

30  
29.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

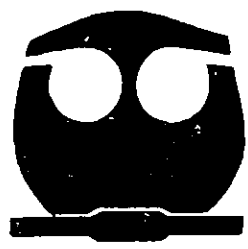


EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

DISEÑO DE UNA PRACTICA PARA EVALUAR LA  
VISCOSIDAD DE FLUIDOS EN UN VISCOSIMETRO  
DE STORMER.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
ADOLFO CASTRO CARDENAS



MEXICO, D. F.

258256

1998.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## JURADO ASIGNADO

**PRESIDENTE:** Prof. LUCILA CECILIA MÉNDEZ CHAVEZ.

**Vocal:** Prof. GENOVEVO SILVA PICHARDO.

**Secretario:** Prof. MARIANO PÉREZ CAMACHO.

**1er. Suplente:** Prof. HECTOR GERARDO MÉNDEZ FREGOSO.

**2do. suplente:** Prof. RAFAEL HERRERA NAJERA.

**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:** Laboratorio de Ingeniería  
Química.

Facultad de Química U . N . A . M.

**ASESOR DEL TEMA:**

Prof. Mariano Pérez Camacho

MARIANO PÉREZ CAMACHO.

Ing. Mariano Pérez Camacho

**SUSTANTE:**

Adolfo Castro Cárdenas.

Adolfo Castro Cárdenas

### **A MI MADRE:**

Amparo Cárdenas Montaña. Con todo mi amor y respeto. A ti madre, que me enseñaste a tener paciencia, respeto por los ideales que uno mismo persigue y sobre todo, por enseñarme, que la perseverancia y el trabajo, son las armas mas importantes que un hombre de bien puede tener.

### **A MI PADRE:**

Ernesto Castro Tlatzimatzin. "..... Viejo, mi querido viejo, yo soy tu sangre mi viejo, soy tu silencio y tu tiempo....." Gracias padre por enseñarme que la vida es una rueda de la fortuna, y que de nosotros mismos depende que está se mantenga arriba.

### **A MI HERMANO:**

Cesar. Gracias por ser mi amigo, mi compañero y mi cómplice, pero sobre todo. Gracias por ser mi hermano.

### **A MIS HERMANAS:**

Támara y Claudia. Gracias por su apoyo, ternura y amor debido a los cuales esta tesis no hubiera sido posible.

### **A MIS SOBRINOS:**

Esteban y el pequeñín que viene en camino.

**A MI NOVIA:**

Norma Angélica; Chiquita gracias por los momentos en los que me haz hecho feliz y sobre todo, gracias por aceptar compartir tu vida junto a mi

**A MI ASESOR :**

Al ingeniero Mariano Pérez Camacho, por su dedicación y empeño puestos en esta tesis.

**A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO :**

Por el honor que me proporcionó al aceptarme como universitario.

**A MI TÍA :**

Alicia Cárdenas Montaña por su incesante apoyo durante toda mi carrera

**A MI FAMILIA:**

A todos mis primos, tíos y a mi abuela.

**A MIS CUÑADOS:**

Ramón Oviedo y Gerardo Garza. Gracias por su apoyo incondicional en todo momento

**A MIS AMIGOS:**

Norma Edna Pérez Mastache, Miriam Estevez, Catalino Flores y Adrián Zendejas y a todos los cuates de la cuadra. Por su apoyo moral y su amistad

**A:**

Pink Floyd, U2, Doors, Led Zeppelin, Queen y Def Leppard. Por aquellos bellos momentos musicales que tuvimos.

A todos aquellos que participaron y que en este momento no me viene a la mente.

## INDICE.

Introducción	1
Capitulo I. <b><u>Cinemática y Dinámica del medio continuo.</u></b>	
1.1 Cinemática del medio continuo.	3
1.2 Cinemática del movimiento de fluidos	4
1.3 Teorema de Green.	6
1.4 Teorema de Reynolds.	6
1.5 Ecuación de continuidad y conservación de masa	8
1.6 Dinámica del medio continuo.	11
1.7 Principio del esfuerzo de Cauchy.	11
1.8 Principio de conservación de momentum lineal ( 1er ley de Euler )	13
1.9 Principio de conservación del Momentum lineal. (2a ley de Euler ).	14
1.10 El tensor de esfuerzos.	14
1.11 Primera ley de movimiento de Cauchy.	17
1.12 Segunda ley de movimiento de Cauchy.	18
1.13 Ecuaciones constitutivas.	20
1.14 Ecuaciones de movimiento para un fluido Newtoniano.	21
Capitulo II. <b><u>Clasificación y caracterización de fluidos Newtonianos y no Newtonianos</u></b>	
2.1 ley de Newton.	24
2.2 Clasificación de fluidos Newtonianos y no Newtonianos.	32
2.3 Ecuaciones de caracterización para fluidos Newtonianos y no Newtonianos.	36
2.4 Tipos de flujo.	45

2.5 Principios de Reometría.	49
2.6 Reómetros rotacionales.	51
Capitulo III. <b><u>Métodos propuestos para evaluar la viscosidad</u></b>	
<b><u>en el viscosímetro de Stormer</u></b>	54
3.1 Determinación del esfuerzo cortante y la velocidad de corte cuando se utilizan cilindros concéntricos.	54
3.2 Descripción del viscosímetro de Stormer.	61
3.3 Métodos propuestos para el análisis de fluidos Newtonianos en un sistema de cilindros concéntricos.	64
3.4 Determinación de la viscosidad para fluidos no Newtonianos en viscosímetro de tubos concéntricos ( tipo Stormer ).	71
Capitulo IV <b><u>Desarrollo Experimental.</u></b>	78
4.1 Procedimiento experimental del primer método propuesto Método de Margules	78
4.2 Procedimiento experimental para el segundo método propuesto Método del Factor de Fricción Vs. Número de Reynolds.	83
4.3 Procedimiento experimental para el tercer método propuesto Método del Factor de Fricción Vs. Número de Reynolds corregido.	105
4.4 Cálculo de la viscosidad de fluidos no Newtonianos.	142
Práctica propuesta.	161
Conclusiones	186
Bibliografía.	193



## INTRODUCCION.

Una propiedad importante en los cálculos ingenieriles es la viscosidad.

Aunque existen datos reportados en la literatura, en ocasiones, no cubren la totalidad de las sustancias existentes .

La determinación experimental la viscosidad requiere considerar diversos factores, entre otros, hay que considerar el tipo de fluido y por lo tanto el método para la determinación de la viscosidad.

El laboratorio de ingeniería química cuenta con diversos viscosímetros, uno de ellos es el de Stormer; sin embargo, utilizando el manual proporcionado por el fabricante se pudo constatar que su procedimiento no es exacto.

Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue el de desarrollar una metodología para la determinación de la viscosidad utilizando el viscosímetro de Stormer, y también la presentación de un guión de acuerdo a los lineamientos del Proyecto de Reforma de la Enseñanza Experimental.

En el capítulo uno se trataran los conceptos básicos y las expresiones matemáticas que describen lo fenómenos que se originan con la deformación de un fluido dentro de esté tipo de viscosímetro.

En el capítulo dos se ven aspectos que definen el comportamiento de los fluidos así como su clasificación. Se repasan algunos modelos matemáticos ya determinados que describen tales comportamientos, se hace una comparación entre varios viscosímetros comerciales con en el que en ésta tesis se analiza.

En el capítulo tres se tocan los fenómenos que se presentan al momento de deformar un fluido, más concretamente la viscosidad, el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad que aparecen desde que un fluido experimenta movimiento en el viscosímetro de Stormer.

En el capítulo cuatro se estudiarán las posibles alternativas o métodos para obtener la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos en el viscosímetro de Stormer, éste se dividirá en dos partes importantes, la primera parte que tratará exclusivamente la experimentación para fluidos newtonianos analizando uno por uno los métodos propuestos en el capítulo anterior, esto con el objeto de comprobar cual de ellos es el más conveniente para el uso del viscosímetro de Stormer y con esto poder plantear una práctica la cual utilice como base este viscosímetro. La segunda parte tratará solamente la experimentación para la obtención de resultados de fluidos no newtonianos. El método propuesto en el capítulo tres será la única base para realizar la experimentación debido a que se cuenta solo con uno.

Para finalizar se puede concluir, que los resultados obtenidos en este tipo de viscosímetro pueden ser precisos, siempre y cuando se hagan algunas consideraciones con respecto a el área que deforma el fluido en éste viscosímetro.

La cinemática es la parte de la mecánica que estudia el movimiento de los cuerpos en función del tiempo, pero haciendo abstracción de las causas o fuerzas que lo provocan.

Para poder entender el estudio cinemático de un fluido se debe recurrir a la teoría del medio continuo.

El medio continuo es suponer que las propiedades características del objeto en estudio son constantes en todo el espacio que ocupan dentro del universo.

Aris en su libro<sup>1</sup>, dice que la idea del continuo es una abstracción . Se sabe por la física molecular que la materia esta compuesta por partículas elementales . En gran variedad de estudios de la materia no es necesario, sin embargo, saber que sucede en el interior de una molécula , ya que para un propósito específico, la molécula es una identidad pequeña pero de dimensiones finitas que interactuan con las demás de acuerdo a ciertas leyes . La materia no es continua sino discreta y sus propiedades macroscópicas, son promedios tomados sobre un gran número de estas moléculas. Las ecuaciones de movimiento de los fluidos han sido obtenidas tomando en cuenta este último punto de vista.

Para muchos propósitos de la ingeniería química no es necesario conocer la estructura molecular en detalle y la hipótesis mencionada del continuo puede ser igualmente satisfactoria en la elaboración de un modelo matemático que nos permita generalizar con fines de estudio las características de un medio en particular.

## 1.2 LA CINEMÁTICA DEL MOVIMIENTO DE FLUIDOS (CAMPOS DE PARTICULAS)

La cinemática se refiere a la descripción del movimiento de un fluido en sí. Con esto no se habla del movimiento que pueda tener el fluido sino de su descripción, y la dinámica trata de las fuerzas que actúan en esta descripción. Pero los resultados de los estudios aplicados de la cinemática a cualquier tipo de fluido son la base del trabajo sobre la cual descansa la dinámica.

El movimiento del fluido se describe por una transformación puntual; en algún instante se puede observar el fluido en un punto y después de cierto tiempo la partícula se localiza en un punto " x ". Se puede generalizar y tomar la primera posición en un tiempo igual a cero y, después de un tiempo " t " la posición sería " x ".

Con un punto inicial en  $t = 0, x = \epsilon$  :

De donde:

$x$  = coordenadas espaciales ( posición)

$\epsilon$  = coordenadas iniciales ( materiales )

$$x = x( \epsilon , t ) \quad \text{o} \quad x_i = x_i ( \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, t ) \dots\dots\dots 1.2.1$$

Por supuesto se puede pensar inmediatamente que el concepto de la teoría de la cinemática no se cumplió, en relación a la descripción de la posición anterior, pues supone un orden al azar del comportamiento del movimiento del fluido .

Pero es aquí donde se involucra realmente el concepto de cinemática, si ésta interpretación de posición se realiza suponiendo un promedio de velocidades de las partículas en un campo dado del movimiento del fluido.

Es necesario entender que el promedio de velocidades que se considera no es más que idealizar un modelo matemático, por medio del cual se entienda, lo que es un campo dentro del movimiento del fluido.

Las coordenadas espaciales "x" de la partícula se refieren a la posición, y asumen un movimiento continuo, evaluado en las coordenadas antes descritas en la ec. 1.2.1 e inversamente surge de la posición inicial las coordenadas materiales de la partícula en cualquier posición "x" en el tiempo "t" así:

$$\epsilon = \epsilon(x,t) \quad \text{o} \quad \epsilon = \epsilon(x_1, x_2, x_3, \dots, t) \dots\dots\dots 1.2.2$$

Este sistema sigue siendo continuo físicamente hablando mientras exista movimiento de las partículas, siempre y cuando exista movimiento en el fluido.

Las coordenadas representadas en 1.2.2 se conocen como la función inversa en coordenadas materiales.

La condición para que ambas funciones tanto la inicial como la inversa existan se representa por el jacobiano.

$$J = \frac{(x_1, x_2, x_3)}{(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)} \dots\dots\dots 1.2.3$$

La transformación del jacobiano localiza los parámetros de la ecuación 1.2.3 que describe la curva en el espacio para un modelo cualquiera del sistema de fluido en movimiento con punto "ε" y el parámetro de t=0.

1.3

TEOREMA DE GREEN.

Este teorema permite pasar de una integral de línea a una integral de volumen . Esto se hace con el objeto de aplicarlo al teorema de Reynolds para obtener la suma total de fuerzas sobre el elemento de volumen

Este surge del teorema de integración por partes en espacios de varias dimensiones y se le conoce como teorema de Green.

Sea :  $u ( x_1, \dots, x_n )$  una función de n variables.

Y que además considere una región del espacio euclidiano n-dimensional entonces se tiene:

$$\int \frac{\partial u}{\partial x_i} ( \underline{x} ) dx = \int u ( \underline{x} ) n_i dx \dots\dots\dots 1.3.1$$

Donde n es el vector unitario que apunta hacia el exterior de " x ".

1.4

TEOREMA DE REYNOLDS.

Un teorema importante en cinemática se deriva de la ecuación de Euler, ecuación de la cual se hablara mas adelante.

El teorema de Reynolds es la suma de los cambios en un elemento infinitesimal de volumen . Para esto se utilizara la integral de volumen, para una función cualquiera  $F ( x, t )$  ; y  $V ( t )$  como función del movimiento del fluido. Esto es considerando sólo algunas partículas en movimiento del fluido.

La expresión que resulta es la siguiente :

$$F ( t ) = \iiint F ( x, T ) dv. \dots\dots\dots 1.4.1$$

Considerando que la función  $F(t)$  puede ser calculada en cualquier punto y tomando la consideración de que el material o modelo que se maneja tiene un movimiento descrito como  $dF/dt$ .

Ahora la integral varía a través de todo el volumen  $v(t)$  y nunca toma signos diferentes a través del volumen.

Esto siempre que la integración este en relación al volumen en el espacio Euclidiano.

Con el propósito de que la variación en la diferenciación y la integración con  $dF/dt$  sea constante en todo el volumen.

Ahora con la transformación en  $x = x(\epsilon, t)$ ,  $dv = j dV_0$  y ajustando  $v(t)$  se detiene el movimiento del material en el volumen, y haciendo un cambio para el volumen en el tiempo  $t = 0$  se tiene:

$$\begin{aligned}
 d/dt \int F(x, T) dT &= d/dt \int F(x(\epsilon, T)) J dV_0 \\
 &= \int (dF/dt J + F dJ/dt) dV_0 \\
 &= \int (dF/dt + F(\nabla \cdot v)) dV_0 \\
 &= \int (dF/dt + F(\nabla \cdot v)) dV_0 \dots\dots\dots 1.4.2
 \end{aligned}$$

Cierto es que  $d/dt = (\partial/\partial t) + \mu$ , y con esto se pueden obtener valores.

Sustituyendo la derivada material y colectando los términos del gradiente queda:

$$d/dt \int F(x, t) dv = \int (\partial F/\partial t + \nabla \cdot (FV)) dv \dots\dots\dots 1.4.3$$

Ahora aplicando el teorema de Green a la segunda integral se tiene:

$$d/dt \iiint_{v(t)} F(x,t) dt = \iiint_{v(t)} \partial f / \partial t dv + \iint_{s(t)} FV \cdot nds \dots\dots\dots 1.4.4$$

donde  $s(t)$  es la superficie del volumen parcial. Con esto podemos ver que el intervalo de la integral de volumen está determinado en un punto para que exista un flujo neto sobre la superficie de la función "F".

"F" puede ser cualquier componente, esto es resultado de la aplicación de la cinemática.

**1.5 ECUACION DE CONTINUIDAD Y CONSERVACIÓN DE MASA.**

Se ha tenido la idea que la conservación de masa no compete a la cinemática. Pero en la realidad, sirve como base fundamental para deducir la ecuación de continuidad. Si se tiene una función  $F(x, t)$  en donde "x" y "t" son coordenadas de masa por unidad de volumen, en un fluido homogéneo.

La ecuación que obtenemos y que nos ayuda a relacionar una masa por volumen finito es:

$$m = \iiint \rho(x,t) dv \dots\dots\dots 1.5.1$$

Con "v" como volumen material, y que es igual para cualquier partícula. Dentro de un medio en el cual la masa no cambia. Y tomando la derivada de la función anterior queda:

$$dm/dt = \iiint (d\rho/dt + \rho(\nabla \cdot v)) dv \dots\dots\dots 1.5.2$$



Ahora es verdad que para un volumen arbitrario se integra en cualquier punto. Suponga que un punto  $p$  cualquiera dentro del volumen no desaparece, y que es positivo. Con la integral continua para cualquier punto dentro de la vecindad, y " $v$ " tomando el valor que espera la vecindad y es por este valor de " $v$ " que la integral toma la siguiente característica.

$$d\rho/dt + (\nabla \cdot v) = \partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho v) \dots\dots\dots 1.5.3$$

Esta Relación se conoce como la ecuación de Continuidad.

Combinando la ecuación de continuidad con la ecuación del teorema de transporte de Reynolds tenemos:

$$d/dt \iiint \rho f dv = \iiint \rho df/dt dv \dots\dots\dots 1.5.4$$

La relación 1.5.4 combina la derivada de la función del comportamiento de una partícula en el volumen que ocupa y su densidad. Dejando la función como una función extensiva.

Propiedades extensivas y su evolución:

Dada cualquier propiedad intensiva  $p$ , podemos definir una propiedad extensiva  $E(t)$  por medio de:

$$E(t) = \int_{B(t)} F(x,t) dx \dots\dots\dots 1.5.5$$

Donde  $F(x,t)$  es la descripción Euleriana de  $\pi$  y  $B(T)$  es la región del espacio físico ocupada por el cuerpo  $B$  a el tiempo  $t$ .

Por ejemplo, la densidad es una propiedad intensiva a la que se le asocia la masa M por:

$$M(t) = \int_{B(t)} \rho(x, t) dx \dots\dots\dots 1.5.6$$

Donde  $(x, t)$  es la descripción Euleriana de la densidad. La rapidez de cambios de las propiedades extensivas se puede derivar de n formas utilizando, el teorema de Reynolds:

$$M'(t) = \int_{B(t)} \partial \rho / \partial t (x, t) dx + \int_{\partial B(t)} \rho(x, t) \underline{v}(x, t) \cdot \underline{n} dx \dots\dots\dots 1.5.7$$

Por medio del teorema de divergencia, se tiene:

$$M'(t) = \int_{B(t)} (\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \cdot \underline{v})) dx$$

Combinadas se tiene:

$$M'(t) = \int_{B(t)} (dp/dt + \rho \nabla \cdot \underline{v}) dx \dots\dots\dots 1.5.8$$

Si no existe producción o cambio en la masa, entonces  $M'(T) = 0$  y por lo tanto:

$$dp/dt + \rho \nabla \cdot \underline{v} \dots\dots\dots 1.5.9$$

que resulta ser la ecuación de conservación de la masa o ecuación de continuidad para fluido incompresible  $(dp/dt)$  por lo que queda:

$$\nabla \cdot \underline{v} = 0 \dots\dots\dots 1.5.10$$

## 1.6

### DINÁMICA DEL MEDIO CONTINUO.

El objetivo de este tema es demostrar algunas de las vías por las cuales se podrán conocer los esfuerzos que se producen en los fluidos.

Es conocido que los esfuerzos son característicos de una fuerza por unidad de área y que tiene dos direcciones (una debido a la fuerza y otra a la normal del área). El primero en tratar de demostrar este tipo de comportamiento fue Cauchy en 1823. El principio de conservación del momentum estableció todas las características del tensor de esfuerzos. La relación que le sigue a esta suposición es la que relaciona la mecánica del tensor y su comportamiento, de lo cual se derivan las ecuaciones constitutivas que se tratarán más adelante.

## 1.7

### PRINCIPIO DEL ESFUERZO DE CAUCHY.

Las fuerzas que actúan sobre un elemento material en un medio continuo pueden ser de dos tipos:

a) EXTERNAS : las fuerzas que actúan sobre el volumen del elemento.

b) INTERNAS : las fuerzas que actúan sobre el elemento de volumen a través de su superficie .

Para ser mas explicito se dirá que las fuerzas externas son aquellas que actúan sobre la totalidad del elemento, o sea que lo hacen en la masa y el volumen del cuerpo. ( fuerzas gravitacionales , electromagnéticas , etc.).

Las segundas o internas son las que actúan sobre el elemento de volumen, sobre su superficie y están relacionadas con la fuerza de fricción.

Si  $\underline{n}$  es la normal unitaria a un punto de superficie de el elemento  $S$  y  $t(\underline{n})$  es un<sup>o</sup> función de la posición  $x$ , de la orientación  $\underline{n}$  y del tiempo  $t$  del elemento de superficie entonces:

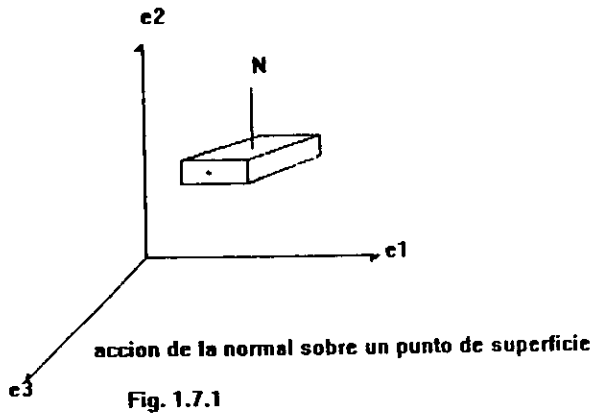
$\underline{n}$  = vector unitario normal a la superficie considerada  $S$ , siempre apunta hacia afuera del plano.

$t(\underline{n})$  = fuerza por unidad de área, se ejerce sobre la superficie del elemento material.

$$t(\underline{n}) = (x, t, \underline{n}) \dots\dots\dots 1.7.1$$

Donde las coordenadas expresan lo siguiente: Tiempo y orientación sobre su superficie respectivamente.

Fig . 1.7.1



En un resumen se puede expresar esta fuerza como:

$$t(\underline{n}) ds$$

Que significan las fuerzas totales internas ejercidas sobre  $v$  a través de  $S$

Ahora bien si se toma una fuerza  $\underline{f}$ , externa por unidad de masa ( para efectos de estudio la fuerza por unidad de volumen se expresa como  $\underline{e}$  (3) donde  $\underline{e}$  es un vector unitario), con esta suposición se puede concluir que la fuerza total por unidad de masa se expresa de la siguiente manera:

$$\underline{F} = \rho \underline{f} dv \dots\dots\dots 1.7.2$$

**1.8 PRINCIPIO DE CONSERVACION DE MOMENTUM LINEAL ( 1a LEY DE EULER ).**

La velocidad de cambio del momentum de un elemento material con respecto a un sistema de coordenadas fijo es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo.

Esto es una forma de integrar las ecuaciones de movimiento las cuales sufren cambios.

La ecuación que representa la primera ley de Euler aplicada a un elemento de volumen que se mueve es:

$$D/Dt \int\int\int_v \rho \underline{v} dv = \int\int\int_v \underline{f} dv + \int\int\int_s \underline{t}(\underline{n}) ds \dots\dots\dots 1.8.1$$

El principio de conservación del momentum lineal dice que la suma de estas dos fuerzas es igual a la rapidez de cambio del momento lineal del volumen.

**1.9 PRINCIPIO DE CONSERVACION DEL MOMENTO DEL MOMENTUM ( 2a LEY DE EULER).**

La velocidad de cambio del momento del momentum de un elemento material con respecto a un sistema de coordenadas fijo es igual a la suma de los momentos de todas las fuerzas que actúan sobre el elemento material.

$$\frac{d}{dt} \iiint_V (\underline{r} \times \underline{v}) dv = \iiint_V (\underline{r} \times \underline{f}) dv + \iint_S (\underline{r} \times \underline{t}(\underline{n})) ds \dots\dots\dots 1.9.1$$

Se puede decir con respecto a esta ecuación que el primer término de ésta es el momento del momentum el segundo es el momento de  $\underline{f}$  y el último es el momento de  $\underline{t}(\underline{n})$ .

Este es el caso de muchos fluidos. En líquidos fuertemente polares existen torques o pares de esfuerzos y torques de fuerzas de volumen. En estos casos no se aplica la última ecuación.

**1.10 EL TENSOR DE ESFUERZOS.**

Considere un tetraedro de altura  $h$  en la figura 1.10.. El área de la superficie inclinada es  $A$ , con una normal  $\underline{n}$ . Las áreas de las caras perpendiculares a los ejes coordenados son  $dA = n_i dA$ .

Las normales a estas caras son  $-\underline{e}(i)$ . Los vectores del esfuerzo que actúan sobre estas caras son  $\underline{t}(i)$ .  $\underline{t}(n)$  que es el vector que actúa sobre  $A$  fig 1.10.1

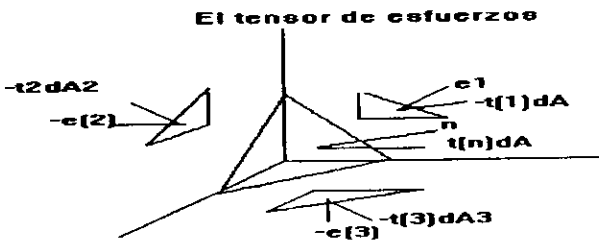


Fig. 1.10.1

Para dilucidar mejor la naturaleza del sistema de esfuerzos así:

$$\underline{e}(1) = (e_1, e_2, e_3) \dots\dots\dots 1.10.1$$

$$\underline{e}(2) = (e_1, e_2, e_3) \dots\dots\dots 1.10.2$$

$$\underline{e}(3) = (e_1, e_2, e_3) \dots\dots\dots 1.10.3$$

Por lo tanto la componente para el vector normal queda:

$$n \cdot \underline{e}(1) = n_1 \underline{e}(1) = n_1 \dots\dots\dots 1.10.4$$

$$n \cdot \underline{e}(2) = n_1 \underline{e}(2) = n_2 \dots\dots\dots 1.10.5$$

$$n \cdot \underline{e}(3) = n_1 \underline{e}(3) = n_3 \dots\dots\dots 1.10.6$$

Ahora tomamos las componentes de cada uno de los vectores unitarios:

$$n \cdot \underline{e}(1) = n_1 \underline{e}(1) = n_1 = \underline{n} \cdot \underline{e}(1) \cos(n \cdot \underline{e}(1)) \dots\dots\dots 1.10.7$$

$$n \cdot \underline{e}(2) = n_2 \underline{e}(2) = n_2 = \underline{n} \cdot \underline{e}(2) \cos(n \cdot \underline{e}(2)) \dots\dots\dots 1.10.8$$

$$n \cdot \underline{e}(3) = n_3 \underline{e}(3) = n_3 = \underline{n} \cdot \underline{e}(3) \cos(n \cdot \underline{e}(3)) \dots\dots\dots 1.10.9$$

De las ecuaciones antes descritas tenemos:

$$\underline{n} = (n_1, n_2, n_3) \dots\dots\dots 1.10.10$$

$$\underline{n} = n_1 \underline{e}_1 + n_2 \underline{e}_2 + n_3 \underline{e}_3 = n_i \underline{e}_i$$

$$\underline{n} \cdot \underline{e}_1 = n_i$$

$$n_i = \cos(\underline{n}, \underline{e}_i) \dots\dots\dots 1.10.11$$

Ahora, si A es el área de la cara sesgada, las áreas de las caras perpendiculares a los ejes coordenados son:

$$A n_i = A_i \dots\dots\dots 1.10.12$$

$$A n_1 = A_1 \dots\dots\dots 1.10.13$$

$$A_{n2} = A_2 \dots \dots \dots 1.10.14$$

$$A_{n3} = A_3 \dots \dots \dots 1.10.15$$

$A_{ni} = A_i$  es la proyección de A sobre cada eje coordenado.

Finalmente los vectores normales hacia afuera de estas caras son  $e_i$  y se denota el vector de esfuerzos cuando  $e_i$  es normal hacia afuera de la cara sesgada.

aplicando la primera ley de Euler a el tetraedro:

$$D/Dt \iiint_V \rho \underline{v} dv = \iiint_V \rho \underline{f} dv + \iint_S \underline{t}(n) ds \dots \dots \dots 1.10.16$$

Tomando en cuenta la primera parte de la integral que presenta la suma total de las fuerzas externas y de las fuerzas de contacto se puede expresar de la siguiente manera:

$$D/Dt \iiint_V \underline{E} dv = \iiint_V D\underline{E}/Dt dv \dots \dots \dots 1.10.17$$

$$\iiint_V (\rho Dv/Dt) - \rho \underline{f} dv = \iint_S \underline{t}(n) ds \dots \dots \dots 1.10.18$$

Aplicando, el principio de equilibrio a las fuerzas cuando el tetraedro es muy pequeño se tiene:

$$\underline{t}(n)A - \underline{t}(1)A_1 - \underline{t}(2)A_2 - \underline{t}(3)A_3 = 0 \dots \dots \dots 1.10.19$$

$$\underline{t}(n)\underline{n} = \underline{t}(1)\underline{n}_1 - \underline{t}(2)\underline{n}_2 - \underline{t}(3)\underline{n}_3 = 0$$

$$\underline{t}(n)A - \underline{t}(1)A_1 - \underline{t}(2)A_2 - \underline{t}(3)A_3 = (\underline{t}(n)\underline{n} - \underline{t}(1)\underline{n}_1 - \underline{t}(2)\underline{n}_2 - \underline{t}(3)\underline{n}_3) \dots \dots \dots 1.10.20$$



Por lo tanto  $A(\underline{t}(n) \underline{n} = \underline{t}(1) \underline{n}1 - \underline{t}(2) \underline{n}2 - \underline{t}(3) \underline{n}3) \dots \dots \dots 1.10.21$

Tomando límite cuando A tiende a cero:

$$\underline{t}(n) \underline{n} = \underline{t}(1) \underline{n}1 - \underline{t}(2) \underline{n}2 - \underline{t}(3) \underline{n}3$$

El volumen se hace muy pequeño. Ahora la pirámide se hace tan pequeña que las componentes  $\underline{t}(1), \underline{t}(2), \underline{t}(3) = \underline{t}(1), \underline{t}(2), \underline{t}(3)$  y se vuelven componentes de  $\underline{t}(n)$ .

**1.11 PRIMERA LEY DE MOVIMIENTO DE CAUCHY.**

Para poder llegar a la ecuación deseada es necesario hacer uso de la ecuación de Euler

Si se toma la primera ley de Euler:

$$D / Dt \int \int \int_v \underline{v} dv = \int \int \int_v \underline{f} dv + \int \int_s \underline{t}(m) ds \dots \dots \dots 1.11.1$$

Y de la ecuación que determina el volumen total de la partícula.

$$D / Dt \int \int \int_v \underline{v} dv = \int \int \int_v D\underline{v} / Dt dv \dots \dots \dots 1.11.2$$

Sustituyendo la ecuación del volumen total en la ecuación de Euler:

$$\int \int \int_v D\underline{v} / Dt dv = \int \int \int_v \underline{f} dv + \int \int_s \underline{t}(m) ds \dots \dots \dots 1.11.3$$

Donde:

El vector de esfuerzo  $\underline{t}(m)$  se expresa como vector unitario del tensor de esfuerzos. Esto es  $\underline{t}(m) = \underline{n} \cdot \underline{T}$ .

La ecuación que queda está en función de un único volumen, esto es considerando los límites de las integrales dentro de un mismo volumen.

Reacomodando la ecuación se tiene:

$$\iiint \rho D\underline{v} / Dt \, dv = \iiint \rho \underline{f} \, dv + \iint \nabla \cdot \underline{t} \, dv.$$

$$\iiint (\rho D\underline{v} / Dt \, dv - \rho \underline{f} - \nabla \cdot \underline{T}) \, dv = 0 \dots\dots\dots 1.11.4$$

Tomando la segunda ley de Newton<sup>2</sup> ( la suma de las fuerzas es igual a la masa por la aceleración ).

Esto aplicado a la ecuación anteriormente obtenida, queda:

$$D\underline{v} / Dt = \underline{T} + \underline{f} \dots\dots\dots 1.11.5$$

Esta es la primera ley de Cauchy o el balance diferencial del momentum para cualquier tipo de fluido. Es el balance de fuerzas sobre el elemento de volumen que se mueve.

**1.12            2a. LEY DE MOVIMIENTO DE CAUCHY.**

Tomando la ultima integral propuesta en el principio de conservación de momentum del momentum podemos observar:

$$\iint_s (\underline{r} \times \underline{t} \cdot \underline{n}) \, ds = \iiint_v (\underline{\nabla} \times (\underline{r} \underline{T})) \, dv \quad \text{por teorema de divergencia.}$$

en componentes :

$$\iiint_S \varepsilon_{ijk} r_j t_{kp} n_p ds = \iiint_V \varepsilon_{ijk} (r_j \tau_{kp})_p dv$$

$$\iiint_V \varepsilon_{ijk} (r_j \tau_{kp})_p dv = \iiint_V \varepsilon_{ijk} (r_j \tau_{kpp} + \varepsilon_{ijk} r_j \tau_{jk})_p dv \dots\dots\dots 1.12.1$$

por lo tanto :

$$\iiint_V \nabla \times (r t) dv = \iiint_V (r \times (\nabla \cdot \tau) + \tau^A) dv \dots\dots\dots 1.12.2$$

$\tau^A$  = es un tensor asimétrico

aplicando la segunda ley de Euler:

$$\iiint_V (r \times (\rho dv/dt - \rho f - \nabla \cdot \tau)) dv = \iiint_V \tau^A dv \dots\dots\dots 1.12.3$$

Por la primera ley de Cauchy:

$$\iiint_V \tau^A dv = 0 \dots\dots\dots 1.12.4$$

por lo tanto:

$$\tau = \tau^T$$

$\tau$  Es un tensor asimétrico

### 1.13. ECUACIONES CONSTITUTIVAS.

Los tres principios que debe satisfacer toda ecuación constitutiva del esfuerzo son las siguientes:

#### 1.- Principio de determinismo.

El esfuerzo en un cuerpo esta determinado por la historia del movimiento o deformación que el cuerpo ha experimentado.

#### 2.- Principio de acción local.

El movimiento del material fuera de una vecindad arbitrariamente pequeña del punto material determinado será ignorado en la determinación del esfuerzo sobre este punto.

#### 3.- Principio para indiferencia material.

Las ecuaciones constitutivas deberán ser invariantes bajo cambios de coordenadas.

**1.14 ECUACIONES DE MOVIMIENTO PARA UN FLUIDO NEWTONIANO**

Para este tipo de fluido, las ecuaciones de movimiento y constitutivas son:

$$\rho \, d\mathbf{v}_i / dt = \tau_{ij} + \rho \, f_i \dots\dots\dots 1.14.1$$

$$\tau_{ij} = (-p + \lambda \nabla \cdot \mathbf{v}) \delta_{ij} + 2 \mu D_{ij} \dots\dots\dots 1.14.2$$

Sustituyendo la ecuación 1.14.1 en la ecuación 1.14.2 tenemos:

$$\tau_{ij} = \partial p / \partial x_j + (\lambda + \mu) \partial / \partial x_j (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \mu \nabla^2 v_i \dots\dots\dots 1.14.3$$

Si se sustituye la ecuación 1.14.1 en la anterior se puede ver que:

$$d\mathbf{v} / dt = \nabla p / \rho + (\lambda + \nu) \nabla (\nabla \cdot \underline{\mathbf{v}}) + \gamma \nabla^2 \underline{\mathbf{v}} + \underline{\mathbf{f}} \dots\dots\dots 1.14.5$$

Ecuación de movimiento en coordenadas rectangulares ( x,y,z ) en función de los gradientes de velocidad para un fluido Newtoniano de  $\rho$  y  $\mu$  constantes:

Componente x

$$\rho (\partial v_x / \partial t + v_x \partial v_x / \partial x + v_y \partial v_x / \partial y + v_z \partial v_x / \partial z) = -\partial p / \partial x + \mu (\partial^2 v_x / \partial x^2 + \partial^2 v_x / \partial y^2 + \partial^2 v_x / \partial z^2) + \rho g_x$$

Componente y

$$\rho (\partial v_y / \partial t + v_x \partial v_y / \partial x + v_y \partial v_y / \partial y + v_z \partial v_y / \partial z) = -\partial p / \partial y + \mu (\partial^2 v_y / \partial x^2 + \partial^2 v_y / \partial y^2 + \partial^2 v_y / \partial z^2) + \rho g_y$$

Componente z

$$\rho (\partial v_z / \partial t + v_x \partial v_z / \partial x + v_y \partial v_z / \partial y + v_z \partial v_z / \partial z) = -\partial p / \partial z + \mu (\partial^2 v_z / \partial x^2 + \partial^2 v_z / \partial y^2 + \partial^2 v_z / \partial z^2) + \rho g_z$$

La ecuación de movimiento en coordenadas cilíndricas ( r,  $\theta$ , z ) en función del gradiente de velocidad para un fluido Newtoniano de  $\rho$  y  $\mu$  constantes:

componente r<sup>a</sup>

$$\rho (\partial v_r / \partial t + v_r \partial v_r / \partial r + v_\theta / r \partial v_r / \partial \theta - v_\theta^2 / r + v_z \partial v_r / \partial z) = -\partial p / \partial r + \mu (\partial / \partial r ( 1/r \partial / \partial r ( r v_r ) + 1/r^2 \partial^2 v_r / \partial \theta^2 - 2/r^2 \partial v_\theta / \partial \theta + \partial^2 v_r / \partial z^2) + \rho g_r$$

componente  $\theta$ <sup>b</sup>

$$\rho (\partial v_\theta / \partial t + v_r \partial v_\theta / \partial r + v_\theta / r \partial v_\theta / \partial \theta + v_r v_\theta / r + v_z \partial v_\theta / \partial z) = -1/r \partial p / \partial \theta + \mu (\partial / \partial r ( 1/r \partial / \partial r ( r v_\theta ) + 1/r^2 \partial^2 v_\theta / \partial \theta^2 + 2/r^2 \partial v_r / \partial \theta + \partial^2 v_\theta / \partial z^2) + \rho g_\theta$$

componente z

$$\rho (\partial v_z / \partial t + v_r \partial v_z / \partial r + v_\theta / r \partial v_z / \partial \theta + v_\phi \partial v_z / \partial \phi) = -\partial p / \partial z + \mu (1/r \partial / \partial r (r \partial v_z / \partial r) + 1/r^2 \partial^2 v_z / \partial \theta^2 + \partial^2 v_z / \partial z^2) + \rho g_r$$

La ecuación de movimiento en coordenadas esféricas. En función de los gradientes de velocidad para un fluido Newtoniano de  $\rho$  y  $\mu$  constantes:

componente r

$$\rho (\partial v_r / \partial t + v_r \partial v_r / \partial r + v_\theta / r \partial v_r / \partial \theta + v_\phi / r \sin \theta \partial v_r / \partial \phi - v_\theta^2 / r + v_\phi^2 / r) = -\partial p / \partial r + \mu (\nabla^2 v_r - 2/r^2 v_r - 2/r^2 \partial v_r / \partial \theta - 2/r^2 \partial v_\theta / \partial \theta - 2/r^2 v_\theta \cot \theta - 2/r^2 \sin \theta \partial v_\phi / \partial \phi) + \rho g_r$$

componente  $\theta$

$$\rho (\partial v_\theta / \partial t + v_r \partial v_\theta / \partial r + v_\theta / r \partial v_\theta / \partial \theta + v_\phi / r \sin \theta \partial v_\theta / \partial \phi + v_r v_\theta / r - v_\phi^2 \cot \theta / r) = -1/r \partial p / \partial \theta + \mu (\nabla^2 v_\theta + 2/r^2 \partial v_r / \partial \theta - v_\theta / r^2 \sin^2 \theta \partial v_\phi / \partial \phi + v_\phi v_\theta / r + v_\theta v_\phi / r \cot \theta) + \rho g_\theta$$

componente  $\phi$

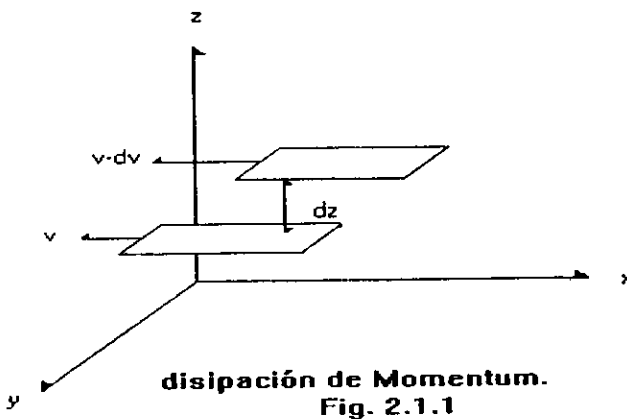
$$\rho (\partial v_\phi / \partial t + v_r \partial v_\phi / \partial r + v_\theta / r \partial v_\phi / \partial \theta + v_\phi / r \sin \theta \partial v_\phi / \partial \phi + v_r v_\phi / r \cot \theta) = -1/r \sin \theta \partial p / \partial \phi + \mu (\nabla^2 v_\phi - v_\phi / r^2 \sin^2 \theta + 2/r^2 \sin \theta \partial v_r / \partial \phi + 2 \cos \phi / r^2 \sin^2 \theta \partial v_\theta / \partial \theta) + \rho g_\phi$$

## CAPÍTULO 2.

### 2.1. LEY DE NEWTON.

En este capítulo se explicará el concepto de la ley de Newton y, para tal propósito se hará recurso de un modelo en el cuál se ejemplificará esta ley.

