas velocidades de rotación (altas velocidades de corte). Esto significa que a 20 rpm. los datos obtenidos serán más sensibles al tamaño de la muestra que a 100 rpm. Por otro lado los factores de conversión utilizados para calcular la viscosidad no contemplan exactamente los efectos de borde de los diferentes *spindles* ó agujas. El tiempo al cual se hace la medición es también una fuente de variación. Todo esto indica que cuando usamos Brookfield deberíamos especificar el tamaño de la muestra, el número de aguja a utilizar y el tiempo al cual se debe hacer la medición, además de por supuesto las rpm. En el caso de utilizar un viscosímetro Hercules (cilindros concéntricos) para medir viscosidad a alta velocidad de corte la misma se encuentra perfectamente definida, lo cual constituye una diferencia importante con el Brookfield. [5], [6] y [7]

La figura 3.2 muestra reogramas Hércules para dos formulaciones de distintas soluciones las cuales tienen la misma viscosidad a alta velocidad de corte ( $46,000 \text{ seg}^{-1}$ ). Sin embargo, puede notarse que la curva para la formulación B da un ciclo mucho más amplio que el mostrado por la formulación A y que además, la formulación B muestra mayor viscosidad a baja velocidad de corte. El mayor ciclo para la formulación B está asociado a una disminución de la viscosidad como consecuencia de una mayor sensibilidad del compuesto B al aumento de temperatura como consecuencia del esfuerzo de corte.



**Fig. 3.2 Esfuerzo vs. Velocidad de corte**

En la figura podemos observar como datos de diferentes reómetros obtenidos sobre una misma pintura a diferentes velocidades de corte pueden ser combinados para dar una curva de flujo única.

La velocidad de corte varía entre  $0,5$  y  $1.000.000 \text{ seg}^{-1}$ . Aquí, el viscosímetro Brookfield fue usado para baja velocidad de corte, el viscosímetro Haake para velocidades de corte medias y el viscosímetro Hercules para velocidades de corte altas. Finalmente un viscosímetro capilar Anton Parr se usó para velocidades de corte extremadamente altas. La figura muestra una solución con muy alta viscosidad a baja velocidad de corte, lo cual indica una pobre nivelación y un comportamiento cercano al Newtoniano a altas velocidades de corte. [7]

3.2 Ventajas y desventajas de los distintos viscosímetros

- Capilares de vidrio operados con gravedad, son los adecuados para fluidos newtonianos, dado que la tasa de deformación varia durante la descarga
- Sistemas de cono y placa se limitan a pequeños esfuerzos, pero los cálculos son simples.
- Viscosímetros de tubo y de mezcla pueden manejar partículas más grandes que el de cono y placa o placas paralelas.
- Problemas de resbalamiento y degradación pueden ser minimizados con un viscosímetro de mezcla.
- Viscosímetro de tubo puede ser construido a nivel de planta piloto o en producción.
- Viscosímetro de cilindros coaxiales cubren un alto rango de medición de la viscosidad, son confiables trabajan con fluidos newtonianos y no newtonianos.



Fig.3.3 Viscosímetros comerciales

## **4.1 Viscosimetría**

El término reometría engloba a un gran número de técnicas de análisis no destructivas que dan información de los distintos tipos de niveles estructurales de un material y de la influencia que tiene la historia anterior de flujo sobre esta estructura interna.

Un subconjunto de la reometría es la viscosimetría. Con ella se estudia la relación de dependencia de una fuerza aplicada (esfuerzo de corte) de acuerdo con un gradiente de deformación (gradiente de velocidad).

Los viscosímetros se denominan absolutos cuando la medición de la viscosidad se basa en la medida de las unidades físicas básicas de fuerza (N), longitud (m) y tiempo (s).

## **4.2 Condiciones para mediciones absolutas en la viscosidad**

Las sustancias a ensayar deben presentar una corriente de flujo que sea calculable matemáticamente. El esfuerzo de corte y/o el gradiente de velocidad deben ser calculables exactamente en las paredes del sistema de medición o en puntos representativos dentro de una ranura de medición.

Las condiciones de ensayo elegidas deben de tener en consideración las consideraciones de contorno mencionadas.

La ventaja más importante de los viscosímetros absolutos es el hecho de que el resultado es independiente del tipo especial o del fabricante del viscosímetro empleado y los valores de los resultados obtenidos pueden compararse entre distintos laboratorios, etc.

## **4.3 Viscosímetros de rotación**

### **4.3.1 Tipos de viscosímetros de rotación**

El principio del viscosímetro de rotación, con sistemas de sensores de cilindros coaxiales, cono-plato y platos paralelos, permite la utilización de estos viscosímetros absolutos en múltiples aplicaciones.

El sistema de medición por cilindros coaxiales de un viscosímetro de rotación corresponde al modelo de placas paralelas de Newton, en el que las placas han sido curvadas formando así un cilindro interior y otro exterior. A un líquido que se encuentra en una ranura anular creada de esta manera puede aplicarse un esfuerzo de corte definido como el modelo de placas. Estas condiciones conducen a un flujo laminar y permiten un tratamiento matemático del problema de medición.

## **4.5 Sistemas**

Preselección del esfuerzo de corte (controlled stress o CS-rheometer)

Al eje del cilindro interior o exterior se aplica un momento de giro definido preseleccionado y con él esfuerzo de corte definido, mientras el cilindro exterior permanece en reposo. La resistencia originada por la viscosidad del líquido solo permite un gradiente de velocidad determinado, es decir, un número de revoluciones característico, el cual se mide.

Preselección del gradiente de velocidad (controlled rate o CR-rheometer)

El cilindro interior o el exterior rotan con un número de revoluciones definido. La resistencia condicionada por la viscosidad del líquido sometido a una fuerza conduce un esfuerzo de corte o aun momento de giro efectivo en la pared del cilindro interior, el cual se mide. La mayoría de los viscosímetros que se ofrecen en el mercado se basan en este principio. De este tipo de viscosímetros existen dos versiones:

#### **4.5.1 Sistema Searle**

El cilindro interior, también llamado rotor, gira con un número de revoluciones constante o variable, según el programa elegido, el cilindro exterior, o vaso de medición, permanece en reposo.

El cilindro interior, al girar, provoca el fluir del líquido que se encuentra en la ranura anular entre los dos cilindros. La resistencia del líquido a la fuerza es proporcional al momento de giro dependiente de la viscosidad. Entre el motor de accionamiento y el eje del cilindro interior está colocado un elemento de medición para este momento de giro (normalmente un resorte de acero que se torsiona). La torsión del resorte es una medida directa de la viscosidad de la sustancia a estudiar.

La mayoría de los viscosímetros del mercado son de tipo Searle. Un motivo para ello es que el control exacto de la temperatura, necesario para mediciones de viscosidad, es más fácil cuando el cilindro exterior no gira. De esta forma, el cilindro se puede encamisar y controlar la temperatura mediante un circuito de líquido externo con un termostato de circulación.

Los viscosímetros Searle pueden abarcar rangos muy amplios de viscosidad, pero tiene limitaciones a la hora de medir líquidos de viscosidad muy bajas, cuando deben emplearse esfuerzos de cizalla elevados. Las fuerzas efectivas en los elementos de volumen provocan la aparición de corrientes no laminares (remolinos de Taylor) y, finalmente, una turbulencia completa.

#### **4.5.2 Sistema Couette**

El cilindro exterior gira con un número de revoluciones definido e impulsa a fluir al líquido en la ranura. La resistencia del líquido al esfuerzo cortante, transmite al cilindro interior un momento de giro proporcional a la viscosidad. Este cilindro giraría como el cilindro exterior si no se le impidiese hacerlo. El momento de giro en el cilindro interior se mide, por ejemplo, determinando la fuerza contraria de compensación que es necesaria para mantenerlo fijo en su posición de reposo.

Los viscosímetros Couette no permiten la formación de remolinos y turbulencias como consecuencia de la influencia de fuerzas centrifugas sobre elementos de volumen del líquido. Como de este modo puede garantizarse una corriente laminar, incluso a un alto número de revoluciones y para líquidos de baja viscosidad, estos viscosímetros amplían el campo de medición de los Searle.

Junto a los sistemas de cilindros coaxiales, están ampliamente extendidos los sistemas de medición cono-plato. Otro sistema menos extendido es el de los platos paralelos.

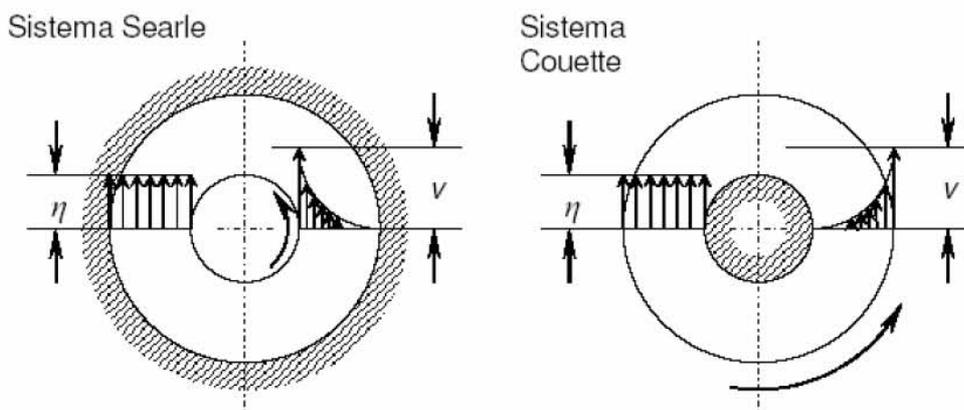


Fig. 4.1. Perfiles de velocidad de flujo y de viscosidad en sistemas Searle y Couette.

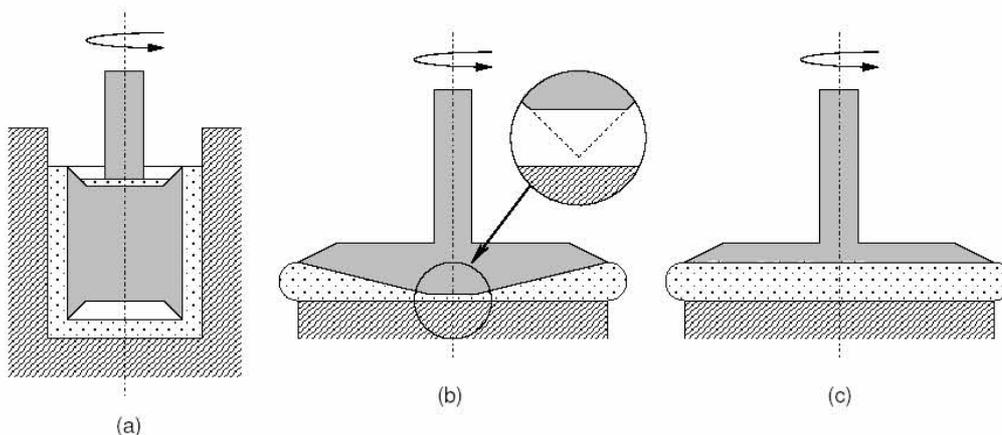


Fig. 4.2. Cilindros coaxiales (a), cono-plato (b) y platos paralelos(c).

#### 4.6 Tipos de sistemas de medición por cilindros coaxiales

La valoración matemática del resultado de la medición de un viscosímetro de rotación exige que el momento de giro solamente se origine en la resistencia del volumen del líquido contenido en la ranura del sistema de cilindros coaxiales. Todos los cilindros poseen, no obstante, no solo una superficie cilíndrica, si no también una superficie inferior y una superior. Al aplicar un esfuerzo de corte a un líquido entre estas dos superficies terminales que sean grandes en relación al momento de giro de la ranura, son el motivo de errores apreciables en la determinación del esfuerzo de corte efectivo y con ello en la determinación de la viscosidad. La elección de la geometría adecuada para los sistemas de cilindros coaxiales puede minimizar el error de medición provocado por las superficies terminales.

### 4.6.1 Sistemas de medición con ranuras muy estrechas

El influjo de ambas superficies terminales sobre el momento angular medido es despreciable cuando la anchura de la ranura angular es muy pequeña ( $R_a - R_i = 0,003 - 0,3$  mm) o la relación de radios toma valores  $R_a/R_i = 1,003 - 1,03$  y la distancia desde el rotor al fondo del vaso de medición es por lo menos igual al radio del rotor  $R_i$ . En la fig. 4.3 se muestra la importancia de la relación de radios. La zona punteada representa el tamaño del error al determinar el gradiente de velocidad. Como se puede observar a mayor relación de radios, mayor error.

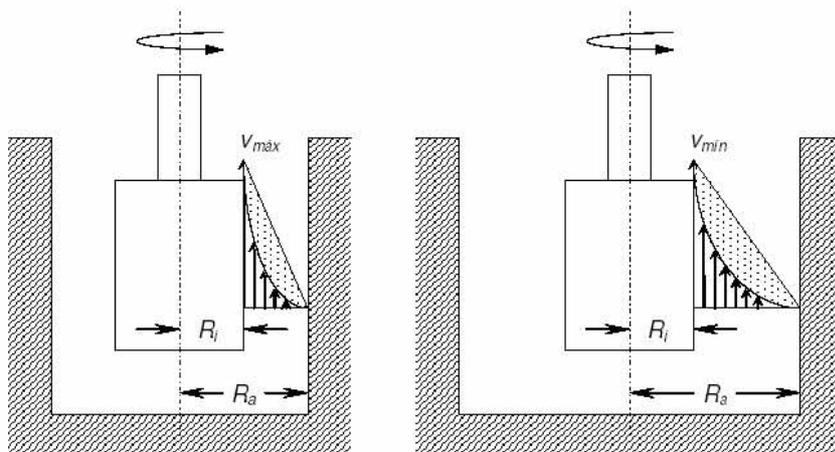


Fig. 4.3. Influencia de la relación de radios sobre el perfil de velocidades en un sistema de cilindros coaxiales tipo Searle.

### 4.6.2 Sistema de medición de ranura doble

El rotor tiene forma de campana. El vaso de medición se compone del cilindro exterior y de un cuerpo cilíndrico interior, que forman juntos una ranura anular en la que se introduce el rotor. Se obtienen así dos ranuras anulares, en el lado interior y en el lado exterior del rotor. La superficie Terminal inferior del rotor es pequeña en relación con las superficies exterior e interior y por ello es también insignificante el influjo de las caras terminales. La superficie campaniforme superior del rotor gira en el aire y con ello se evita su influjo. Este sistema de medición corresponde a la norma DIN 54 453.

### 4.6.3 Sistemas de medición estándar

Las superficies inferior y superior del cilindro interior están excavadas. Este sistema de medición corresponde a la norma DIN 53 018.

En la cavidad inferior del rotor queda encerrado aire cuando se la sumerge en el vaso lleno de sustancia. La burbuja de aire encerrada cubre aproximadamente el 90% de la superficie Terminal inferior. Cuando el rotor gira, el cojín de aire evita el cizallado de la sustancia situada debajo del rotor y evita con ello un momento de giro adicional. Solamente el delgado borde que se forma al excavar la cara terminal tiene una pequeña aportación al momento de giro. Aproximadamente la mitad del volumen de prueba necesario se encuentra por debajo del rotor y allí no es sometido al esfuerzo de corte.

La superficie en la cual termina el rotor está igualmente excavada. A este hueco puede rebosar la sustancia sobrante el ser llenado el sistema de medición, para que así el borde superior del nivel líquido en la ranura se iguale al borde superior del rotor. La sustancia sobrante que se encuentra en el hueco superior del rotor no es cizallada. El rotor solo toca aire en su superficie superior y así esta superficie no puede originar ningún aporte al momento angular medido.

#### **4.6.4 Sistema de medición según Money-Ewart**

Combina el sistema de medición de cilindros coaxiales y el de doble cono. En dependencia de la ejecución espacial, la ranura del doble cono puede representar aproximadamente al 20% del momento angular medido y la ranura anular del sistema de cilindros coaxiales superior aproximadamente el 80%.

Mediante la creación de un campo de flujo geoméricamente determinado en una ranura de doble cono bajo el cilindro interior, es posible el cálculo de la aportación de la superficie inferior al momento angular medido. Este modelo prevé un ángulo tal entre el cono del rotor y el vaso de medición, que el esfuerzo de corte medio en la ranura anular entre los cilindros interior y exterior.