Si en un par de láminas sobrepuestas con una separación  $dz$ . se aplica una fuerza, de cualquier magnitud y en dirección  $x$ , en la lámina que esta en la parte inferior, como resultado se obtendrá un movimiento con una velocidad ( $v$ ) en dirección a esa fuerza, este movimiento no sólo se manifestará en esta lámina sino que encontrará repercusión en la lámina superior, el movimiento de esta será de menor magnitud ( $v - dv$ ) y en dirección a la fuerza aplicada. ( fig. 2.1.1 )



Este ejemplo simple permite ver, que aparte de las fuerzas que se presentan existe una disipación de momentum; este es perpendicular a la fuerza aplicada, y es el que provoca el movimiento en las láminas superiores.



Esta disipación origina una serie de alteraciones en el material. Estas alteraciones se manifiestan en forma de esfuerzos cortantes, que son propios del material y son los responsables de provocar deformación en su estructura original.

Entonces estos esfuerzos cortantes son proporcionales al gradiente de velocidad o deformación que sufre el material.

Esto se puede expresar en la siguiente ecuación:

$$\tau_{yx} \propto dv_x / dy \dots\dots\dots 2.1.1.$$

$\tau_{yx}$  = Esfuerzo cortante

$dv_x / dy$  = Gradiente de deformación

El concepto anterior, al ser aplicado a líquidos y gases, se manifiesta de la misma forma. Ahora, ya que se debe eliminar la proporcionalidad de la ecuación anterior ésta podrá escribirse como:

$$\tau_{yx} = - \mu dv_x / dy \dots\dots\dots 2.1.2$$

Donde :

$\tau_{yx}$  = Esfuerzo cortante

$dv_x / dy$  = Gradiente de velocidad

$\mu$  = Viscosidad

La ecuación anterior se conoce como la ley de Newton.

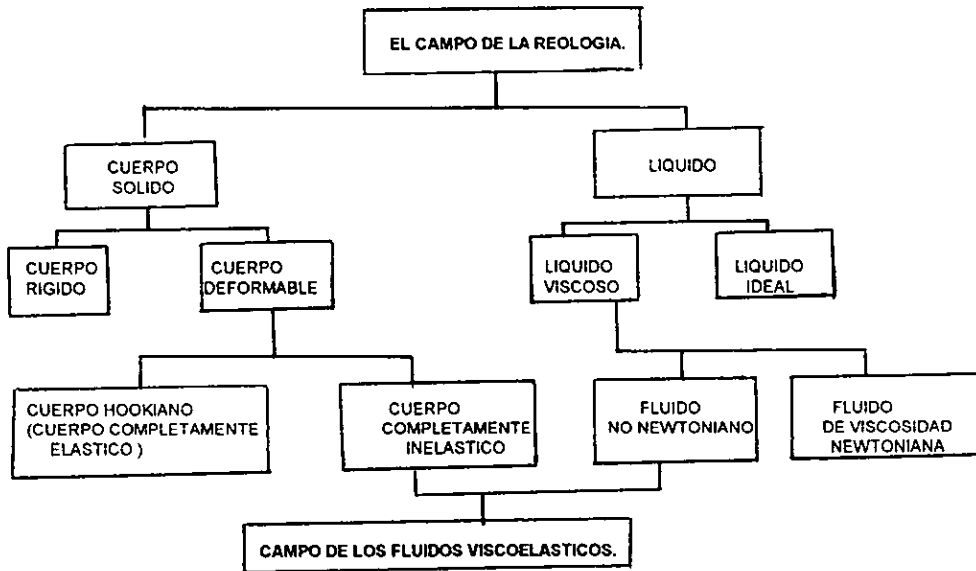
El elemento que se usa para quitar la proporcionalidad en esta ley recibe el nombre de viscosidad. Para poder entender el concepto de lo que es viscosidad en primer término se deberá definir lo que es un fluido.

Bajo el concepto de la ley de Newton se puede entender como fluido a la sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. Por lo tanto la viscosidad se puede definir como la oposición de éste, a ser deformado.

Debe recordarse entonces que, en ausencia del esfuerzo cortante no existe deformación. Los fluidos se pueden clasificar en forma general, según la relación que existe entre el esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante. Aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación se denominan fluidos Newtonianos. La mayor parte de los fluidos comunes como el agua, el aire, y la gasolina son prácticamente newtonianos bajo condiciones normales.

La figura 2.1.2 muestra el campo de estudio de la reología:

figura 2.1.2



La reología se entiende como la ciencia de la deformación y el flujo de materia.

Un cuerpo es deformado cuando la aplicación de un sistema de fuerzas adecuado cambia la forma o el tamaño del mismo. Se dice que un cuerpo fluye si su grado de deformación cambia continuamente.

Desde el punto de vista fundamental o básico los objetivos de la reología son: por un lado, desarrollar técnicas que permitan establecer experimentalmente las relaciones de comportamiento de un material y por el otro y, sin lugar a duda, el mas importante, el establecimiento de las relaciones entre los esfuerzos y deformación, capaces de explicar el comportamiento de los materiales complejos.

En la figura 2.1.2 se muestra el comportamiento de los sólidos y de los líquidos, y toma como referencia la ley de Hooke, la cual representa el comportamiento de un sólido perfectamente elástico y la ley de Newton, que representa el comportamiento del llamado fluido viscoso de Newton. Así pues, entre el sólido de Hooke y el fluido de Newton existe una enorme gama de materiales reales los cuales exhiben un comportamiento que es una mezcla de conductas elásticas y viscosas.

Si se hace un análisis de la ( fig. 2.1.2 ) se podrá observar que la gran parte de los fluidos pueden tener la característica de ser Newtonianos o bien fluidos no Newtonianos con la característica de ser cuerpos completamente inelásticos para formar lo que se conoce como fluidos viscoelásticos.

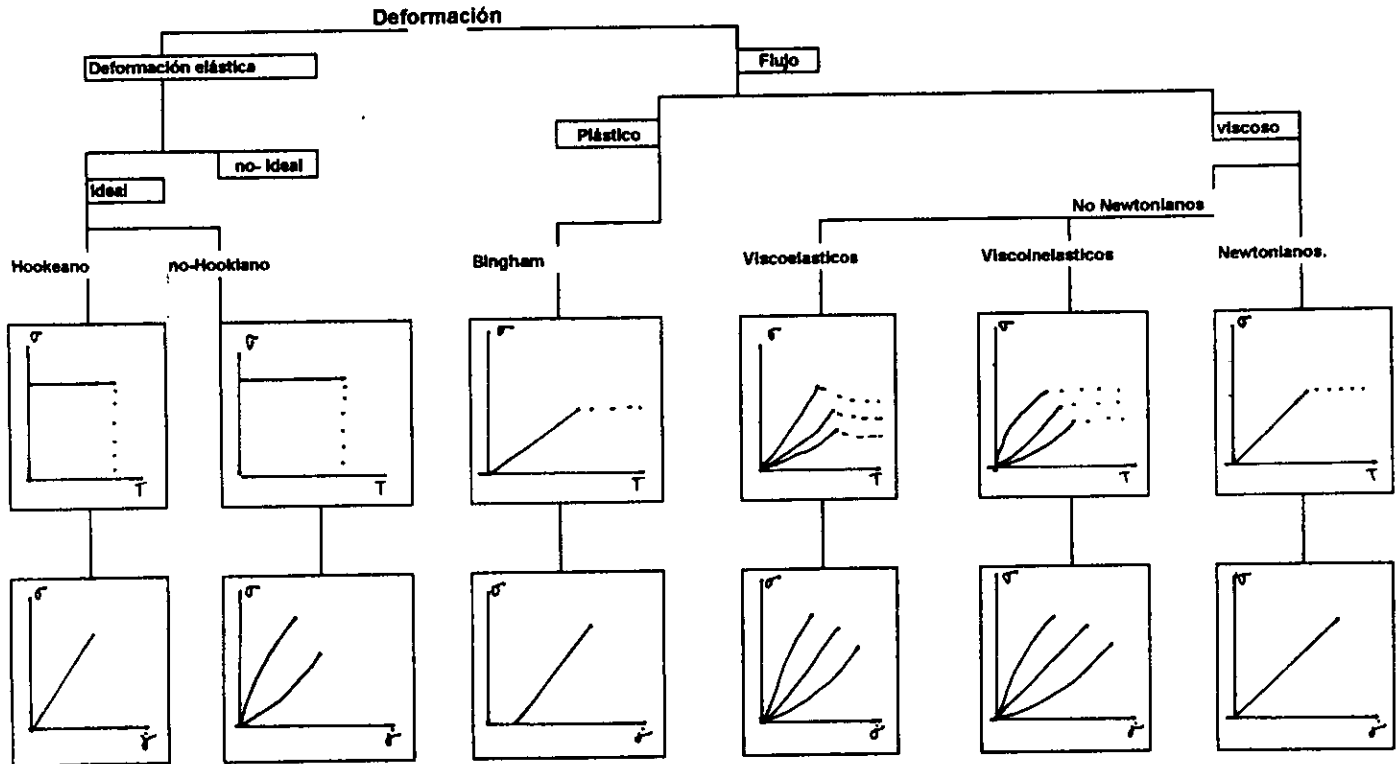
Por lo que él mismo concluye que el estudio de estos es muy complicado, y debe realizarse de manera particular, pues los modelos matemáticos que de estos resultan son muy complejos.

A partir de esta clasificación se delimita el estudio de esta tesis, a sólo el estudio de fluidos que se encuentran según la clasificación anterior dentro de los que se conocen como fluidos puramente viscosos ( Newtonianos y No newtonianos ).

La reología también permite determinar técnicas por medio de las cuales se puede conocer el comportamiento del fluido; una de estas técnicas, es el uso de una gráfica en donde se muestre el esfuerzo cortante (  $\tau_{yx}$  ) vs el gradiente de velocidad (  $dv_x / dy$  ) logrando con esto una curva del comportamiento del material en estudio. Esto se conoce como Reograma.

Con el propósito de presentar, la amplia gama de posibles comportamientos reológicos de los materiales, se presentara la figura 2.1.3 .

Figura 2.1.3



Donde se proponen diferentes formas de comportamiento según la deformación que presenta el material.

Esta deformación puede ser debida a el flujo o bien, una deformación elástica.

Estas a su vez se dividen en Plástica o viscosa y ideal o no ideal. Después de esta clasificación se presenta una gama muy amplia del comportamiento de los materiales. Esta abarca desde un sólido hookiano hasta un fluido Newtoniano

Si se empieza por el sólido Hookiano se podrá observar que el esfuerzo cortante ( $\tau_{yx}$ ) es constante durante el tiempo de deformación ( $t$ ) y por consiguiente al graficar el esfuerzo cortante ( $\tau_{yx}$ ) vs. el gradiente de velocidad ( $dv_x / dy$ ) se obtiene una línea partiendo del origen lo que denota que aunque el esfuerzo es constante todo el tiempo, existe deformación. Para un sólido no hookiano el esfuerzo cortante, al igual que en el caso anterior guarda las mismas características, pero a diferencia del reograma anterior este presenta variaciones en su gradiente de velocidad ( presenta disminuciones o aumentos en su comportamiento. ). En la parte no ideal se tiene a los cuerpos completamente recuperables, estos aumentan su esfuerzo cortante con respecto al tiempo de deformación. Por consiguiente el reograma presenta aumentos o disminución en su gradiente de deformación o bien se puede presentarse el caso de que el gradiente de deformación sea proporcional a el esfuerzo cortante. De los plastoelásticos se puede ver que el esfuerzo se incrementa con el tiempo de deformación, pero en este caso en particular se presenta lo que se conoce como el tiempo de relajación ( cuando el material a dejado de ser sometido a deformación y presenta disminuciones en los esfuerzos cortantes. ). Con esto el reograma que presentan estos materiales no partirá del origen por la razón de que presenta un esfuerzo de cedencia.

El caso de los plastoinelásticos el esfuerzo cortante, al igual que en el caso anterior aumenta con respecto a el tiempo, solo que en este caso no existe un tiempo de relajamiento. El reograma al igual que el anterior no parte del origen pues presenta un esfuerzo de cedencia. En el caso de un fluido de Bingham el esfuerzo cortante es proporcional al tiempo de deformación y no presenta tiempo de relajación. En este caso en particular, el material presenta una tendencia lineal en su reograma que no parte del origen, pues presenta un esfuerzo de cedencia.

El caso de los fluidos viscoelásticos el esfuerzo cortante aumenta con respecto a el tiempo, una vez que ha dejado de ser deformado presenta un tiempo de relajación. En el reograma, el gradiente aumenta, disminuye o bien es proporcional al esfuerzo cortante, partiendo del origen. Para el caso de los viscosos se presenta un comportamiento parecido al anterior, solo que en este caso no existe el tiempo de relajamiento. El reograma resultante es similar al anterior. Por último, se analiza el caso de los fluidos Newtonianos en este caso el esfuerzo cortante es proporcional al tiempo de deformación y por lo tanto en el reograma se puede observar que el esfuerzo cortante es proporcional a el gradiente de velocidad.

Considerando sólo el tipo de deformación debida a el flujo, se limita el estudio de esta tesis a los materiales que presentan Viscoinelásticidad o simplemente viscosos, newtonianos y no newtonianos incluyendo los fluidos tipo Bingham.

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS.

La teoría clásica de la dinámica de los fluidos, ha desarrollado estudios de fluidos ideales o perfectos, estos son incompresibles, sin viscosidad o elasticidad. En el movimiento de estos no existe fricción alguna y como consecuencia no existe esfuerzo cortante. La relación matemática que detalla esto ha sido obtenida del comportamiento de un fluido perfecto de una amplia variedad de situaciones físicas. Algunos de estos resultados han resultado del uso de aproximaciones del desarrollo de fluidos reales en ciertos casos especiales pero las aplicaciones prácticas están limitadas.

En este caso en especial, hablando de fluidos ideales, se puede decir que estos se consideran como meras suposiciones debido a que realmente no existen.

Dentro de la naturaleza los fluidos se pueden dividir en dos grandes grupos, los fluidos Newtonianos y los no Newtonianos.

El fluido Newtoniano, es aquel en el cual el esfuerzo varía en forma lineal con la rapidez de deformación. En otras palabras, el fluido Newtoniano presenta una viscosidad constante.

Por otro lado, los fluidos no Newtonianos son aquellos en los cuales el esfuerzo varía en forma no lineal con respecto a la rapidez de deformación; o sea que la viscosidad es una función de la rapidez de deformación y puede ser dependiente o independiente del tiempo. Estos fluidos pueden subdividirse en:

- 1) Inelásticos, o viscosos, independientes del tiempo.
- 2) Inelásticos o viscosos, dependientes del tiempo.
- 3) Viscoelásticos.



### 1) Fluidos no Newtonianos independientes del tiempo.

Estos materiales algunas veces son llamados como fluidos no Newtonianos viscosos o bien fluidos puramente viscosos. Existe una clasificación preliminar de estos fluidos los cuales se diferencian por tener o no tener esfuerzo de cedencia.

#### 1.1) Fluidos que presentan esfuerzo de cedencia.

El comportamiento físico de los fluidos con esfuerzo de cedencia es usualmente explicado en términos de su estructura interna, descrita en tres dimensiones, esto hace al fluido capaz de predecir valores de esfuerzo cortante que se manifiesta en "y" ( $\tau_y$ ). Este puede ser tan grande en un principio como el esfuerzo cortante ( $\tau_{xy}$ ) ( en un principio el valor del esfuerzo cortante puede ser igual al valor del esfuerzo en la dirección de "y", esto cuando el fluido comienza a experimentar deformación ). La estructura interna se considera deformada instantáneamente cuando el valor del esfuerzo cortante ( $\tau_{xy}$ ) es mayor al esfuerzo en dirección de "y" ( $\tau_y$ ).

Las curvas típicas para estos materiales con su intersección ( $\tau_y$ ) en el eje del esfuerzo cortante ( $\tau_{xy}$ ) se muestra en la figura 2.2.1.

#### 1.2) Fluidos que no presentan esfuerzo de cedencia.

La mayoría de los materiales están dentro de esta categoría, las curvas de flujo se muestran en la figura 2.2.1 y se caracterizan por tener una tendencia lineal, y esfuerzo cortante muy alto o muy bajo.

Estos materiales se pueden subdividir en dos grupos según las características descritas anteriormente:

En los fluidos Pseudoplasticos y los fluidos dilatantes.

El comportamiento de los fluidos pseudoplásticos se presenta en solventes de alto peso molecular o bien soluciones de partículas en dispersión. Estos se caracterizan por tener un incremento en el esfuerzo cortante y, como consecuencia, una disminución en la viscosidad aparente.

Para fluidos dilatantes se muestran dos fenómenos, los cuales caracterizan a este tipo de materiales, la dilatación volumétrica, denota un incremento en el volumen total, bajo el esfuerzo. Mientras que la dilatación reológica se manifiesta en el incremento de la viscosidad aparente junto con un incremento del esfuerzo cortante. Sus curvas características se muestran en la figura 2.2.1.

## 2) Fluidos no Newtonianos dependientes del tiempo.

Estos materiales se clasifican en dos grupos, los fluidos Tixotropicos y los fluidos Reópecticos, estos dependen del incremento o decremento del esfuerzo cortante con respecto a el tiempo de deformación.

### 2.1 Fluidos Tixotrópicos.

Estas sustancias exhiben un decrecimiento reversible en el esfuerzo cortante con respecto a el tiempo. Con un valor constante de esfuerzo y un valor fijo de temperatura. El esfuerzo cortante toma un curso aproximado a unos valores consistentes con la estructura del equilibrio. la curva de flujo es medida en un experimento simple en donde el esfuerzo cortante se incrementa invariablemente de cero a el valor máximo e inmediatamente decrece a un valor cercano a cero.

La curva obtenida se conoce como ciclo de histerisis. Esta se muestra en la figura 2.2.2. Un viscosímetro rotatorio puede ser el mas conveniente para este tipo de estudio.

Las flechas en la figura indican el progreso cronológico de el experimento. Es importante notar que para el mismo fluido la localización del ciclo es diferente, para diferentes tiempos. Esto altera meramente el intervalo en donde el valor del gradiente de velocidad incrementa o decrece lo suficiente para modificar el ciclo de histéresis.

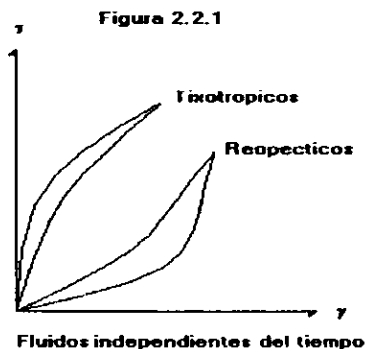
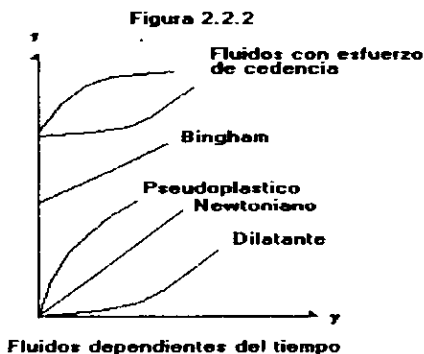
**2) Fluidos reopécticos.**

Estos materiales ocasionalmente son referidos como fluidos antitixotrópicos y son muy raros de encontrar. Exhiben un incremento reversible en el esfuerzo cortante con el tiempo, esto bajo condiciones isotérmicas.

El ciclo de histéresis obtenido de estas sustancias es producido en forma similar a la del fluido tixotrópico.

La dirección de las flechas y la concavidad de la curva como quiera que sea se reserva, esta se muestra en la figura 2.2.2 la localización del ciclo depende de la historia del tiempo del material, incluyendo el valor del gradiente de velocidad, que aumenta o decrece durante la experimentación.

El comportamiento reopéctico es explicado en términos análogos del uso del cálculo para la dilatación de periodos de tiempo mas prolongados del cambio de la estructura.



De la figura 2.2.1 y en las regiones en que  $\mu$  disminuye al aumentar el gradiente de velocidad (  $- dv_x / dy$  ), el comportamiento se denomina pseudoplástico; y dilatante en las que  $\mu$  aumenta con dicho gradiente. Si  $\mu$  resulta independiente del gradiente de velocidad, el fluido se comporta como un Newtoniano.

## **2.3 ECUACIONES DE CARACTERIZACION PARA FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS.**

Se han propuesto numerosas ecuaciones o modelos para tratar de expresar la relación que existe, en estado estacionario, entre el esfuerzo cortante (  $\tau_{yx}$  ) y del gradiente de velocidad (  $dv_x / dy$  ). Partiendo de los modelos que se muestran en la tabla 2.3.1 y seleccionando los modelos que se refieren a los fluidos de estudio de esta tesis, se presenta a continuación un resumen de varios modelos representativos. Todas las ecuaciones tienen parámetros empíricos positivos, cuyo valor numérico puede determinarse correlacionando los datos experimentales de esfuerzo cortante (  $\tau_{yx}$  ) frente a los de el gradiente de velocidad (  $dv_x / dy$  ) a temperatura y presiones constantes. En este capítulo se presenta un resumen de los modelos mas importantes .

### **Resumen de Modelos de flujo.**

- a) Plásticos de Bingham ( presentan un valor límite ).
- b) Modelos del tipo de la ley de la potencia.
- Oswald de Waele.
- Ellis.
- Bingham.
- Eyring.

**TABLA 2.3.1.**  
**MODELOS DE FLUJO.**  
**fluidos que no presentan esfuerzo de cedencia.**

MODELO	ECUACION QUE LO REPRESENTA
Sisko	$\tau_{yz} = A \left( \frac{du}{dy} \right) + B \left( \frac{du}{dy} \right)^n$
Symonds	$\left( \tau_{yz} \right)_{rr} = \tau_w = a \left( \frac{8v}{D} \right)^{1+n}$

**TABLA 2.3.1.**  
**MODELOS DE FLUJO.**  
**fluidos que no presentan esfuerzo de cedencia.**

MODELO	ECUACION QUE LO REPRESENTA
Ley de la potencia	$\tau_{yz} = k \frac{(du)}{g_c dy}^n$
Ellis	$\tau_{yz} = \frac{1}{A + B r_{yx}^{a-1}} \left( \frac{du}{dy} \right)$
Del laven	$\tau_{yz} = \frac{\mu_0/g_c}{1 + C r_{yx}^n} \left( \frac{du}{dy} \right)$
Prandtl - Eyring	$\tau_{yz} = A \operatorname{senhip}^{-1} \left( \frac{1}{B} \left( \frac{du}{dy} \right) \right)$
Powell - Eyring	$\tau_{yz} = C \left( \frac{du}{dy} \right) + \frac{1}{B} \operatorname{senhip}^{-1} \left( \frac{1}{A} \left( \frac{du}{dy} \right) \right)$

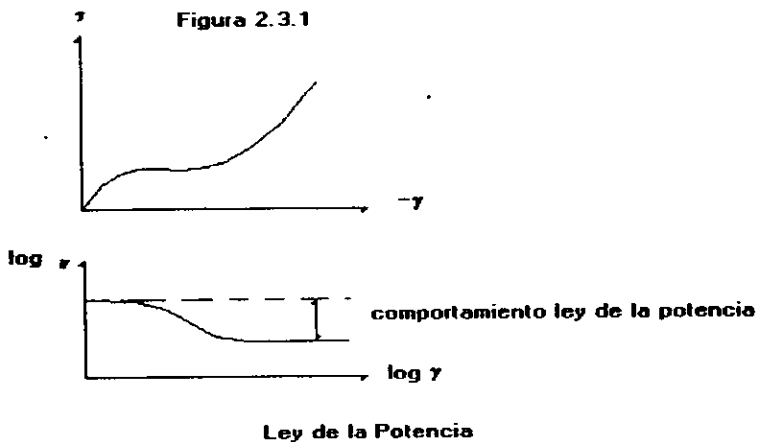
**TABLA 2.3.1.**  
**MODELOS DE FLUJO.**  
**fluidos que presentan esfuerzo de cedencia.**

MODELO	ECUACION QUE LO REPRESENTA
Bingham	$\tau_{yz} - \tau_y = \frac{\eta}{g_c} \left( \frac{du}{dy} \right)$
Herschel - Bulkey.	$\tau_{yz} - \tau_y = \left( \frac{\eta}{g_c} \left( \frac{du}{dy} \right) \right)^n$
II	$\tau_{yz} - \tau_y = \frac{\eta/g_c}{1 + C(\tau_{yz} - \tau_y)^n} \left( \frac{du}{dy} \right)$

a) Ley de la Potencia de Oswald - de Waele.

Dentro del intervalo intermedio del gradiente de velocidad que se presenta en la figura 2.3.1, se puede observar que la gráfica de  $\log \mu$  vs  $\log dv_x/dy$  es una línea recta, al principio de esta se denota un gradiente de velocidad casi constante, esto es debido a que la deformación es mínima; por el contrario, en la parte final de la gráfica se presenta algo similar que al principio, esto se debe a consecuencias inversas a las iniciales, esto es, exceso de deformación. Precisamente entre estos dos extremos de la gráfica se encuentra una tendencia lineal, en la cual se puede aplicar un modelo matemático que ajuste al comportamiento de esta línea. Esta línea recta descendente puede ser representada por una ley de la potencia como:

$$\mu = m ( dv_x / dy )^{n-1} \dots\dots\dots 2.3.1$$





En donde  $m$  ( es la pendiente ) y  $n$  ( adimensional ), son características de cada fluido. Esta expresión es sin duda la más conocida y usada en aplicaciones de ingeniería. Muchos problemas específicos de flujo han sido resueltos usando este modelo y los resultados han sido útiles. La ley de la potencia no puede describir la porción de la curva de viscosidad cuando el gradiente de velocidad (  $dv_x / dy$  ) tiende a cero, pero esta región no es muy importante en el diseño ingenieril. Este modelo es capaz de predecir cualitativamente, dependiendo del valor de  $n$ , el comportamiento newtoniano, pseudoplástico y dilatante.

$n = 1$  Newtoniano.

$n < 1$  Pseudoplástico.

$n > 1$  Dilatante.

Para el caso mas común, que es el pseudoplástico, este modelo presenta las siguientes desventajas:

- Predice viscosidad infinita cuando el gradiente de velocidad tiende a cero.
- Predice viscosidad cero cuando el gradiente de velocidad tiende a infinito.
- La constante  $m$  tiene unidades que dependen del valor de  $n$ .
- Es incapaz de predecir fenómenos viscoelásticos.

b) Ley de la potencia truncada de Spriggs.

Para aprovechar la simplicidad de la ley de la potencia y evitar la objeción de que no se incluya dentro de los parámetros un tiempo característico, podemos escribir.

$$\eta = \eta_0 \quad \gamma < \gamma_0$$

$$\eta = \eta_0 \left( \gamma / \gamma_0 \right)^{n-1} \quad \gamma > \gamma_0$$

Este modelo tiene tres constantes:  $\eta_0$ . La viscosidad Newtoniana inferior,  $(1/\gamma_0)$  un tiempo característico y  $n$  índice de flujo de la ley de la potencia. Este modelo es capaz de predecir la asintota de la ley de la potencia cuando el gradiente de velocidad tiende a infinito.

c) Modelo de Eyring.

A partir de la teoría de procesos fuera del equilibrio Eyring demostró que :

$$\eta = \tau_0 T_0 \left( \frac{\text{arc sinh } \tau_0 \gamma}{\tau_0 \gamma} \right) \dots\dots\dots 2.3.2$$

Donde  $T_0$  es un esfuerzo característico y  $\tau_0$  es un tiempo característico.

Esta expresión es el resultado del primer intento para explicar desde un punto de vista molecular el comportamiento de la viscosidad para fluidos no Newtonianos

d) Modelo de Ellis.

Los cuatro modelos anteriores son del tipo  $\eta = \eta(\gamma)$ , como ejemplo de  $\eta = \eta(T)$

tenemos el modelo de Ellis.

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + \left( \frac{\tau^*}{\tau_0} \right)^{-1} \dots\dots\dots 2.3.4$$

Donde :

$\eta_0$  : Viscosidad Newtoniana inferior.

$\tau^*$  : Valor del esfuerzo cortante.

- 1 : Pendiente de la curva

e) Modelo de Bingham.

$$\tau = -\mu_0 \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_0 \quad \text{si } \tau_{xy} > \tau_0$$

$$dv_x/dy = 0 \quad \text{si } \tau_{xy} < \tau_0$$

La ecuación anterior se utiliza con signo (+) si  $\tau_{xy}$  es positivo, y con signo (-) si es negativo. Toda sustancia que se comporta de acuerdo con este modelo de dos parámetros se denomina plástico de Bingham; permanece rígida mientras el esfuerzo cortante es menor en un determinado valor  $\tau_0$ , por encima del cual se comporta semejante a un fluido Newtoniano. Este modelo resulta suficientemente exacto para muchas pastas y suspensiones finas.

Todo lo anteriormente señalado solo ha determinado, que este estudio realmente se basa sobre el comportamiento de algunos materiales. El estudio de este comportamiento se explicará posteriormente.

## 2.4 TIPOS DE FLUJO.

Se tratarán los flujos que se conocen como flujos principales. Estos son los flujos cortantes (pueden presentarse dos tipos de flujo: cortante o flujo cortante unidireccional).

Para el flujo cortante sus características son:

a) posee una familia uni - paramétrica de superficies materiales. Esto es una serie de placas del mismo tamaño una sobre otra, (superficies de corte) que se mueven isométricamente; es decir, que la distancia entre dos partículas en la superficie es constante.

b) el volumen de cada elemento del fluido es constante; es decir, que la separación entre dos superficies cortantes es constante.

#### Flujo cortante unidireccional.

Las líneas de corte (que son de la familia de curvas tangentes a la dirección del movimiento de cada partícula), son líneas materiales; es decir, que consisten del mismo conjunto de partículas en cada instante.

Este tipo de flujo presenta las siguientes características:

#### - Flujo viscométrico.

Es el flujo cortante unidireccional en el que la velocidad de corte es independiente del tiempo.

#### - Flujo viscométrico homogéneo.

Es el flujo viscométrico donde la velocidad de corte no varía de partícula a partícula, o sea, que la velocidad de corte es independiente de la posición.

#### - Flujo cortante simple a régimen permanente.

Es el flujo viscométrico homogéneo cuyas superficies de corte son planos.

El siguiente esquema denota en forma simple los tipos de flujos:

**Tipos de flujo viscométricos.**

	Flujo cono y plato.
	Flujo torsional.
TIPOS DE FLUJO	Axial-anular
	Tangencial anular.
	Flujo cortante simple
	Flujo a régimen permanente

Ejemplos de flujos viscométricos:

a) **Flujo anular Axial:** fig. 2.4.1 a

En este caso y analizando los componentes de la ecuación de movimiento tenemos:

$$V_r = 0 \qquad P + \rho z g = P(r, z) \dots\dots\dots 2.4.1$$

$$V_\theta = 0$$

$$V = V_z(r)$$

Así la ecuación de movimiento queda como:

$$0 = -dp/dr - \{ 1/r d/dr (r \tau_{rr}) - \tau_{\theta\theta} / r \}$$

$$0 = 1/r^2 d/dr (r^2 \tau_{r\theta})$$

$$0 = dp/dz - 1/r d/dr (r \tau_{rz}) \dots\dots\dots 2.4.2$$

Integrando la ecuación anterior se tiene:

$$(p + \tau_{rr})_B - (p + \tau_{rr})_A = (\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta} / r) dr \dots\dots\dots 2.4.3$$

Para un fluido Newtoniano  $P_a=P_b$ . En el líquido polimérico, si  $P_a>P_b$  entonces  $(\tau_{rr}-\tau_{\theta\theta})$  es positivo.

**b) Flujo tangencial anular.** fig . 2.4.1. b

Su campo de velocidades característico es el siguiente:

$$V_z = V_z(r), V_r, V_\theta=0$$

Su velocidad de corte se manifiesta de la siguiente manera:

$$\gamma = rd/dr (V_\theta / r)$$

La superficie de corte se manifiesta en la geometría de cilindros concéntricos.

Las líneas de corte se dan en círculos con r y z constantes.

**c) Flujo torsional:** fig. 2.4.1. c

Su campo de velocidades característico es el siguiente:

$$V_\theta = V_\theta(z), V_r = V_z=0$$

Su velocidad de corte se manifiesta de la siguiente manera:

$$\gamma = r\omega / h$$

La superficie de corte se manifiesta en discos paralelos y sus líneas de corte se manifiestan en círculos con r y z constantes.

**d) Flujo de cono y plato:** fig. 2.4.1. d

el campo de velocidad se manifiesta de la siguiente manera:

$$V_\phi = V_\phi(\theta), V_\theta = V_r = 0$$

El gradiente de velocidad se denota como:

$$\gamma = 1/r (dV_{\theta}/d\theta)$$

La superficie de corte se manifiesta en conos a  $\theta$  constante y las líneas de corte se manifiestan en círculos a  $r$  y  $z$  constantes.

**e) Flujo en un tubo a régimen permanente:** fig. 2.4.1. e

el campo de velocidades se determina como:

$$V_z = V_z(r), V_r = V_{\theta} = 0$$

no existe velocidad de corte y el gradiente de velocidad se determina como:

$$\gamma = dV_z / dr.$$

La superficie de corte se manifiesta en cilindros concéntricos y sus líneas de corte se manifiestan en rectas paralelas al eje del tubo.

**f) Flujo Helicoidal.** fig. 2.4.1. f

El campo de velocidad se presenta como:

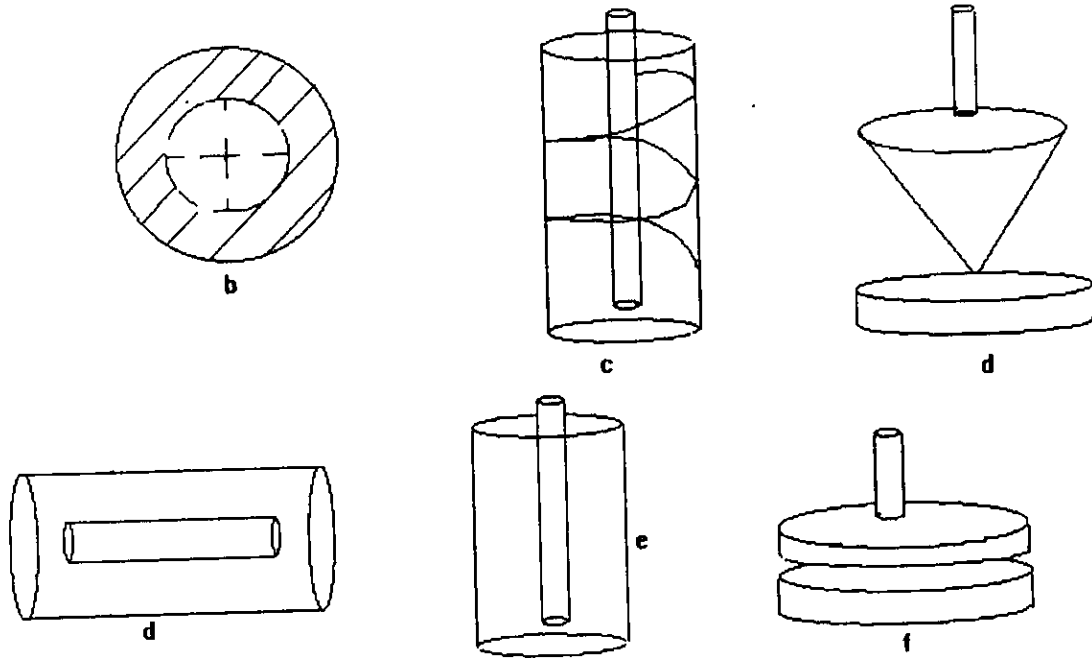
$$V_{\theta} = V_{\theta}(r), V_z = V_z(r), V_r = 0$$

La velocidad de deformación se manifiesta como:

$$\gamma = \left( \left( r \frac{d}{dr} \left( \frac{V_{\theta}}{r} \right) \right)^2 + \left( \frac{dV_z}{dr} \right)^2 \right)^{1/2}$$

la superficie de corte se determina en cilindros concéntricos y las líneas de corte se determinan en forma de hélices.