Esta construcción implica que cada elemento de volumen en el sistema tiene su aportación a la medición, es decir, que el volumen total del que se dispone es cizallado. Esto es importante cuando solo se dispone de pocos centímetros cúbicos de líquido para una medición de viscosidad. En comparación, los sistemas de medición estándar precisan un gran volumen de muestra. Este sistema corresponde a la norma DIN 53018.

#### **4.6.5 Sistema de medición según DIN 53 019/ ISO 3219**

Estos estandarizan, entre otros, la relación de radios, la longitud del rotor en relación con el radio del mismo y la distancia entre la punta cónica del rotor y el fondo del vaso de medición. La unificación de estas sustancias significa que las aportaciones al error por la no linealidad del gradiente de velocidad a través de la ranura y por el efecto de las caras terminales, tanto para pequeños como para grandes sistemas de cilindros coaxiales, se mantienen constantes proporcionalmente y comparables entre sí.

Los sistemas de medición según DIN 53 019/ ISO 3219 son el resultado de un compromiso entre exigencias reológicas y su aplicabilidad a un amplio espectro de sustancias, tanto en campos de viscosidad bajos como altos. Estos sistemas de medición con geometría normalizada disminuyen las diferencias, en los resultados de medición que se presentan a menudo cuando se mide un material en viscosímetros absolutos de diferentes fabricantes. Estas diferencias se deben con frecuencia a las variadas formas geométricas de los sistemas de medición y en especial de las superficies terminales.

Todos estos tipos de sistemas de medición se muestran en la fig. 1.8

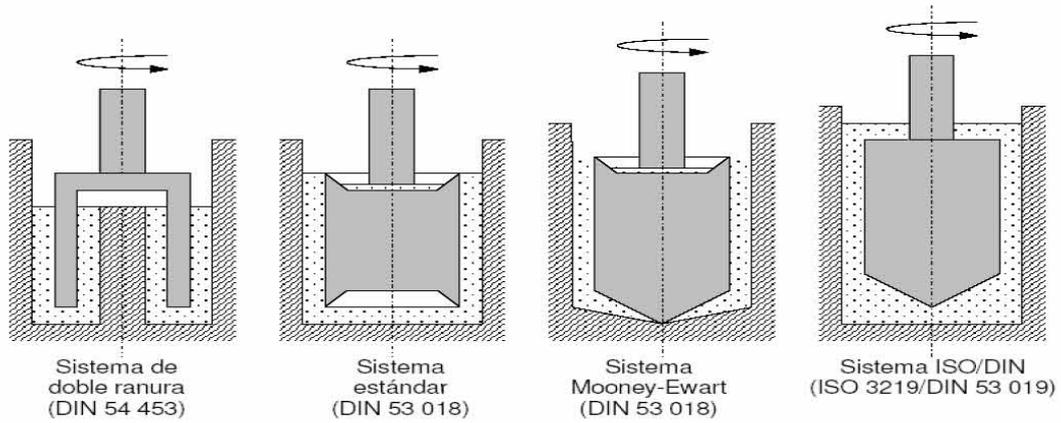


Fig.4.4 Diferentes sistemas de medición por cilindros coaxiales.  
Flujo laminar entre cilindros rotatorios

### 5.1 Funcionamiento del prototipo

Se coloca el fluido bajo prueba dentro de un cilindro o copa, dicho cilindro se encuentra acoplado a un rodamiento rígido de bolas, se introduce un segundo cilindro o rotor, dentro de la copa, de tal manera que el fluido quede dentro de una región anular pequeña entre los cilindros pueda transmitir el par generado por un motor, el cual lo hace girar a una velocidad angular constante, el cilindro presenta un movimiento debido a la viscosidad del fluido, la cual se transmite a una celda de carga por medio de un brazo de palanca, una característica resaltante del viscosímetro es que para aumentar el rango de medición, la celda de carga se monta sobre un mecanismo husillo-tuerca para variar de manera lineal el brazo de palanca y en consecuencia la fuerza medida por la celda.

Para llevar a cabo dicho sistema se toman en cuenta las restricciones que nos supone la norma en la cual nos restringe en cuanto a las dimensiones y relaciones existente entre el rotor y la copa, como ejemplo la relación entre el diámetro del cilindro exterior y el interior, otra restricción es la terminación del rotor y el ángulo en el cual deben estar sus geometrías finalmente , así como la distancia entre la base de la copa con la punta del cilindro interior terminado en cono, la norma alemana e internacional se menciono anteriormente DIN 53 019/ ISO 3219 tomadas del manual de usuario del viscosímetro Haake. [7]

#### 5.1.2 Fundamento teórico

Flujo entre las paredes laterales de dos cilindros concéntricos

De acuerdo con los tratamientos existentes en la literatura se obtiene a continuación las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible, en el caso en el que el fluido se encuentra en el espacio entre dos cilindros coaxiales que rotan con velocidades  $\omega_1$  y  $\omega_2$ . En esta ocasión no se consideran las bases de los cilindros que requieren de una corrección que se tratara mas adelante.

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

$$V_z = V_r = 0 \quad V_\theta = V_\theta(r) \quad \rho = \rho(r) \quad (5.1)$$

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

$$\sigma_{ik} = -\rho\delta_{ij} + \eta \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) \quad (5.2)$$

Que expresando en coordenadas cilíndricas y utilizando la relación (5.1) se reduce a:

$$\sigma_{r\theta} = \eta \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \right) \quad (5.3)$$

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

$$\rho \frac{v_\theta^2}{r} = \frac{\partial p}{\partial r} \quad (\text{Ec. 5.4}) \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} = 0 \quad (5.5)$$

De donde se obtiene el valor de  $v_\theta$  integrando

$$v_\theta = \frac{c_1 r}{2} + \frac{c_2}{r} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Las constantes se obtienen imponiendo las condiciones de frontera

$$\begin{aligned} v_\theta &= 0 & r &= R \\ v_\theta &= kR\Omega \text{int} & \text{Para } r &= kR \end{aligned}$$

Por lo que finalmente

$$v_\theta = \Omega \text{int } kR \left( \frac{\frac{R}{r} - \frac{r}{R}}{\frac{1}{k} - k} \right) \quad (5.7)$$

La razón de corte  $\dot{\gamma} = dv/dr$  se obtiene de las ecuaciones 5.6 y 5.7

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = \frac{d}{dr} \left( \frac{c_1 r}{2} + \frac{c_2}{r} \right) \quad (5.8)$$

Utilizando las ecuaciones 5.3, 5.6 y 5.7 se obtiene el esfuerzo cortante

$$\sigma_{r\theta} = -\mu \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \frac{v_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] \quad (5.9)$$

Solo una fuerza se resiste a la rotación de cilindro interior (F) esta es una fuerza de corte corresponde a la componente  $r\theta$  de esfuerzos viscosos, la cual esta basada en la ley

general de la viscosidad de Newton donde  $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$ .

$$\sigma_{r\theta} = \frac{2\mu k \Omega \text{int}}{\left(\frac{1}{k} - 1\right)} \left(\frac{R}{r}\right)^2 \quad (5.9a)$$

Para determinar el par de movimiento será el producto del arrastre del flujo, la superficie del cilindro y el brazo de palanca

$$T = \sigma_{r\theta} Ar \quad (5.10)$$

donde  $A$  es el área de la pared del cilindro en contacto con el fluido. Para determinar el par de torsión en ambos cilindros se evalúa la ecuación (5.9) de la siguiente manera:

$$T_{interior} = -\sigma_{r\theta} \Big|_{r=kR} 2\pi kRL_2 * kR \quad (5.10a)$$

$$T_{exterior} = -\sigma_{r\theta} \Big|_{r=R} 2\pi kRL_1 * R \quad (5.10b)$$

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

$$T_{exterior} = -4\mu\Omega_{int} \pi R^2 L \left( \frac{k^2}{1-k^2} \right) \quad (5.11)$$

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 (5.8 y 5.9). Por otro lado, cuando los radios son aproximadamente iguales, el esfuerzo cortante es prácticamente constante en el anillo de fluido que esta entre los cilindros. [9]

Al definir la viscosidad en el capítulo anterior se empleo 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 5.11.

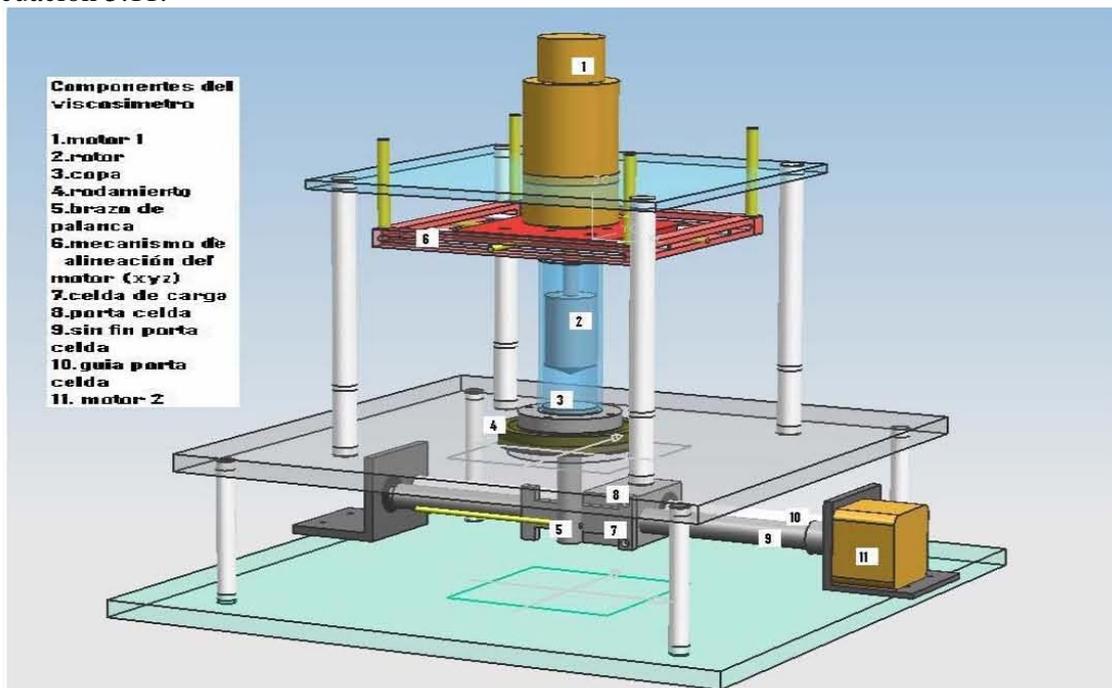


Fig. 5.1. Diseño conceptual del viscosímetro de cilindros coaxiales

5.2 Sistema de tres grados de libertad (sistema de posición del motor DC.)

En la siguiente figura mostramos el dispositivo denominado “sistema de tres grados de libertad”, el cual nos permitirá desplazar el motor principal en tres direcciones diferentes mediante unas guías y tornillos posicionados en diferentes partes del dispositivo, haciendo de esta forma un dispositivo sencillo y practico que nos permita la alineación correcta de el motor acoplado al rotor para lograr la alineación de estos componentes al eje de rotación de todo el dispositivo lo que nos garantiza que se mantendrá la distancia requerida para que el momento transmitido en el fluido y no variara en función del ángulo o tendremos variaciones de distancia en la dirección radial que en este caso será el eje de giro un eje paralelo al eje “Z”.

- 1. Motor
- 2. Placa superior
- 3. Tornillos de desplazamiento "z"
- 4. Guías de desplazamiento "y"
- 5. Tornillo de desplazamiento en "y"
- 6. Tornillos guías desplazamiento "x"
- 7. Rieles movimiento "x,y"

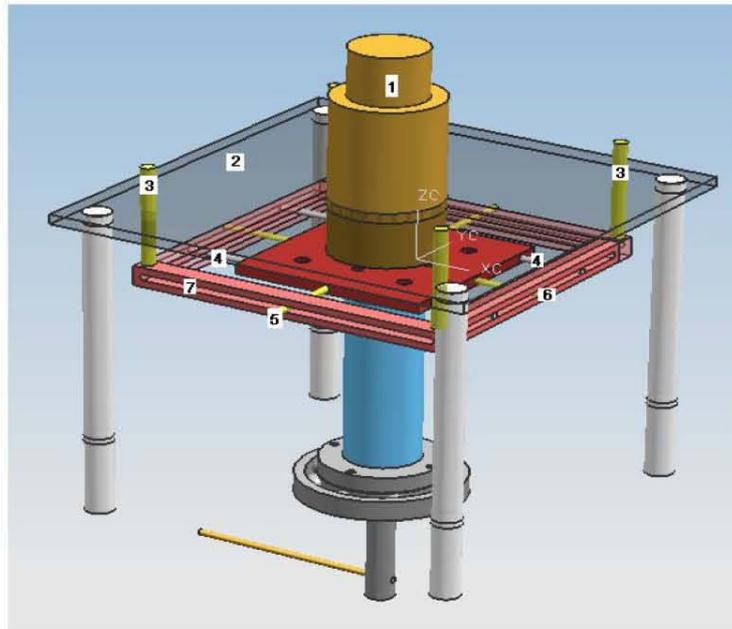


Fig.5.2 Sistema de tres grados de libertad

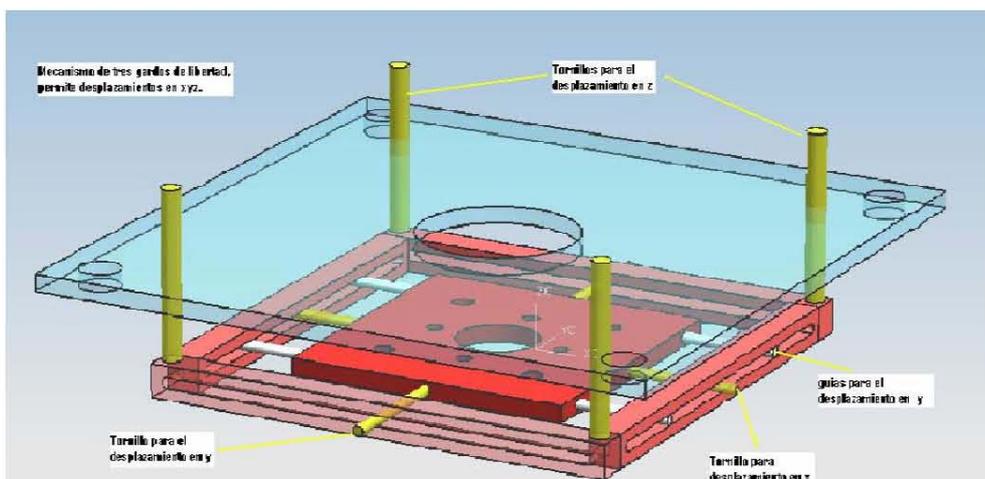
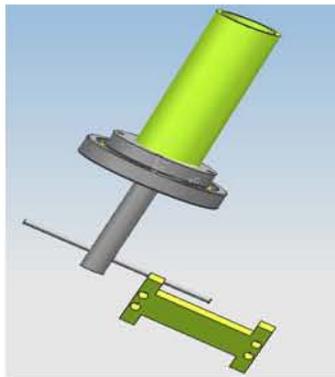


Fig.5.3 Movimientos en “x,y y z”

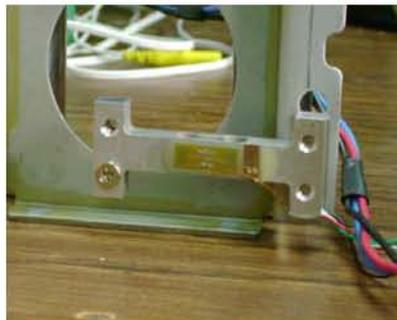
### 5.3 Componentes centrales del viscosímetro

En este apartado mostramos a todos los componentes que entran en juego al momento de transmitir el momento generado por el par del motor hacia el fluido, se ve claramente la copa como esta dispuesta o acoplada a una base que se encuentra acoplada al rodamiento y esta a su vez tiene acoplado un eje el cual porta un brazo de palanca que es en nuestro sistema el que transmite el par generado hacia la celda de carga que finalmente será el dispositivo en la cual mediremos o trataremos de censar, la fuerza con la cual es impactada y registraremos su deformación mediante las ecuaciones descritas al inicio de este capítulo las cuales nos ayudaran a obtener la viscosidad del fluido en cuestión.