Ejemplos de flujos Viscometricos Fig 2.4.1





## 2.5 PRINCIPIOS DE REOMETRÍA.

Un coeficiente de viscosidad constante es todo lo que se necesita para determinar el comportamiento de líquidos newtonianos e incompresibles, bajo cualquier condición de movimiento y esfuerzo. La medición de este coeficiente de viscosidad requiere del uso de un " viscosímetro ". Como ejemplos de estos instrumentos podemos citar: el viscosímetro de Oswald, medidor de flujo ( melt indexer ), Brookfield Sychro - Electric.

La viscosidad de líquidos no Newtonianos puede ser dependiente de la rapidez de deformación. por lo tanto, un viscosímetro es inadecuado para caracterizar el comportamiento de estos materiales y debe ser reemplazado por un " Reómetro ", definido como un instrumento para medir propiedades reológicas.

La reología se define como la ciencia de la deformación y el flujo de materia.

Se dice que un cuerpo es deformado cuando la aplicación de un sistema de fuerzas adecuado cambia la forma o el tamaño del mismo.

Se dice que un cuerpo fluye si su grado de deformación cambia continuamente.

Desde el punto de vista fundamental o básico los objetivos de la reología son: por un lado, desarrollar técnicas que permiten establecer experimentalmente las relaciones de comportamiento de un material y por el otro sin lugar a duda el más importante, el establecimiento de relaciones entre esfuerzos y deformación, capaces de explicar el comportamiento de materiales complejos.

La aparición de los reómetros como instrumentos de medición han dado origen a lo que actualmente conocemos como reometría.

Dentro de la reometría existen dos objetivos básicos. El primero incluye el intento de determinar el comportamiento de un fluido no Newtoniano en situaciones de flujo simples empleando funciones materiales adecuadamente definidas. Lo que se pretende es encontrar una correlación entre estructura molecular y comportamiento material o alternativamente entre propiedades materiales y el comportamiento observado en situaciones prácticas.

El segundo objetivo involucra la predicción del comportamiento en situaciones de flujo más complejas a partir de los resultados de experimentos reométricos simples. Los datos del réometro son empleados para construir ecuaciones reológicas de estado (constitutivas) las cuales pueden ser empleadas en conjunción con las ecuaciones de movimiento y continuidad para predecir el comportamiento en situaciones más prácticas.

Desde el punto de vista experimental, existen básicamente dos tipos de réómetros:

- a) Rotacionales.
- b) Capilares o Slits.

Los dispositivos rotacionales, se basan en la medición de fuerzas y torques ejercidas por el material de prueba sobre alguna de las diferentes geometrías empleadas, tales como, cono y plato, placas paralelas, placas excéntricas, entre otras.

La deformación es aplicada al material por medio de la rotación de alguno de los miembros del aparato. Es característica de los réómetros rotacionales que el material de prueba se encuentre confinado por uno de los miembros del aparato.

Los dispositivos del tipo del capilar o Slit, se basan en medir la fuerza necesaria para que un fluido fluya a lo largo de un ducto de sección circular ( capilar ) o rectangular ( slit ) .

Estos instrumentos son los más versátiles para medir funciones materiales de polímeros, debido a que por su geometría son capaces de medir propiedades de los fluidos, tales como la viscosidad ( $\eta$ ).

Algunos de estos aparatos son muy sofisticados, debido que en algunos casos, estos son capaces de percibir valores bajos en la rapidez de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), esto dependerá de la especificaciones del fabricante.

Otra ventaja es que en la mayoría de los casos, las funciones materiales se pueden obtener directamente de las cantidades experimentales medibles, sin la necesidad de realizar correcciones. La única limitación de estos dispositivos radica en que no puede trabajar en valores altos de rapidez de deformación. En este intervalo, el flujo se vuelve inestable por la aparición de flujos secundarios provocados, en gran parte por los efectos inerciales.

En este capítulo se de hará una comparación y análisis de varios viscosímetros, las diferencias entre reómetros, así como sus intervalos de operación.

Algunos de estos son muy sencillos como por ejemplo el viscosímetro de Mac Michel y el Stormer que son cilindros concéntricos y que datan desde la primera década de este siglo.

Aunque realmente solo se cuenta con datos de hace 15 ó 20 años. Con los avances tecnológicos y el auge de la electrónica no tardó en modificarse la estructura de los viscosímetros convencionales.

La precisión se tomo como parte fundamental en los nuevos aparatos, así, surgieron instrumentos como el Brookfield o el Agia, por nombrar sólo algunos de los muchos que aparecieron.

La variedad de los valores de viscosidad arrojados por estos aparatos depende fundamentalmente del control de las variables, mismas a las que todo instrumento preciso está sujeto, dependiendo del control de las variables, se obtienen magnificos resultados.

Los instrumentos comerciales de este tipo, que pueden aplicarse a polímeros son básicamente los siguientes:

- a) Rheometrics Mechanical Spectrometer.
- b) Weissenberg Rheogoniometer.
- c) Brookfield Rheometer.
- d) Estormer Rheometer.

Estos son, sin duda los más versátiles, de un diseño de fácil uso y montaje dentro de un laboratorio.

En la tabla 2.6.1 se muestran de manera general algunos aspectos de los instrumentos señalados anteriormente.

TABLA 2. 6.1

ESQUEMA COMPARATIVO DE VARIOS VISCOSIMETROS COMERCIALES

NOMBRE	FABRICANTE	INTERVALO DE VELOCIDAD ( R.P.M.)	VISCOSIDAD APARENTE ( INTERVALO DE MEDICION ) ( POISE )	ESFUERZO CORTANTE ( INTERVALO DE MEDICION ) ( Seg. -1)	CONTROL DE TEMPERATURA
ROTOVISCO	GEBRUDER HAAKE BERLIN ALEMANIA	0.03 - 486	5E-3 - 4 E 7	1E-2 - 1 E4	BUENA
AGIA	AGIA AKTIENGESELLSCHAFT MUNICH ALEMANIA	0.08 - 250	1E -1 - 1 E 5	0.4 - 4.5 E2	BUENA
RHEOGONIOMETER	FAROL SCI P. LTD. SUSSEX ENGLAND	1.5 E -3 - 1 E 3	1 E -3 - 1 E 10	1 E-4 - 1 E3	EXCELENTE
MERRIL - BROOKFIELD	BROOKFIELD ENG. LABS. STOUGHTON MASS.	0 - 6000	2.5 E-1 - 1 E3	0 - 1 E5	EXCELENTE
FERRANTI - SHIRLEY	FERRANTI LTD. HLLINWOOD ENGLAND.	0 - 1000	2 E -1 - 1 E 3	0 - 1.8 E4	BUENA
REOMETRO DRAGE	AG. EPPREGEHT LTD. ZURICH. SUIZA.	16.38 - 320	5 E -3 - 3 E 4	3.7 - 1.64 E3	
POLARAD	POLARAD ELECTRON CORP. LONG ISLAND CITY		ARRIBA DE 8	0.2 - 50	BUENA
BROOKFIELD	BROOKFIELD ENG. LABS. STOUGHTON MASS.	0.3 - 100	1E -2 - 6.4 E4	1.5 E-3 - 95.75 E4	
STORMER	A.H. THOMAS Co. PHILADELFHIA PaW.	0 - 600	1 E -1 - 6E 3	DEPENDE DEL ROTOR Y EL CONTENEDOR	REGULAR
MAC MICHEL	FISHER SCI Co. PITTSBURGH PaW.	1E-1 - 2.1 E 4	2.14 - 14.3	0 - 4.55 E4	REGULAR

### CAPÍTULO 3

En este capítulo se presenta la determinación y propuesta de un método que se acerque al modelo real que prediga el como medir la deformación, y con esto lograr conocer la viscosidad del fluido, parte importante que permitirá conocer mas adelante el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad.

La geometría en donde se lleva a cabo la deformación del fluido es muy importante y se debe considerar dentro de los métodos que se propongan, pues ésta es la que influye en su determinación; ya que estos se basan en principios de deformación. La deformación que sufre depende de la forma de aplicar la fuerza, del movimiento y de la velocidad del fluido. Otro aspecto importante en la deformación es el contacto entre el fluido y la superficie de contacto.

La geometría que se estudiará en este capítulo es la de cilindros concéntricos y el análisis para poder conocer en principio el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad es el que a continuación se presenta.

**3.1 DETERMINACIÓN DE ESFUERZO CORTANTE Y LA VELOCIDAD DE CORTE**  
**CUANDO SE UTILIZAN CILINDROS CONCÉNTRICOS**

La Ley de Newton establece que la relación entre  $\tau$  y  $\gamma$  se expresa como:

Donde:

$\tau_{yx} = \mu \gamma$  .....3.1.1

$\mu$  = viscosidad

$\tau$  = esfuerzo cortante

$\gamma$  = velocidad de corte

Para fluidos no Newtonianos se puede decir que :

$\tau_{yx} = \eta \gamma$  .....3.1.2

$\eta$  = viscosidad aparente o función de viscosidad

Aplicando la Ley de la Potencia se obtiene :

$\tau_{yx} = k ( dv_x / dy )^n$  .....3.1.3

Comparando esta con la ecuación de la ley de viscosidad newtoniana tenemos:

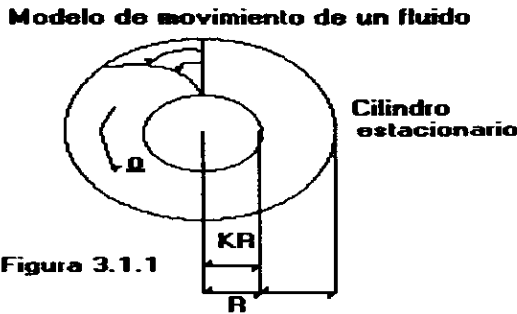
$\tau_{yx} = k \gamma^n$  .....3.1.4

**n=índice de consistencia**

donde  $n$  indica el comportamiento del fluido y  $k$  la viscosidad.

- Si  $n = 1$                                     El fluido es Newtoniano
- Si  $n > 1$                                     El fluido es Pseudoplástico
- Si  $n < 1$                                     El fluido es Dilatante

El siguiente modelo representa el movimiento de un fluido incompresible con flujo laminar en el espacio comprendido entre dos cilindros coaxiales, el cilindro interno gira con una velocidad angular  $\Omega$  i como se muestra en la siguiente figura 3.1.1



$k$  = constante de la relación de radios ( radio del husillo / radio del contenedor )

A fin de analizar el movimiento del fluido entre dos cilindros se requiere utilizar la Ecuación de Continuidad ( Ecuación de balance de materia ) y la Ecuación de Movimiento ( de Transferencia de Momento. ) en Coordenadas cilíndricas.

Si se toma la ecuación de continuidad:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{1}{r} \left( \frac{\delta \rho r}{\delta r} V_r \right) + \frac{1}{r} \left( \frac{\delta \rho}{\delta \theta} V_\theta \right) + \frac{\delta \rho}{\delta z} V_z \dots\dots\dots 3.1.5$$

Y haciendo las siguientes consideraciones:

- a ) el líquido es incompresible.
- b) el movimiento del líquido es laminar.



La ecuación anterior se reduce a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} = 0.$$

La ecuación anterior nos indica que la velocidad no depende del ángulo, y teniendo en cuenta que el husillo es uniforme a lo largo de su altura ( z ), se concluye que la velocidad angular únicamente es función del radio.

Tomando la Ec de Movimiento con r y z como constantes, la altura y el radio del husillo no varían.

Para la componente en  $\theta$  :

$$\rho \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{V_{\theta}}{r} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} \right) + V_r \frac{V_{\theta}}{r} + V_z \frac{\partial V_{\theta}}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (r V_{\theta})}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) + \left( \frac{V_{\theta}}{\partial \theta^2} + 2 \delta \frac{V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_{\theta}}{\partial z^2} \right) \rho g_{\theta} \dots \dots \dots 3.1.6.$$

Tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- a ) La velocidad del husillo es constante.
- b ) No existe velocidad radial ( el radio del husillo no cambia )
- c ) La gravedad en la componente  $\theta$  no existe.

Con lo anterior la Ecuación de Movimiento se reduce a:

$$\mu \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \left( r \frac{\partial V_{\theta}}{\partial r} \right) \right] = 0 \dots \dots \dots 3.1.7.$$

Integrando la ecuación anterior tenemos:

$$\frac{1}{r} d \left( r V_{\theta} / dr \right) = C_1 \dots \dots \dots 3.1.8.$$

Integrando por segunda vez:

$$V_{\theta} = C_1 ( r / 2 ) + ( C_2 / r ) \dots \dots \dots 3.1.9.$$

Las condiciones a la frontera se toman considerando que  $r$  sólo puede tomar los valores del radio exterior del husillo y el radio interior del contenedor y  $V_\theta$  toma los valores en donde  $r$  es igual al diámetro del husillo, y donde el valor de  $r$  no es mayor al diámetro del contenedor, esto se hace con el fin de evaluar  $C_1$  y  $C_2$  entonces tenemos:

$$\begin{array}{ll} \text{Si: } r = kR & \text{Entonces: } V_\theta = \Omega_1 KR. \\ r = R & V_\theta = 0 \end{array}$$

Con estas condiciones las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$0 = (C_1 R / 2) + (C_2 / R) \dots\dots\dots 3.1.10$$

$$\Omega_1 KR = [(C_1 KR) / 2] + (C_2 / kR) \dots\dots\dots 3.1.11$$

De la solución simultánea de ambas ecuaciones se obtiene:

$$C_1 = -2\Omega_1 k^2 / (1 - K^2) \dots\dots\dots 3.1.12.$$

$$C_2 = R^2 \Omega_1 K^2 / (1 - K^2) \dots\dots\dots 3.1.13$$

Sustituyendo los valores de las constantes en la ecuación 3.1.9 tenemos:

$$V_\theta = (R^2 \Omega_1 K^2 - (Rk)^2 \Omega_1) / (k^2 - 1) \dots\dots\dots 3.1.14.$$

La ecuación anterior se conoce como distribución o perfil de velocidades, y permite determinar la velocidad en cualquier punto entre el radio del husillo y el radio del contenedor.

El siguiente paso es analizar el Esfuerzo Cortante ( $\tau_{r\theta}$ ), el cual se manifiesta en conjunto con la velocidad del movimiento de un fluido.

La obtención del esfuerzo cortante se hace a partir de los tensores de esfuerzo en coordenadas cilíndricas.

$$\tau_{r\theta} = -\mu \left[ \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( \frac{V\theta}{r} \right) + \left( \frac{1}{r} \right) \left( \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right) \right] \quad \dots\dots\dots 3.1.15.$$

Como la velocidad radial en este sistema no existe, por lo tanto; de la ecuación anterior nos queda:

$$\tau_{r\theta} = -\mu \left[ \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( \frac{V\theta}{r} \right) \right] \quad \dots\dots\dots 3.1.16.$$

Sustituyendo el perfil de velocidades ( Ec. 3.1.14 ) en la ecuación anterior tenemos:

$$\tau_{r\theta} = -\mu \left( \frac{d}{r} \right) \left( \frac{r^2 \Omega_1 K^2 - (Rk)^2 \Omega_1}{(R^2 - 1)r^2} \right) \quad \dots\dots\dots 3.1.17.$$

Llevando a cabo la derivada respecto al radio del perfil de velocidades y simplificando, el esfuerzo queda:

$$\tau_{r\theta} = 2\mu \Omega_1 R^2 \left( \frac{1}{r^2} \right) (K^2 / 1 - K^2) \quad \dots\dots\dots 3.1.18.$$

La ecuación anterior determina la distribución de esfuerzos cortantes en cualquier posición radial.

Para el caso particular en el que se considera el esfuerzo cortante en la superficie de la pared del husillo entonces  $r = kR$ , tenemos:

Para fluidos Newtonianos:

$$\tau_{r\theta} = 2 \mu \Omega_1 \left( \frac{1}{1 - K^2} \right) \quad \dots\dots\dots 3.1.19$$

Para fluidos No Newtonianos:

$$\tau_{r\theta} = 2 \eta \Omega_1 ( 1/1- K^2 ) \dots\dots\dots 3.1.20.$$

Para obtener la expresión del esfuerzo en el sistema gravitacional.

$$\tau_{r\theta} = ( 2/gc ) \mu \Omega_1 ( 1/1-K^2 ) \dots\dots\dots 3.1.21.$$

Recordando la Ec. ( 3.1.2. ) tenemos:

$$\gamma = \tau_{r\theta} / \eta$$

En donde expresándola en función del gradiente de deformación o velocidad de deformación ( $\gamma$ ) ya que es el factor que determina la forma en que se incrementa o disminuye la deformación en un fluido queda:

Primero sustituyendo el perfil del esfuerzo cortante en la Ec. (3.1.21) en la ecuación anterior tenemos:

$$\gamma = 2\Omega_1 ( 1/1-k^2 ) \dots\dots\dots 3.1.22.$$

Esta ecuación permite determinar el gradiente de velocidad en la pared externa del husillo.

Con las ecuaciones 3.1.22 y 3.1.21 se determina el comportamiento de un fluido al someterlo a una deformación: esfuerzo cortante y gradiente de velocidad.

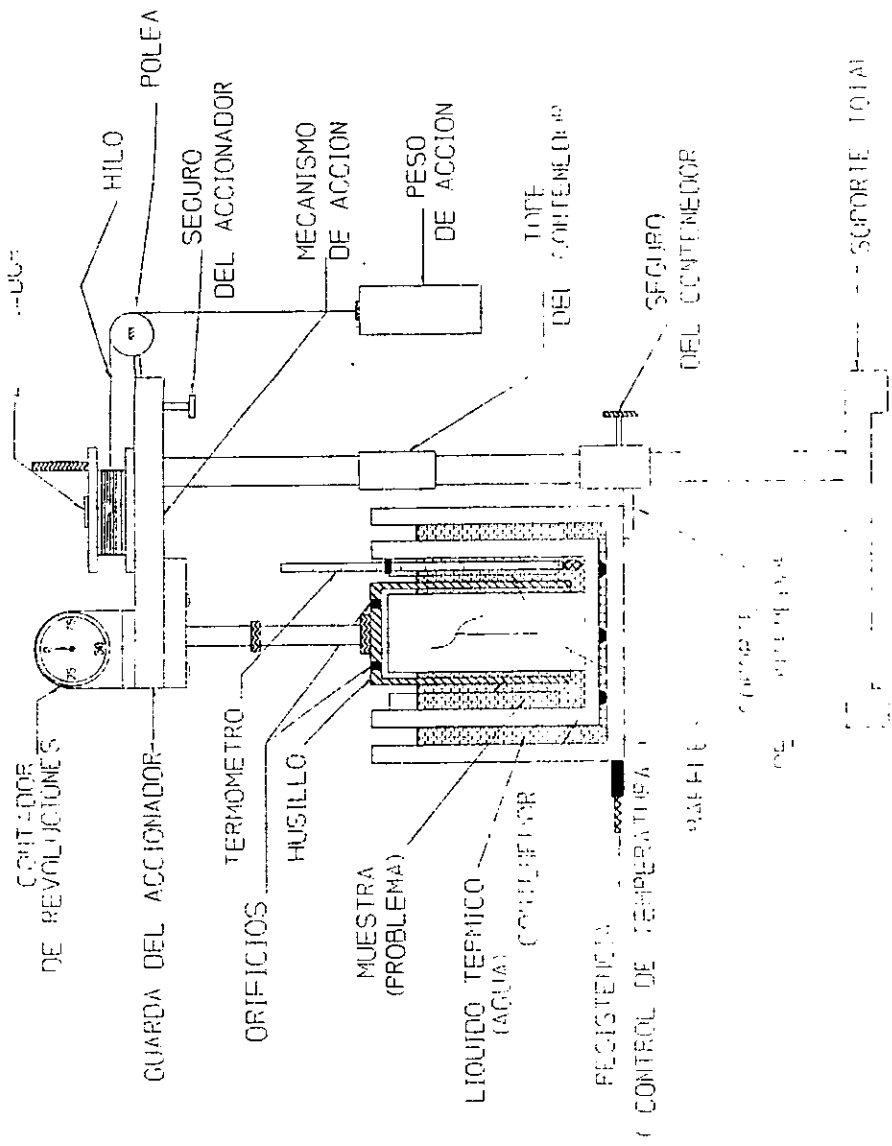
Sus valores dependen de la geometría a la que se expone el fluido. Para poder hacer un análisis concreto de las variables que antes se repasaron del comportamiento del fluido es necesario considerar la geometría del viscosímetro que se utilizará; en este caso será el de Stormer.

### **3.2 DESCRIPCIÓN DEL VISCOSÍMETRO DE STORMER.**

El viscosímetro de Stormer (esquema 3.2.1) es totalmente mecánico, y no mide directamente la viscosidad. Está diseñado para deformar un fluido que se encuentra en la región anular a lo largo de los dos cilindros concéntricos, uno de ellos rota sobre su eje, mientras el otro se encuentra estacionario.

Está provisto de un contenedor o recipiente en donde se vierte la muestra del fluido que se desea analizar, el cual tiene un par de baffles ( láminas que se encuentran en el interior del contenedor y permiten el movimiento del cilindro interno ), y una funda para termómetro. El contenedor está soportado por una base que se puede ajustar, esto con el fin de poder extraer la muestra una vez que se ha concluido la experimentación, otra característica de la base es poder controlar la temperatura de la muestra, por medio de un fluido térmico ( agua ) y una resistencia eléctrica que se encuentra en la parte inferior de la base. El cilindro interno cuenta con perforaciones en la parte superior a fin de que no se introduzca aire dentro de este y su propósito es evitar el efecto de bollaje. En la parte superior posee un mecanismo que acciona el movimiento del cilindro interno y cuenta además con un freno, el movimiento del cilindro se origina con diferentes pesas, así, a mayor peso mayor es el movimiento.

A continuación se propondrán métodos para poder evaluar la viscosidad del fluido.



ESQUEMA STORMER ESQUEMA 321

**DIMENSIONES DEL HUSILLO Y CONTENEDOR**  
**VISCOSÍMETRO DE STORMER.**

largo	3.56
diámetro del husillo	3.18
diámetro interno del contenedor	4.77

**Notas:**

las dimensiones están en centímetros

los diferentes husillos fueron diseñados con las mismas longitudes.

Para efectos de cálculo solo se usaran el diámetro externo del husillo y el diámetro interno del contenedor.

**3.3 MÉTODOS PROPUESTOS PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE FLUIDOS NEWTONIANOS EN UN SISTEMA DE CILINDROS CONCÉNTRICOS.**

**3.3.1 Método de la ecuación de Margules.**

En este caso en particular el análisis se basará en la ecuación de Margules.

Para poder entender esta ecuación es necesario partir de algunas definiciones:

**Torque:**

Desde el punto de vista físico, torque es la acción de un par de fuerzas sobre un punto a una distancia dada.

Aplicando este concepto al viscosímetro de Stormer, el torque se manifiesta sobre la pared del husillo y el peso que acciona el movimiento, y considerando el radio externo del husillo como brazo de palanca, el torque en función del esfuerzo cortante podrá escribirse como:

$$\zeta = \tau_{r\theta} 2 \pi R_1^2 L \dots\dots\dots 3.3.1.$$

Donde:

- $\zeta$  = Torque. ( g.cm. )
- $\tau_{r\theta}$  = Esfuerzo cortante. ( g/ cm<sup>2</sup>. )
- $R_1$  = Radio del husillo externo. ( cm.)

Se debe tomar en cuenta un punto que es importante, el esfuerzo cortante también está en función de la Viscosidad y el Gradiente de Velocidad, así:

$$\tau_r = \eta \gamma \dots\dots\dots 3.1.2.$$



Si se despeja la viscosidad de la ecuación 3.1.2 y recordando la ecuación que determina el gradiente de velocidad ( Ec. 3.1.22 ) y sustituyendo esta en la ecuación 3.3.1 tenemos:

$$\eta = \frac{\tau_r}{\dot{\gamma}} = \left( \frac{\zeta}{4 \pi \Omega_1 L} \right) \cdot \left( \frac{R_c^2 - R_b^2}{R_c^2 R_b^2} \right) \dots\dots\dots 3.3.2$$

Reagrupando tenemos:

$$\eta = \left( \frac{R_c^2 - R_b^2}{4 \pi L R_c^2 R_b^2} \right) \cdot \frac{\zeta}{\Omega_1} \dots\dots\dots 3.3.3$$

donde  $R_c$  es el radio externo del husillo y  $R_b$  es el radio interno del contenedor.

El término  $\left( \frac{R_c^2 - R_b^2}{4 \pi L R_c^2 R_b^2} \right)$  se conoce como la constante del viscosímetro (  $k$  ) entonces la viscosidad podrá expresarse como:

$$\eta = \frac{K \cdot \zeta}{\Omega_1} \dots\dots\dots 3.3.4.$$

o también como:

$$\zeta = (\eta/K) \Omega_1 \dots\dots\dots 3.3.5$$

Donde:

$K$  = cte. del viscosímetro.

$\zeta$  = Torque.

$\Omega_1$  = velocidad angular.

La ecuación 3.3.5 se conoce como Ecuación de Margules, las variables son el torque ( $\zeta$ ) y la velocidad angular ( $\Omega_1$ ).

La velocidad angular se calcula en la superficie del husillo y el torque se considera como el peso que acciona el movimiento de este por el brazo de palanca (radio externo).

Si se observa la ecuación de Margules en su última expresión (3.3.5) podrá observarse que esta presenta un comportamiento de tipo lineal.

Las variables que se deben considerar son el torque, pues este es el que afecta directamente al movimiento del husillo y la velocidad angular. Para poder determinar los torques que originen una deformación homogénea del fluido dentro del espacio que se origina por el husillo y el contenedor del viscosímetro, se deberá aplicar un método por el cual se visualice la deformación homogénea, este método se determina graficamente( R.P.M. vs. Torque ). Así, por medio de dicha gráfica se puede ver que: para deformaciones muy pequeñas en el fluido ( fig. 3.3.1) (movimientos muy lentos del husillo zona 1) la ecuación no se cumple y para movimientos muy rápidos (régimen turbulento zona 3) tampoco se cumple esta ecuación. La parte lineal zona 2 es la que cumple con la ecuación de Margules.

Dicho método se presenta en el artículo "Extending the useful of concentric cylinder viscometer". Donde se muestra la parte en donde el comportamiento es lineal y por tanto la ecuación de Margules se cumple.

En la figura 3.3.1 se muestra dicho ejemplo:

### Gráfica de comportamiento Ec. Margules

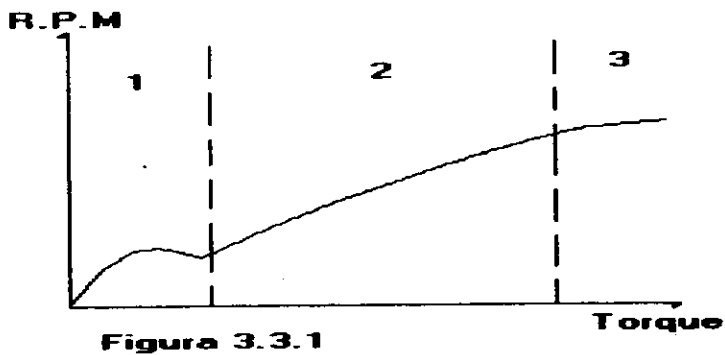


Figura 3.3.1

### Método del Factor de Fricción contra el número de Reynolds

El segundo método se basa en el análisis tanto del factor de fricción como del número de Reynolds que se originan en la superficie del husillo.

Ahora, toda relación que se obtenga de estos, estará bajo el límite propuesto anteriormente.

Se debe recordar que el factor de fricción es función del esfuerzo cortante y el primero, a su vez es función del número de Reynolds. Así si se considera cada uno de los factores que intervienen ( esfuerzos, velocidad angular del husillo y densidad del liquido ) el factor de fricciones puede definir como:

$$f = \tau_{r0} / (0.5 \rho \Omega^2) \dots \dots \dots 3.3.6$$

Donde:

$\tau_{r0}$  = Esfuerzo cortante en la pared ( g cm / s ).

$\rho$  = densidad ( g / cm<sup>3</sup> ).

$\Omega$  = velocidad angular del husillo.

Para un fluido Newtoniano según la ecuación 3.1.22 se tiene:

$$\tau_{r0} = \frac{(2)}{gc} \mu \Omega_1 \left( \frac{1}{1-K^2} \right)$$

Que al sustituirla en la ecuación del Factor de Fricción da:

$$f = [2 \mu \Omega_1 ( 1 / 1-K^2 )] / (0.5 \rho \Omega^2) \dots \dots \dots 3.3.7$$

Como se podrá observar en la ecuación anterior, el denominador determina lo se conoce como energía cinética; en donde, la única variable que puede tomar cualquier valor dentro de un perfil muy amplio, es la velocidad angular.

Ahora bien, si se considera que el efecto del factor de fricción sólo nos interesa sobre la pared externa del husillo, el valor de la velocidad puede sustituirse por  $(v = \Omega, KR)$  entonces la ecuación anterior podrá escribirse como:

$$f = [4 \mu ( 1/1-K^2)] / [\rho \Omega_1 ( KR )^2] \dots\dots\dots 3.3.8$$

Esta ecuación determina el factor de fricción manifestado sobre la pared del husillo.

De igual forma se pueden entonces utilizar las mismas consideraciones para el número de Reynolds.

Tomando el diámetro igual al diámetro del husillo  $( 2KR )$  y el valor de la velocidad como  $KR\Omega_1$ , el numero de Reynolds podrá expresarse como:

$$Re = \frac{2( KR )^2 \Omega_1 \rho}{\mu} \dots\dots\dots 3.3.9.$$

Si se divide la ecuación anterior entre ocho, y una vez hecha esta operación, se toma el inverso se observará que el factor de fricción se puede expresar en función del número de Reynolds.

$$f = \left( \frac{8}{Re} \right) \times \left( \frac{1}{1-K^2} \right) \dots\dots\dots 3.3.10.$$

Esta ecuación nos permite determinar el factor de fricción sobre la pared del husillo.

En este método, solo se considera la pared del husillo y la pared interna del contenedor como limite, tanto para el factor de fricción como para el numero de Reynolds.

Habrá que considerar algunos otros factores que intervienen en el proceso de deformar un fluido en este viscosímetro. Por ejemplo, el efecto de las áreas ( baffles y guarda del termómetro ) en el contenedor del viscosímetro, así como los esfuerzos adicionales provocados por estos.

**Método del factor de fricción contra el número de Reynolds corregido.**

En este se podrá observar que las ecuaciones y los puntos de partida, son complementarios de los métodos anteriormente descritos. Es producto de una corrección que toma en cuenta las áreas que forman parte del viscosímetro ( contenedor ) o bien los efectos secundarios que pueden presentarse en la experimentación a partir de estos.

El factor de fricción, el cual está definido por la siguiente ecuación:

$$f = \tau_{rg} / 0.5 \rho v^2 \dots\dots\dots 3.3.6$$

Si se despeja el esfuerzo cortante de la ecuación 3.3.1 propuesta en el primer método y se sustituye en la ecuación anterior, y considerando la velocidad en la superficie del husillo el factor de fricción se puede definir como:

$$f = \frac{\zeta}{2 \pi R_1^2 L 0.5 \rho (\Omega_1 R_1)^2} \dots\dots\dots 3.3.11.$$

Reacomodando la ecuación anterior tenemos:

$$f = \frac{\zeta}{0.1963 D^4 L \rho \Omega_1^2} \dots\dots\dots 3.3.12.$$

En la ecuación anterior el término (0.1963 D<sup>4</sup> L) denota el efecto de área.

Ahora existen varias consideraciones que deben de tomarse en cuenta.

Tanto el factor de fricción como el número de Reynolds son fenómenos que se manifiestan a través de todo un perfil, en este caso sólo se consideraremos los que ocurren sobre la superficie del husillo.

El efecto que se origina en el área adicional debido tanto a los baffles del contenedor como el área interna del husillo es desconocido, por lo tanto, los efectos posteriores también se desconocen; es por esta razón que el efecto de esta área se puede eliminar de la ecuación 3.3.12.

Y con esto se originará un nuevo factor de fricción corregido, en donde los efectos de área adicional no son tomados en cuenta.

El nuevo factor de fricción ahora con unidades se expresa de la siguiente manera:

$$f' = \frac{\zeta}{\rho \Omega_i^2} \dots\dots\dots 3.3.13$$

Donde:

$\zeta$  = Torque o peso ( g ).

$\rho$  = Densidad ( g cm<sup>3</sup> )

$\Omega$  velocidad angular.

Para el número de Reynolds la ecuación resultante considerando la velocidad en el husillo se expresa:

$$Re = \frac{D_i K_r \Omega_i \rho}{\mu} \dots\dots\dots 3.3.14.$$

El efecto de área que determina el diámetro interno del husillo (  $D_i K_r$  ) se elimina, pues al igual que en el factor de fricción no se conocen los efectos finales, y bajo las mismas condiciones.

El número de Reynolds nos queda como:

$$Re' = \frac{\Omega \rho}{\mu} \dots\dots\dots 3.3.15.$$

Donde:

$\mu$  = viscosidad ( g cm / s )

$\rho$  = Densidad ( g / cm<sup>3</sup> )

Este número de Reynolds corregido cuenta con unidades al igual que el factor de fricción corregido, estos cumplen con la definición del número de Reynolds y factor de fricción.

Todos y cada uno de estos métodos serán discutidos con mayor detalle en la parte experimental, y estarán sujetos a prueba con el objeto de poder saber cual de estos es el que mejor funciona, y arroja mejores resultados, comparándolos con los ya existentes en bibliografía.

Ahora que se han discutido los métodos por los cuales se puede conocer la viscosidad para fluidos newtonianos, el siguiente paso dentro de este tipo de análisis es el poder determinar la viscosidad en fluidos no newtonianos, que a diferencia de los newtonianos, los esfuerzos que presentan son diferentes a través de la deformación que llega a tener el fluido, y es por esta razón que el proceso de obtención de viscosidad en especial, es diferente.

### **3.4 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD PARA FLUIDOS NO NEWTONIANOS EN VISCOSÍMETRO DE TUBOS CONCÉNTRICOS ( Stormer ).**

Para el caso en el que los fluidos que se pretenden estudiar son no Newtonianos, el análisis es mas complicado que para los fluidos newtonianos.

Según lo que se propuso en el capítulo uno de esta tesis. El comportamiento de los fluidos no Newtonianos es diferente entre si, esto es, que las diferencias entre estos son muy marcadas.

Por esta razón es necesario determinar un método que determine el comportamiento del fluido no Newtoniano en este viscosímetro.

Como inicio se debe considerar como parte importante la geometría de este viscosímetro y para resolver esta situación será necesario partir de las ecuaciones que se vieron en el inicio de este capítulo.

De la determinación del esfuerzo cortante ( $\tau$  sección 3.1) . Y según la geometría del viscosímetro se tiene:

$$\tau (r) = \zeta / (2 \pi r^2 L) \dots\dots\dots 3.4.1$$

Donde:

$\zeta$  = torque ( g )

$r$  = radio del husillo ( cm )

$L$  = longitud del husillo ( cm )

Con el propósito de simplificar esta ecuación, se definirá (  $G = \zeta / L$  ) fuerza por longitud ( cm ) del husillo, así la ecuación anterior nos queda como:

$$\tau (r) = G / (2 \pi r^2) \dots\dots\dots 3.4.2$$

Bajo este concepto y recordando la ecuación 3.1.2 tenemos:

$$\tau_{yx} = \eta \gamma$$



De la ecuación anterior podemos decir entonces que el gradiente de velocidad es función del esfuerzo cortante:

$$\gamma = f(\tau)$$

Bajo esta condición se puede determinar que el gradiente de velocidad se puede definir entonces como:

$$\gamma = r \frac{d\Omega}{dr} = r \frac{d}{dr} \left( \frac{u}{r} \right) \dots\dots\dots 3.4.3.$$

Igualando la ecuación 3.4.2 y 3.4.3, el esfuerzo cortante en función del gradiente nos queda como:

$$r \left( \frac{d}{dr} \right) \left( \frac{u}{r} \right) = f \left[ \frac{G}{2 \pi r^2} \right] \dots\dots\dots 3.4.4.$$

La solución de la ecuación diferencial resultante ( Ec. 3.4.4 ) depende de los límites o condiciones a la frontera y de la superficie de ambos cilindros, tanto del husillo como del contenedor, tomando en cuenta que no existe escurrimiento en el husillo las condiciones a la frontera se pueden proponer como:

$$\begin{array}{ll} V_t = 0 & r = R \\ V_t = \Omega_1 KR & r = KR \end{array}$$

Bajo estas condiciones y si se realiza la integración de la ecuación 3.4.4, para conocer la velocidad puntual:

$$u \left( \frac{r}{r} \right) = f \left( \frac{G}{2 \pi r^2} \right) \frac{dr}{r} \dots\dots\dots 3.4.5$$

Ahora cuando la posición radial ( r ) adquiere el valor del radio del contenedor la integral queda como:

$$\Omega = u \left( \frac{R}{R} \right) = f \left( \frac{G}{2 \pi r^2} \right) \frac{dr}{r} \dots\dots\dots 3.4.6$$

La ecuación anterior esta en función de la velocidad de corte y por lo tanto puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Omega = f \left( \frac{G}{2 \pi r^2} \right) \frac{dr}{r} \dots\dots\dots 3.4.7$$

Si el esfuerzo cortante se define como una fuerza por unidad de área, entonces es valido pensar que:

$$\tau ( r ) = G / 2 \pi r^2$$

Donde :

**G = fuerza**

**2 π r<sup>2</sup> = Area**

Y por lo tanto la derivada queda como:

$$\frac{dr}{r} = \frac{d\tau}{2\tau}$$

Así pues la integral expresada en la ecuación 3.4.7 puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$\Omega = f(\tau) \frac{d\tau}{2\tau} \dots\dots\dots 3.4.8$$

La solución de la ecuación anterior permite determinar la velocidad angular en un punto dado, en función del esfuerzo cortante.