**Fig. 5.4. Componentes centrales**

La celda de carga es un elemento crucial de nuestro instrumento de medición, por lo que debe de asegurarse una máxima resolución y precisión en la instrumentación de la misma, se eligió una celda con un rango limitado de medición de 0 a 500 [g] gracias al sistema motor-tuerca-husillo del brazo de palanca, la celda se muestra a continuación:



**Fig.5.5. Celda de carga**

El acondicionamiento de señal de la celda de carga es un circuito que consta de un amplificador de instrumentación como primera etapa, esto con el fin de reducir el ruido en modo común y sólo amplificar la señal diferencial de la celda, la cual entrega 1mV por cada gramo de peso.

5.3.1 Motor de DC

Esta máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, par y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos.

La selección de un motor de corriente continua se debe al hecho de que necesitamos mantener a una sola velocidad nuestro rotor sin importar que la viscosidad del fluido varíe, lo que nos significara un aumento en la demanda de corriente y no afectaremos la velocidad. [10]

**WITH HIGH ACCURACY ENCODER "HA" TYPE**  
**500 to 1000 pulses/rev**

■ **DIMENSIONS** in mm (inches)

Type	L	L1
UGFMED-B5T20E	70.5 (2.78)	43.5 (1.72)
UGFMED-B5S20E	81.5 (3.21)	54.5 (2.15)
UGFMED-B5M20E	92.0 (3.62)	65.0 (2.56)
UGFMED-B5L20E	102.0 (4.02)	75.0 (2.95)

■ **OPTICAL ENCODER CHARACTERISTIC TABLES**

Type	P/rev
UTPCI-050HA	500
UTOFI-060HA	600
UTOFI-080HA	800
UTOFI-100HA	1000

Input Power Requirement	+5VDC ± 5% 100mA Max.
Waveform	Square Wave, 2 Channel
Output Circuit	TTL Compatible
Flutter	360° ± 9° (5% p-p Max.)
Pulse Duty Cycle	180° ± 30° (50 ± 8.3%)
Phase Offset	90° ± 36° (25 ± 11%)
Frequency Range	20kHz

● **Signal Waveform**

CCW rotation when viewed from shaft drive end

● **Encoder Lead**

Input	+5VDC	RED
	0V	BLACK
Output	Channel A	WHITE
	Channel B	GREEN
	Shield	—

**Notes:**

- The relation of A and B channels to the motor rotating direction must correctly be set. If not so, overtravel may occur.
- Avoid vibration or shock on the encoder or its output shaft.
- Do not perform the insulation test or measure the insulation resistance.

5.3.2 Rotor

**Cilindro interior (rotor)**

El rotor es un sólido de una sola pieza, fabricado en acero inoxidable. El cilindro tiene una longitud total de 70.2 [mm] y un diámetro igual a 26.8 [mm], la punta cónica cumple con un ángulo de 120°. La pared cilíndrica es de 10.2 de altura. El eje del rotor tiene una longitud de 30 [mm] y un diámetro de 8.04 [mm], el eje esta roscado en su parte superior para permitir el acoplamiento con el motor.[5]

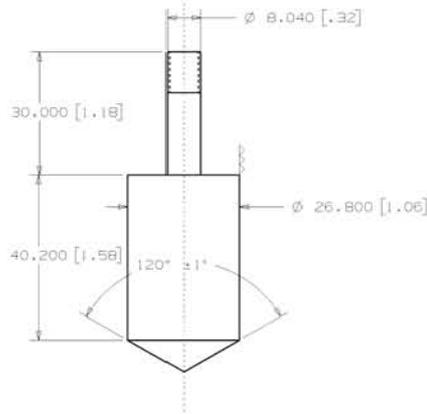


Fig. 5.6 Cilindro interior (rotor)

5.3.3 Copa

**Cilindro exterior (copa)**

La copa es fabricada en acero inoxidable y en dos piezas para garantizar una superficie plana en el fondo de la misma, el ajuste entre piezas es el necesario para evitar deslizamientos y fugas de fluidos en su ensamble. Tiene un diámetro interior de 29.07 [mm] y un espesor de pared de 2.5 [mm]. La altura de la copa es de 87.2 [mm] y la base es de un diámetro exterior igual a 51.43 [mm]. [5]

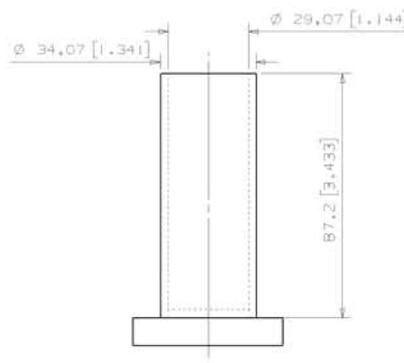


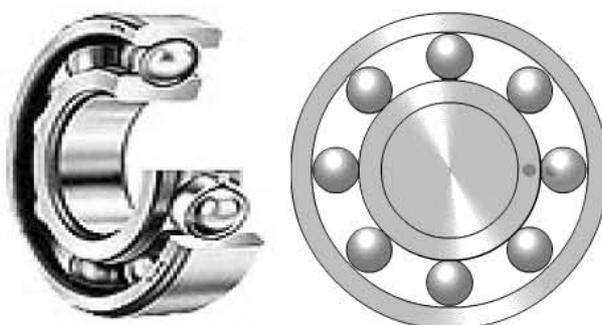
Fig.5.7. Cilindro exterior (copa)

**5.3.4 Rodamiento mecánico**

Rodamiento rígido de bolas

Son aquellos que no aceptan desalineamientos del eje. Ante un desalineamiento se generan cargas que pueden dañar definitivamente el rodamiento.

En nuestro caso seleccionamos el rodamiento rígido de bolas, de una hilera porque creemos que es el que nos da mejores prestaciones y se apega a las características requeridas para nuestro trabajo, lo cual es tener el mínimo coeficiente de fricción dinámico, que en el momento de transmitir el par presente la menor resistencia posible para que no provoque una pérdida significativa en el par transmitido desde el motor al líquido y este a su vez lo haga al brazo de palanca, Para que se pueda llevar a cabo una medida fiable y nos permita calcular el par final.



**Fig.5.8. Rodamiento rígido de bolas - SKF**

**Mantenimiento**

Para que un rodamiento funcione de un modo fiable, es indispensable que esté adecuadamente lubricado con el objeto de evitar el contacto metálico directo entre los elementos rodantes, los caminos de rodadura y las jaulas, evitando también el desgaste y protegiendo las superficies del rodamiento contra la corrosión. Por tanto, la elección del lubricante y el método de lubricación adecuado, así como un correcto mantenimiento, son cuestiones de gran importancia. [11]

**Fricción de los cojinetes**

Los coeficientes de fricción por deslizamiento de acero en ceso son de 0.40 a 0.80 y con grasa del orden de 0.005 a 0.20. Estos son valores de un manual y se incluyen para comparación.

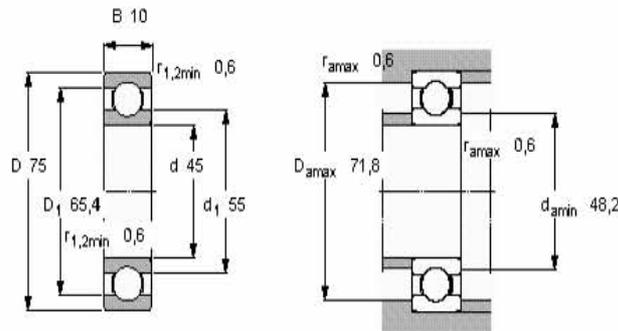
**Tabla 5.1. Coeficientes de fricción**

Tipo de cojinete	Coefficiente de Fricción
Cojinete de bolas radiales de autoalineamiento	0.0010-0.0020
Cojinete de empuje de cilindros	0.0011-0.0015
Cojinete de empuje de bolas	0.0013-0.0015
Cojinete de bolas radiales de hilera sencilla	0.0015-0.0020
Cojinete de rodillos esféricos	0.0018-0.0020
Cojinete de redilos cónicos	0.0018-0.0020

Selección de rodamiento

Tabla 5.2. Características geométricas rodamiento

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga $P_u$	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	$C_0$		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
45	75	10	16,5	10,8	0,52	20000	12000	0,17	16009 *