Para fluidos que siguen la ley de la potencia ( Sección 2.2 )

$$\tau = k(\gamma)^n$$

Despejando el gradiente de velocidad ( $\gamma$ ) de la ecuación anterior :

$$\gamma = f(\tau) = \left( \frac{\tau}{k} \right)^{1/n} \dots\dots\dots 3.4.9$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación 3.4.8 , la integral se puede definir como:

$$\Omega = \left( \frac{\tau}{k} \right)^{1/n} \frac{d\tau}{2\tau} \dots\dots\dots 3.4.10$$

Realizando la integral expresada en la ecuación anterior.

$$\Omega = \frac{n}{2k^{1/n}} (\tau_1^{1/n} - \tau_2^{1/n}) \dots\dots\dots 3.4.11$$

Ahora si recuerda la función del esfuerzo cortante propuesta anteriormente se tiene:

$$\tau(r) = \frac{G \cdot \theta}{2 \pi r}$$

Al sustituir este valor en la ecuación anterior el valor queda como:

$$\Omega = \frac{n}{2^{1/n}} \left( \frac{G}{2\pi} \right)^{1/n} \left( \left( \frac{1}{KR} \right)^{1/n} - \left( \frac{1}{R} \right)^{1/n} \right) \dots\dots\dots 3.4.12$$

Si se toma como referencia la ecuación para fluidos según la ley de la potencia (sección 2.2) y tomando el gradiente de velocidad en función del radio y expresándolo en función de la primera tenemos:

$$\tau = k (\gamma)^n$$

Despejando el gradiente de velocidad (  $\gamma$  ) y sustituyendo el valor del esfuerzo cortante ( Ec. 3.4.2 ) se puede expresar el valor del gradiente de la siguiente manera:

$$\gamma ( r ) = \left( \frac{G}{2\pi r^2 k} \right) \dots\dots\dots 3.4.13.$$

Si se despeja G de la ecuación anterior y se sustituye en la ecuación 3.4.12 el valor del gradiente de velocidad queda como:

$$\gamma = \frac{2\Omega}{n \left( (1/KR)^{2/n} - (1/R)^{2/n} \right) r^{2n}} \dots\dots\dots 3.4.14$$

La relación anterior determina el perfil del gradiente de velocidad a través del espacio que existe entre el husillo y el contenedor, y está depende únicamente del índice de la ley de la potencia ( n )

Ya con los términos una vez identificados, el siguiente paso es determinar el método matemático para obtener la viscosidad dentro del sistema de tubos concéntricos.

Para calcular la viscosidad se debe recordar que:

$$\mu (r) = \frac{\tau (r)}{\gamma (r)}$$

Si se toma en cuenta que  $\tau (r) = G / 2 \pi r^2$  y con la ecuación 3.4.14 ( de la determinación del gradiente de velocidad ) se puede entonces conocer la ecuación, que determine como encontrar el perfil de viscosidades que se presentan en el espacio entre el contenedor y el husillo de este viscosímetro.

Para fluidos no Newtonianos esta se puede expresar como:

$$\mu (r) = \frac{G ((1/kR^2) - (1/R^2)) \cdot n (1 - (kR/k))^{2n} (r/kR)^{2n-2}}{4 \pi \Omega (1 - (kR/k)^2)} \dots\dots\dots 3.4.15$$

Donde :

G = Peso por altura.(g cm)

kR = Diámetro del husillo.( cm )

k = Diámetro del contenedor.( cm )

n = Índice de la ley de la Potencia.

r = posición radial.

Para poder resolver esta ecuación se deberá determinar una serie de limites los cuales se propondrán en la parte experimental de esta tesis.

## CAPÍTULO 4.

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el capítulo anterior se estudiaron las posibles alternativas o métodos para obtener la viscosidad de fluidos newtonianos y no Newtonianos en el viscosímetro de Stormer. Ahora, en este se aplicarán cada uno de los métodos descritos anteriormente.

Este capítulo se dividirá en dos partes importantes, la primera parte que tratará exclusivamente la experimentación para fluidos newtonianos, analizando uno por uno los métodos descritos en el capítulo 3, esto con el objeto de comprobar cual de ellos es el mas conveniente para el uso del viscosímetro de Stormer y con esto poder plantear una práctica la cual utilice como base este viscosímetro.

La segunda parte tratará solamente la experimentación para la obtención de resultados de fluidos no Newtonianos. El método propuesto en el capítulo 3 será la única base para realizar la experimentación debido a que sólo se cuenta con un método.

A continuación se presenta la experimentación para obtener los resultados obtenidos en el primer método.

#### **4.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DEL PRIMER MÉTODO PROPUESTO:** **(APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE MARGULES).**

Tomando la ecuación de Margules propuesta en el capítulo 3 sección 3.3.

$$\eta = \frac{\kappa \cdot \zeta}{\Omega_1}$$

Donde:

$\zeta$  = torque, que es el peso que acciona el movimiento por el radio del husillo ( g.cm )

K = constante del viscosímetro y, que es adimensional (el valor de esta se calculará más adelante).

$\Omega_1$  = velocidad angular del husillo ( el cálculo de esta variable se hace según la ecuación propuesta en el manual del aparato)

$$\text{R.P.M.} = \left( \frac{\text{tiempo en seg. por cada 100 revoluciones}}{100} \right) \times 60 \dots\dots\dots 4.1.1$$

El valor de la constante del aparato ( K ) , según la sección 3.3, es:  $( R_c^2 - R_b^2 ) / 4 \pi L R_c^2 R_b^2$

donde  $R_c$  es el radio externo del husillo y  $R_b$  es el radio interno del contenedor del viscosímetro de Stormer.

$$K = \frac{(4.77^2 - 3.18^2)}{4 (3.1416) (3.56) (4.77) (3.18)}$$

$$K = 0.3390.$$

( la constante del viscosímetro es adimensional )

Para la aplicación de la ecuación anterior es necesario considerar ciertos aspectos del funcionamiento del viscosímetro Stormer. (observar esquema 3.2.1) :

Procedimiento experimental:

- a) El líquido térmico deberá ser vertido en el contenedor, antes de iniciar la experimentación.
- b) Subir el peso que acciona el movimiento del husillo con el accionador girándolo en contra del sentido de las manecillas del reloj y deteniéndolo con el seguro del accionador.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- c) Comprobar la temperatura de experimentación con la resistencia o control de temperatura.
- d) Poner el husillo en su base.
- e) Vaciar la muestra problema en el contenedor.
- f) Subir el contenedor hasta el tope.

Para evaluar la viscosidad se consideraran solo los pesos en los que se cumple la ecuación de Margules ( zona lineal ). Para esto se debera hacer una gráfica de R.P.M. vs. Torque ( ver Figura 3.3.1 )

El tiempo se mide lo que tarda en dar una vuelta completa el contador de revoluciones ( esquema 3.2.1 ), con esto se obtendrán las revoluciones por minuto.

Los fluidos problema que se utilizaron durante este método son:

Acetona, benceno, ciclohexanol y aceite Texaco. La temperatura a la cual se realizo la experimentación es de 20°C .

Los datos obtenidos Asi como las gráficas de selección de pesos se muestran en la tabla 4.1.1.

Si se observan estos, discrepan mucho de los valores reportados en la bibliografía mismos que se presentan en dicha tabla.

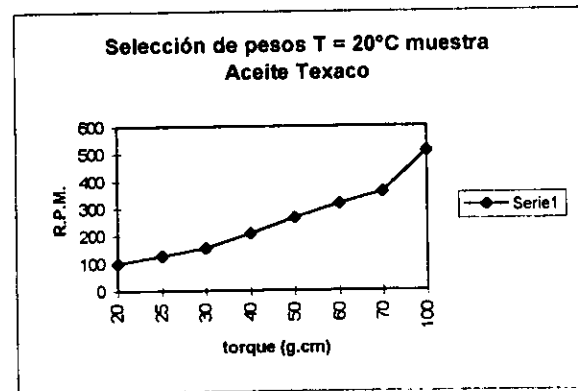
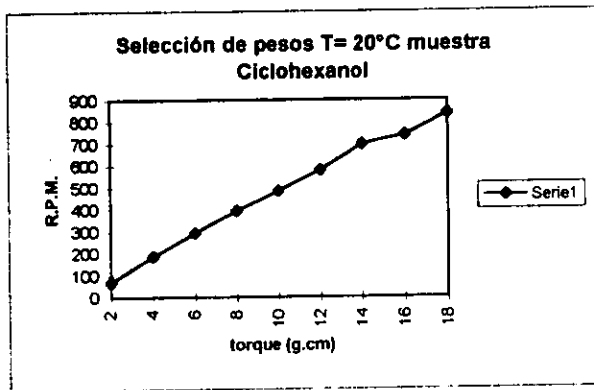
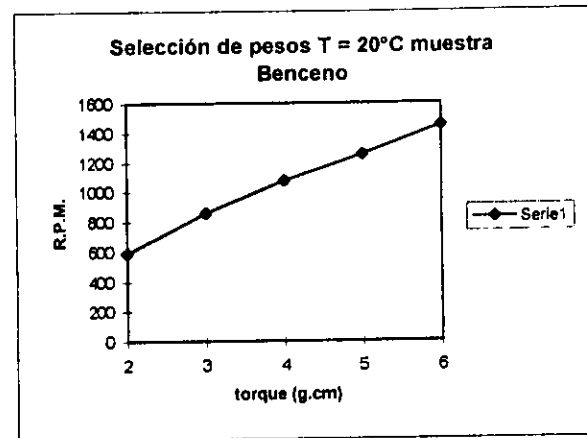
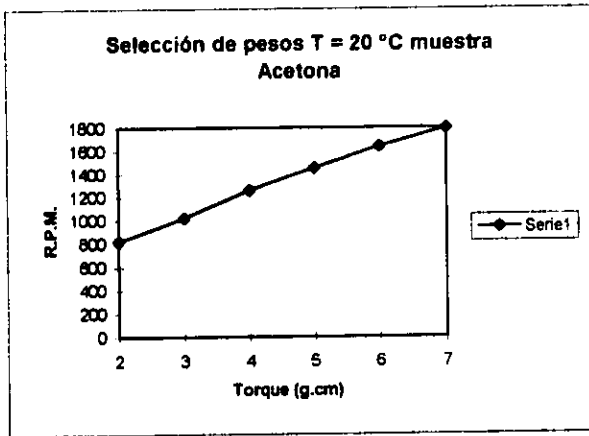
#### Interpretación de datos.

Las variaciones se deben a que no se cosnideraron algunas variantes que en un momento determinado participan en la experimentación como son:

· Las áreas presentes en la deformación del fluido dentro del viscosímetro, caso concreto: a) los baffles, b) guarda del termómetro, c) el área interna del mismo husillo.

Por los motivos anteriormente descritos no se puede aplicar la ecuación propuesta.





**TABLA 4.1.1**  
**ECUACIÓN DE MARGULÉS:**

Cálculo de la viscosidad muestra Acetona		
T= 20 °C Ec. de Margules		
Torque (g.cm.)	R.P.M	viscosidad
6.36	616.16	0.00264169
9.54	1016.68	0.00317413
12.72	1256.64	0.00343144
15.9	1449.91	0.00371754
19.08	1638.65	0.00394722
22.26	1795.17	0.00420358

promedio 0.00351927 c.p.  
valor tablas 0.33 c.p.

Cálculo de la viscosidad muestra Benceno		
T= 20 °C Ec. de Margules		
Torque (g.cm.)	R.P.M	viscosidad
6.36	600	0.0035934
9.54	856.77	0.003774712
12.72	1077.066	0.004003543
15.9	1256.64	0.004289295
19.08	1449.53	0.004462219

promedio 0.004024634 c.p.  
valor tablas 0.54 c.p.

Cálculo de la viscosidad muestra Ciclohexanol		
T= 20 °C Ec. de Margules		
Torque (g.cm.)	R.P.M	viscosidad
6.36	69.8	0.03088883
12.72	187.55	0.02289163
19.08	292.24	0.0221329
25.44	392.7	0.02196119
31.8	483.32	0.02230448
38.16	579.98	0.02230463
44.52	698.13	0.02161815

promedio 0.0234574 c.p.  
valor tablas 75 c.p.

Cálculo de la viscosidad muestra Aceite Texaco		
T= 20 °C Ec. de Margules		
Torque (g.cm.)	R.P.M	viscosidad
63.6	99.96	0.215690276
79.5	127.73	0.210995851
95.4	155.73	0.207670969
127.2	208.22	0.207092498
159	265.46	0.20304754
190.8	317.17	0.203932276
222.6	359.02	0.210187176

promedio 0.208373798 c.p.  
valor tablas 99 c.p.

Los Torques marcados con \* son los que cumplen con la ecuación de Margules.

Revisar gráficas de selección de pesos.

Los valores de viscosidad fueron tomados del manual del Ingeniero químico ( Pery and Chilton )

En las gráficas solo se muestra el peso que se uso en la experimntación, esto solo con el objeto de observar la delimitación de los pesos.

## 4.2 MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS.

Para iniciar la explicación de este método, es conveniente repasar las ecuaciones explicadas en el capítulo dos de esta tesis. Como principio cabe recordar que éstas fueron deducidas considerando un cilindro total, pero en realidad no se toma en cuenta ninguna alteración en la geometría del husillo (esquema 3.2.1), refiriéndose concretamente a las perforaciones del husillo en la parte superior, así como que el husillo sea hueco.

Las ecuaciones 3.3.9 y 3.3.10 dependen de variables que no se conocen; como son la viscosidad y el número de Reynolds. Por tal motivo, el primer paso de este método se inclinará por detallar el procedimiento de como encontrar las variables que hacen falta para determinar la viscosidad.

La relación del factor de fricción que se muestra en la ecuación 3.3.6. puede ser de gran utilidad, pues en todo momento podemos partir de esta para conocer el factor de fricción.

Tomando está ecuación como referencia:

$$f = \tau_{\theta} / 0.5 \rho \Omega^2 \dots\dots\dots 3.3.6$$

Donde la velocidad angular se determina por la velocidad del husillo, la densidad es dato que se conoce de la bibliografía. El esfuerzo cortante es la variable más importante en el desarrollo de esta parte. Este se determina bajo la ecuación antes descrita en el capítulo 3 ( ec. 3.3.1 ) y despejando el esfuerzo se tiene:

$$\tau_{r\theta} = \frac{\zeta}{2 \pi R_i^2 L} \dots\dots\dots 3.1.22$$

Donde:

L = Longitud del husillo.

$\zeta$  = torque o peso por el radio externo del husillo.

R = Radio externo del husillo.

Con este dato se puede calcular el factor de fricción. El siguiente paso será determinar el uso que se le dará al factor de fricción, pues si bien lo conocemos, éste en un momento dado no ayuda a determinar el numero de Reynolds y mucho menos la viscosidad.

Esta problemática, se convierte entonces en la segunda parte de este método.

Para encontrar la viscosidad será necesario determinar un procedimiento que permita conocer el número de Reynolds a partir del factor de fricción. El procedimiento que puede cubrir este requisito es una gráfica tipo Moody reportada comúnmente en la literatura en donde se muestre el factor de fricción vs. el número de Reynolds.

El como se elabora este tipo de gráfica se detalla a continuación:

1) Se selecciona una serie de fluidos cuyos datos sean conocidos ( viscosidad y densidad ). En este caso en particular se seleccionó la glicerina, cuyas características se enlistan a continuación:

Densidad a 25°C = 0.009 g/ml.

Metales pesados = 0.00005 ppm

Cloruros = 0.00025 ppm

peso molecular = 92.097 g/mol.

De esta, se hicieron diferentes diluciones ( 14, 22, 40, 50, 70 y 90 de % en peso y a temperaturas de 20, 25 y 30°C ) los datos de estos fluidos se presentan en la tabla 4.2.1.

TABLA 4.2.1  
VISCOSIDAD ABSOLUTA DE SOLUCIONES ACUOSAS DE GLICERINA

peso especifico 25 / 25 ° C	porciento en peso de glicenna	viscosidad absoluta en centipuases			peso especifico 25 / 25 ° C	porciento en peso de glicenna	viscosidad absoluta en centipuases		
		20 ° C	25 ° C	30 ° C			20 ° C	25 ° C	30 ° C
1.00000	0.00	1.005	0.893	0.890	1.11099	55.00	7.997	6.562	5.491
1.00235	1.00	1.029	0.912	0.917	1.14365	56.00	8.482	6.963	5.919
1.00475	2.00	1.055	0.935	0.938	1.14640	57.00	9.016	7.394	6.143
1.00710	3.00	1.083	0.959	0.856	1.14915	58.00	9.526	7.830	6.495
1.00950	4.00	1.112	0.984	0.877	1.15185	59.00	10.25	8.312	6.870
1.01185	5.00	1.143	1.010	0.900	1.15460	60.00	10.96	8.823	7.312
1.01425	6.00	1.175	1.037	0.924	1.15735	61.00	11.71	9.421	7.740
1.01660	7.00	1.207	1.064	0.948	1.16010	62.00	12.52	10.11	8.260
1.01900	8.00	1.239	1.092	0.972	1.16285	63.00	13.43	10.83	8.812
1.02135	9.00	1.274	1.121	0.997	1.16560	64.00	14.42	11.57	9.386
1.02370	10.00	1.311	1.153	1.024	1.16835	65.00	15.54	12.36	10.02
1.02620	11.00	1.350	1.186	1.052	1.17110	66.00	16.73	13.22	10.68
1.02865	12.00	1.390	1.221	1.082	1.17385	67.00	17.96	14.14	11.45
1.03110	13.00	1.431	1.256	1.112	1.17660	68.00	19.40	15.23	12.33
1.03360	14.00	1.473	1.292	1.143	1.17935	69.00	21.07	16.62	13.27
1.03605	15.00	1.517	1.331	1.174	1.18210	70.00	22.54	17.96	14.32
1.03850	16.00	1.565	1.370	1.207	1.18480	71.00	25.17	19.53	15.56
1.04100	17.00	1.614	1.411	1.244	1.18755	72.00	27.56	21.29	16.88
1.04345	18.00	1.664	1.453	1.281	1.19025	73.00	30.21	23.28	18.34
1.04590	19.00	1.715	1.495	1.320	1.19295	74.00	33.04	25.46	19.93
1.04840	20.00	1.769	1.542	1.360	1.19565	75.00	36.46	27.73	21.68
1.05095	21.00	1.825	1.592	1.403	1.19840	76.00	40.19	30.56	23.60
1.05350	22.00	1.892	1.644	1.447	1.20110	77.00	44.53	33.55	25.80
1.05605	23.00	1.957	1.699	1.494	1.20380	78.00	49.57	37.18	28.64
1.05860	24.00	2.025	1.754	1.541	1.20655	79.00	55.47	41.16	31.62
1.06115	25.00	2.095	1.810	1.590	1.20925	80.00	62.0	45.66	34.92
1.06370	26.00	2.167	1.870	1.641	1.21190	81.00	69.3	51.02	38.55
1.06625	27.00	2.242	1.934	1.695	1.21455	82.00	77.9	56.90	42.52
1.06880	28.00	2.324	2.008	1.752	1.21720	83.00	87.9	64.2	47.90
1.07135	29.00	2.410	2.082	1.812	1.21990	84.00	99.6	72.2	52.63
1.07395	30.00	2.501	2.157	1.876	1.22255	85.00	112.9	81.5	60.05
1.07660	31.00	2.597	2.235	1.942	1.22520	86.00	129.0	92.6	68.1
1.07925	32.00	2.700	2.318	2.012	1.22790	87.00	150.3	106.1	77.5
1.08190	33.00	2.809	2.407	2.085	1.23055	88.00	174.5	122.6	88.8
1.08455	34.00	2.921	2.602	2.167	1.23320	89.00	201.4	141.8	101.1
1.08715	35.00	3.040	2.600	2.249	1.23585	90.00	234.6	163.6	115.3
1.08980	36.00	3.169	2.706	2.335	1.23850	91.00	278.4	189.3	134.4
1.09245	37.00	3.300	2.817	2.427	1.24115	92.00	328.4	221.8	156.2
1.09510	38.00	3.440	2.923	2.523	1.24380	93.00	387.7	262.9	182.8
1.09775	39.00	3.593	3.052	2.624	1.24645	94.00	457.7	308.7	212.0
1.10040	40.00	3.750	3.181	2.731	1.24910	95.00	546.0	366.0	248.8
1.10310	41.00	3.917	3.319	2.845	1.25175	96.00	661.0	425.0	296.7
1.10575	42.00	4.106	3.466	2.966	1.25440	97.00	805.0	502.9	354.0
1.10845	43.00	4.307	3.624	3.094	1.25705	98.00	974.6	629.6	424.0
1.11115	44.00	4.509	3.787	3.231	1.25970	99.00	1197.0	775.0	511.0
1.11380	45.00	4.715	3.967	3.350	1.26201	100.00	1499.0	945.0	624.0
1.11650	46.00	4.952	4.165	3.540					
1.11915	47.00	5.206	4.367	3.706					
1.12185	48.00	5.485	4.571	3.873					
1.12450	49.00	5.730	4.787	4.051					
1.12720	50.00	6.020	5.041	4.247					
1.12995	51.00	6.336	5.319	4.467					
1.13265	52.00	6.764	5.597	4.709					
1.13540	53.00	7.158	5.910	4.957					
1.13815	54.00	7.582	6.230	5.216					

El objeto de seleccionar varias diluciones es con el propósito de contar con una gama amplia de viscosidades.

2) Se calculan los factores de fricción y números de Reynolds para cada una de estas diluciones. Esto se hace según la ecuación 3.3.9 y 3.3.10. Los valores del número de Reynolds y el factor de fricción se pueden determinar, pues se conocen las variables agrupadas en la ecuación.

Cabe recalcar que la temperatura juega un papel muy importante. Si se observa la ecuación 3.3.9 se observa que esta depende de la densidad y viscosidad variables cuyos valores fluctúan o cambian con la temperatura. Por esta razón debe cuidarse durante la experimentación. Este aspecto hace entonces que existan tantas gráficas como temperaturas seleccionadas de experimentación.

Ya con estos datos calculados, se podrá realizar la gráfica. Esta se hace en papel logarítmico, en donde el Reynolds está en las abscisas y el factor de fricción está en las ordenadas.

Un ejemplo propuesto para mostrar los datos organizados en una tabla, se muestran a continuación:

TEMPERATURA DE OPERACION 20 ° C				
14 % EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.032g/cm <sup>3</sup>			Visc= 1.473E-2 cp	
PESO ( g )	TIEMPO ( seg )	R. P. M	f	Re
5	40	150	4.33E-05	332797.1741
6	35	171.4	3.79E-05	380276.2376
8	29	206.8	3.14E-05	458816.3707
10	25	240	2.70E-05	532475.4785
12	22	272.7	2.38E-05	605025.2625

De esta tabla se puede ver que:

a) Peso. Se toma el peso que provoca el movimiento del husillo, bajo el criterio de registrar el mínimo movimiento del husillo.

b) El tiempo en segundos. Es el tiempo en dar una vuelta completa el contador de revoluciones del viscosímetro de Stormer ( esquema 3.2.1 ).

Las Revoluciones por minuto se calculan según la ecuación 4.1.1.

El factor de fricción (  $f$  ) se calcula según la ecuación 3.3.10.

El número de Reynolds se calcula según la ecuación 3.3.9.

Cada dilucion tendrá una tabla y habrá tantas tablas como temperaturas de experimentación se hayan seleccionado.

Las temperaturas de experimentación fueron de 20°C, 25°C y 30°C. Los resultados a 20°C a 25°C y a 30°C se muestran en la tabla 4.2.2 . Las gráficas de Mody propuestas para cada temperatura se muestran después de las tablas.

El como usar estas gráficas se convierte en la tercera parte de este método, y para desarrollar esta parte se seleccionaron 4 fluidos cuya característica que se desconoce específicamente es la viscosidad. En este caso los fluidos problema fueron: Benceno, Ciclohexanol, aceite Texaco, Acetona.

La densidad se considera como una de las variables que se pueden conocer de la bibliografía. En el caso de que no se cuente con el dato de está, se recomienda el uso del densímetro ( aparato por medio del cual se puede obtener la densidad del liquido experimentalmente ) a la temperatura deseada.

La problemática de encontrar la viscosidad en fluidos newtonianos para este método se resuelve de la siguiente manera:

Si se observa la ecuación 3.3.10 el factor de fricción no puede ser calculado pues no se conoce el número de Reynolds y este a su vez no puede ser calculado, pues sólo se conoce la densidad ( valor tomado de tablas según la temperatura de experimentación ) . Es aquí en donde la gráfica tipo Mody interviene.

Para empezar se selecciona la gráfica a la temperatura de experimentación ( en este caso solo se cuenta con tres gráficas 20°C, 25°C y 30°C ), como segundo paso se calcula el factor de fricción. En esta parte es en donde se hace uso de un método diferente al propuesto anteriormente.

De la ecuación 3.3.10, se comprende que ésta no puede ser utilizada, por tal motivo se deberá hacer uso de otra expresión en donde el factor de fricción se calcule mediante otro proceso.

Dicho proceso está expresado por medio de la ecuación 3.3.6. Una vez que se conoce el factor de fricción el siguiente paso es leer el número de Reynolds de la gráfica. Ya con esté valor y la expresión del número de Reynolds ( ec. 3.3.9 ) se puede despejar la viscosidad.

### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR LA VISCOSIDAD.**

Para calcular la viscosidad de un fluido Newtoniano, el procedimiento es el siguiente:

- a) Se vierte la muestra en el contenedor y se selecciona la curva según la temperatura que se desea.
- b) Se pone el fluido térmico en el recipiente y se coloca el contenedor.
- c) Se sube la base y se seleccionan los pesos de experimentación ( recuérdese que se uso el criterio del mínimo movimiento ).
- d) Se mide el tiempo
- e) Se calculan los esfuerzos cortantes según la ecuación 3.1.22 ( recuérdese que existirán tantos esfuerzos como pesos de experimentación sean seleccionados ).
- f) Se calculan los factores de fricción ( ec. 3.3.6 ).



**TABLAS DE RESULTADOS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON  
MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS**

Análisis de datos para las diferentes concentraciones de glicerina T = 20°C

**TABLA 4.2.2**

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 20 ° C				
14 % EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.032g/cm <sup>3</sup>		Visc= 1.473E-2 cp		
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
5	40	150	4.33E-05	332797.1741
6	35	171.4	3.79E-05	380276.2376
8	29	206.8	3.14E-05	458816.3707
10	25	240	2.70E-05	532475.4785
12	22	272.7	2.38E-05	605025.2625

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 20 ° C				
22% EN PESO DE GLICERINA				
Dens= 1.052g/cm <sup>3</sup>		Visc=1.831E-2cp		
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
5	41	146.3	5.41E-05	266184.7324
6	36	166.66	4.75E-05	303228.6227
8	30	200	3.96E-05	363888.9029
10	26	230.7	3.43E-05	419745.8494
12	23	260.8	3.03E-05	474511.1293

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 20 ° C				
40% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.099g/cm <sup>3</sup>		Visc= 3.730E-2cp		
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
2	128.5	46.69	3.31E-04	43563.63944
3	82	73.13	2.11E-04	68233.21809
5	53	113.2	1.36E-04	105620.1325
6	45	133.3	1.16E-04	124374.2373
8	37	162.16	9.52E-05	151301.7728
10	31	193.5	7.98E-05	180543.2476
12	28	214.12	7.21E-05	199762.5332
15	24	250	6.17E-05	233260.0099
20	19	315.7	4.89E-05	294560.7405
25	17	352.9	4.37E-05	329269.8299
30	15	400	3.86E-05	373216.0158

**TABLAS DE RESULTADOS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON  
MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS**

Análisis de datos para las diferentes concentraciones de glicerina T = 20°C

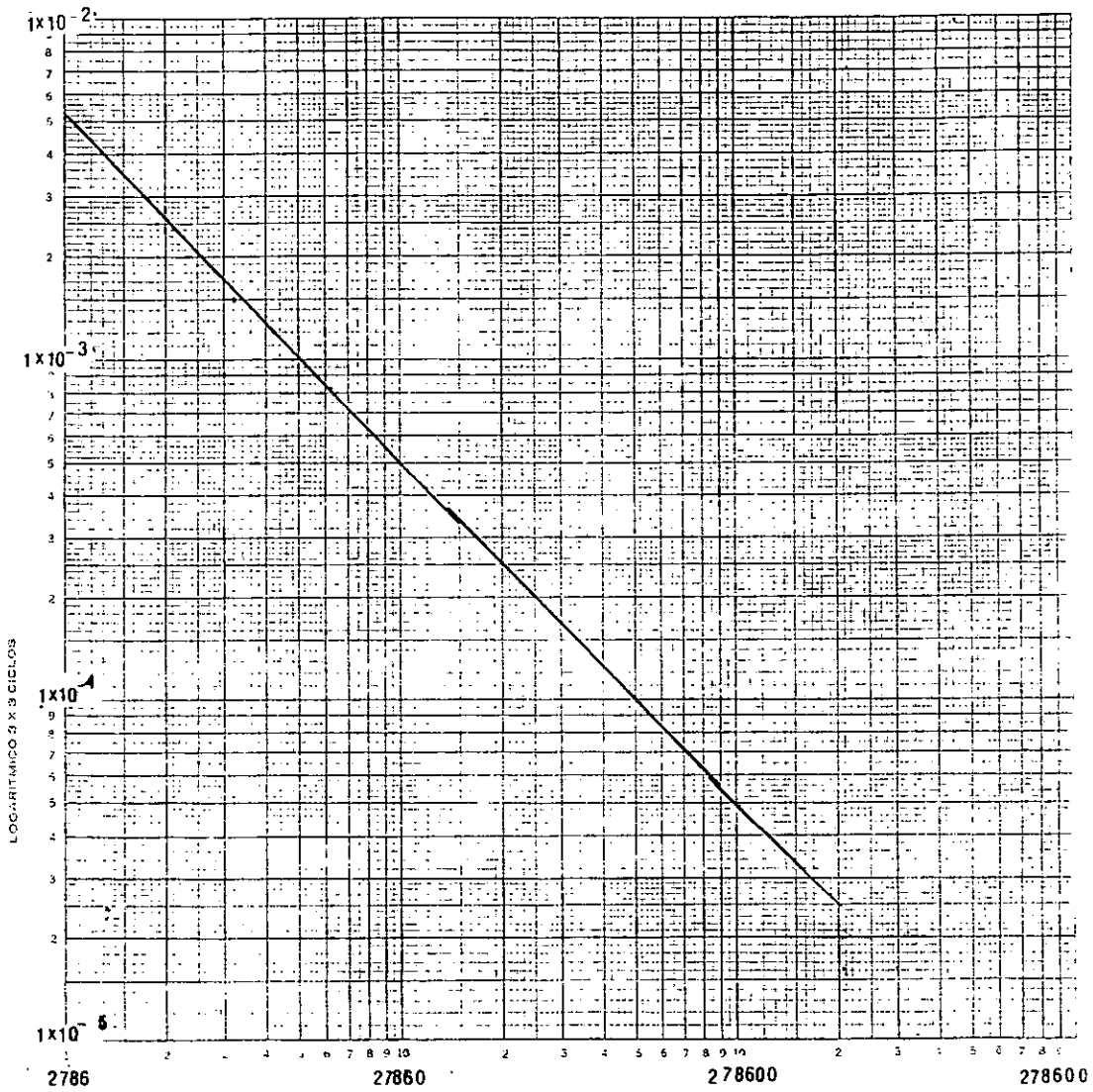
**TABLA 4.2.2**

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 20 ° C				
70% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.1812g/cm <sup>3</sup>		Visc= 0.2294cp		
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
5	351	17.09	5.17E-03	2786.656946
10	164	36.58	2.41E-03	5964.652492
15	108	55.55	1.59E-03	9057.858009
20	82	73.17	1.21E-03	11930.93556
30	55	109.09	8.10E-04	17787.96994
40	42	142.87	6.18E-04	23296.06073
50	35	171.42	5.15E-04	27951.35949
60	29	206.8	4.27E-04	33720.34269
70	25	240	3.68E-04	39133.85998

# CURVA PATRON

T = 20°C

método del factor de Fricción Vs. el Número de Reynolds



**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PATRON**  
**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. EL NÚMERO DE REYNOLDS**  
 Análisis de datos de las diferentes concentraciones de glicerina T = 25°C

**TABLA 4.2.2**

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25° C				
14 % EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.03g/cm <sup>3</sup> Visc= 1.292E-2cp				
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
2	84	71.42	7.99E-05	180304.2556
4	45	133.33	4.28E-05	336599.9216
6	43	181.81	3.14E-05	458990.7129
8	27	222.22	2.57E-05	561008.2846
10	23	260.86	2.19E-05	658557.3806
12	20	300	1.90E-05	757368.7579
14	19	315.78	1.81E-05	797206.3546
16	17	352.94	1.62E-05	891019.098
18	16	375	1.52E-05	946710.9474
20	15	400	1.43E-05	1009825.011

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25° C				
22% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.05g/cm <sup>3</sup> Visc=1.644E-2cp				
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
2	85	70.58	1.01E-04	142751.4605
4	47	127.65	5.58E-05	258178.2932
6	35	171.42	4.15E-05	346705.2332
8	28	214.28	3.32E-05	433391.6543
10	24	250	2.85E-05	505637.0803
12	22	272.72	2.61E-05	551589.3781
14	20	300	2.37E-05	606764.4964
16	18	333.33	2.14E-05	674176.0319
18	16.5	363.63	1.96E-05	735459.246
20	15	400	1.78E-05	809019.3285

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25° C				
40% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.09g/cm <sup>3</sup> Visc= 3.181E-2cp				
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
2	119	50.42	2.63E-04	54711.3071
4	60	100	1.33E-04	108511.1208
6	43	139.53	9.51E-05	151405.5668
8	35	171.43	7.74E-05	186020.6144
10	30	200	6.64E-05	217022.2416
12	26	230.76	5.75E-05	250400.2623
14	24	250	5.31E-05	271277.8019
16	22	272.72	4.87E-05	295931.5286
18	20	300	4.42E-05	325533.3623
20	19	315.78	4.20E-05	342656.4172
22	17	352.94	3.76E-05	382979.1497

**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PATRON**  
**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. EL NÚMERO DE REYNOLDS**  
 Análisis de datos de las diferentes concentraciones de glicerina T = 25°C

**TABLA 4.2.2**

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25° C				
50% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.123g/cm <sup>3</sup>		Visc= 3.18E-2cp		
PESO (g)	TIEMPO (s.)	R. P. M	f	Re
2	180	33	3.90E-04	36904.38706
4	83	72.28	1.78E-04	80831.7908
6	58	103.4	1.25E-04	115633.7461
8	45	133.33	9.66E-05	149104.9069
10	37	162.16	7.94E-05	181345.9214
12	33	181.81	7.08E-05	203320.8064
14	29	206.89	6.22E-05	231368.1405
16	26	230.76	5.58E-05	258062.3138
18	24	250	5.15E-05	279578.6898
20	22	272.7	4.72E-05	304964.4348

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25° C				
60% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.15g/cm <sup>3</sup>		Visc=8.823E-2cp		
PESO (g)	TIEMPO (s.)	R. P. M	f	Re
2	284	21.12	1.65E-03	8717.398418
4	117	51.28	6.80E-04	21166.10752
6	80	75	4.65E-04	30956.67052
8	62	96	3.63E-04	39624.53827
10	51	117.64	2.97E-04	48556.5696
12	43	139.53	2.50E-04	57591.78984
14	38	157.89	2.21E-04	65169.98278
16	35	171.42	2.04E-04	70754.56614
18	32	187.5	1.86E-04	77391.6763
20	29	206.8	1.69E-04	85357.85951

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25° C				
70% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.17g/cm <sup>3</sup>		Visc= 0.1796cp		
PESO (g)	TIEMPO (s.)	R. P. M	f	Re
4	169	35.5	1.97E-03	7323.510404
6	91	65.92	1.06E-03	13599.03678
8	80	75	9.31E-04	15472.20508
10	67	89.55	7.79E-04	18473.81286
12	59	101.69	6.86E-04	20978.24713
14	52	115.38	6.05E-04	23802.44029
16	46	130.43	5.35E-04	26907.19611
18	42	142.85	4.89E-04	29469.39327
20	38	157.89	4.42E-04	32572.08613

**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PATRON**  
**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. EL NÚMERO DE REYNOLDS**  
 Análisis de datos de las diferentes concentraciones de glicerina T = 25°C

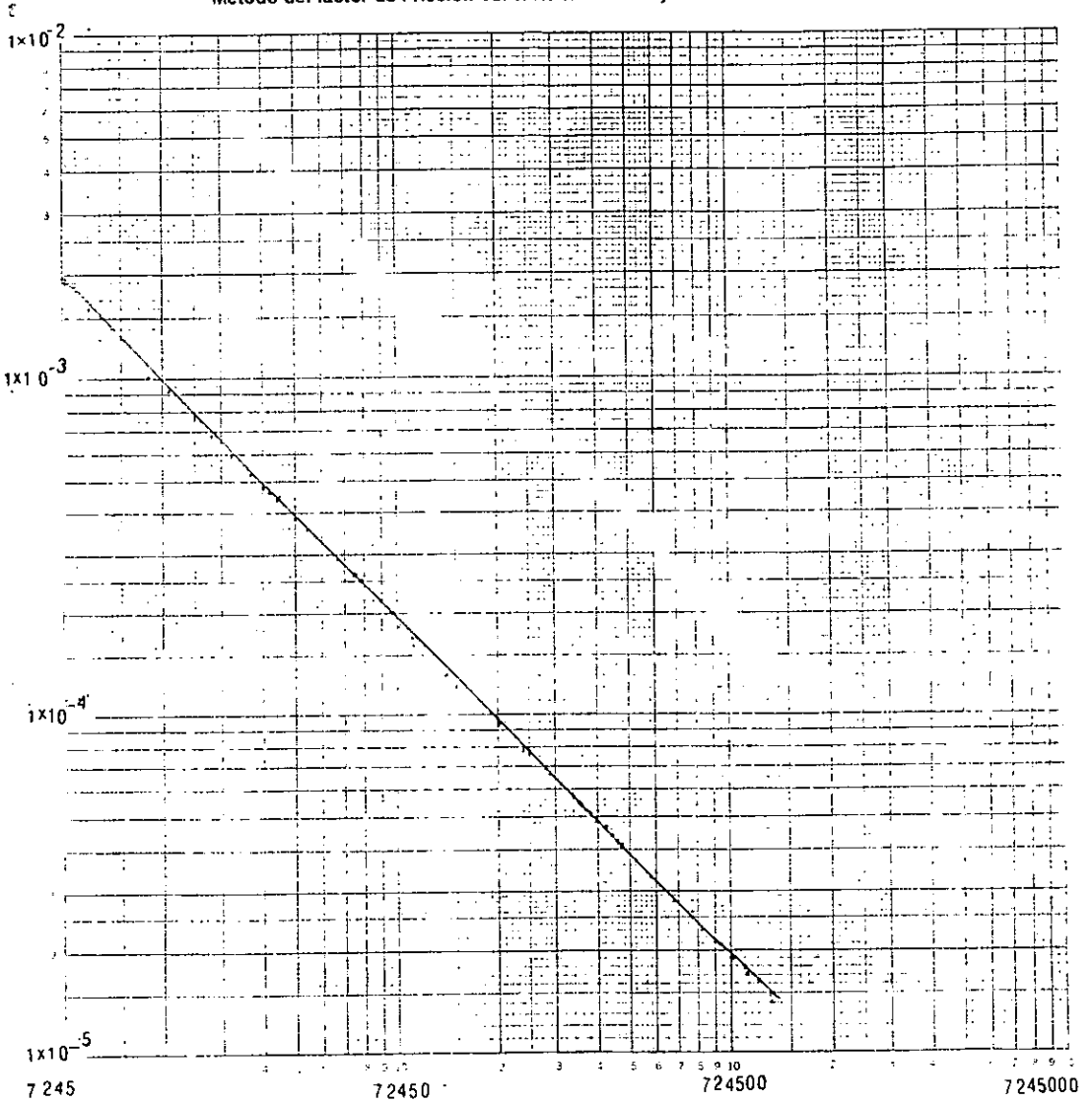
**TABLA 4.2.2**

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25° C				
90% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.23g/cm <sup>3</sup>		Visc= 1.536cp		
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
150	46	130.43	4.35E-03	3307.522524
200	36	166.66	3.41E-03	4226.264693
250	28	214.28	2.65E-03	5433.841344
300	24	250	2.27E-03	6339.650625
350	21	285.71	1.99E-03	7245.20632