Factores de cálculo  
 $k_r$  0,02  
 $f_0$  14

Calculo del par de rozamiento, pérdida de potencia

Par de rozamiento - pérdida de potencia

Rodamiento	16009	<b>Par de rozamiento rodante</b>	$\Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr}$ , Nmm	6.29
d, mm	45	<b>Par de rozamiento deslizante</b>	$M_{sl}$ , Nmm	0.453
D, mm	75	<b>Par de rozamiento de las obturaciones</b>	$M_{seal}$ , Nmm	0
$d_m$ , mm	60	<b>Par de rozamiento de las pérdidas de energía debidas a la agitación del aceite</b>	$M_{drag}$ , Nmm	0
n, rpm	350 promedio	<b>Par de rozamiento total</b>	M, Nmm	6.74
$v$ , mm <sup>2</sup> /s	20	<b>Pérdida de potencia</b>	$N_R$ , W	0.247
$F_r$ , N	0	<b>Par de arranque</b>	$M_{start}$ , Nmm	0.573
$F_a$ , N	20			
$\mu_{EHL}$	0.05			

Tipo de lubricación  
 Grasa

**Estimación del momento de fricción**

Bajo determinadas condiciones

- carga del rodamiento  $P \approx 0,1 C$
- buena lubricación
- condiciones de funcionamiento normales

es posible calcular el momento de fricción con una precisión suficiente, usando un coeficiente de fricción constante  $\mu$  en la siguiente ecuación

$$M = 0,5 \mu P d$$

donde

- $M =$  momento de fricción, Nmm
- $\mu =$  coeficiente de fricción constante del rodamiento
- $P =$  carga dinámica equivalente, N
- $D =$  diámetro del agujero del rodamiento, mm

**Tabla 1: Coeficiente de fricción constante  $\mu$  para rodamientos sin obturaciones**

Tipo de rodamiento	Coeficiente de fricción de fricción $\mu$
Rodamientos rígidos de bolas	0,0015

Calculo del momento de fricción para el rodamiento 16009- SKF

$$M = 0,5 \mu P d$$

$$\mu = 0.0015$$

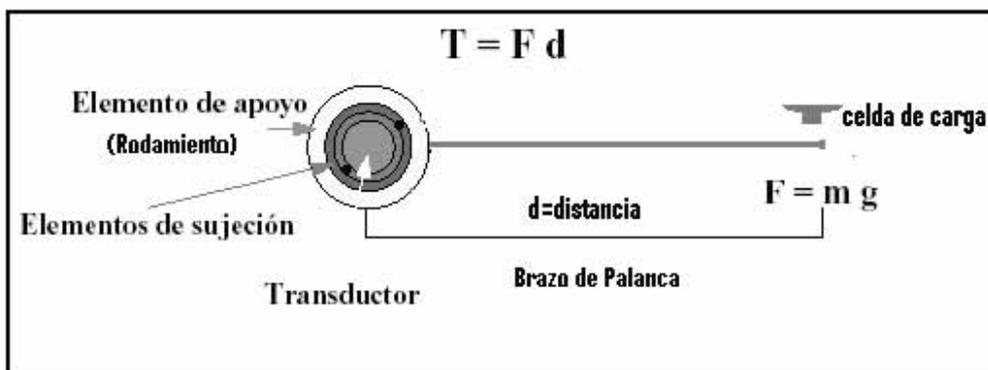
$$d = 45 \text{ [mm]}$$

$$P = (9.81 \text{ [m/s}^2\text{]})(2\text{[kg]})= 19.62 \text{ [N]}$$

$$M = 0.6621 \text{ [N mm]}$$

**5.3.5 Brazo de palanca**

Otra característica singular de nuestro viscosímetro es el hecho de poseer un brazo de palanca el cual esta acoplado a la base de la copa, para impactar a una celda de carga que se encuentra sobre un mecanismo de posicionamiento lineal, el cual lo mantiene a una cierta distancia, por lo cual nuestro viscosímetro es capaz de censar en un rango amplio de viscosidad de varios fluidos.

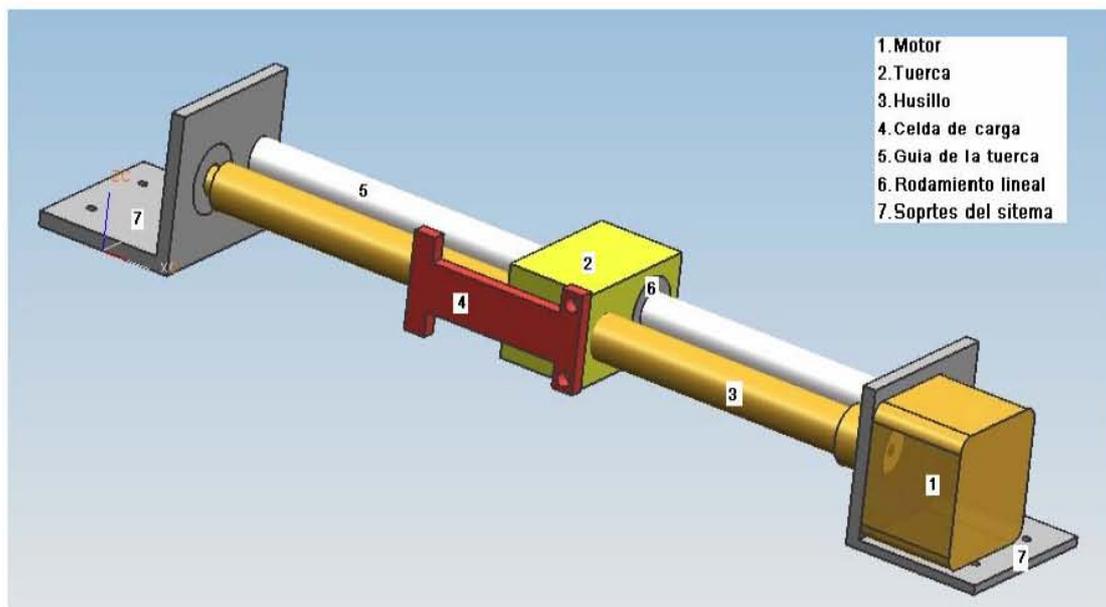


**Fig.5. 9. Sistema primario medición del par**

#### 5.4 Sistema de posición de la celda de carga (motor-husillo-tuerca)

##### Ajuste del brazo de palanca para una medición multi-rango.

Se utiliza un motor a pasos para mover la celda de carga a lo largo del riel paralelo al brazo de palanca, el motivo por el cual se opta por un motor a pasos es debido a que se puede tener un control a lazo abierto, ahorrando en costosos sensores lineales. La única condición que hay que cumplir es que al iniciar la medición, el sistema deberá enviar a la celda a una posición inicial llamada HOME y de ahí contar los pasos para ubicar a la celda en la posición deseada, esto quiere decir que hay que garantizar que no se pierda ningún paso en el transcurso, esto es fácil de lograr con la apropiada electrónica del controlador del motor a pasos.



**Fig. 5.10. Sistema motor-husillo-tuerca permite el ajuste de la celda de carga**

El mecanismo de husillo-tuerca está constituido por un tornillo (husillo) que al girar produce el desplazamiento longitudinal de la tuerca en la que va enroscado (movimiento rectilíneo).

El husillo se caracteriza por:

- n° de entradas (z): es el n° de hélices roscadas sobre el núcleo del tornillo; generalmente será 1, 2 o 3.

- Paso de rosca (Ph): es la distancia, en mm, entre dos filetes consecutivos de una misma hélice.

La longitud L que avanza la tuerca al girar el husillo será:

$$L = Ph \cdot z \cdot n$$

Siendo n: n° de revoluciones o vueltas del husillo en rpm.

La velocidad de avance se expresa en mm/min y se calcula con la fórmula anterior. [13]

$$L = 3 (1000) \cdot 1.95 = 97.5 \text{ [mm/min] desplazamiento de nuestra celda.}$$

El presente capítulo se realiza con el objetivo de comunicar los resultados obtenidos por el equipo, teniendo en consideración toda la investigación y análisis, reportado en los capítulos anteriores.

### **6.1 Conclusiones y comentarios**

El equipo de trabajo cumplió con los requerimientos del proyecto planteados para el área de investigación del estado del arte en cuanto a los dispositivos de medición de viscosidad se refiere, tomando en cuenta las patentes consultadas y no mencionadas en el presente trabajo por ser de poco interés hacia nuestros objetivos.