# CURVA PATRON

T = 25°C

Método del factor de Fricción Vs. el Número de Reynolds



74

**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PATRÓN  
MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS**

Análisis de datos de las diferentes concentraciones de glicerina T = 30 °C

**TABLA 4.2.2**

<b>TEMPERATURA DE OPERACIÓN 30° C</b>				
<b>14 % EN PESO DE GLICERINA</b>				
<b>Dens = 1.0288 g/cm<sup>3</sup></b>		<b>Visc = 1.143E-2 cp</b>		
<b>PESO (g)</b>	<b>TIEMPO (s.)</b>	<b>R. P. M</b>	<b>f</b>	<b>Re</b>
2	79	75.94	6.65E-05	216454.5595
4	43	139.53	3.62E-05	397707.4622
6	32	187.5	2.69E-05	534438.1077
8	26	230.76	2.19E-05	657743.6679
10	23	260.86	1.94E-05	743538.7988
12	20	300	1.68E-05	855100.9723
14	18	333.33	1.52E-05	950102.6904
16	16	375	1.35E-05	1068876.215
18	15	400	1.26E-05	1140134.63

<b>TEMPERATURA DE OPERACIÓN 30° C</b>				
<b>22% EN PESO DE GLICERINA</b>				
<b>Dens = 1.0485 g/cm<sup>3</sup></b>		<b>Visc = 1.447E-2 cp</b>		
<b>PESO (g)</b>	<b>TIEMPO (s.)</b>	<b>R. P. M</b>	<b>f</b>	<b>Re</b>
2	85	70.58	8.89E-05	161954.4845
4	46	130.43	4.81E-05	299287.6653
6	34	176.47	3.56E-05	404932.1037
8	28	214.28	2.93E-05	491691.7957
10	24	250	2.51E-05	573655.7258
12	21	285.71	2.20E-05	655596.7096
14	20	300	2.09E-05	688386.8709
16	19	315.78	1.99E-05	724596.0203

<b>TEMPERATURA DE OPERACIÓN 30° C</b>				
<b>40% EN PESO DE GLICERINA</b>				
<b>Dens = 1.09475 g/cm<sup>3</sup></b>		<b>Visc = 2.731E-2 cp</b>		
<b>PESO (g)</b>	<b>TIEMPO (s.)</b>	<b>R. P. M</b>	<b>f</b>	<b>Re</b>
4	58	103.44	1.10E-04	131308.6045
6	42	142.47	7.96E-05	180853.9916
8	35	170.97	6.63E-05	217032.4064
10	30	195.09	5.81E-05	247650.7701
12	27	223.21	5.08E-05	283346.8061
14	23	252.87	4.49E-05	320997.7458
16	21	276.62	4.10E-05	351146.4249



**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PATRON**  
**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS**

Análisis de datos de las diferentes concentraciones de glicerina T = 30 °C

**TABLA 4.2.2**

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 30 ° C				
50% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.123 g/cm <sup>3</sup>		Visc= 3.18E-2 cp		
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
4	75	80	1.61E-04	89465.18074
6	51	117.64	1.09E-04	131558.5483
8	41	146.34	8.80E-05	163654.1819
10	35	171.42	7.51E-05	191701.516
12	31	193.54	6.65E-05	216438.6385
14	27	222.22	5.79E-05	248511.9058
16	25	240	5.37E-05	268395.5422
18	23	260.86	4.94E-05	291723.5881
20	21	285.71	4.51E-05	319513.7099

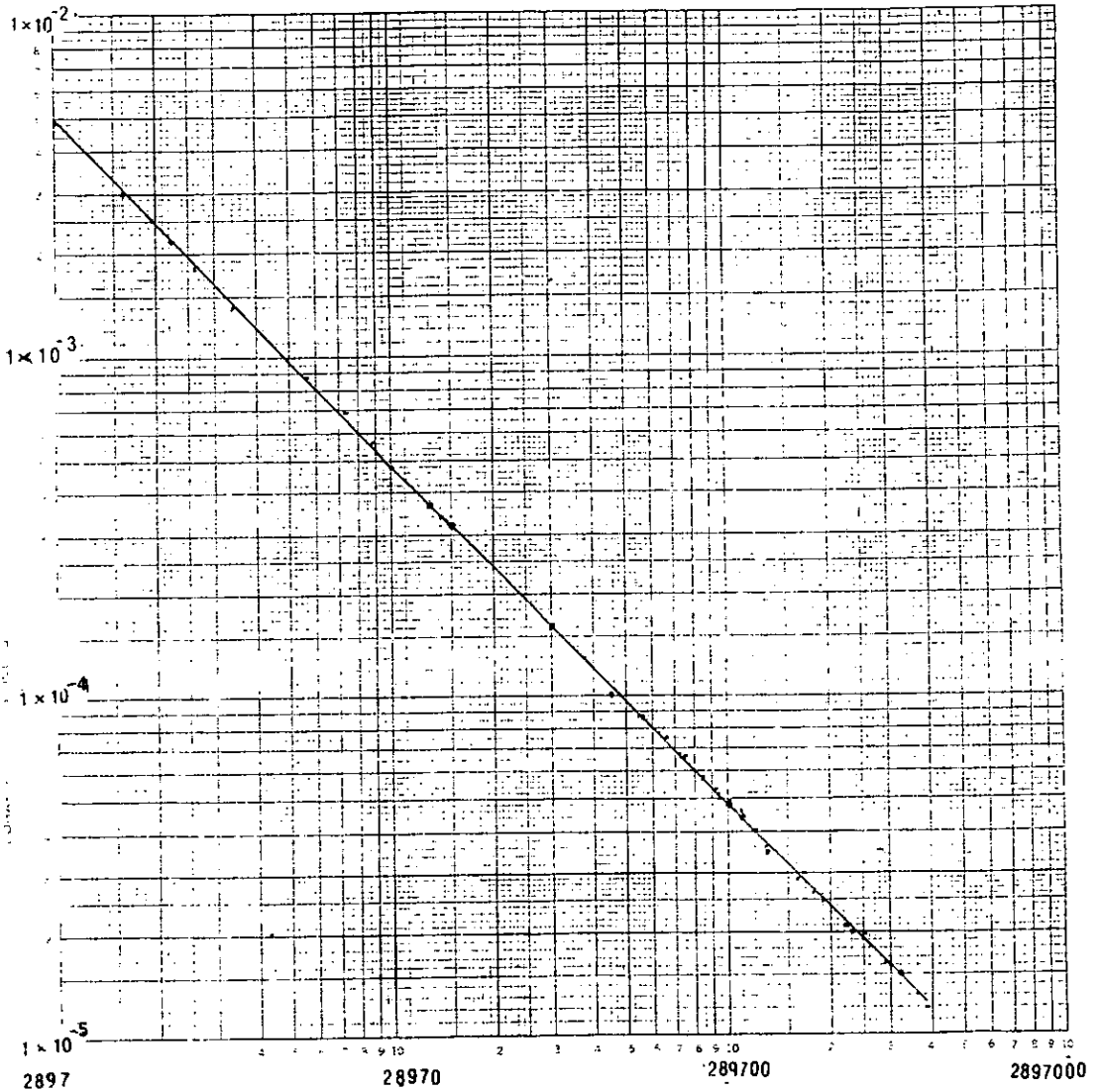
TEMPERATURA DE OPERACIÓN 30° C				
70% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.1756 g/cm <sup>3</sup>		Visc=0.1432 cp		
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
4	156	38.46	1.44E-03	9998.555456
6	94	63.82	8.68E-04	16591.4667
8	75	80	6.92E-04	20797.82726
10	61	98.36	5.63E-04	25570.92862
12	52	115.38	4.80E-04	29995.66637
14	46	130.43	4.25E-04	33908.25762
16	41	146.34	3.79E-04	38044.42552
18	37	162.16	3.42E-04	42157.19586
20	35	171.42	3.23E-04	44564.54436

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 30 ° C				
90% EN PESO DE GLICERINA				
Dens = 1.2289 g/cm <sup>3</sup>		Visc= 1.58 cp		
PESO ( g )	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re
100	51	117.64	4.97E-03	2897.518338
150	31	193.54	3.02E-03	4766.96117
200	26	230.76	2.53E-03	5683.703419
250	23	260.86	2.24E-03	6425.077456
300	19	315.78	1.85E-03	7777.777195

# CURVA PATRON

T = 30°C

Método del factor de Fricción Vs. el Número de Reynolds



g) Con los factores de fricción ya calculados, el siguiente paso es usar la gráfica; la forma de uso es:

1) El valor del factor de fricción obtenido se busca en las abscisas de la gráfica, una vez que se encuentra se traza una línea recta u horizontal hasta encontrar la curva.

2) Una vez que se intercepta la curva se traza una línea recta o vertical hacia las ordenadas de la gráfica.

3) Esta intersección nos dará un valor del número de Reynolds.

4) Con el valor del número de Reynolds y la ecuación 3.3.9 se calcula la viscosidad de el fluido en cuestión.

Una vez que se han elaborado las curvas patrón, se podrá entonces pasar a la siguiente fase, en donde se hará uso de éstas, para determinar la viscosidad de diferentes fluidos newtonianos:

Acetona, ciclohexanol, benceno y aceite Texaco.

Algunos de estos fluidos son de viscosidades menores a la del agua. Esta observación puede ser válida si se recuerda que las curvas se hicieron con fluidos cuya viscosidad es más alta a la de los fluidos propuestos. Esta parte resulta ser la más interesante de este método pues los valores de las viscosidades no influyen en el uso de las gráficas. Realmente lo que lo que marca el parámetro de uso, son los pesos o torques, ya que estos son los que marcan la zona de la curva en donde caen los valores.

Un ejemplo propuesto para mostrar los datos organizados en una tabla, se muestran a continuación:

TEMPERATURA DE OPERACION 20 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ( ACETONA )						
DENS. = 0.789 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( seg )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
2	0.05623439	56.5	106.19	3.20E-07	306281	0.008662674
3	0.084351585	37	162.16	2.06E-07	306345	0.013225782
4	0.11246678	30	200	1.81E-07	306359	0.01831127
5	0.140585975	26	230.76	1.70E-07	306365	0.018819575
6	0.16870317	23	260.8	1.59E-07	306371	0.021269063
7	0.196820365	21	285.71	1.55E-07	306373	0.0233004
					Visc. prom.cp	0.016931461

1) Peso; es el peso seleccionado para provocar el movimiento del husillo. En este método el peso se seleccionó bajo el criterio de movimiento, esto es; que se registraron bajo el mínimo movimiento del husillo.

2) Esfuerzo cortante según la ecuación 3.1.22.

3) tiempo; es el tiempo que tarda en dar una vuelta completa el contador de revoluciones. ( esquema 3.2.1 )

4) Revoluciones por minuto según la ecuación 4.1.1

5) Factor de fricción según la ecuación 3.3.6.

6) Lectura del Reynolds según las gráficas.

7) Valor de la viscosidad ( despejando la variable de la ecuación 3.3.9 ) ( el valor de la viscosidad será el promedio de los valores obtenidos )

Los valores obtenidos en este método se muestran en la tabla 4.2.3 para 20°C, 25°C y 30°C.

Cabe recalcar que en este método las gráficas de las curvas patrón se elaboraron en papel logarítmico y tratando de presentar la curva, que mas se asemeje a los datos calculados. No usando ningún programa de computadora ( que simplemente ajuste los datos obtenidos, y con esto hacer que la pendiente de la curva real sea diferente a la obtenida ) y como consecuencia hacer que los resultados varíen significativamente.

El área ajena a la deformación juega un papel muy importante en el calculo de las viscosidades, es por esta razón que se propone un nuevo método en donde está no intervenga.

**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CURVA PÁTRON ( VISCOSIDADES FLUIDOS PROBLEMA )**

**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS NÚMERO DE REYNOLDS**

Resultados de viscosidades de fluidos no conocidos por medio de la curva patrón

T = 20°C

**TABLA 4.2.3**

TEMPERATURA DE OPERACION 20 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ( ACETONA )						
DENS = 0.789 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
2	0.05623439	56.5	106.19	3.20E-07	306281	0.008662674
3	0.084351585	37	162.16	2.06E-07	306345	0.013225782
4	0.11246878	30	200	1.81E-07	306369	0.01631127
5	0.140585975	26	230.76	1.70E-07	306365	0.018819575
6	0.16870317	23	260.8	1.59E-07	306371	0.021269063
7	0.196820365	21	285.71	1.55E-07	306373	0.0233004
Visc. prom. cp						0.016931461
Visc. real cp						0.33

TEMPERATURA DE OPERACION 20 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ( BENCENO )						
DENS=0.8791g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re	VISC. CALC.
2	0.05623439	64	93.75	3.69E-07	306254	0.006521954
3	0.084351585	44	136.36	2.61E-07	306314	0.012392812
4	0.11246878	35	171.42	2.21E-07	306336	0.015578052
5	0.140585975	30	200	2.03E-07	306346	0.01817471
6	0.16870317	26	230.7	1.83E-07	306368	0.020963706
Visc. prom. cp						0.015126247
Visc. real cp						0.54

TEMPERATURA DE OPERACION 20 ° C						
MUESTRA PROBLEMA (CICLOHEXANOL)						
DENS = 0.962 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re	VISC. CALC.
2	0.05623439	540	46.69	1.36E-06	305702	0.004652775
4	0.11246878	201	73.13	1.11E-06	305841	0.007284275
6	0.16870317	129	113.2	6.93E-07	306073	0.01126689
8	0.22483756	96	133.3	6.67E-07	306098	0.013266927
10	0.281171951	78	162.16	5.63E-07	306146	0.016136214
12	0.337406341	31	193	4.77E-07	306194	0.019202029
14	0.393640731	28	214	4.53E-07	306207	0.021290465
16	0.449875121	24	250	3.79E-07	306248	0.024868709
18	0.506106511	19	315	2.69E-07	306310	0.031328231
Visc. prom. cp						0.016588513
Visc. real cp						74.76

TEMPERATURA DE OPERACION 20 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ACEITE TEXACO						
DENS = 0.883 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re	VISC. CALC.
20	0.562343901	377	15.91	1.27E-04	117012	0.003901998
25	0.702929877	295	20.33	9.76E-05	147668	0.003849927
30	0.843515852	243	24.69	7.94E-05	178304	0.003871971
40	1.124687802	181	33.14	5.88E-05	236810	0.003913133
50	1.405859753	142	42.25	4.52E-05	306480	0.003955006
60	1.687031704	118	50.48	3.80E-05	362180	0.003987328
70	1.968203654	105	57.14	3.46E-05	417900	0.003823314
100	2.811719506	74	81.08	2.45E-05	595060	0.003875123
Visc. prom. cp						0.003962547
Visc. real cp						99.65

**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CURVA PÁTRON ( FLUIDOS PROBLEMA ).**

**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS**

Resultados de viscosidades de fluidos no conocidos por medio de la curva patrón.

T = 25°C

**TABLA 4.2.3**

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ( ACETONA )						
DENS = 0.792 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
2	0.05623439	52	115.3	2.71E-07	795971	0.003633027
3	0.084351585	36	166.66	1.94E-07	796261	0.005249435
4	0.11246878	29	206.8	1.68E-07	796370	0.006512868
5	0.140585975	25	240	1.56E-07	796384	0.007558321
6	0.16870317	22	272.7	1.45E-07	796442	0.008587517
7	0.196820365	18	333.33	1.13E-07	796540	0.010495507
Visc. prom. cp						0.007006112
Visc. real cp						0.391

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ( BENCENO )						
DENS=0.879 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
2	0.05623439	65	92.3	3.80E-07	795573	0.003229401
3	0.084351585	43	139.5	2.50E-07	796044	0.004877951
4	0.11246878	34	176.4	2.08E-07	796225	0.006166846
5	0.140585975	29	206.8	1.89E-07	796297	0.007228959
6	0.16870317	25	240	1.69E-07	796370	0.008388738
7	0.196820365	23	260.8	1.67E-07	796345	0.009116048
Visc. prom. cp						0.006501324
Visc. real cp						0.743

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ( CICLOHEXANOL )						
DENS =0.9818 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
2	0.05623439	390	15.38	1.27E-05	1231650	0.00037638
3	0.084351585	220	27.27	6.04E-06	775215	0.001060279
4	0.11246878	157	39.21	4.10E-06	782087	0.001472562
5	0.140585975	124	48.38	3.20E-06	785358	0.001856758
6	0.16870317	103	58.25	2.65E-06	787531	0.002229387
7	0.196820365	88	68.18	2.25E-06	788980	0.002604643
10	0.281171951	63	95.23	1.65E-06	791154	0.003628022
Visc. prom. cp						0.001899718
Visc. real cp						59.95

TEMPERATURA DE OPERACIÓN 25 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ACEITE TEXACO						
DENS = 0.8820 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
20	0.562343901	291	20.61	7.60E-05	181125	0.003181791
25	0.702929877	229	26.2	5.88E-05	246330	0.002974104
30	0.843515852	191	31.41	4.91E-05	289800	0.003030891
40	1.124687802	138	43.47	3.41E-05	405720	0.002965955
50	1.405859753	107	56.07	2.57E-05	543375	0.00288538
60	1.687031704	88	68.18	2.08E-05	724500	0.002631423
70	1.968203654	76	78.94	1.81E-05	796950	0.002789735
100	2.811719506	53	113.9	1.24E-05	1231650	0.002585881
Visc. prom. cp						0.00288187
Visc. real cp						130.46

**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CURVA PÁTRON ( VISCOSIDADES DE FLUIDOS PROBLEMA )**

**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. EL NÚMERO DE REYNOLDS**

Resultados de viscosidades de fluidos no conocidos por medio de la curva patron.

T = 30 °C

**TABLA 4.2.3**

TEMPERATURA DE OPERACION 30 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ( ACETONA )						
DENS = 0.792 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
2	0.05623439	52	115.3	2.71E-07	318513	0.009079015
3	0.084351585	35	171.42	1.84E-07	318665	0.013465844
4	0.11246878	29	206.8	1.68E-07	318577	0.016280687
5	0.140585975	25	240	1.56E-07	318583	0.018894058
6	0.16870317	22	272.72	1.45E-07	318588	0.021469611
Visc. prom.cp						0.015843843
Visc. real cp						0.49

TEMPERATURA DE OPERACION 30 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ( BENCENO )						
DENS=0.876 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
2	0.05623439	61	98.36	3.37E-07	318478	0.00856773
3	0.084351585	42	142.8	2.39E-07	318536	0.012421932
4	0.11246878	33	181.81	1.97E-07	318559	0.015814205
5	0.140585975	28	214.2	1.77E-07	318567	0.018631085
6	0.16870317	26	230.7	1.84E-07	318565	0.020066379
7	0.196820365	22	272.72	1.53E-07	318583	0.023719855
Visc. prom.cp						0.016535214
Visc. real cp						0.7462

TEMPERATURA DE OPERACION 30 ° C						
MUESTRA PROBLEMA (CICLOHEXANOL)						
DENS =0.9416 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
4	0.11246878	129	46.51	2.80E-06	317047	0.004374219
6	0.16870317	86	69.76	1.87E-06	318565	0.008529596
8	0.22493756	65	92.3	1.42E-06	318588	0.008638736
10	0.281171951	51	117.64	1.09E-06	318090	0.011027647
12	0.337408341	44	136.36	9.78E-07	318107	0.012781789
14	0.393640731	39	153.8	8.95E-07	318154	0.014414408
16	0.449875121	35	171.4	8.24E-07	318194	0.016061892
18	0.506109511	31	193.5	7.27E-07	318252	0.018129578
Visc. prom.cp						0.011494733
Visc. real cp						34.37

TEMPERATURA DE OPERACION 30 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ACEITE TEXACO						
DENS =0.8826 g/cm <sup>3</sup>						
PESO ( g )	ESFUERZO	TIEMPO ( s. )	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
20	0.562343601	214	28.03	4.11E-05	347640	0.002253302
30	0.843515852	152	39.47	3.11E-05	434550	0.002538362
40	1.124687802	107	56.07	2.05E-05	724250	0.002163556
50	1.405859753	85	70.58	1.62E-05	989100	0.002269541
60	1.687031704	73	82.19	1.43E-05	984980	0.002331942
70	1.968203654	61	98.32	1.17E-05	1216740	0.002258241
100	2.811719506	44	136.36	8.68E-06	1056	3.608686948
Visc. prom.cp						0.603374765
Visc. real cp						168.68

## **ANÁLISIS DE DATOS**

Los resultados de las viscosidades se muestran, junto con los reportados en la bibliografía y discrepan. Las desviaciones en los resultados puede ser provocadas por:

- a) los esfuerzos que se presentan debido a las áreas tanto de los baffles y el contenedor del termómetro.
- b) el esfuerzo que interviene por el efecto del área interna del husillo.
- c) la selección de pesos de experimentación ( no se propone parámetro de selección), esto es que debe evaluarse la viscosidad en zonas donde se tiene la deformación del fluido constante. Y no de una simple inspección de la curva del  $f$  vs.  $Re$ .
- d) debido a la falta de selección de pesos la gráfica adquiere una variación importante en su inclinación.



#### **4.3 MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS**

##### **CORREGIDO**

Una vez revisados los dos métodos anteriores, y comprobar que estos no son exactos para poder determinar la viscosidad en el aparato en estudio. Será necesario entonces modificar ciertos lineamientos que se usaban como base en estos.

Como se observó en el capítulo 3 este método es complemento y suplemento de los dos anteriores, y como resultado, se obtuvo uno nuevo, que posiblemente responda a las expectativas propuestas en el desarrollo de la experimentación.

Para iniciar este se dividirá en dos partes, en la primera se tratarán algunos aspectos que si se consideran podría tener consecuencias benéficas para el desarrollo experimental.

Tales cuestiones, la forman la selección preliminar de pesos para el cálculo tanto de las curvas patrón como de los fluidos problema en cuestión.

Por otro lado, el eliminar el efecto del área que se presenta durante la experimentación.

Como inicio, se empezará por tratamiento que se presento en el capítulo 3, en donde se presentan tanto el factor de fricción y el número de Reynolds sin el efecto del área.

Así pues si se ven las ecuaciones 3.3.13 y 3.3.15 se podrá observar que el factor de fricción es la variable que puede calcularse inmediatamente, a diferencia del número de Reynolds el cual depende de la viscosidad ( dato que no se conoce ).

Como principio y tomando el factor de fricción como base, las variables son: la densidad ( dato que se puede obtener de la bibliografía ), el torque ( que al igual que en el método dos, es el peso que acciona el movimiento del husillo ) y la velocidad angular que se calcula según la ecuación 4.1.1.

En el caso del número de Reynolds el cálculo se complica y es aquí en donde la primera parte adquiere su importancia, pues éste no puede ser calculado directamente, y entonces se propone en base al método del factor de fricción vs. el número de Reynolds, una gráfica que permita conocer esta variable indirectamente.

La forma de construir la gráfica en principio es similar a la usada en el método del factor de fricción vs. número de Reynolds: se selecciona un fluido cuyas características sean similares, en este caso se usó la glicerina a las concentraciones propuestas anteriormente. En el método del factor de fricción vs. número de Reynolds se usaron pesos arbitrarios, solo considerando el movimiento del husillo ( sin importar si éste era rápido o lento ) y se inició el cálculo para las variables en cuestión ( factor de fricción y número de Reynolds. ). La diferencia en el nuevo método propuesto es: Hacer uso de la ecuación de Margules propuesta en el método uno con el objeto de delimitar los pesos en los cuales la deformación del fluido es homogénea. Esto se puede comprobar si se hace una gráfica que muestre el torque vs. las R.P.M. Un ejemplo se muestra en la figura 4.3.1.

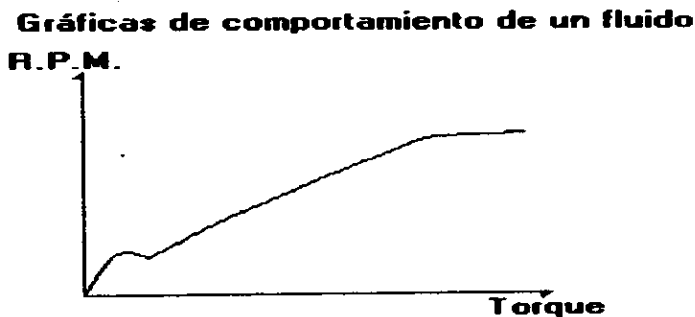


Fig. 4.3.1

Pero ¿ por qué hacer uso de la ecuación de Margules que en principio fue propuesto como método ?

La respuesta se traduce en simple técnica, pues si bien esté no fue exacto como método, su uso para implementar una técnica gráfica en donde muestre el comportamiento del fluido es importante en esta parte del desarrollo experimental. Esta es la primer variante que se incorpora en este método y que lo hace diferente al anterior, el propósito es en un momento determinado poder usar, en la experimentación, solo aquellos pesos que realmente deformen homogéneamente al fluido.

Pero ¿Cuál es la zona que determina la deformación homogénea del fluido?

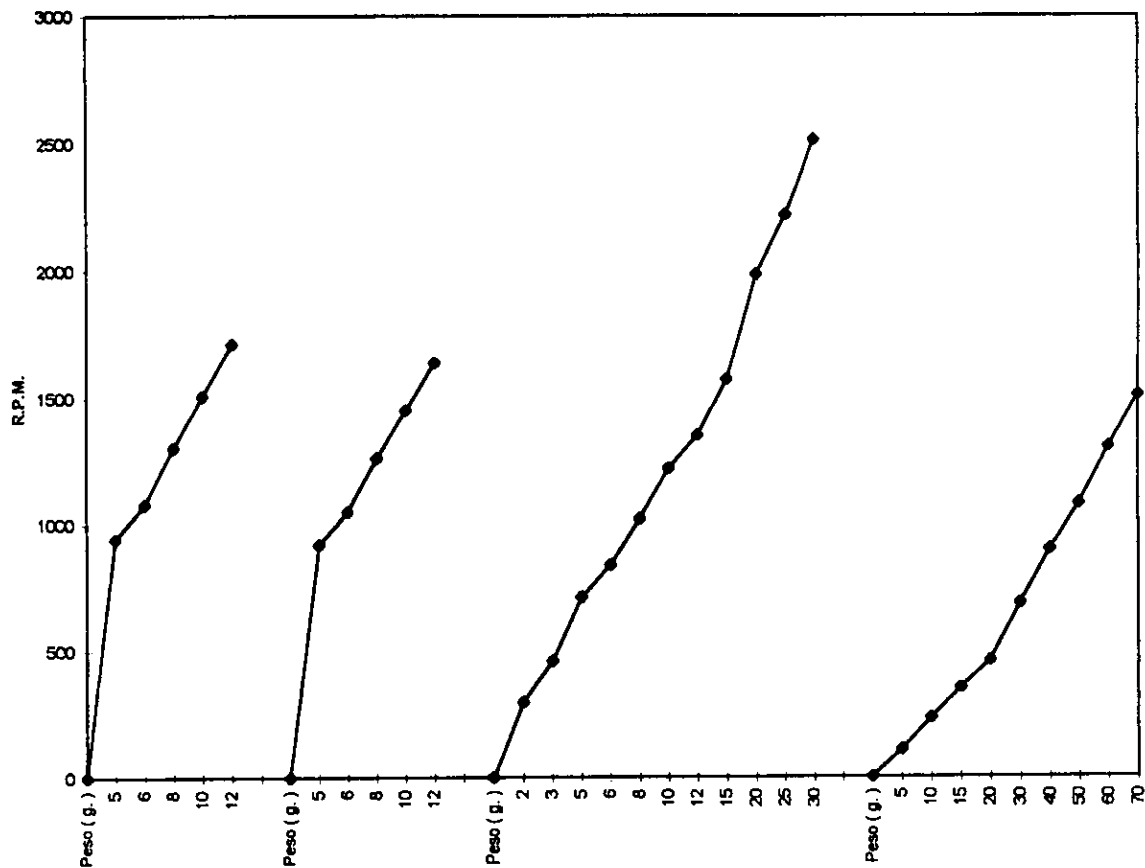
La ecuación de margules determina un comportamiento lineal, así que si se grafican los pesos o torques v.s. las revoluciones por minuto se obtendrá una curva en donde se muestran tres zonas bien definidas ( fig. 4.3.1 ) como son : 1 zona de bajo movimiento o caótico, 2 zona de deformación homogénea ( zona en donde se cumple la ley de Margules ), 3 zona turbulenta o de movimiento rápido.

Bajo el concepto descrito anteriormente, se ve la necesidad de seleccionar los pesos antes de los cálculos para elaborar las curvas patrón.

Este proceso se puede observar en las tablas y gráficas de la sección 4.3.1, en donde se presentan tanto las diluciones que se usaron de glicerina para la elaboración de las curvas patrón. Así como los pesos recomendados según la gráfica de torques vs. R.P.M.

Es importante recalcar que, para la elaboración de las curvas patrón, así como el calculo de las viscosidades de fluidos problema ( fluidos cuya viscosidad se desconoce ), será necesario realizar este análisis previo a los cálculos ( las gráficas de torques v.s. R.P.M. ( habrá tantas gráficas como temperaturas de experimentación se tengan ) . Y para los fluidos seleccionados como problema ( Acetona, Benceno, Ciclohexanol y Aceite Texaco ) se muestran al principio del calculo para la viscosidad.

SELECCIÓN DE PESOS PARA LA CURVA PÁTRON MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO T = 20°C TABLA 4.3.1



**TABLAS DE SELECCIÓN Y GRÁFICAS DE PESOS OPTIMOS**  
**TABLA 4.3.1 T=20°C MÉTODO DEL P VS. Re' CORREGIDO**

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
5	942.48	40
6	1077.12	35
8	1299.972414	29
10	1507.968	25
12	1713.6	22

14 % en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
5	919.4926829	41
6	1047.2	36
8	1256.64	30
10	1449.969231	26
12	1639.095652	23

22 % en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
2	293.3789883	128.5
3	459.7463415	82
5	711.3056604	53
6	837.76	45
8	1018.897297	37
10	1216.103228	31
12	1346.4	28
15	1570.8	24
20	1984.168421	19
25	2217.6	17
30	2513.28	15

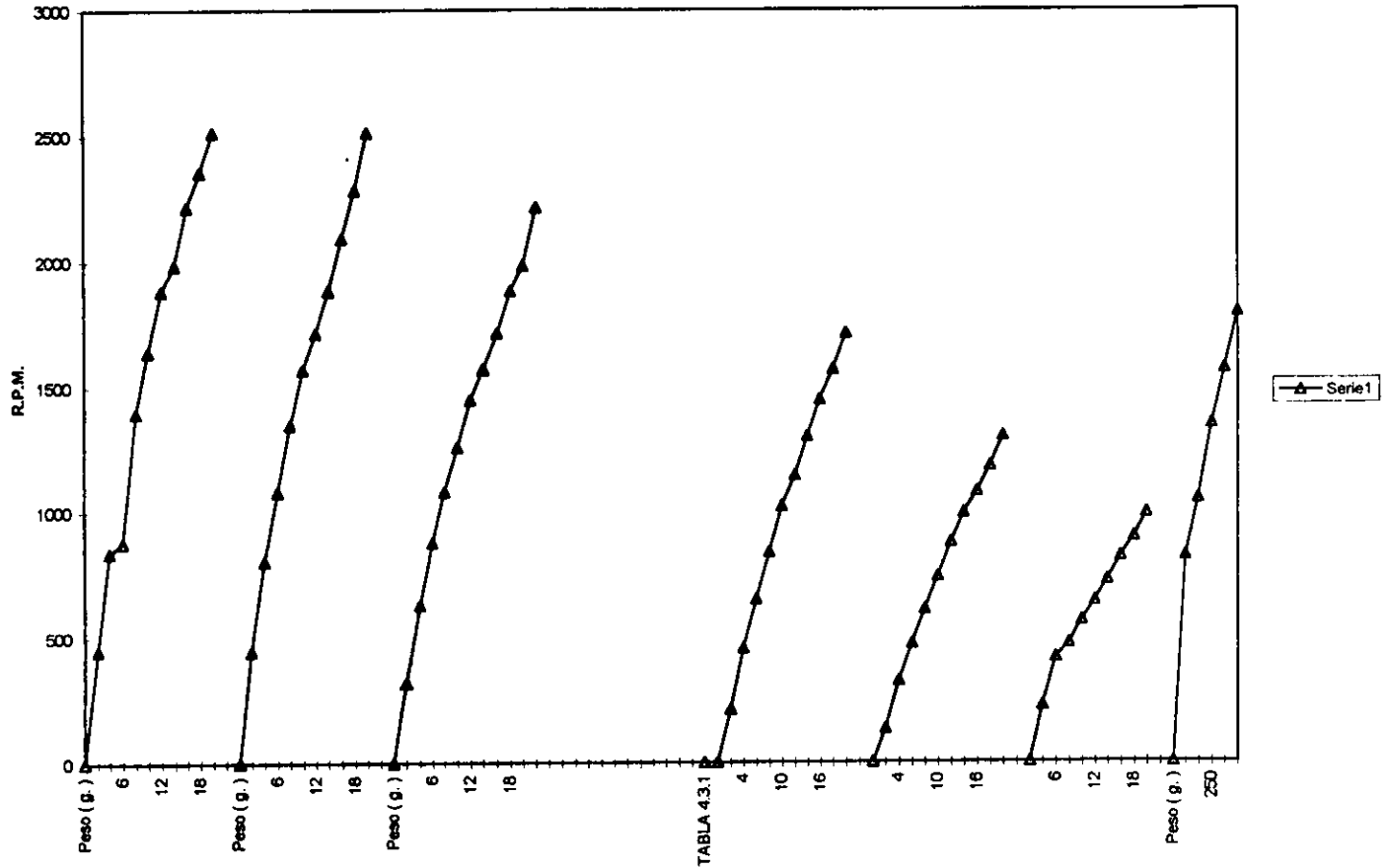
40 % en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
5	107.4051282	351
10	229.8731707	164
15	349.0666867	108
20	459.7463415	82
30	685.44	55
40	897.6	42
50	1077.12	35
60	1299.972414	29
70	1507.968	25

70 % en peso de glicerina

Los pesos marcados con el asterisco ( \* ) son los pesos que según la gráfica se recomiendan para la elaboración de la curva patrón.

SELECCIÓN DE PESOS PARA LA ELABORACIÓN DE LA CURVA PÁTRON MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. EL NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO T= 25°C TABLA 4.3.1



**TABLAS PARA LA SELECCIÓN DE PESOS OPTIMOS**

**TABLA 4.3.1** T=25°C *MÉTODO r' VS. Re' CORREGIDO*

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
2	448.8	84
4	837.76	45
6	876.725581	43
8	1396.26667	27
10	1639.09565	23
12	1884.96	20
14	1984.16842	19
16	2217.6	17
18	2356.2	16
20	2513.28	15

14 % en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
2	443.52	85
4	802.110638	47
6	1077.12	35
8	1346.4	28
10	1570.8	24
12	1713.6	22
14	1884.96	20
16	2094.4	18
18	2284.8	16.5
20	2513.28	15

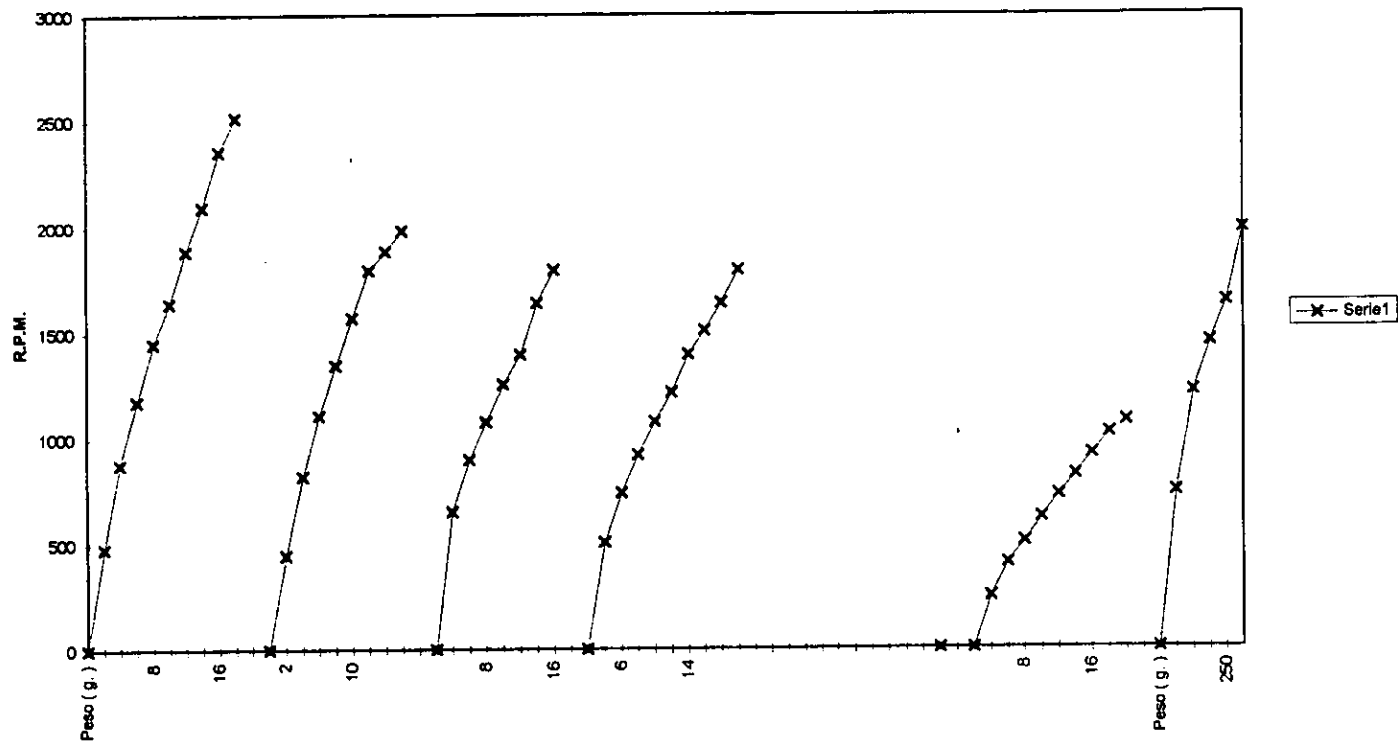
22% en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
2	316.8	119
4	628.32	60
6	876.725581	43
8	1077.12	35
10	1256.64	30
12	1449.96923	26
14	1570.8	24
16	1713.6	22
18	1884.96	20
20	1984.16842	19
22	2217.6	17

40 % en peso de glicerina

Los pesos marcados con el asterisco ( \* ) son los pesos que según la gráfica se recomiendan para la elaboración de la curva patrón.

SELECCIÓN DE PESOS PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN  
 VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO T= 30°C TABLA 4.3.1





**TABLAS PARA LA SELECCIÓN DE PESOS OPTIMOS**

**TABLA 4.3.1 T=25°C MÉTODO f' VS. Re' CORREGIDO**

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
2	209.44	180
4	454.207229	83
6	649.986207	58
8	837.76	45
10	1018.8973	37
12	1142.4	33
14	1299.97241	29
16	1449.96923	26
18	1570.8	24
20	1713.8	22

50 % en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
2	132.743662	284
4	322.215385	117
6	471.24	80
8	608.051613	62
10	739.2	51
12	876.725581	43
14	992.084211	38
16	1077.12	35
18	1178.1	32
20	1299.97241	29

60 % en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
4	223.072189	169
6	414.276923	91
8	471.24	80
10	562.674627	67
12	638.969492	59
14	724.984615	52
16	819.547826	46
18	897.6	42
20	992.084211	38

70 % en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
150	819.547826	46
200	1047.2	36
250	1346.4	28
300	1570.8	24
350	1795.2	21

90 % en peso de glicerina

Los pesos marcados con el asterisco ( \* ) son los pesos que según la gráfica se recomiendan para la elaboración de la curva patrón.

**TABLAS DE SELECCIÓN DE PESOS OPTIMOS**

**TABLA 4.3.1** T=30°C **MÉTODO DEL f VS. Re CORREGIDO**

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
2	477.205063	79
4	876.725581	43
6	1178.1	32
8	1449.96923	26
10	1639.09565	23
12	1884.96	20
14	2094.4	18
16	2356.2	16
18	2513.28	15

14 % en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
2	443.52	85
4	819.547826	46
6	1108.8	34
8	1346.4	28
10	1570.8	24
12	1795.2	21
14	1884.96	20
16	1984.16842	19

22% en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
4	649.986207	58
6	897.6	42
8	1077.12	35
10	1256.64	30
12	1396.26667	27
14	1639.09565	23
16	1795.2	21

40 % en peso de glicerina

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )
4	502.656	75
6	739.2	51
8	919.492683	41
10	1077.12	35
12	1216.10323	31
14	1396.26667	27
16	1507.968	25
18	1639.09565	23
20	1795.2	21

50 % en peso de glicerina

Los pesos marcados con el asterisco ( \* ) son los pesos que según la gráfica se recomiendan para la elaboración de la curva patrón.

**TABLAS DE SELECCIÓN DE PESOS OPTIMOS**

**TABLA 4.3.1 T=30°C MÉTODO DEL  $f'$  VS.  $Re'$  CORREGIDO**

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )	
* 4	241.661538	156	70 % en peso de glicerina
* 6	401.055319	94	
* 8	502.656	75	
* 10	618.019672	61	
* 12	724.984615	52	
* 14	819.547826	46	
* 16	919.492683	41	
* 18	1018.8973	37	
* 20	1077.12	35	

Peso ( g. )	R.P.M.	Tiempo ( s. )	
* 100	739.2	51	90 % en peso de glicerina
* 150	1216.10323	31	
* 200	1449.96923	26	
* 250	1639.09565	23	
* 300	1984.16842	19	

Los pesos marcados con el asterisco ( \* ) son los pesos que según la gráfica se recomiendan para la elaboración de la curva patrón.

Ya con los pesos o torques seleccionados el siguiente paso será, el calculo del factor de fricción y número de Reynolds ( ecuaciones 3.3.13 y 3.3.15 ) para construir las curvas patrón.

Es en esta parte, en donde la segunda variación da ponderancia a esté método, esta variación la hace el área, que como se dijo en el capítulo 3 ( sección 3.3.12 ) puede en un momento dado propiciar que los resultados no caigan dentro de un rango de aceptación.

Teóricamente puede ser aceptada, la propuesta en que se dice que el factor de fricción y número de Reynolds ( mostrados en las ec. 3.3.13 y 3.3.15 ) aunque tienen unidades cumplen con la definición de los mismos. Pero ¿ prácticamente en que beneficia a el proceso de experimentación ? Si se observan las gráficas realizadas con el fluido conocido ( glicerina ) se notará que la pendiente varia significativamente, en ambos métodos. En el método dos la pendiente esta por encima de los 45 grados, sobre todo en la parte alta de la gráfica.

En este método la pendiente es próxima a los 45 grados proporcionando que la lectura sea mas exacta.

Estas curvas a el igual que las curvas obtenidas en el método anterior fueron creadas con el propósito de poder calcular la viscosidad de un fluido Newtoniano cualquiera.

Las variables para el calculo de estos (  $f'$  y  $Re'$  ), son: la densidad y la viscosidad ( datos que se obtienen de la bibliografía ). las temperaturas seleccionadas de éxperimentación para la realización de las gráficas fueron de 20, 25 y 30 °C. Los datos se muestran en las tablas 4.3.2 las curvas patrón se presentan al final de cada tabla ( recuérdese que existen tantas curvas como temperaturas de experimentación se hayan seleccionado )

Un ejemplo de como se pueden elaborar y organizar estas tablas se muestra a continuación:

Temperatura de operación 20 °C 14% en peso de glicerina.				
T=20 °C Den. = 1.032 g/cm <sup>3</sup> Visc. = 883.8 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s )	R.P.M.	Re'	f'
5	40	942.48	1.100519758	8.67248E-06
6	35	1077.12	1.257736884	7.96784E-06
8	29	1299.97241	1.517958284	7.29355E-06
10	25	1507.968	1.760831609	6.77537E-06
12	22	1713.6	2.00094501	6.29622E-06

De esta tabla se puede ver que:

El peso o torque. Es seleccionado, para provocar el movimiento del husillo ( esquema 3.2.1 ). En este método el peso se selecciono bajo el criterio de la ley de margules, esto es; bajo el criterio de deformación homogénea.

El tiempo en segundos: Es el tiempo en dar una vuelta completa el contador de revoluciones del viscosímetro de Stomer. ( esquema 3.2.1 ).

las revoluciones por minuto se calculan según la ecuación 4.1.1.

El factor de fricción ( f' ) se calcula según la ecuación 3.3.13.

El número de Reynolds se calcula según la ecuación 3.3.15.

Cada dilucion tendrá una tabla. Y habrá tantas tablas como temperaturas de experimentación se hayan seleccionado.

Las gráficas de Mody propuestas, según los datos obtenidos a cada temperatura se muestran al final de las tablas sección 4.3.2.

**TABLAS PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON**

Análisis de datos para diferentes concentraciones de Glicerina T = 20°C

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO

**TABLA 4.3.2**

Temperatura de operación 20 °C 14% en peso de glicerina.				
T=20 °C				
Den. = 1.032 g/cm <sup>3</sup> Visc. = 883.8 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
5	40	942.48	1.100519756	8.67248E-06
6	35	1077.12	1.257738864	7.96784E-06
8	29	1299.97241	1.517958284	7.29355E-06
10	25	1507.968	1.760831609	6.77537E-06
12	22	1713.6	2.00094501	6.29622E-06

Temperatura de operación 20 °C 22% en peso de glicerina.				
T=20 °C				
Den. = 1.052 g/cm <sup>3</sup> Vis.=1098.6 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
5	41	919.492683	0.880489989	8.9383E-06
6	36	1047.2	1.002780266	8.26939E-06
8	30	1256.64	1.203336319	7.65684E-06
10	26	1449.96923	1.388464983	7.18892E-06
12	23	1639.09565	1.569569112	6.75078E-06

Temperatura de operación 20 °C 40% en peso de glicerina.				
T=20 °C				
Den. = 1.099 g/cm <sup>3</sup> Vis.=2238 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
2	128.5	293.378988	0.144067698	3.3618E-05
3	82	459.746341	0.225764624	2.05345E-05
5	53	711.30566	0.349296211	1.42974E-05
6	45	837.76	0.411393315	1.23683E-05
8	37	1018.8973	0.500343222	1.11488E-05
10	31	1216.10323	0.597183845	9.7827E-06
12	28	1346.4	0.661167828	9.57707E-06
15	24	1570.8	0.771362466	8.79526E-06
20	19	1984.16842	0.974352589	7.34975E-06
25	17	2217.6	1.088982306	7.35484E-06

**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON.**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO

Análisis de datos para diferentes concentraciones de Glicerina T = 20 °C

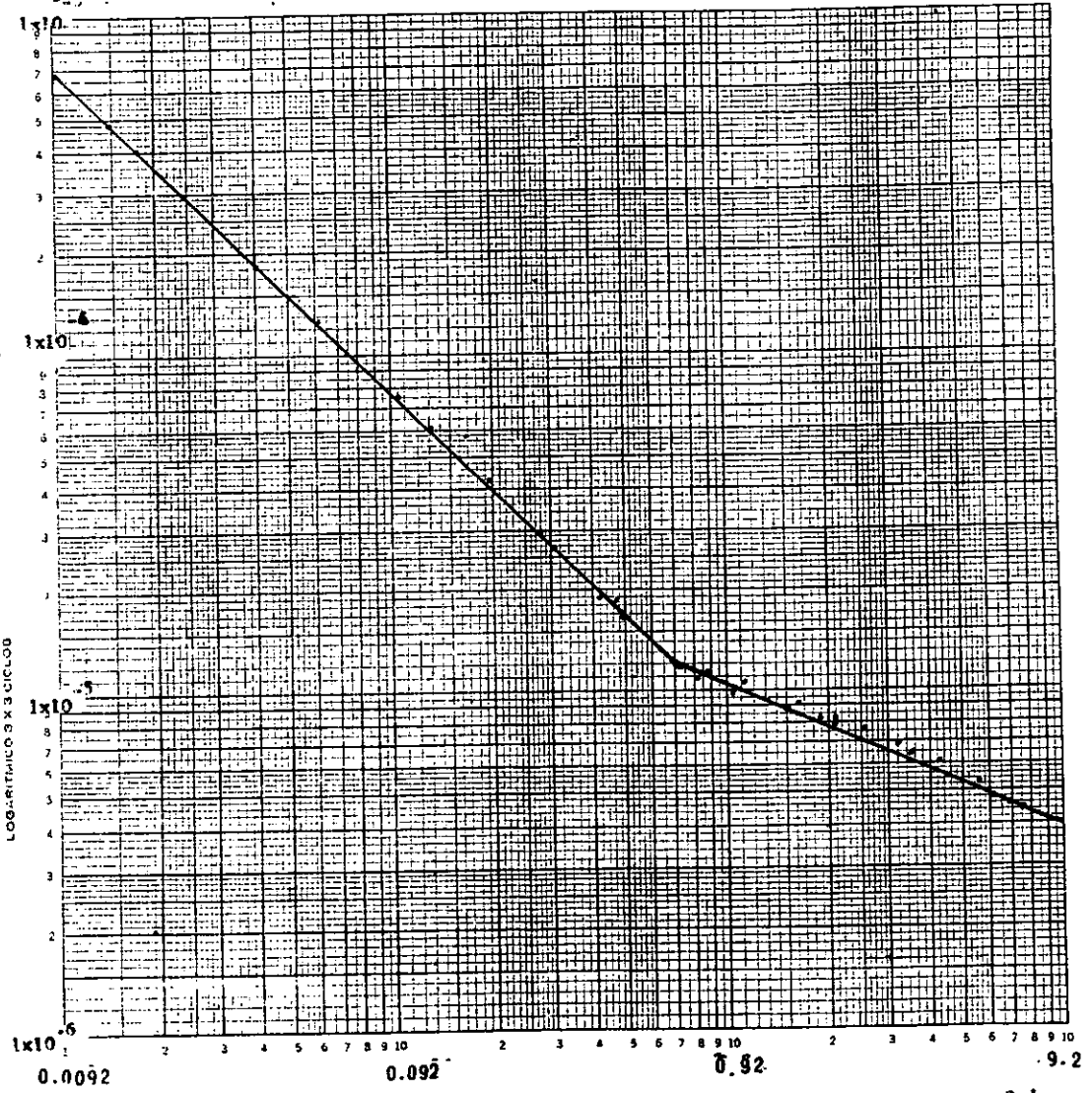
**TABLA 4.3.2**

<u>Temperatura de operación 20 °C</u> <u>70% en peso de glicerina.</u>				
T=20 °C		Den. = 1.1812 g/cm <sup>3</sup> Vis.=13764 g/cm min		
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
20	82	459.746341	0.039454547	0.00012737
30	55	685.44	0.058823142	8.5952E-05
40	42	897.6	0.077030305	6.68295E-05
50	35	1077.12	0.092436368	5.80117E-05
60	29	1299.97241	0.111561132	4.77922E-05
70	25	1507.968	0.129410913	4.14369E-05

# CURVA PATRON

T = 20°C

Método del factor de Fricción Vs. el Número de Reynolds Corregido





**TABLAS PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON.**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO

Análisis de datos para diferentes concentraciones de Glicerina T = 25 °C

**TABLA 4.3.2**

<u>Temperatura de operación 25 °C</u>				
<u>14% en peso de glicerina.</u>				
T=25 °C				
Den. = 1.0336 g/cm <sup>3</sup>				
Visc. = 775.2 g/cm min				
<u>Peso ( g. )</u>	<u>Tiempo ( s. )</u>	<u>R.P.M.</u>	<u>Re' ( cm<sup>2</sup> )</u>	<u>f' (cm<sup>3</sup> min<sup>2</sup>.)</u>
2	84	448.8	0.5984	1.52746E-05
4	45	837.76	1.117013333	8.76729E-06
6	43	876.725581	1.168967442	1.20079E-05
8	27	1396.26667	1.861688889	6.31245E-06
10	23	1639.09565	2.18546087	5.7258E-06
12	20	1884.96	2.51328	5.19543E-06
14	19	1984.16842	2.645557895	5.47036E-06
16	17	2217.6	2.9568	5.00493E-06
18	16	2356.2	3.1416	4.98761E-06

<u>Temperatura de operación 25 °C</u>				
<u>22% en peso de glicerina.</u>				
T=25 °C				
Den. = 1.0537 g/cm <sup>3</sup>				
Vis. = 986.4 g/cm min				
<u>Peso ( g. )</u>	<u>Tiempo ( s. )</u>	<u>R.P.M.</u>	<u>Re' ( cm<sup>2</sup> )</u>	<u>f' (cm<sup>3</sup> min<sup>2</sup>.)</u>
2	85	443.52	0.473780438	1.53421E-05
4	47	802.110638	0.856836962	9.38148E-06
6	35	1077.12	1.150609635	7.80375E-06
8	28	1346.4	1.438262044	6.6592E-06
10	24	1570.8	1.677972384	6.11559E-06
12	22	1713.6	1.830515328	6.16655E-06
14	20	1884.96	2.013566861	5.94571E-06
16	18	2094.4	2.237296513	5.50403E-06
18	16.5	2284.8	2.440687105	5.20303E-06
20	15	2513.28	2.684755815	4.7778E-06

**TABLAS PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON.**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. EL NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.

Análisis de datos para diferentes concentraciones de Glicerina T = 25 °C

**TABLA 4.3.2**

Temperatura de operación 25 °C				
40% en peso de glicerina.				
T=25 °C				
Den. = 1.1 g/cm <sup>3</sup>				
Vis.=1908.5 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
2	119	316.8	0.182584093	2.88047E-05
4	60	628.32	0.362125118	1.46454E-05
6	43	876.725581	0.505290862	1.12831E-05
8	35	1077.12	0.620785916	9.96704E-06
10	30	1256.64	0.724250236	9.15341E-06
12	26	1449.96923	0.835673349	8.25027E-06
14	24	1570.8	0.905312795	8.20145E-06
16	22	1713.6	0.987613958	7.876E-06
18	20	1864.96	1.086375354	7.32272E-06
20	19	1984.16842	1.143553004	7.34306E-06

Temperatura de operación 25 °C				
50% en peso de glicerina.				
T=25 °C				
Den. = 1.1256 g/cm <sup>3</sup>				
Vis.=3024.6 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
2	180	209.44	0.077942757	6.44056E-05
4	83	454.207229	0.169032486	2.73883E-05
6	58	649.986207	0.241891316	2.00612E-05
8	45	837.76	0.31177103	1.61014E-05
10	37	1018.8973	0.379180982	1.36067E-05
12	33	1142.4	0.425142313	1.29885E-05
14	29	1299.97241	0.483782632	1.17023E-05
16	26	1449.96923	0.539603705	1.07502E-05
18	24	1570.8	0.58457068	1.03049E-05
20	22	1713.6	0.63771347	9.62109E-06

**TABLAS PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON.**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. EL NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.

Análisis de datos para diferentes concentraciones de Glicerina T = 25 °C

TABLA 4.3.2

Temperatura de operación 25 °C				
60% en peso de glicerina.				
T=25 °C				
Den. = 1.15460 g/cm <sup>3</sup>				
Vis.=5293.8 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f'(cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
2	284	132.743662	0.02895195	0.000156303
4	117	322.215385	0.070276528	5.30558E-05
6	80	471.24	0.102779422	3.72077E-05
8	62	608.051613	0.132618609	2.97971E-05
10	51	739.2	0.161222623	2.52024E-05
12	43	876.725581	0.191217529	2.14991E-05
14	38	992.084211	0.21637773	1.95883E-05
16	35	1077.12	0.234924393	1.89914E-05
18	32	1178.1	0.256948555	1.78597E-05
20	29	1299.97241	0.28352944	1.62977E-05

Temperatura de operación 25 °C				
70% en peso de glicerina.				
T=25 °C				
Den. = 1.18210 g/cm <sup>3</sup>				
Vis.=10776 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f'(cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
8	80	471.24	0.051693839	4.84561E-05
10	67	562.674627	0.061723986	4.24843E-05
12	59	638.969492	0.07009334	3.95334E-05
14	52	724.984615	0.079528982	3.58272E-05
16	46	819.547826	0.089902328	3.20416E-05
18	42	897.6	0.098464454	3.00504E-05
20	38	992.084211	0.108829134	2.73323E-05

**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON.**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. EL NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.

Análisis de datos para diferentes concentraciones de Glicerina T = 25 °C

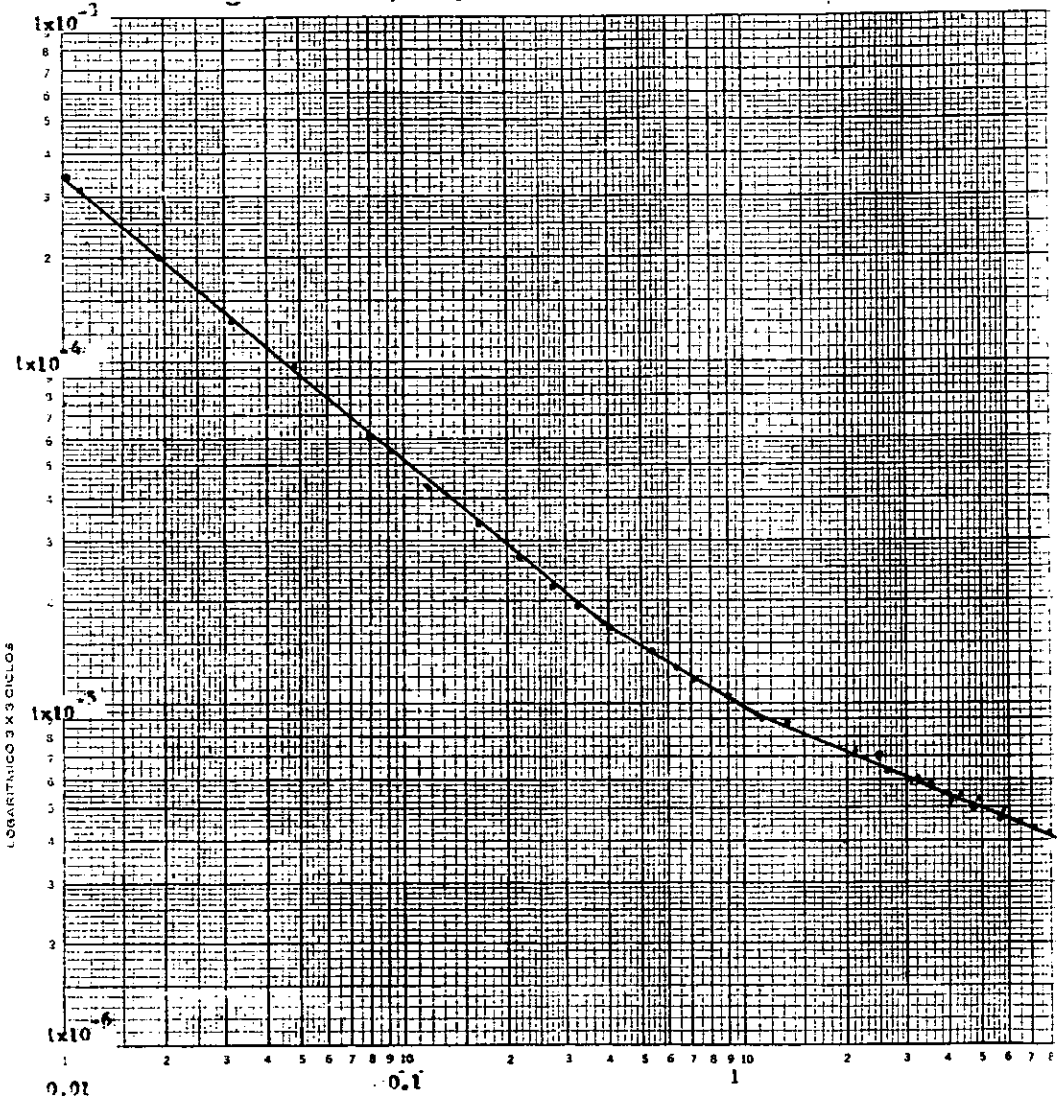
**TABLA 4.3.2**

<u>Temperatura de operación 25 °C.</u>				
<u>90% en peso de glicerina.</u>				
T=25 °C				
Den. = 1.2310 g/cm <sup>3</sup>				
Vis.=98160 g/cm min				
<b>Peso ( g. )</b>	<b>Tiempo ( s. )</b>	<b>R.P.M.</b>	<b>Re' ( cm<sup>2</sup> )</b>	<b>f'(cm<sup>2</sup> min<sup>2</sup>.)</b>
150	46	819.547826	0.010277744	0.000288457
200	36	1047.2	0.013132673	0.000235564
250	28	1346.4	0.016884866	0.000178127
300	24	1570.8	0.01969901	0.000157043
350	21	1795.2	0.022513154	0.000140275

# CURVA PATRON

T = 25°C

Método del factor de Fricción Vs. el Número de Reynolds Corregido.



R=

**TABLAS PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON.**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. EL NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.

Análisis de datos para diferentes concentraciones de Glicerina T = 30 °C

**TABLA 4.3.2**

Temperatura de operación 30 °C				
14% en peso de glicerina.				
T=30 °C				
Den. = 1.0288 g/cm <sup>3</sup>				
Visc. = 685.8 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>3</sup> min <sup>2</sup> .)
2	79	477.205063	0.715877179	1.35733E-05
4	43	876.725581	1.315216212	8.04264E-06
6	32	1178.1	1.767321785	6.68118E-06
8	26	1449.96923	2.175165274	5.88083E-06
10	23	1639.09565	2.458882483	5.75251E-06
12	20	1884.96	2.827714856	5.21967E-06
14	18	2094.4	3.141905395	4.93259E-06
16	16	2356.2	3.53464357	4.45412E-06
18	15	2513.28	3.770286474	4.4041E-06

Temperatura de operación 30 °C				
22% en peso de glicerina.				
T=30 °C				
Den. = 1.0485 g/cm <sup>3</sup>				
Vis.=850.2 g/cm min				
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>3</sup> min <sup>2</sup> .)
2	85	443.52	0.546966267	1.54182E-05
4	46	819.547826	1.010698536	9.03109E-06
6	34	1108.8	1.367415867	7.40071E-06
8	28	1346.4	1.66043331	6.69222E-06
10	24	1570.8	1.937172195	6.14592E-06
12	21	1795.2	2.21391108	5.64656E-06
14	20	1884.96	2.324606634	5.9752E-06
16	19	1984.16842	2.446954351	6.16299E-06

**TABLAS PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON.**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO

Análisis de datos para diferentes concentraciones de Glicerina T = 30 °C

**TABLA 4.3.2**

Temperatura de operación 30 °C 40% en peso de glicerina.				
T=30 °C		Den. = 1.09475 g/cm <sup>3</sup> Vis.=1638.6 g/cm min		
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
4	58	649.986207	0.434258316	1.3751E-05
6	42	897.6	0.599687294	1.0816E-05
8	35	1077.12	0.719624753	1.00148E-05
10	30	1256.64	0.839562212	9.1973E-06
12	27	1396.26667	0.932846902	8.93978E-06
14	23	1639.09565	1.095081146	7.56836E-06
16	21	1795.2	1.199374588	7.21068E-06

Temperatura de operación 30 °C 50% en peso de glicerina.				
T=30 °C		Den. = 1.123 g/cm <sup>3</sup> Vis.=2548.2 g/cm min		
Peso ( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Re' ( cm <sup>2</sup> )	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)
4	75	502.656	0.221522129	2.24148E-05
6	51	739.2	0.325767836	1.55469E-05
8	41	919.492683	0.405223406	1.33971E-05
10	35	1077.12	0.474890275	1.22036E-05
12	31	1216.10323	0.535940634	1.14884E-05
14	27	1396.26667	0.615339246	1.01674E-05
16	25	1507.968	0.664566386	9.96215E-06
18	23	1639.09565	0.722354787	9.48596E-06
20	21	1795.2	0.791150459	8.78662E-06

**TABLAS PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS PÁTRON.**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.

Análisis de datos para diferentes concentraciones de Glicerina T = 30 °C

**TABLA 4.3.2**

<u>Temperatura de operación 30 °C</u>				
<u>70% en peso de glicerina.</u>				
T=30 °C				
Den. = 1.1756 g/cm <sup>3</sup>				
Vis.=8592 g/cm min				
<b>Peso ( g. )</b>	<b>Tiempo ( s. )</b>	<b>R.P.M.</b>	<b>Re' ( cm<sup>2</sup> )</b>	<b>f' (cm<sup>2</sup> min<sup>2</sup>.)</b>
4	156	241.661538	0.033065329	9.26366E-05
6	94	401.055319	0.054874375	5.04522E-05
8	75	502.656	0.068775884	4.28239E-05
10	61	618.019672	0.084560513	3.54106E-05
12	52	724.984615	0.099195986	3.08789E-05
14	46	819.547826	0.112134593	2.81914E-05
16	41	919.492683	0.125809544	2.55953E-05
18	37	1018.8973	0.139410575	2.34503E-05
20	35	1077.12	0.147376894	2.33152E-05

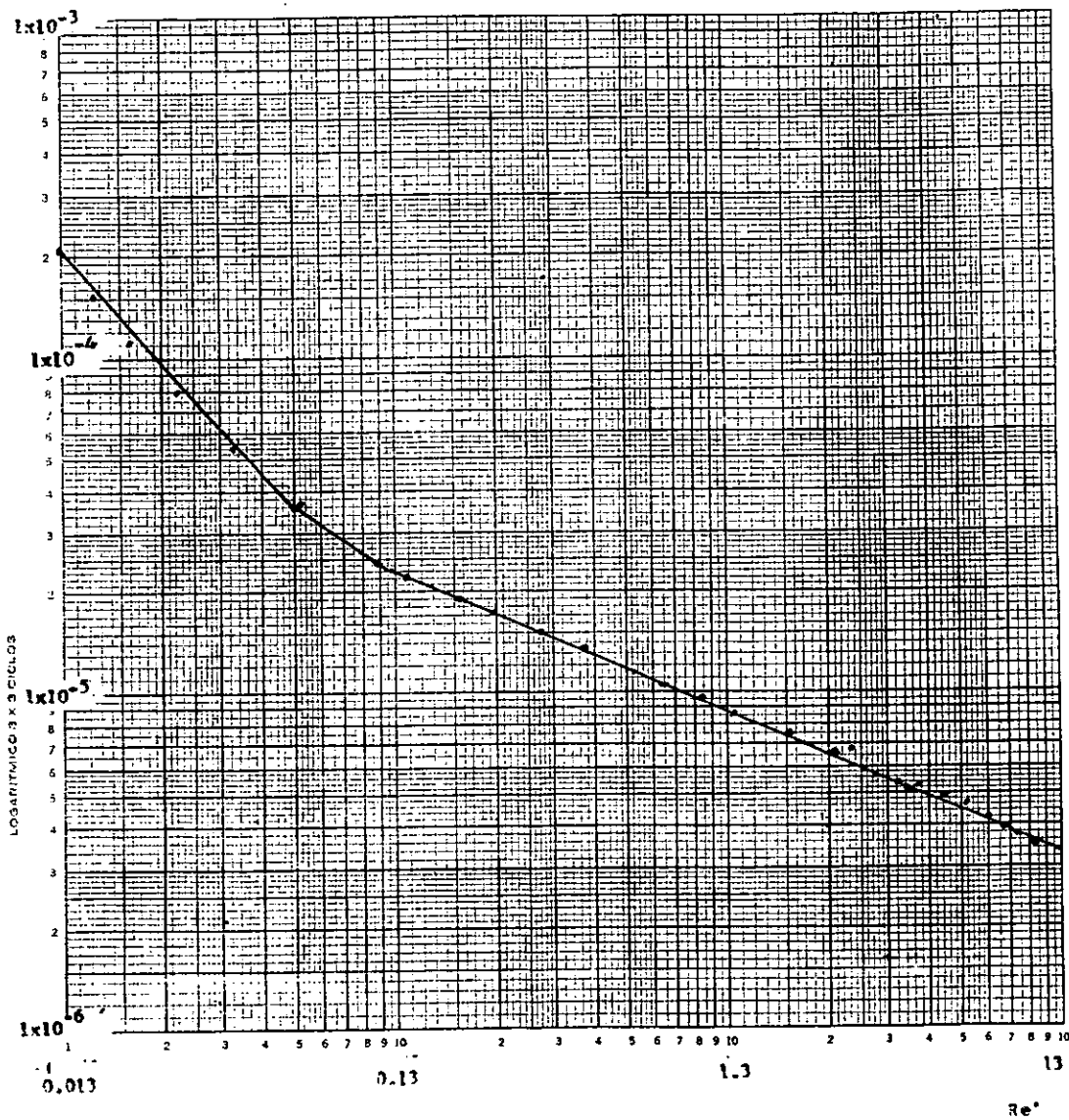
<u>Temperatura de operación 30 °C</u>				
<u>90% en peso de glicerina.</u>				
T=30 °C				
Den. = 1.2289 g/cm <sup>3</sup>				
Vis.=69480 g/cm min				
<b>Peso ( g. )</b>	<b>Tiempo ( s. )</b>	<b>R.P.M.</b>	<b>Re' ( cm<sup>2</sup> )</b>	<b>f' (cm<sup>2</sup> min<sup>2</sup>.)</b>
150	31	1216.10323	0.021509344	0.000137179
200	26	1449.96923	0.025645757	0.000128662
250	23	1639.09565	0.028990856	0.000125855
300	19	1984.16842	0.035094194	0.000103063



# CURVA PATRON

T = 30°C

Método del factor de Fricción Vs. el Número de Reynolds Corregido



Y se debe enfatizar que la temperatura juega un papel muy importante, ya que con cualquier variación de la temperatura variara proporcionalmente la densidad y con esto, los resultados.

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR LA VISCOSIDAD.

Para calcular la viscosidad de un fluido Newtoniano ,el procedimiento es el siguiente:

- a) Se vierte la muestra en el contenedor y se selecciona la temperatura según la curva en la que se desea trabajar.
- b) Se pone el fluido térmico en el recipiente y se coloca el contenedor.
- c) Se sube la base y se seleccionan los pesos de experimentación con la gráfica de torque vs. R.P.M.
- d) se calculan las velocidades angulares ( ec 4.1.1 )
- e) Se calculan los factores de fricción ( ec. 3.3.13 )
- f) Con los factores de fricción ya calculados, el siguiente paso es usar la gráfica; la forma de uso es:
  - 1) El valor obtenido se busca en las absisas (  $f'$  ) de la gráfica, una vez que se encuentra se traza una línea recta hasta encontrar la curva.
  - 2) Una vez que se interceptada la curva se traza una línea recta hacia las ordenadas de la gráfica.
  - 3) Esta intersección nos dará un valor de número de Reynolds.
  - 4) con el valor del número de Reynolds y la ecuación 3.3. 15 se calcula la viscosidad de el fluido en cuestión. el valor de la viscosidad será el promedio de las lecturas obtenidas.

Los fluidos experimentales cuyas viscosidades no se conocían fueron : Benceno, Ciclohexanol, Acetona y Aceite Texaco.

Un ejemplo propuesto para mostrar los datos organizados en una tabla, se muestran a continuación:

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema ACETONA. 20 °C. densidad= 0.789g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	F f'cm3min2	Re' graf	VISCOSIDAD
2	816.816	6.0409E-06	3.13	205.9002633
3	1018.883712	5.82361E-06	3.9	206.1280125
4	1256.64	5.10456E-06	4.8	206.5602
5	1449.911232	4.793E-06	5.5	207.9963567
6	1638.65856	4.50292E-06	6.2	208.5325167
7	1795.173072	4.37729E-06	6.8	208.2928756
promedio( g/cmmin )			=	<b>207.2350375</b>
VISC. (cp.)			=	<b>0.345391729</b>

1) Peso; es el peso seleccionado para provocar el movimiento del husillo. En este método el peso se selecciono bajo el criterio de la ley de margules, esto es; bajo el criterio de deformación homogénea.