Consta de un motor a pasos, el cual desplaza horizontalmente la celda de carga para controlar la longitud del brazo de palanca, el movimiento verticalmente la base del motor acoplado al cilindro rotor para controlar la distancia entre la punta del rotor y el fondo de la copa será por medio de un mecanismo de tres grados de libertad

El prototipo final esta básicamente tomado de una geometría estandarizada sus dimensiones y todas las partes geométricas que lo componen surgen de la necesidad establecida al inicio del capítulo en la cual se establece que existe una norma internacional la cual nos restringe las dimensiones de los componentes que se encuentran en funcionamiento de nuestro aparato, así mismo se hace la selección para los sistemas periféricos como, lo son el sistema que se diseño para la alineación de el motor principal, dicho sistema nos permitirá alinear de manera exacta nuestra rotor con los demás componentes del sistema, sin embargo lo que nos hace un poco mas difícil la selección del rodamiento mecánico (rígido de bolas) lo que nos causaría un poco de problemas al tratar de alinear y dejar todos los componentes centrales sobre un mismo eje y de esta forma todos los componentes fueran coaxiales, considerando que este pequeño defecto quedara resuelto con el sistema de posición de tres grados de libertad y como un último dato, será necesario señalar que si la carga no excede a la carga soportada por el rodamiento en su dirección radial no tendremos ninguna desalineación en el momento de las pruebas y como la carga para la prueba es demasiado pequeña en comparación con la carga que es capaz de soportar no tenemos ningún problema para su alineación total.

Lo que tenemos que decir en esta instancia y no a sido mencionado en capítulos anteriores es que debido a que se sobre entiende que el rodamiento mecánico causa errores en nuestras mediciones, pues se supone que la persona que realice la caracterización de dicho viscosímetro una vez terminado el prototipo finalmente tendrá que restar de la ecuación que relaciona al par transmitido por el motor hacia el fluido las perdidas ocasionadas por el rodamiento que se denomina como par de rozamiento, dicho cálculo no fue realizado en este trabajo debido a que es un diseño conceptual.

Este dispositivo denominado como viscosímetro de cilindros coaxiales será empleado para distintos fluidos, se considera que tenga un rango amplio de medición y la respuesta que encontramos a dicha necesidad es agregar un sistema que le permita lograr dicho objetivo y nos encontramos con un sistema motor-tuerca-husillo, que es el mecanismo de la celda para alejarla o acercarla, tomando en consideración que se usara para aplicaciones industriales en donde no importa demasiado la precisión del instrumento sino que nos

proporcione el medir en tiempo real y de una manera directa la viscosidad del fluido comparada con la de algún fluido patrón; esto será logrado através de variar la distancia en la cual un brazo de palanca impactar a la celda.

## **6.2 Trabajo futuro**

El trabajo a futuro se espera que sea construido en los laboratorios del Centro de ciencias aplicadas y desarrollo tecnológico, UNAM

Una vez ya fabricado el prototipo y construido en su totalidad se caracterizara mediante el uso de un fluido denominado polietilenglicol a distintas concentraciones, para obtener datos de pruebas las mismas que se ocuparan para hacer una comparación con diferentes viscosímetros para ver que tan exactos son nuestros datos.

Este diseño será de fácil construcción considerando que casi todas las piezas no son de manufactura complicada y algunos de los componentes son comerciales como los motores de los cuales consta nuestro prototipo, los rodamientos lineales y radiales lo que lo hace tan competitivo como los existentes en el mercado para el cual se tiene contemplado, de esta forma se pretende que su precio se vea afectado de manera significativa para beneficio de la industria mexicana la cual compra productos a empresas extranjeras y eleva su precio.

Es importante mencionar, que el diseño propuesto en esta tesis es solo un diseño conceptual que queda abierta la posibilidad de modificar cualquier geometría del sistema siempre que esto no afecte el principio de funcionamiento del viscosímetro, como una alternativa se propone que se podría cambiar la base que aloja al rodamiento por una geometría de forma circular y posicionar a 120° los portes de soporte de este elemento y no surgiría ningún problema para la posicionar al sistema que porta a la celda de carga.

Todos los documentos presentados y analizados en este y los capítulos anteriores son ideas de momentos en los que el cerebro es capaz de volar e invocar imágenes que tiene guardadas pero que nunca imagino ocupar...

# Apéndice

7.1 Apéndice 1

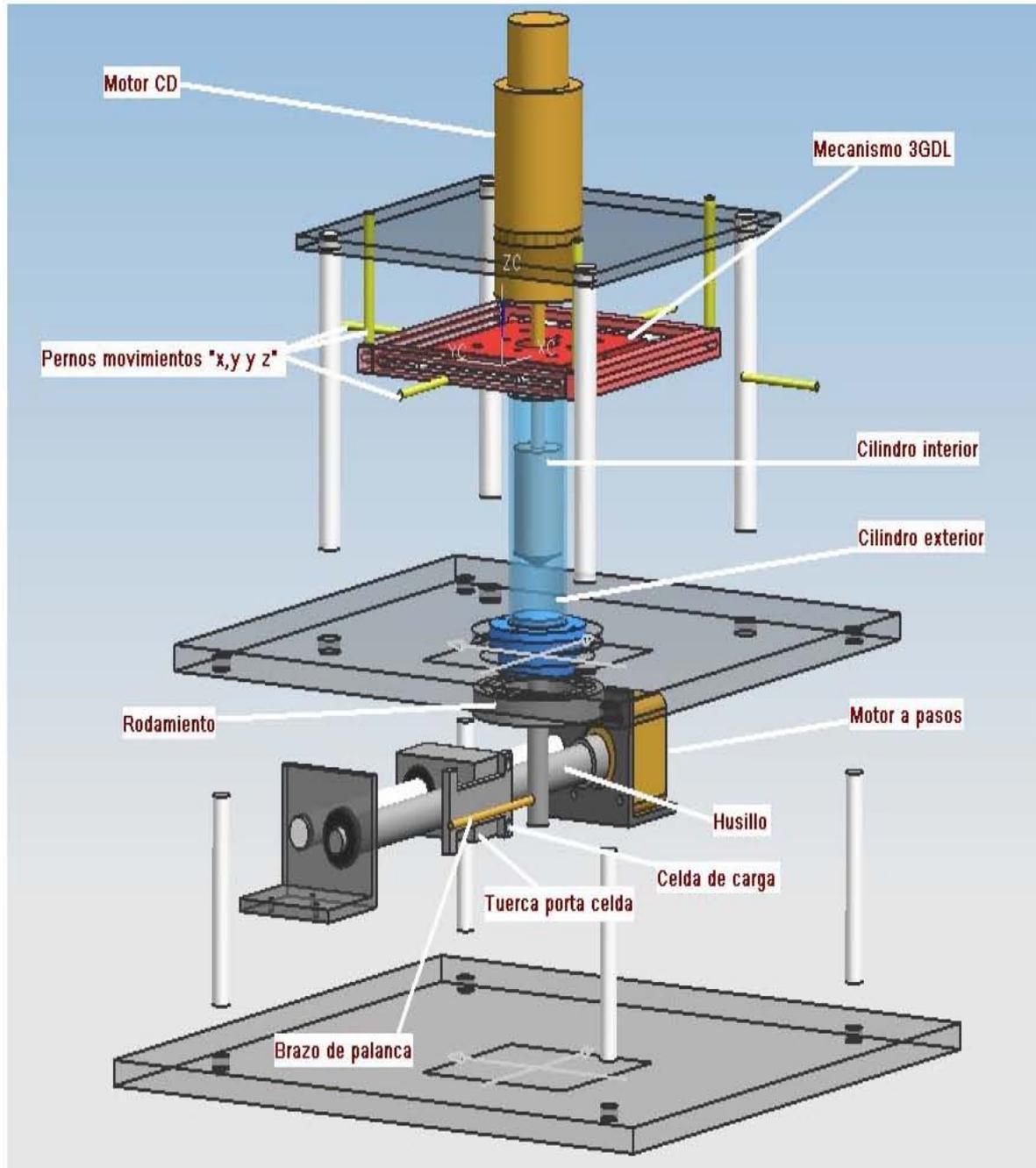


Fig.7.1 Explosivo general de ensamble

7.2 Apéndice 2

Cantidad		Dimensiones
Viscosidad dinamica	$ML^{-1}t^{-1}$	$FtL^{-2}$
Viscosidad cinematica	$L^2t^{-1}$	$L^2t^{-1}$