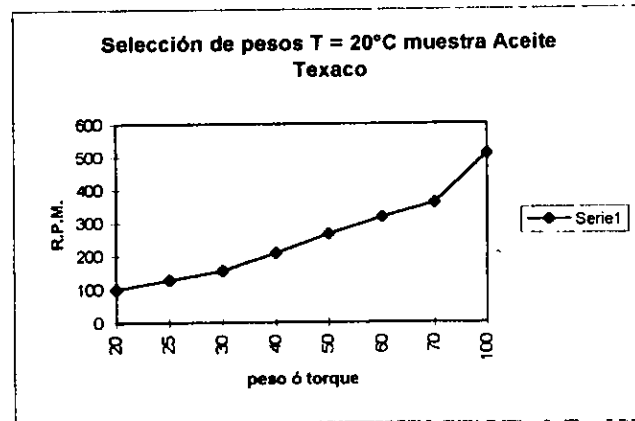
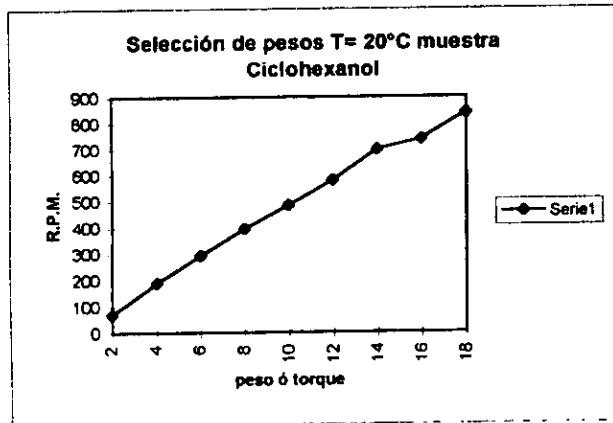
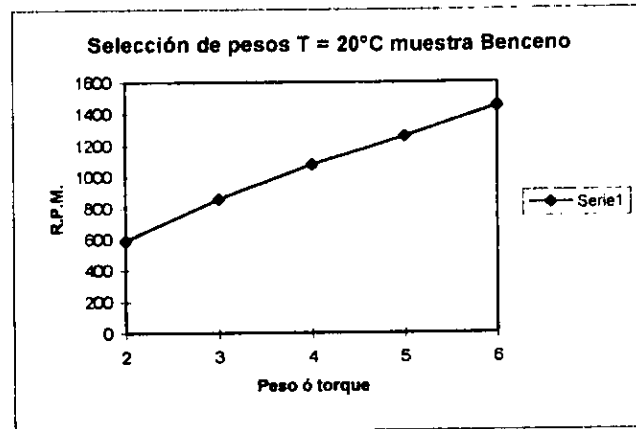
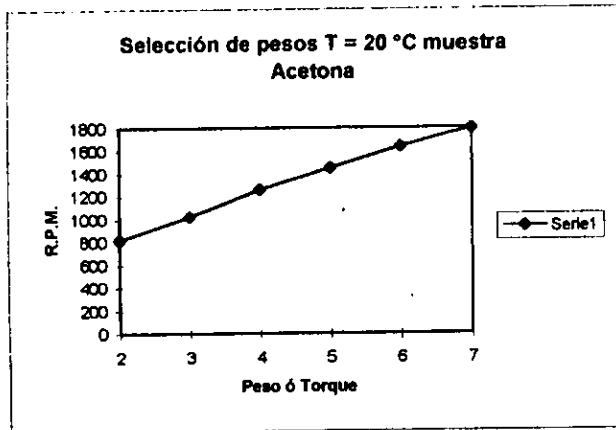
2) tiempo; es el tiempo que tarda en dar una vuelta completa el contador de revoluciones. ( esquema 3.2.1 )

4) Revoluciones por minuto según la ecuación 4.1.1

5) Factor de Fricción según la ecuación 3.3.13. ( cm<sup>3</sup> min<sup>2</sup> )

6) Lectura del Reynolds según las gráficas. ( unidades de área cm<sup>2</sup> )

7) Valor de la viscosidad ( despejando la variable de la ecuación 3.3.15 ) ( el valor de la viscosidad será el promedio de los valores obtenidos ) en este caso para hacer la conversión a centipoises es necesario dividir entre 60 para pasar los minutos a segundos, dividir una vez mas entre 1000 para pasar los gramos a kilogramos. Y con



**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CURVA PATRÓN ( FLUIDOS PROBLEMA )**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO  
**TABLA 4.3.3**

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema ACETONA. 20 °C. densidad= 0.789g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
3	1018.883712	5.82361E-06	3.9	206.1280125
4	1256.64	5.10456E-06	4.8	206.5602
5	1449.911232	4.793E-06	5.5	207.9963567
6	1638.65856	4.50292E-06	6.2	208.5325167
7	1795.173072	4.37729E-06	6.8	208.2928756
promedio ( g. / cm min )			=	<b>207.5019923</b>
VISC. (cp.)			=	<b>0.345836654</b>

Visc. real cp = 0.33

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema BENCENO 20 °C. densidad= 0.8791g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
2	589.05	1.04252E-05	1.59	325.6816698
3	856.777152	7.3917E-06	2.3	327.475128
4	1077.066144	6.2364E-06	2.9	326.4996025
5	1256.64	5.72674E-06	3.4	324.91536
promedio ( g. / cm min )			=	<b>326.1429401</b>
VISC. (cp.)			=	<b>0.543571567</b>

Visc. real cp = 0.54

**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CURVA PATRÓN ( FLUIDOS PROBLEMA )**

MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO

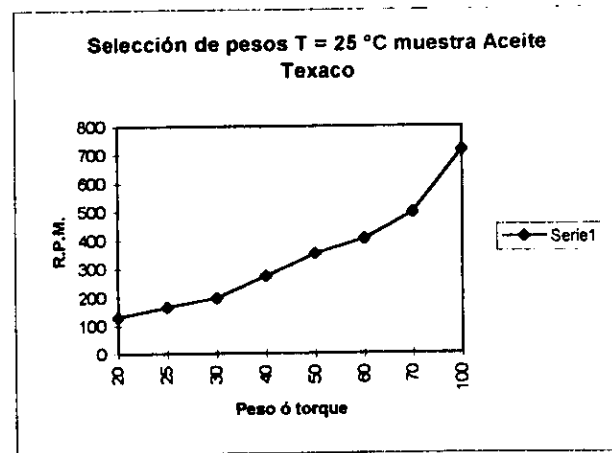
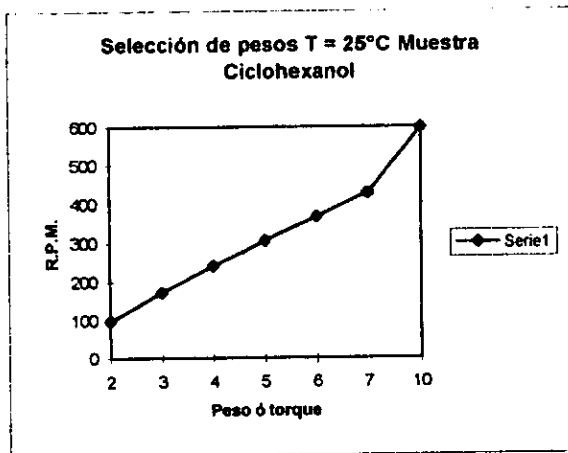
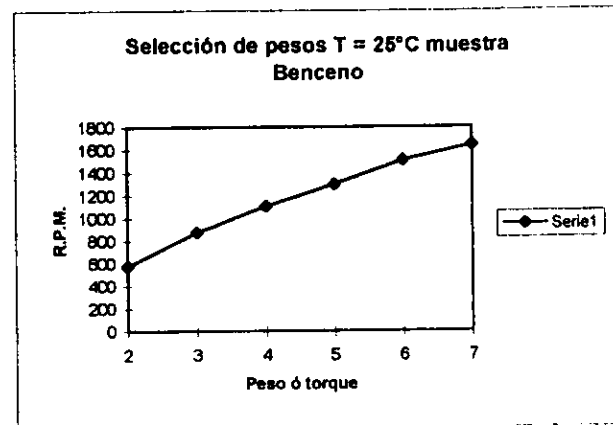
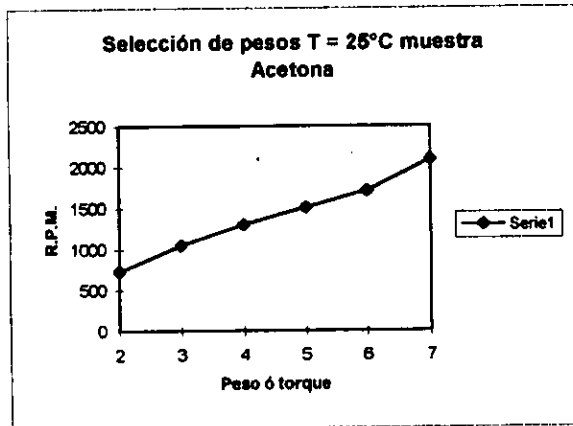
**TABLA 4.3.3**

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema CICLOHEXANOL 20 °C. densidad= 0.962g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
2	69.806352	0.000678363	0.0015	44769.14042
4	187.5579182	0.000187937	0.004	45107.67934
6	292.2416851	0.000116115	0.0062	45344.59895
8	392.7	8.57413E-05	0.0084	44973.5
10	483.3232219	7.07533E-05	0.013	35765.91842
12	579.9877406	5.89611E-05	0.0124	44995.8231
14	698.1326352	4.7476E-05	0.014	47971.68536
promedio ( g. / cm min )			=	<b>44132.62051</b>
VISC. (cp.)			=	<b>73.55436752</b>

Visc. real cp = 74.76

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema ACEITE TEXACO 20 °C. densidad= 1.8833g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
40	208.225248	0.000778881	0.0084	48684.59638
50	265.4652	0.000599008	0.013	38457.73932
60	317.175936	0.000503534	0.0124	48172.37422
70	359.022048	0.000458494	0.014	48296.15879
promedio ( g. / cm min )			=	<b>45402.71717</b>
VISC. (cp.)			=	<b>75.67119529</b>

Visc. real cp = 99.65



**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CURVA PÁTRON ( FLUIDOS PROBLEMA )**  
**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.**  
**TABLA 4.3.3**

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema ACETONA. 25 °C. densidad= 0.788g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
2	724.45296	7.67944E-06	2.97	192.2117618
3	1047.158112	5.51337E-06	4.2	196.4668077
4	1299.36576	4.77438E-06	5.3	193.1887205
5	1507.968	4.43104E-06	6.1	194.7998007
6	1713.42864	4.1185E-06	7	192.8831098
promedio ( g. / cm min )			=	193.9100401
VISC. (cp.)			=	0.3231834
Visc. real cp =				0.391

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema BENCENO 25 °C. densidad= 0.879g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
2	579.93938	1.07568E-05	1.7	299.8627632
3	876.5064	7.06349E-06	2.6	296.3265868
4	1108.35648	5.88992E-06	3.3	295.2258624
5	1299.36576	5.35692E-06	3.8	300.5638166
6	1507.968	4.77282E-06	4.5	294.556416
7	1638.65856	4.71552E-06	4.8	300.0793488
promedio ( g. / cm min )			=	446.6536984
VISC. (cp.)			=	0.744422831
Visc. real cp =				0.743



**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CURVA PÁTRON ( FLUIDOS PROBLEMA )**  
**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.**

**TABLA 4.3.3**

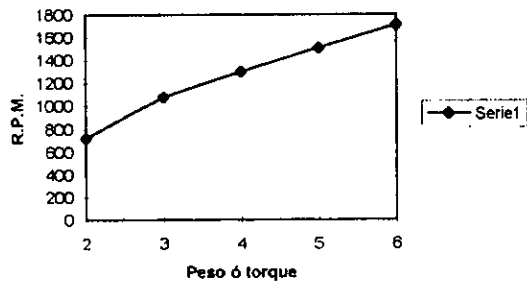
Cálculo del factor de fricción para una muestra problema CICLOHEXANOL 25 °C. densidad= 0.9518g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
2	96.635616	0.000357773	0.0026	35376.06896
3	171.342864	0.000170703	0.0047	34698.75276
4	240.081072	0.00011593	0.006	38084.86072
5	303.981216	9.03916E-05	0.008	36166.16517
6	365.9964	7.48254E-05	0.01	34835.53735
7	428.388576	6.37197E-05	0.011	37067.29515
promedio ( g. / cm min )			=	<b>36038.11335</b>
VISC. (cp.)			=	<b>60.06352225</b>

Visc. real cp = 59.75

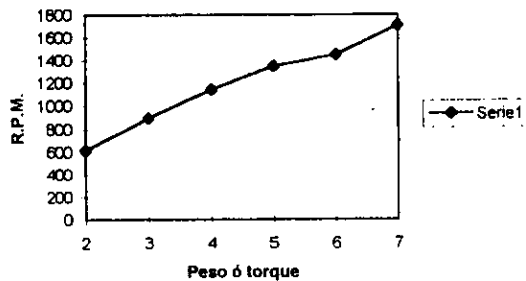
Cálculo del factor de fricción para una muestra problema ACEITE TEXACO 25 °C. densidad= 1.8830g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
30	197.355312	0.000650385	0.0062	59938.71814
40	273.130704	0.000452758	0.0084	61226.79948
50	320.883024	0.000410037	0.013	46478.67186
60	390.689376	0.000331921	0.0124	59328.07218
70	495.995808	0.000240264	0.014	66711.43618
promedio ( g. / cm min )			=	<b>58736.73957</b>
VISC. (cp.)			=	<b>97.89456595</b>

Visc. real cp = 130.56

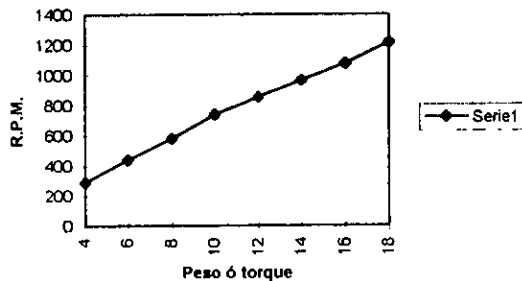
Selección de Pesos T = 30°C muestra  
Acetona



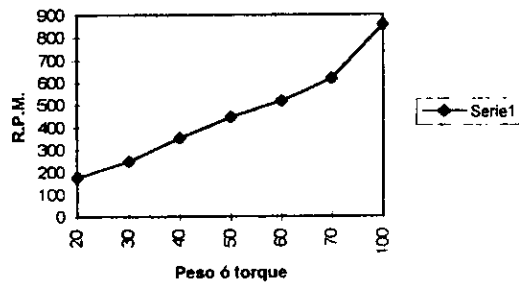
Selección de pesos T = 30°C Muestra  
Benceno



Selección de pesos T = 30 °C Muestra  
Ciclohexanol



Selección de pesos T = 30°C Muestra  
Aceite Texaco



**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CURVA PÁTRON ( FLUIDOS PROBLEMA )**  
**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.**  
**TABLA 4.3.3**

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema ACETONA. 30 °C. densidad= 0.787g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f'(cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
3	1077.066144	5.21143E-06	4.7	180.3512884
4	1299.36576	4.77438E-06	5.6	182.6072952
5	1507.968	4.43104E-06	6.5	182.5801255
6	1713.42864	4.1185E-06	7.4	182.2254513
promedio ( g. / cm min )			=	<b>181.9410401</b>
VISC. (cp.)			=	<b>0.303235067</b>

Visc. cp = 0.49

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema BENCENO 30 °C. densidad= 0.875g/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f'(cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
2	618.015552	9.51525E-06	1.9	284.6124253
3	897.24096	6.77161E-06	2.8	280.3878
4	1142.348592	5.56996E-06	3.6	277.6541717
5	1345.86144	5.01601E-06	4.2	280.3878
promedio ( g. / cm min )			=	<b>449.2168788</b>
VISC. (cp.)			=	<b>0.748694798</b>

Visc. cp = 0.7423

**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CURVA PÁTRON ( FLUIDOS PROBLEMA )**  
**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.**

**TABLA 4.3.3**

<b>Cálculo del factor de fricción para una muestra problema</b> <b>CICLOHEXANOL 30 °C. densidad= 0.9416g/cm³</b>					
<b>MASA. ( g. )</b>	<b>R.P.M</b>	<b>f'(cm³ min².)</b>	<b>Re' graf</b>	<b>VISCOSIDAD</b>	
4	292.231632	7.90927E-05	0.0135	20382.81516	
6	438.316032	5.2736E-05	0.02	20635.91879	
8	579.93936	4.01657E-05	0.026	21002.72698	
10	739.155648	3.09071E-05	0.034	20470.26348	
12	856.777152	2.76043E-05	0.039	20685.67606	
14	966.35616	2.53154E-05	0.044	20880.02182	
16	1076.94048	2.32952E-05	0.049	20694.83992	
18	1215.7992	2.05627E-05	0.056	20442.79512	
<b>promedio ( g. / cm min )</b>				=	<b>20624.35717</b>
<b>VISC. (cp.)</b>				=	<b>34.37392861</b>

Visc. cp = 34.35

<b>Cálculo del factor de fricción para una muestra problema</b> <b>ACEITE TEXACO 30 °C. densidad= 1.8825g/cm³</b>					
<b>MASA. ( g. )</b>	<b>R.P.M</b>	<b>f'(cm³ min².)</b>	<b>Re' graf</b>	<b>VISCOSIDAD</b>	
30	247.997904	0.000411991	0.0062	75299.36359	
40	352.299024	0.000272207	0.0084	78952.7277	
50	443.468256	0.000214737	0.013	84217.61476	
60	516.416208	0.000190026	0.0124	78399.47674	
70	617.764224	0.000154923	0.014	83067.22512	
<b>promedio ( g. / cm min )</b>				=	<b>75987.28158</b>
<b>VISC. (cp.)</b>				=	<b>126.6454693</b>

Visc. cp = 168.68

esto tener unidades de poise. Después de esto, se multiplica el resultado por 100 para obtener unidades de centipoise

Los valores obtenidos en este método se muestran en la tabla 4.3.3 para 20 °C, 25 °C y 30 °C. Las gráficas para seleccionar los pesos óptimos se muestran al principio de estos.

#### INTERPRETACIONDE LOS DATOS.

- a) Al quitar el efecto de área los cálculos se vuelven mas exactos.
- b) La selección de los pesos, hace que la inclinación de las curvas patrón sea mas cercana a los 45 grados, y con esto eliminamos los efectos de bajo o alto movimiento del husillo.
- c) El valor de los esfuerzos que se originan por el área de los baffles se desconoce y por lo tanto no se consideran en este método.
- d) El uso de la ecuación de Margules como alternativa auxiliar en el desarrollo experimental fue de gran utilidad.

#### 4.4

### CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD EN FLUIDOS

#### NO NEWTONIANOS.

En esta parte del proceso de experimentación, la forma en como se calcula la viscosidad es totalmente diferente.

Esta diferencia marca el comportamiento de los fluidos. Como se dijo en el capítulo uno, el comportamiento de los fluidos Newtonianos es diferente al de los no Newtonianos. Esto motivó a buscar una forma por medio de la cual se pudiese hacer uso del viscosímetro con el cual se hizo en un principio la experimentación.

Como inicio y repasando lo que anteriormente se explicó, se recordará que el viscosímetro de Stormer no da la lectura directa de la viscosidad, a diferencia quizá de otros viscosímetros que existen en el mercado. Esto puede significar una desventaja en el desarrollo experimental.

debido a que si bien se propusieron métodos con los cuales se pueda encontrar la viscosidad de fluidos Newtonianos estos en ningún momento pueden ser usados para el cálculo de fluidos no Newtonianos. Esto por la simple razón que todos los fluidos que se usaron en el desarrollo experimental para fluidos Newtonianos cubren solo la característica de estos últimos.

Ahora, aun cuando el viscosímetro tenga algunas limitantes, la mas importante y la que en un momento dado interviene de manera directa es el conocer la viscosidad. Variable que ocupa la importancia directa de este método.

Ahora, si se recuerda la ecuación que describe el perfil de viscosidades para fluidos no Newtonianos ( ec. 3.4.15)

$$\mu (r) = \frac{G ((1/k^2) - (1/R^2)) \cdot n (1 - (kR/R))^{2n} (r/kR)^{2n-2}}{4 \pi \Omega (1 - (kR/k)^2)} \dots\dots\dots 3.4.15$$

se puede observar que existen dos variables que no se pueden conocer de forma directa. Estas son: ( "n" o índice de consistencia, y la posición radial "r" ) esta ultima puede reducir la expresión del perfil de viscosidades, debido a que se considero la viscosidad solo en la superficie del husillo. Por esta razón el valor de la posición radial ( r ) adquiere el valor de el radio externo del husillo ( kR ). Así la expresión puede ser reducida a:

$$\mu (r) = \frac{G ((1/kR^2) - (1/R^2)) \cdot n (1 - (kR/R))^{2n} 1}{4 \pi \Omega (1 - (kR/R)^2)} \dots\dots\dots 3.4.15$$

La expresión anterior solo determina la viscosidad que se presenta en la superficie del husillo.

Con esto, la única variable que presenta dificultad para su cálculo es n o el índice de consistencia, el cual depende de la viscosidad. Está variable puede ser calculada experimentalmente, o bien puede encontrarse registrada en la bibliografía ( 3 ).

En esta tesis se optó por ser calculada experimentalmente. El proceso de experimentación se realizo con el viscosímetro de Brookfield ( esquema 3.2.2 ).

Las características de este viscosímetro son:

- a) Motor sincrono ( proporciona una velocidad constante y con esto, una deformación constante )
- c) La viscosidad es dato que se obtiene de la lectura directa del viscosímetro.

Los cálculos de obtención para conocer la viscosidad, así como el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad que de estos se derivan son totalmente distintos a los propuestos anteriormente.

Cabe señalar que el valor de la velocidad de deformación en este viscosímetro está relacionado con los factores geométricos y la velocidad angular. Para fluidos no Newtonianos , además de lo anterior, las propiedades de deformación del fluido son importantes en la determinación de el gradiente de velocidad (  $\gamma$  ).

Tomando como referencia la practica propuesta en el laboratorio de Ingeniería ( 5 ) y a fin de reducir la limitante que presenta el viscosímetro de Brookfield, se seleccionó un modelo que permite reducir el margen de error que presenta este aparato.

Los cálculos que se presentan a continuación sólo son utilizados para procesar la información que se obtiene del viscosímetro de Brookfield:

Con el dato de la viscosidad aparente obtenido directamente de la lectura del aparato y la siguiente ecuación se despeja el torque T :

$$\eta = \frac{T L}{\pi R_b^4 \Omega} \dots\dots\dots 4.2.1.$$

El esfuerzo cortante se define como:

$$\tau = \frac{T}{2 \pi R_b^3} \dots\dots\dots 4.2.2.$$

El gradiente de velocidad se define como:

$$\gamma = \frac{R_b \Omega}{2 L} \dots\dots\dots 4.2.3.$$

Donde:

$\eta$  es la viscosidad aparente ( este dato es obtenido directamente del viscosímetro de Brookfield )

T torque este dato se obtiene al despejar la variable ( T ) de la ecuación 4.2.1.



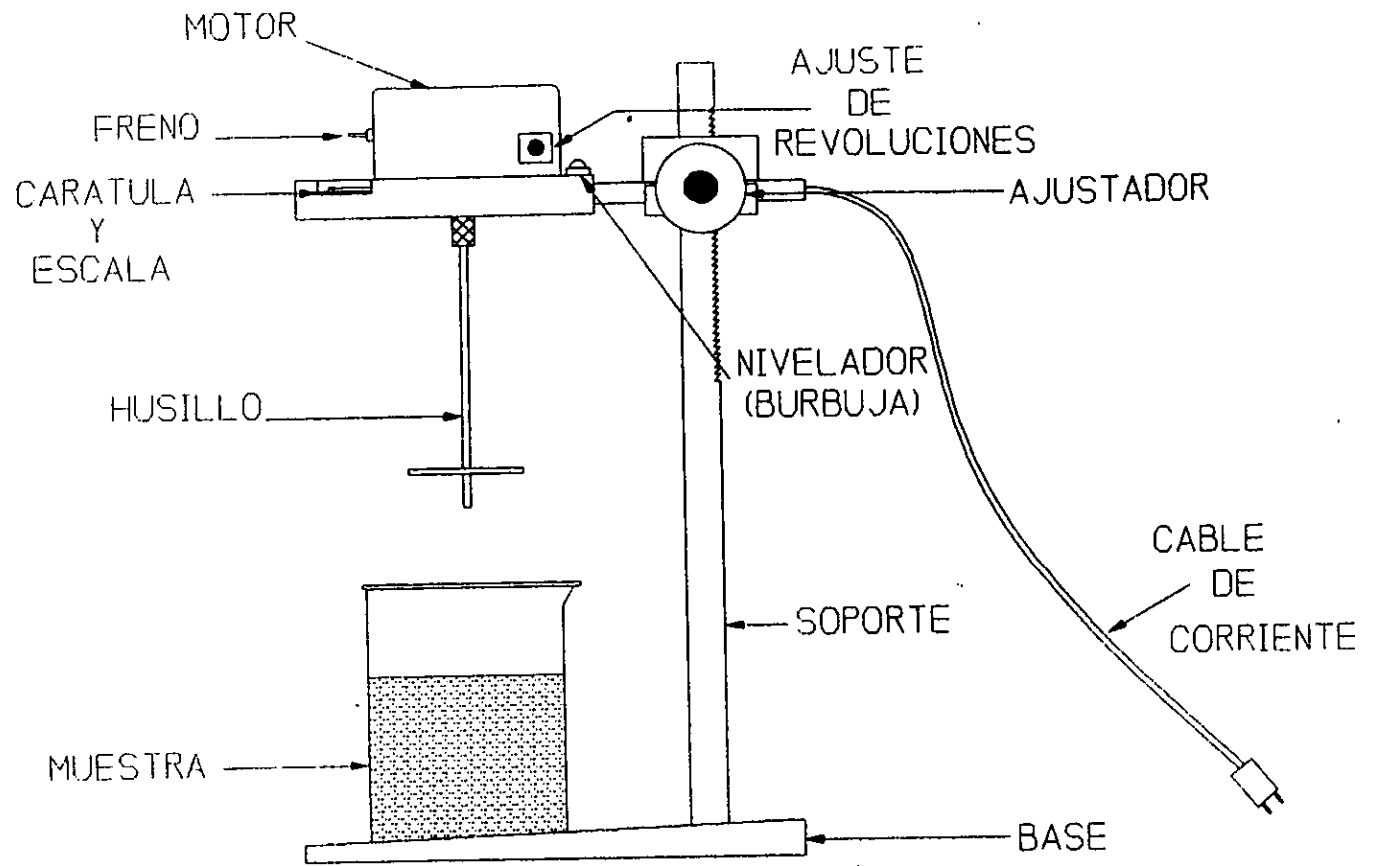


DIAGRAMA 3.2.2

VISCOSIMETRO DE BROOKFIELD.

ESQUEMA 4.4.3

Tabla de medidas y diámetros de los husillos del viscosímetro de Brookfield.

dimensiones	Número de husillo					
	1	2	3	4	5	6
L1	3.45	2.53	2.5	2.41	2.36	2.1
L2	2.82	2.53	2.5	2.55	2.63	2.92
D	5.62	4.71	3.48	2.75	2.12	1.46
r	2.81	2.35	1.74	1.37	1.06	0.73
h	2.22	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117
Lt	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5

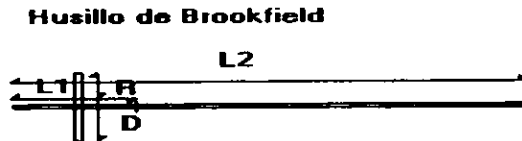
Los longitudes se muestran según la figura que se presenta en esta misma tabla.  
Las longitudes estan en centímetros.

$R_b$  es el radio del husillo ( fig. 4.4.4. )

$L$  es la longitud total del husillo.( fig. 4.4.4. )

$\gamma$  gradiente de velocidad.

$\tau$  esfuerzo cortante.



Las longitudes, así como los radios de los diferentes husillos se muestran en el esquema 4.4.3.

Una vez que se conoce como calcular los valores del esfuerzo cortante  $\tau$  y el gradiente de velocidad  $\gamma$  ( ec. 4.4.3 y 4.4.2 ) el siguiente paso es suponer que los fluidos se comportan según la ley de la potencia. esto es:

$$\tau = K \gamma^n$$

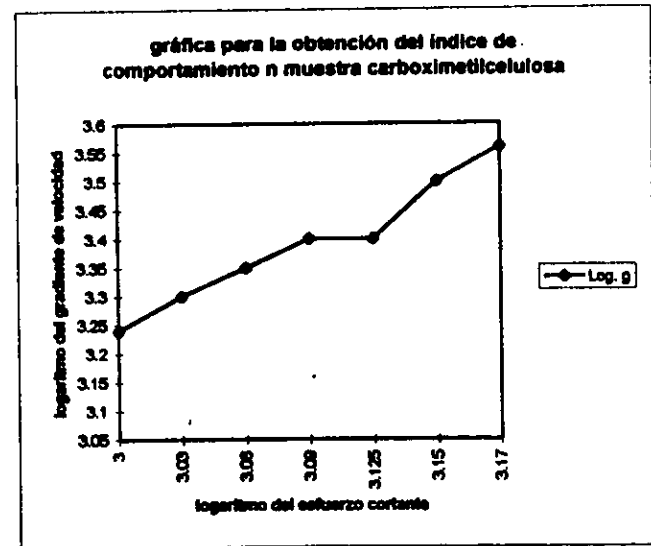
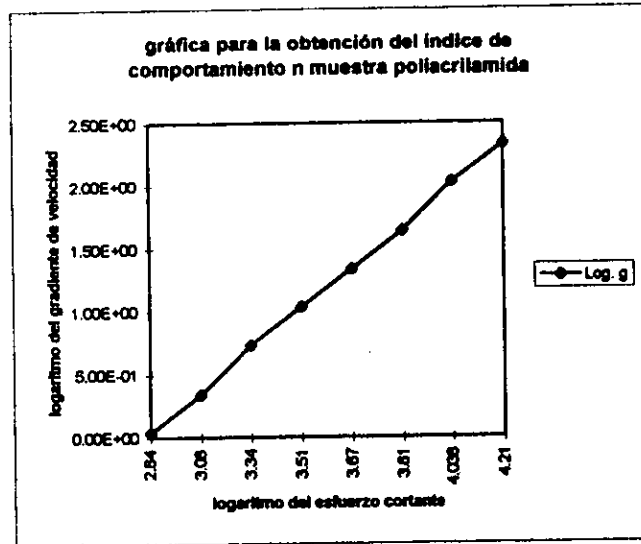
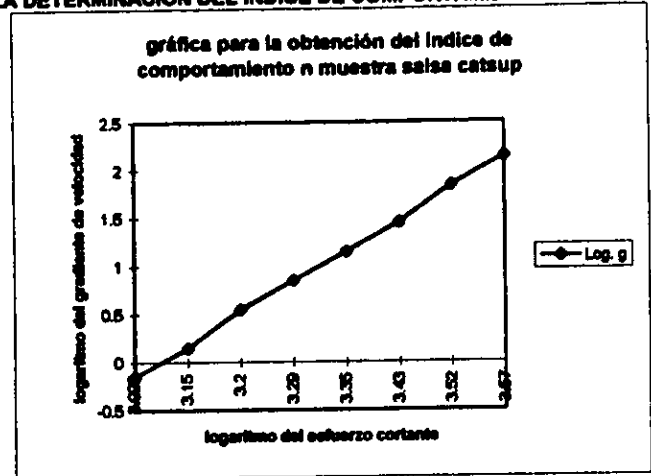
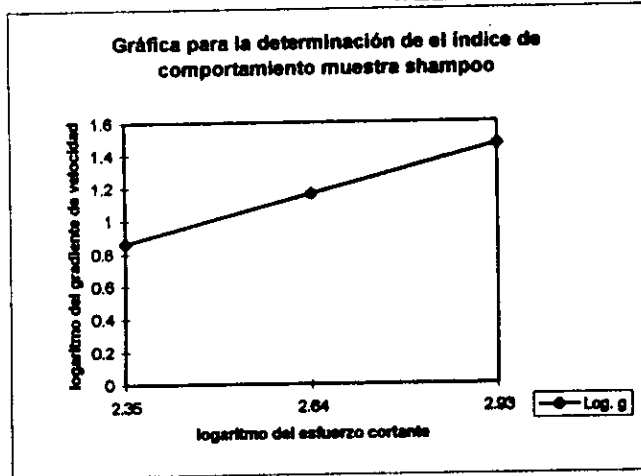
Para poder conocer el índice de consistencia (  $n$  ) se aplicara logaritmo base diez. Así

$$\log \tau = K + n \log \gamma$$

Si se observa la ecuación anterior se podrá observar, que representa la ecuación de una línea recta, por lo tanto si se elabora una gráfica de el logaritmo de el gradiente de velocidad vs. el logaritmo de el esfuerzo cortante se obtendrá una gráfica de una línea, en donde si se realiza un análisis de regresión lineal se podrá conocer la variable  $n$  o índice de consistencia.

Los fluidos que fueron sometidos a experimentación fueron:

TABLA 4.4.1 GRÁFICAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO



Salsa catsup ( Clemente Yack's ).

Shampoo ( maraca Libre ).

Carboximetil celulosa. ( 20 % en peso ).

Poliacril amida ( 20 % en peso ).

La temperatura de experimentación fue de 20 °C.

Las gráficas de cada fluido, así como los resultados de la regresión lineal se presentan en la tabla 4.4.1.

Un ejemplo de como fueron organizados los datos se muestran en la siguiente tabla:

Obtencion del indice de la potencia en el viscosímetro de Brookfield Temperatura = 20 °C Muestra: Shampoo								
R.P.M	VEL.ANG.	VISC.	VISC.	Tor.	$\tau$	$\gamma$	Log.	Log.
(r.p.m.)	( 2 pi.rpm )	(C.p.)	(g/cm.s.)	gcm2/s2	g/cm2	1/s	$\tau$	$\gamma$
2.5	15.7	3.09E+03	30.9	18372.1	225.3	7.29	2.35	0.862
5	31.41	3.04E+03	30.4	36181.15	443.46	14.58	2.64	1.163
10	62.83	2.98E+03	29.8	70906.18	869.56	29.17	2.93	1.464

Realizando el analisis de regresion lineal tomando el log. Tao vs. Log. Gamma obtenemos:  
a = 1.5195 b = 0.9634 r = 1 Asi: n = 0.9634

- 1) Las revoluciones por minuto. Son determinadas por el mismo viscosímetro.
- 2) La velocidad angular que se calcula según la ecuación  $2 \pi \cdot ( r.p.m )$ .
- 3) lectura del viscosímetro ( directa ).
- 4) Viscosidad expresada en g/cm s.
- 5) Cálculo del torque según ecuación 4.2.1
- 6) calculo del esfuerzo cortante (  $\tau$  ) según la ecuación 4.2.2.
- 7) calculo del gradiente de velocidad (  $\gamma$  ) según la ecuación 4.2.3.
- 8) logaritmo de el esfuerzo cortante.
- 9) logaritmo de el gradiente de velocidad.

Análisis de resultados para la obtención de el índice de Comportamiento (n) en el viscosímetro de BROOKFIELD. **TABLA 4.4.1**

Obtención del índice de la potencia en el viscosímetro de Brookfield Temperatura = 20 °C								
Muestra: Shampoo								
R.P.M	VEL.ANG.	VISC.	VISC.	Tor.	$\tau$	$\gamma$	Log.	Log.
(r.p.m.)	( 2 pi.rpm )	(C.p.)	(g/cm.s.)	(gcm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> .)	g/cm <sup>2</sup>	1/s.	$\tau$	$\gamma$
2.5	15.7	3.09E+03	30.9	18372.1	225.3	7.29	2.35	0.862
5	31.41	3.04E+03	30.4	36161.15	443.46	14.58	2.64	1.163
10	62.83	2.98E+03	29.8	70906.18	869.56	29.17	2.93	1.464

Realizando el análisis de regresión lineal tomando el log. Tao vs. Log. Gamma se tiene:  
**a = 1.5195 b = 0.9634 r = 1 Asi: n = 0.9634**

Obtención del índice de la potencia en el viscosímetro de Brookfield Temperatura = 20 °C								
Muestra: Catsup.								
R.P.M	VEL.ANG.	VISC.	VISC.	Tor.	$\tau$	$\gamma$	Log.	Log.
(r.p.m.)	( 2 pi.rpm )	(C.p.)	(g/cm.s.)	(gcm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> .)	g/cm <sup>2</sup>	1/s.	$\tau$	$\gamma$
0.5	3.1415	1.93E+05	1930	9393.5	1255	0.7055	3.098	-0.151
1	6.28	1.11E+05	1110	10799.8	1443	1.4103	3.15	0.149
2.5	15.7	4.96E+04	496	12064.64	1612	3.525	3.2	0.546
5	31.41	3.00E+04	300	14599	1951	7.053	3.29	0.848
10	62.83	1.76E+04	176	17132	2290	14.11	3.35	1.149
20	125.66	1.04E+04	104	20247	2706	28.22	3.43	1.45
50	314.15	5.12E+03	51.2	24920	3330	70.55	3.52	1.84
100	628.31	2.91E+03	29.1	28327	3786	141.1	3.57	2.14

Realizando el análisis de regresión lineal tomando el log. Tao vs. Log. Gamma se tiene:  
**a = 3.115 b = 0.212 r = 0.9958 Asi: n = 0.212**

Análisis de resultados para la obtención de el índice de comportamiento (n) en el viscosímetro de BROOKFIELD. TABLA 4.4.1

Obtención del índice de la potencia en el viscosímetro de Brookfield Temperatura = 20 °C Muestra: Poliacrilamida.

R.P.M (r.p.m.)	VEL.ANG. ( 2 pi.rpm )	VISC. (C.p.)	VISC. (g/cm.s.)	Tor. (gcm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> .)	τ g/cm <sup>2</sup>	γ 1/s.	Log. τ	Log. γ
0.5	3.1415	6.40E+03	640	23159.9	699.6	1.093	2.84	3.86E-02
1	6.28	5.50E+03	550	39804.9	1202.56	2.186	3.08	0.339
2.5	15.7	4.04E+03	404	73093.9	2208.27	5.46	3.34	0.7371
5	31.41	3.00E+04	300	108541.5	3279.2	10.93	3.51	1.038
10	62.83	2.15E+03	215	155600.99	4700	21.86	3.67	1339
20	125.66	1.50E+03	150	217117.67	6559.45	43.72	3.81	1.64
50	314.15	1.00E+03	100	361862.78	10932.42	109.32	4.038	2.03
100	628.31	7.47E+02	74.7	540631.6	16333	218.6	4.21	2.33

Realizando el análisis de regresión lineal tomando el log. Tao vs. Log. Gamma se tiene:  
 $a = 2.87$   $b = 0.57$   $r = 0.997$  Asi:  $n = 0.57$

Obtención del índice de comportamiento en el viscosímetro de Brookfield Temperatura = 20 °C Muestra: Carboximetilcelulosa.

R.P.M (r.p.m.)	VEL.ANG. ( 2 pi.rpm )	VISC. (C.p.)	VISC. (g/cm.s.)	Tor. (gcm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> .)	τ g/cm <sup>2</sup>	γ 1/s.	Log. τ	Log. γ
1	6.28	1.72E+03	550	39804.9	1000	1744.3	3	3.24
2.5	15.7	1.16E+03	404	73093.9	1083.8	2017.7	3.03	3.3
5	31.41	9.00E+04	300	108541.5	1167.2	2287.8	3.06	3.35
10	62.83	6.81E+04	215	155600.99	1250.5	2537.2	3.09	3.4
20	125.66	5.46E+04	150	217117.67	1333.9	2907	3.125	3.4
50	314.15	3.58E+04	100	361862.78	1417.3	3244.7	3.15	3.5
100	628.31	2.50E+04	74.7	540631.6	1500.6	3670	3.17	3.56

Realizando el análisis de regresión lineal tomando el log. Tao vs. Log. Gamma se tiene:  
 $a = 2.87$   $b = 0.57$   $r = 0.997$  Asi:  $n = 0.539$

las unidades de los valores obtenidos son absolutos. Los resultados obtenidos de la experimentación se muestran en la tabla 4.4.1.

Una vez que se ha logrado el propósito de encontrar el índice de consistencia para los fluidos anteriormente propuestos. El siguiente paso es entonces, hacer uso de la ecuación propuesta para encontrar la viscosidad de fluidos no Newtonianos en el viscosímetro de Stormer. Desafortunadamente para propósitos de comparación en esta tesis solo se hizo uso de este método, pues solo se encontró esta propuesta en la bibliografía.

Los datos reportados de esta parte experimental se muestran en la tabla 4.4.2. Los fluidos de experimentación fueron

Salsa catsup ( Clemente Yack's ).

Shampoo ( marca Libre ).

Carboximetil celulosa. ( 20 % en peso ).

Poliacril amida ( 20 % en peso ).

La temperatura de experimentación fue de 20 °C.

Ecuación 3.4.15.

$$\mu (r) = \frac{G \left( \left( \frac{1}{kR^2} \right) - \left( \frac{1}{R^2} \right) \right) \cdot \eta \left( 1 - \left( \frac{kR}{R} \right) \right)^{2m} 1}{4 \pi \Omega \quad 1 - \left( \frac{kR}{R} \right)^2}$$

Donde :

G = La fuerza que determina el movimiento del husillo ,entre la altura del husillo ( en este caso la fuerza es igual al peso )

kR = Radio externo del husillo en cm.

R = Es el radio interno del husillo cm.

$\Omega$  = Velocidad angular.



Durante el cálculo de viscosidades, debe recordarse el multiplicar por el factor gravitacional en las unidades correspondientes, para obtener la viscosidad.