**Ecuación de continuidad**

Sistema coordenadas cilíndricas (r,θ,z)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

**Ecuación de conservación de momentum**

Sistema coordenadas cilíndricas (r,θ,z):

Componente r:

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(r\sigma_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\sigma_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial\sigma_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r$$

Componente θ:

$$\rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\theta v_r}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = - \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2\sigma_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial\sigma_{\theta z}}{\partial z} \right) + \rho g_\theta$$

Componente z:

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial\sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

*Ecuaciones de Navier – Stokes*

Sistema coordenadas cilíndricas (r,θ,z):

Componente r:

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) + \rho g_r$$

Componente θ:

$$\rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\theta v_r}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_\theta)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right) + \rho g_\theta$$

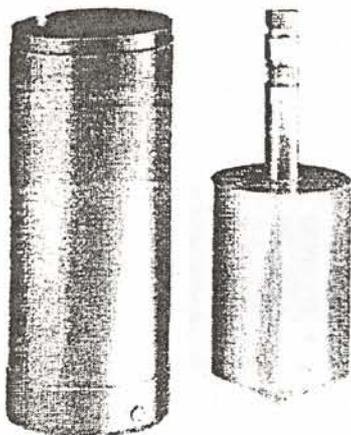
Componente z:

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

7.3 Apéndice 3

Norma DIN 53 019/ ISO 3219

**Measuring Ranges**



**6.5 Sensor System MV DIN / SV DIN**

The sensor system has been standardized for viscosity measurements of water based plastic dispersions (DIN 53 788), and of paints (DIN 53 214).

This coaxial cylinder sensor system consists of the cup MV and the rotor MV DIN or the cup SV and the rotor SV DIN.

This sensor system meets the requirements of the German Standard DIN 53 019 for rotational viscometers.

DIN 53 019 defines the characteristic geometrical ratios as follows:

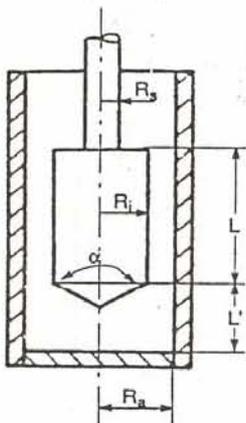
$$\frac{R_a}{R_i} = 1.0847$$

$$\frac{R_s}{R_i} \leq 0.3$$

$$\frac{L}{R_i} = 3$$

$$\frac{L'}{R_i} = 1$$

$$\alpha = 120^\circ (2.094 \text{ rad}) \pm 1^\circ$$

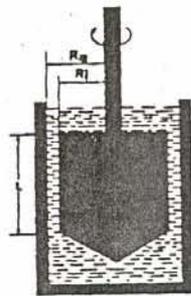


The sensor system should also be used when samples are subjected to programmed temperature increases and decreases. These temperature changes will only lead to the temperature related change of the sample volume in this sensor system. Its influence on the viscosity measurement will be small unless an insufficiently overfilled cup leads to a just partly filled annular gap when the temperature drop is very low.

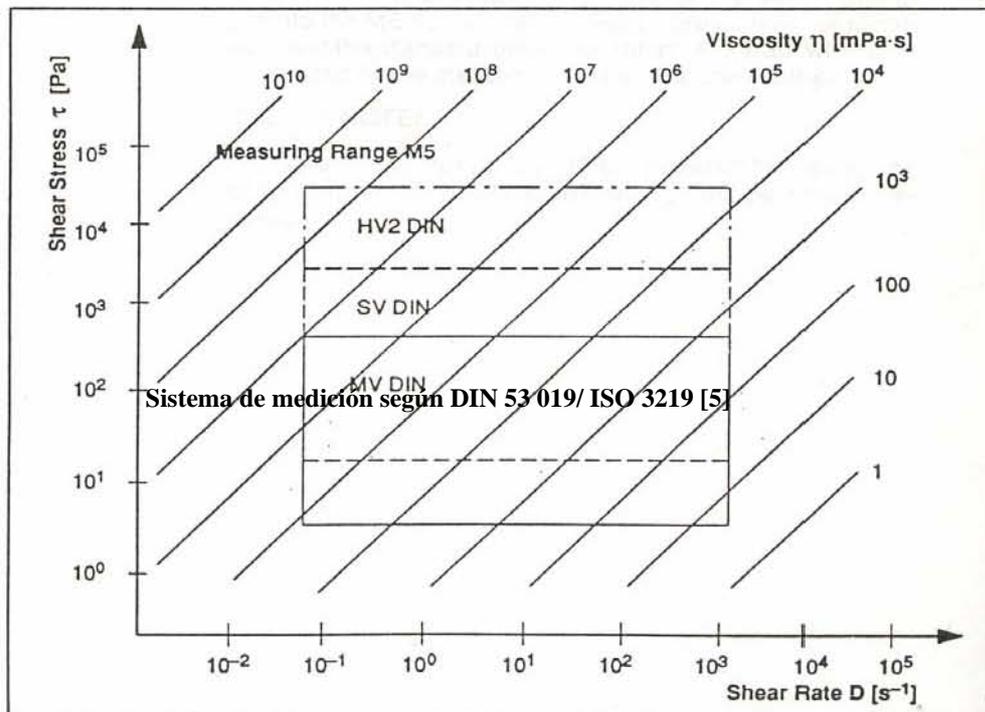
**Cleaning:**

The bottom of the cup can be removed. (Order No. for the sealing ring of the MV Beaker: 807-0458)

Measuring Ranges



Sensor System DIN 53019	MV DIN	SV DIN	HV2 DIN
Inner Cylinder (Rotor)			
Radius $R_i$ [mm]	19.36	10.65	4.0
Height $L$ [mm]	58.08	31.45	11.8
Outer Cylinder (Cup)			
Radius $R_a$ [mm]	21	11.55	4.35
Radii Ratio $R_a / R_i$	1.0847	1.0847	1.0847
Gap Width [mm]	1.64	0.9	0.39
Sample Volume $V$ [cm <sup>3</sup> ]	46	14	0.7
Temperature [°C]	-30/100		
Factors M5/M5-Osc			
A (Pa/% $\tau$ )	3.01	18.1	345
M (s <sup>-1</sup> /D%)	6.45	6.45	6.45
Factors M10			
A (Pa/% $\tau$ )	6.05	36.2	690
M (s <sup>-1</sup> /D%)	12.9	12.9	12.9



1. Labanda Angulo, L. Tesis Doctoral: Desarrollo de modelos estructurales para la cuantificación del comportamiento tixotrópico de sistemas coloidales. Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Facultad de Química, Universidad de Barcelona, Barcelona, 2003.
2. Schramm, G. A Practical Approach to Rheology and Rheometry. Karlsruhe, Ed. ThermoHaake (Rheology), 1998, p. 11,1,18 -20 [Soporte informático pdf].
3. Ferguson, J., Kemblowski, Z. Applied Fluid Rheology. Nueva York, Ed. Elsevier Applied Science, 1991.
4. Molera, P. (Director). Master en Tecnología de Pinturas. Universidad de Barcelona, Barcelona, 1996, Capítulo 2.1: Reología de pinturas.
5. Instruction manual rotovisco RV 20 Measuring system M, Haake Viscometers, 2000.
6. Instruction manual viscometer, Brookfield Measuring system, 2005.
7. Rosas, A. G. Fundamentals of Rheology: From Deformation to Flow of Materials. TA Instruments, Inc. 2003 Meeting ,[<http://www.shindosc.co.kr>].
8. [http://www.biblioteca.universia.net/html\\_bura/ficha/params/id/1420060.html](http://www.biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/id/1420060.html)
9. Pierre J. Carreau, Daniel C.R. Kee, Raj P. Chhabra, Rheology of Polymeric System, principles and applications, Hanser Publishers, 1997.
10. [http://www.desing-KAE-C249-30B\(motor yaskawa\).pdf](http://www.desing-KAE-C249-30B(motor yaskawa).pdf)
11. Diseño en ingeniería mecánica, Josph E. Shigley, Sexta edición, McGraw-Hill Interamericana, Año 2002.
12. Catalogo general SKF-4000 Sp, Año 2007. [www.skf.com/parts](http://www.skf.com/parts)
13. <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3109/2/36335-2.pdf>. Caracterización y propiedades anticorrosivas de pinturas marinas modificadas con polímeros conductores, Sumario anexos.