También debe recordarse que para saber el tipo de fluido no Newtoniano que se está manejando debe realizarse un reograma o gráfica de comportamiento en donde se muestra el gradiente de velocidad ( Ec. 3.1.20 ) vs. esfuerzo cortante ( Ec. 3.1.22 )

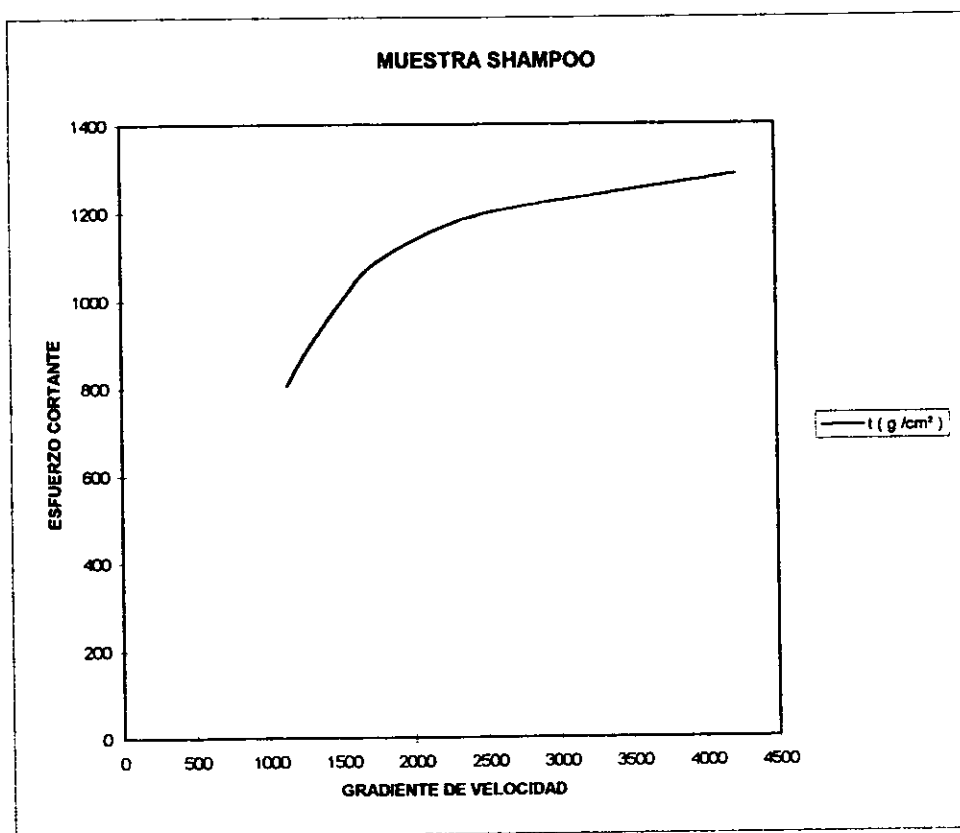
Procedimiento experimental para evaluar la viscosidad.

Para calcular la viscosidad de un fluido no Newtoniano el procedimiento es el siguiente:

- a) se vierte la muestra en el contenedor .
  - b) se pone el fluido térmico en el recipiente y se coloca el contenedor.
  - c) se sube la base y se seleccionan los pesos de experimentación.
  - d) se calcula el índice de consistencia según el proceso antes descrito.
  - e) se calcula la viscosidad según la ecuación ( 3.14.15 )
  - f) cálculo del esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad ( Ec. 3.1.20 y 3.1.22 ).
- Un ejemplo de como se organizan los datos se muestra a continuación:

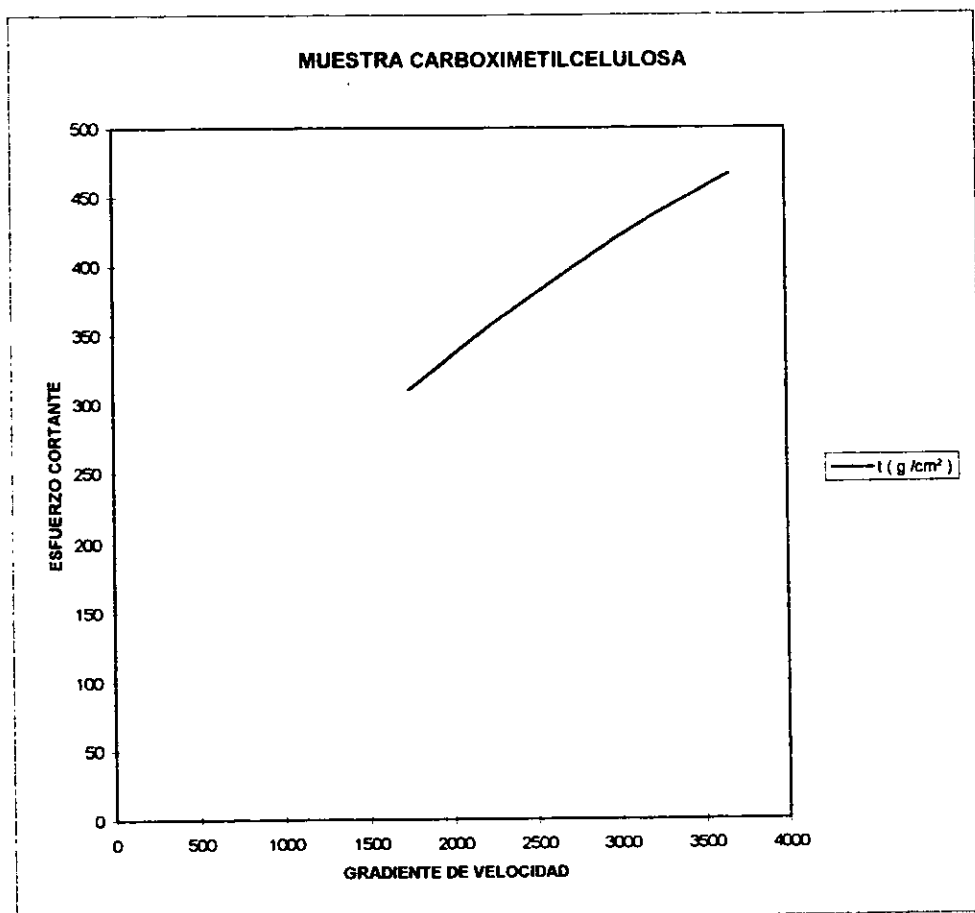
**TABLA 4.4.2**

DETERMINACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS.						
TEMPERATURA DE OPERACIÓN = 20 °C			SAHMPPOO		n = 0.963	
PESO (g.)	TIEMPO (s.)	R.P.M	Vel. Ang.	VISC.CALC (cp.)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	$\tau$ (g/cm <sup>2</sup> )
200	123	48.78	306.4	0.709	1134.15	804.11
220	110	54.54	342.6	0.697	1268.14	883.89
250	89	67.47	423.9	0.641	1529.08	1005.7
270	80	75	471.2	0.622	1744.1	1084.8
290	63	95.2	598.1	0.527	2213.8	1166.7
300	53	113.2	711.2	0.458	2632.5	1205.7
320	33	181.81	1142.3	0.304	4228.2	1285.39



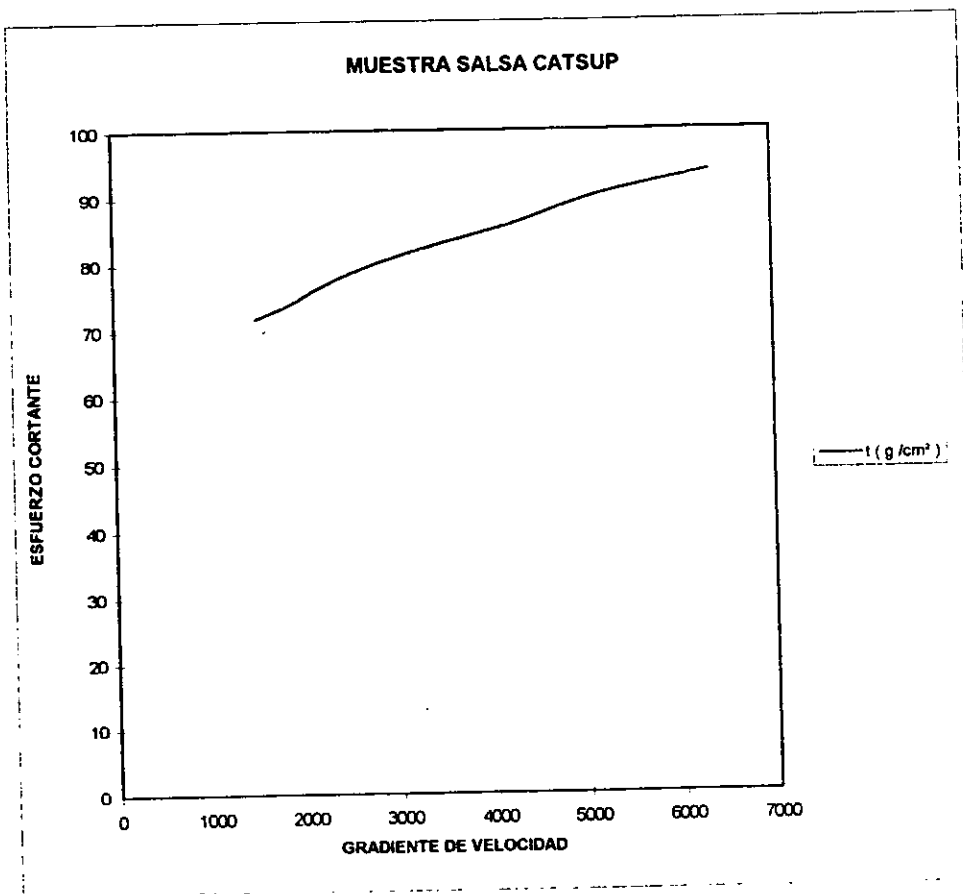
**TABLA 4.4.2**

DETERMINACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS.						
TEMPERATURA DE OPERACIÓN = 20 °C				CARBOXIMETILCELULOSA		
n = 0.539						
PESO (g.)	TIEMPO (s.)	R.P.M	Vel Ang.	VISC.CALC (cp.)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	$\tau$ (g/cm <sup>2</sup> )
240	80	75	471.2	0.178	1744.16	310.4
260	69	86.75	545.06	0.167	2017.5	336.9
280	61	98.36	618.01	0.158	2287.5	361.4
320	48	125	785.3	0.142	2906.8	412.7
340	43	139.5	876.5	0.135	3244.39	437.9
360	38	157.8	991.4	0.127	3669.7	466.05



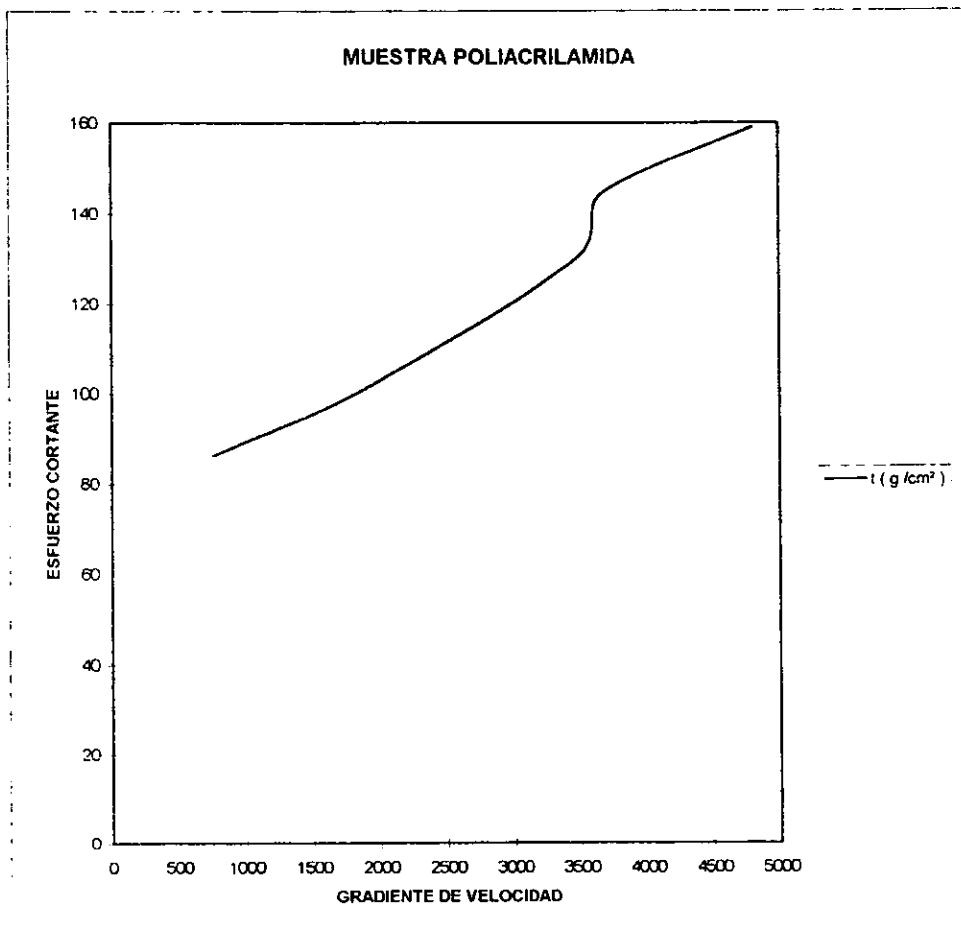
**TABLA 4.4.2**

DETERMINACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS.						
TEMPERATURA DE OPERACIÓN = 20 °C			SALSA CATSUP		n = 0.212	
PESO (g.)	TIEMPO (s.)	R.P.M	Vel. Ang.	VISC.CALC (cp.)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	$\tau$ (g/cm <sup>2</sup> )
350	93	64.51	405.3	0.0478	1500.2	71.71
360	75	79.99	502.02	0.0397	1858.2	73.77
380	58	103.4	649.6	0.0324	2404.5	77.9
400	43	139.5	876.5	0.0253	3244.3	82.08
420	33	181.81	1142.3	0.0203	4228.26	85.83
440	27	222.22	1392.2	0.0175	5153.28	90.18
460	20	272.72	1713.5	0.0148	6342.58	93.87



**TABLA 4.4.2**

DETERMINACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS.						POLIACRILAMIDA	
TEMPERATURA DE OPERACIÓN = 20 °C						n = 0.570	
PESO ( g. )	TIEMPO ( s. )	R.P.M	Vel. Ang.	VISC.CALC ( cp. )	$\dot{\gamma}$ ( 1/s )	$\tau$ ( g /cm <sup>2</sup> )	
60	183	32.78	205.9	0.113	762.1	86.12	
70	73	82.19	516.4	0.053	1911.4	101.3	
90	40	150	942.4	0.0373	3488.32	130.11	
100	38	157.8	991.4	0.0394	3669.7	144.5	
110	29	206.8	1299.3	0.0331	4809.4	159.19	



Es por esta situación que las magnitudes tanto del esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad son diferentes dependiendo del viscosímetro en el que se realice la experimentación.

Los reogramas, así como los resultados de la experimentación de cada uno de estos fluidos se muestran en la tabla 4.4.2 de este capítulo.

### ***Interpretación de los resultados:***

Para poder evaluar los resultados se tendrán que observar cuidadosamente los reogramas que se obtuvieron en la experimentación, y a partir de estos establecer las conclusiones.

Como primer punto se debe tratar de predecir que tipo de fluido representa cada uno de los reogramas, así y recordando el primer capítulo de esta tesis se podrá concluir que:

- a) La salsa Catsup, presenta un comportamiento de tipo Bingham o viscoplastico.
- b) Carboximetil celulosa, Poliacrilamida y Samphoo Presentan un comportamiento de tipo Pseudoplastico.

Una vez identificados los fluidos con los que se experimento, el siguiente paso será discutir tanto el proceso de experimentación como los resultados obtenidos.

El viscosímetro de Stormer es un aparato cuya característica no es precisamente identificar las deformaciones bajas en el fluido. Esto se puede ver en los reogramas obtenidos, pues a bajos movimientos del husillo la deformación no se aprecia, y a altos movimientos de este, se presenta una importante alteración en el comportamiento del fluido.

Bajo los preceptos anteriores se puede entonces determinar, que fluidos como la salsa Catsup, con este viscosímetro no se pueden conocer sus esfuerzos de cedencia

( este se conoce observando el comportamiento del fluido hacia las absisas del reograma ). Ya que seria incierto el tratar de intentar conocerlos.

Algo similar pasa con los demás fluidos con los que se experimento, que aunque no se sabe si presentan esfuerzo de sedencia, tampoco se puede pensar si existe este.

Puede decirse que la misma situación se presenta cuando el fluido se deforma en exceso. Aunque en el reograma se puede localizar fácilmente esta situación. Después de este efecto son inciertos los comportamientos del fluido o las suposiciones que se puedan hacerse de este.

Otra de las limitantes que presenta el método de experimentación en si, es el que no se pueda comparar experimentalmente con otro método diferente al propuesto. Esto se debe en primer lugar a la poca información que existe sobre este viscosímetro y su uso para obtener este tipo de viscosidades. Por otro lado si se tratan de comparar estos resultados mediante el uso de otro viscosímetro. La limitante será la geometría de este, ya que por esta razón las magnitudes de los esfuerzos cortantes y los gradientes de velocidad serán totalmente distintos y no así su comportamiento. Pues este sigue siendo el mismo.

Bajo las conclusiones anteriores se puede decir que el viscosímetro de Stormer tiene una serie de limitantes, mismas que arrojan unos resultados en la experimentación que pueden ser inciertos por no poderse comprobar, así pues se sugiere realizar correcciones a esté método en un estudio posterior a esta tesis.

## PRACTICA PROPUESTA.

### “ Determinación de la viscosidad para fluidos Newtonianos en un viscosímetro de cilindros concéntricos ( Stormer ). ”

Objetivo académico:

Que el alumno determine el efecto que originan las áreas ajenas a la evaluación de la viscosidad por medio de la deformación de un fluido en un viscosímetro de tubos concéntricos ( viscosímetro de Stormer )

Objetivo de la practica:

Evalúe la viscosidad del Ciclohexanol a 20°C, por medio de los tres métodos propuestos en esta practica, en el viscosímetro de tubos concéntricos ( Stormer ), y determine el porcentaje de error en cada una de los casos

#### Método de la ecuación de Margules

Para empezar con este método se deberá partir de una definición que es importante. El torque, ya que es este el que da una forma determinada a el proceso del funcionamiento de este viscosímetro.

Torque:

Desde el punto de vista físico, es la acción de un par de fuerzas sobre un punto a una distancia dada, este se puede representar por la siguiente ecuación:

$$\zeta = \tau_r \cdot 2 \pi R \cdot L \dots\dots\dots 1.1$$

Donde:

$\zeta$  = Torque. ( producto de la fuerza por distancia. )

$\tau_r$  = Esfuerzo cortante. ( fuerza entre área. )

R = Radio del husillo externo. ( cm. )



L = Longitud del husillo.

Ahora si consideramos la ley de Newton para evaluar la viscosidad veremos que:

$$\tau_r = \eta \gamma \dots\dots\dots 1.2$$

Donde:

$$\tau_r = \text{Esfuerzo cortante ( g. / cm. ) .}$$

$$\eta = \text{Viscosidad ( g. cm / s. ) .}$$

$$\gamma = \text{Gradiente de velocidad ( 1 / s. ) .}$$

El gradiente se determina en coordenadas cilíndricas como:

$$\gamma = 2 \Omega \left( \frac{1}{1-k^2} \right)$$

Si se toma la viscosidad de la ecuación de Newton y despejando el esfuerzo cortante de la ecuación que determina el torque, y considerando el gradiente de velocidad tenemos:

$$\eta = \frac{\tau_r}{\gamma} = \left( \frac{\zeta}{4 \pi \Omega L} \right) \left( \frac{R^2 - R'^2}{R'R'} \right) \dots\dots\dots 1.3$$

Reagrupando tenemos:

$$\eta = \left( \frac{R^2 - R'^2}{4 \pi L R'R'} \right) \times \frac{\zeta}{\Omega} \dots\dots\dots 1.4$$

donde  $R_e$  es el radio externo del husillo y  $R_i$  es el radio interno del contenedor. El término  $\left( \frac{R^2 - R'^2}{4 \pi L R'R'} \right)$  se conoce como la constante del viscosímetro ( K ) .

$$\eta = \frac{K \times \zeta}{\Omega} \dots\dots\dots 1.5.$$

Donde:

$$K = \text{cm.}$$

$$\zeta = \text{g.}$$

$$\Omega = \text{s.}$$

Así pues el torque según la ecuación de Margules se puede definir como:

$$\zeta = (\eta/k) \Omega \dots\dots\dots 1.6.$$

Donde:

$k$  = cte. del aparato ( se obtiene de las medidas físicas del aparato ).

$\zeta$  = Torque.

$\Omega$  = velocidad angular.

Es importante considerar el torque, debido a que la longitud del punto donde se aplica el peso que origina el movimiento del husillo y el accionador del viscosímetro son muy cortos, por lo tanto esta longitud se puede despreciar.

Así en este aparato el torque es equivalente a el peso que acciona el movimiento del husillo. ( Fig. 3.1.1 ).

La velocidad angular se calcula según la ecuación propuesta en el manual del viscosímetro:

$$\text{R.P.M.} = \left( \frac{100}{\text{tiempo en seg. por cada 100 revoluciones}} \right) \times 60 \dots\dots\dots 1.7$$

El tiempo en segundos se determina como el tiempo que tarda en dar una vuelta completa el contador de revoluciones.

Para poder obtener la velocidad angular (  $\Omega$  ) se deben multiplicar las revoluciones por minuto por  $2 \pi$ .

Para evaluar la viscosidad deberá hacer uso de un fluido propuesto:

- Ciclohexanol.

**Lista de material.**

Viscosímetro de Stormer.

Ciclohexanol al 100 %.

Termostato o controlador de temperatura.

Lote de pesos.

**Procedimiento experimental.**

- a) Quite el seguro del contenedor y baje el soporte del mismo hasta la base del viscosímetro.
- b) Ponga agua en el baño María, este se encuentra rodeando el contenedor, el agua deberá llegar a tres cuartas partes del contenedor.
- c) Saque el contenedor y vierta el fluido problema.
- d) Coloque el husillo en la guarda del contenedor. y regule la temperatura de experimentación con la resistencia (  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ).
- e) coloque la polea del viscosímetro de tal forma que el hilo que sujeta el peso de acción lo deje caer libremente ( fig. 3.1.1 ).
- f) Gire el accionador en contra de las manecillas del reloj. Asegúrese que el indicador del contador este en cero, ya que el peso de acción este sujeto; Ponga el seguro del accionador ( este no permite el movimiento del husillo ).
- g) Suba la base del contenedor hasta el tope.
- h) Se propone empiece con un peso de acción de dos gramos, suelte el seguro del accionador y cuente el tiempo en segundos en que el contador tarda en dar 100 revoluciones. Repita esta operación tomando los siguientes pesos de experimentación 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 6, 8, 10, 12, y 14 g. Calcule las revoluciones por minuto para el fluido. En seguida calcule la viscosidad del fluido. La viscosidad será el promedio de las lecturas que resulten de la experimentación de la muestra.

Organice sus datos en la siguiente tabla:

peso. ( g. )	R.P.M.	Velocidad angular (s.)	viscosidad. ( gcm /s)

### CUESTIONARIO.

- Realice una gráfica de las R.P.M. vs peso ( g. ) y otra de viscosidad Vs. peso en ( g. ) de la muestra.
- **De la gráfica de viscosidad Vs. Peso. ( g. )**
  - 1.- Concluya sobre el comportamiento de la viscosidad de 2 a 4 g.
  - 2.- Bajo el mismo criterio concluya sobre el comportamiento de la viscosidad en el intervalo de 4 a 14 g.
  - 3.- Que pasa en el ultimo intervalo de esta gráfica.
  - 4.- Según la teoría de los fluidos Newtonianos. ¿ Cree usted que la viscosidad se comporta según esta teoría en el primer intervalo. ?
  - 5.- Siguiendo el mismo criterio. Opine sobre el segundo intervalo ?
  - 6.- Concluya sobre el tercer intervalo ?
- **De la gráfica de R.P.M. Vs. peso.**
  - 7.- Concluya sobre comportamiento de las R.P.M Vs. peso en el primer intervalo ( 2 a 4 g. )
  - 8.- Siguiendo la secuencia que concluye del intervalo de 4 a 14 g.
  - 9.- Qué pasa con las R.P.M después de 14 g.

10.- Puede esta gráfica determinar una zona de deformación homogénea del fluido

¿ Por qué?

11.- Calcule un media aritmética de las viscosidades en la zona donde el valor es constante ( gráfica de viscosidad Vs. Peso. ) y compare el resultado que obtuvo con el reportado en la bibliografía ¿ Son iguales ?.

12.- El método de Margules ¿ Realmente funciona para la determinación de viscosidades en este aparato ?

13.- Considerando la relación que determina el método de Margules Y tomando los aspectos físicos del viscosímetro. Concluya de la veracidad de la viscosidad que obtuvo por este método.

• **Método del factor de Fricción vs. Número de Reynolds.**

Este método basa su funcionamiento, en relación al factor de fricción y el Número de Reynolds. Fenómenos que se presentan en el caso particular del flujo de fluidos. Ahora, si observamos el husillo que se utiliza para deformar el fluido en el viscosímetro de Stormer ( Fig. 3.1.1 ), este presenta movimientos de tipo axial con respecto a un ducto. si de este razonamiento partimos, podremos entonces pensar en describir el factor de fricción como:

$$f = \frac{\tau_w}{0.5 \rho v^2} \dots\dots\dots 2.1$$
$$f = \frac{F/A}{0.5 \rho v^2} \dots\dots\dots 2.1$$

Donde:

$\tau_w$  = Esfuerzo cortante.

$\rho$  = densidad.

$v$  = velocidad del husillo.

$F$  = Fuerza o peso que hace girar al husillo

$A$  = Area externa del husillo.

Ahora, si tomamos la ecuación del esfuerzo cortante, que resulta de revisar el fenómeno bajo las condiciones que determinan las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en coordenadas cilíndricas que ocurren dentro del ducto, el esfuerzo cortante se puede definir como:

$$\tau_w = \frac{2}{gc} \mu \Omega \left( \frac{1}{1-K^2} \right) \dots\dots\dots 2.2$$

Donde:

$\mu$  = Viscosidad C.p.

$\Omega$  = Velocidad angular ( 1/min.)

$K$  = Relación de radios. ( Radio externo del husillo entre Radio interno del contenedor ).

Si la expresión del esfuerzo cortante se sustituye en la ecuación del factor de fricción tenemos como resultado:

$$f = \frac{2 \mu \Omega \left( \frac{1}{1-K^2} \right)}{0.5 \rho v^2} \dots\dots\dots 2.3$$

De la ecuación anterior se determina un factor de fricción que se presenta en cualquier parte del espacio que existe entre el husillo y el contenedor. Ahora si lo que nos interesa es conocer el fenómeno en la superficie del husillo. La velocidad ( v ) se debe definir como la velocidad angular por el radio externo del husillo (  $v = \Omega_1 KR$  ). Así tenemos:

$$f = 4 \mu \left( \frac{1}{1-K^2} \right) / \rho \Omega_1 (KR)^2 \dots\dots\dots 2.3.$$

Esta ecuación determina el factor de fricción manifestado sobre la pared del husillo.

De igual forma se puede entonces, hacer el mismo análisis para el número de Reynolds. Dado por:

$$Re = \frac{D v \rho}{\mu} \dots\dots\dots 2.4$$

Donde:

v = velocidad. ( 1 / min. )

D= diámetro ( cm )

$\rho$  = Densidad ( g / cm<sup>3</sup> )

$\mu$  = Viscosidad. ( c.p. )

Si la velocidad se toma en la superficie del husillo  $v = \Omega_1 KR$  y tomando de igual manera el diámetro del husillo como 2KR. Entonces:

$$Re = \frac{2 KR \times KR \Omega_1 \rho}{\mu} = \frac{2 (KR)^2 \Omega_1 \rho}{\mu} \dots\dots\dots 2.5.$$

Si se toma la ecuación 2.4 y se divide entre ocho, y una vez hecha esta operación, se toma el inverso se observará que el factor de fricción se puede expresar en función del número de Reynolds, así:

$$f = \left( \frac{8}{Re} \right) \times \left( \frac{1}{1-K^2} \right) \dots\dots\dots 2.6.$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

Esta ecuación nos permite determinar el factor de fricción sobre la pared del husillo.

Ahora que se cuenta con las ecuaciones básicas para desarrollar este método el siguiente paso es determinar como se evaluara la viscosidad.

#### **Lista de materiales.**

- |                                   |                               |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Viscosímetro Stormer.             | Glicerina al 100 %            |
| Densímetro.                       | Estuche con diferentes pesas. |
| Agua destilada                    | Regulador de temperatura.     |
| 4 Vasos de precipitado( 500 ml.). | Ciclohexanol.                 |

#### **Procedimiento experimental.**

##### **Elaboración de curva patrón.**

Para poder evaluar la viscosidad será necesario recurrir a un método gráfico que permita desarrollar un proceso para la determinación de esta.

Esta metodología la determina el uso y elaboración de una gráfica que en adelante llamaremos curva patrón.

Estas gráficas nos permitirán preparar un método indirecto para calcular la viscosidad de un fluido Newtoniano.

El proceso de elaboración es el siguiente:



Para la elaboración de estas curvas, se deberá preparar por equipo 400 ml de glicerina al 0, 20, 40, 60 y 80 % en peso de glicerina. Se recomienda a los equipos, preparen una solución cada uno y las intercambien. La temperatura de experimentación es de 20 °C. Los datos para conocer la viscosidad y la densidad a esta temperatura los puede consultar en la tabla que se anexa en esta práctica. (Tabla 2.1).

Vacíe sus resultados en las tablas que a continuación se proponen Siguiendo estas consideraciones:

Calcule las R.P.M para cada peso que se propone en las tablas, según la dilución que se trabaje (Ecuación 1.7). Con esto se podrá calcular la velocidad angular ( $R.P.M. \times 2 \times \pi$ )

Con este dato calculado y la densidad y viscosidad de la dilución a la temperatura de experimentación (datos obtenidos de la bibliografía tabla 2.1) Calcule el Número de Reynolds según la ecuación 2.5.

Con el dato del Número de Reynolds y la ecuación 2.6 puede calcular el factor de fricción tomando  $k$  como la relación de radios (radio externo del husillo / radio interno del contenedor.).

**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PATRÓN**  
 Método del Factor de Fricción Vs. Número de Reynolds

TABLA 2.1

T = 20 °C      0 % en peso de glicerina      Densidad = 0.99 g/cm <sup>3</sup> Viscosidad = 1.15 c.p.					
Pesos( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Velocidad Angular	f Factor fricción	Re. N. de Reynolds
1					
2					
3					
4					
5					

T = 20 °C      22 % en peso de glicerina      Densidad = 1.052 g/cm <sup>3</sup> Viscosidad = 1.831E-2 c.p.					
Pesos( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Velocidad Angular	f Factor fricción	Re. N. de Reynolds
4					
6					
8					
10					
12					
14					
16					
18					
20					

T = 20 °C      40% en peso de glicerina      Densidad = 1.099 g/cm <sup>3</sup> Viscosidad = 3.73E-2 c.p.					
Pesos( g. )	Tiempo ( s. )	R.P.M.	Velocidad Angular	f Factor fricción	Re. N. de Reynolds
4					
6					
8					
10					
12					
14					
16					
18					
20					
22					
24					
26					
28					
30					

**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PATRÓN**  
**Método del Factor de Fricción Vs. Número de Reynolds**  
**TABLA 2.1**

T = 20 °C      70% en peso de glicerina				Densidad = 1.1812 g/cm <sup>3</sup> Viscosidad = 0.2294 c.p.	
Pesos (g.)	Tiempo (s.)	R.P.M.	Velocidad Angular	f Factor fricción	Re. N. de Reynolds
10					
12					
14					
16					
18					
20					
22					
24					
26					
28					
30					
32					
34					
36					
38					
40					

Gráfiqúe en papel logarítmico el factor de fricción Vs. el número de Reynolds de cada dilución de glicerina que se propuso en las tablas. Trate de trazar una curva que pase por la mayoría de los puntos que gráfico. A esta la llamaremos curva patrón. Una vez que se han elaborado las curvas patrón el siguiente paso es darles uso, para calcular la viscosidad de un fluido Newtoniano.

Tome como problema Ciclohexanol, y realice la misma secuencia para calcular las revoluciones por minuto y el tiempo, considerando la temperatura de experimentación de 20 °C

**Evaluación de la viscosidad.**

Calcule el factor de Fricción a la temperatura de experimentación propuesta ( 20 °C. )

Como principio a la evaluación de la viscosidad, deberá observarse la ecuación para calcular el factor de Fricción ( Ec. 2.6 ). Esta depende del Número de Reynolds ( dato del fluido problema que no se conoce ). Por lo tanto, en esta parte del método deberá calcularse el factor de fricción por otro medio.

La manera de calcular el factor de fricción se determina de la siguiente forma:

Tomando la ecuación 2.1 como referencia:

$$f = \frac{\tau_0}{0.5 \rho \Omega^2} \dots\dots\dots 2.1$$

Donde la velocidad angular (  $\Omega$  ) se determina por la velocidad de el husillo según ecuación 1.7, la densidad es dato que se puede conocer de la bibliografía a la temperatura de experimentación. Así, la única variable mas importante en el desarrollo de esta parte es el esfuerzo cortante.

Para evaluarlo, se tomara en cuenta el comportamiento que manifiesta el esfuerzo cortante según la ecuación propuesta en el primer método ( Ec 1.1 ).

$$\tau_{\theta} = \frac{\zeta}{2 \pi R^2 L} \dots\dots\dots 1.1.$$

Donde:

L = Longitud del husillo.

$\zeta$  = torque o peso por el radio externo del husillo.

R = Radio externo del husillo.

Una vez que se ha calculado el esfuerzo cortante se puede hacer uso de la ecuación 2.1. Podrá calcular el factor de fricción y con este obtener una lectura del Número de Reynolds por medio de las curvas patrón. Con este dato, se puede obtener el valor de la viscosidad del fluido que no se conoce usando la ecuación 2.5.

Seleccione la curva patrón según la temperatura de experimentación ( 20 °C ) y localice el factor de fricción en las abscisas de la gráfica, trace una línea recta hasta llegar a la curva una vez que intercepta la curva trace una línea recta hacia las ordenadas de la gráfica, una vez que llegue a las ordenadas tome el valor del Número de Reynolds. Con este dato y la ecuación 2.5, podrá calcular la viscosidad.

Al igual que las curvas patrón existirán tantas viscosidades como pesos de acción sean utilizados durante la experimentación, por tal motivo, la viscosidad será el promedio de las viscosidades resultantes de cada muestra.

Organice sus resultados en la siguiente tabla.

**TABLA DE EVALUACIÓN DE VISCOSIDAD**  
**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS**

TEMPERATURA DE OPERACION 20 ° C						
MUESTRA PROBLEMA ( Ciclohexanol )						
DENS =0.962 gr/cm <sup>3</sup>						
PESO (g)	ESFUERZO	TIEMPO (s)	R. P. M	f	Re GRAF	VISC. CALC.
2						
4						
6						
8						
10						
12						
14						
16						
18						
20						
22						
					visc prom	

## CUESTIONARIO.

- 1.- En base a la conclusión que obtuvo en la interpretación de la gráfica de viscosidad vs. peso en el método de Margules. Concluya que relación existe entre los puntos que salen dispersos y los pesos que ocupó para generar estos puntos.
- 2.- Concluya si puede evitarse la dispersión de puntos, seleccionando solo los pesos donde la viscosidad es constante.
- 3.- Proponga una alternativa que permita evaluar la curva patrón de tal manera que evite la dispersión de puntos.
- 4.- Concluya si el valor del factor de Fricción que obtuvo mediante la ecuación 2.1. Esta dentro del rango que determinan los valores de los factores de Fricción de los fluidos que se usaron para elaborar la curva patrón.
- 5.- Si los valores que obtuvo no están dentro del rango establecido. ¿ A qué le atribuye esta diferencia. ?
- 6.- Tomando la relación del esfuerzo cortante, en ausencia del área de deformación, este se expresa como:  
$$\tau = m.g \text{ ( ahora con unidades de fuerza ) .}$$
Haga un único cálculo del factor de Fricción considerando el esfuerzo cortante dado por esta última ecuación.  
¿ El valor que obtuvo está dentro del rango que determinan los factores de Fricción con los que elaboró la curva patrón.?
- 7.- ¿ Qué aspecto físico del viscosímetro influye en sus cálculos ?
- 8.- Del cálculo que realizó del factor de Fricción ¿ Resulta este adimensional ?

9.- Concluya sobre la precisión del método para estimar la viscosidad del Ciclohexanol.

**MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS**  
**CORREGIDO**

Una vez que se ha determinado que el área es el factor que influye en el calculo de la viscosidad. Se implementará un nuevo método, cuya característica principal será establecer las relaciones que determinan tanto el factor de Fricción como el Número de Reynolds sin que estos tengan relación con el área de deformación del fluido.

Este método es producto de una corrección que es valida, solo si se toma en cuenta cierta condición que debe ser considerada y que en los dos métodos anteriores no se tomaron en cuenta. El caso concreto del área que forma parte del viscosímetro ( contenedor ) o bien los efectos secundarios que pueden presentarse en la experimentación a partir de estos.

Identificada esta entonces, se partirá por el factor de Fricción, el cual esta definido según el segundo método por la siguiente ecuación:

$$f_0 = \tau_w / 0.5 \rho \Omega' \dots\dots\dots 2.1$$

Si se despeja el Esfuerzo Cortante de la ecuación 2.1 propuesta en el primer método y la sustituimos en la ecuación 1.1, y considerando la velocidad en la superficie del husillo el factor de Fricción se puede definir como:

$$f = \frac{\zeta}{2 \pi R' L 0.5 \rho (\Omega R)'} \dots\dots\dots 3.1.$$



Reacomodando la ecuación anterior tenemos:

$$f = \frac{\zeta}{0.1963 D^2 L \rho \Omega^2} \dots\dots\dots 3.2.$$

En la ecuación anterior el término (0.1963 D<sup>2</sup> L) denota el efecto de área.

Si este se omite la ecuación anterior se puede escribir como

$$f' = \frac{\zeta}{\rho \Omega^2} \dots\dots\dots 3.3.$$

Donde:

$\zeta$  = Torque en g.

$\rho$  = Densidad.( g./ cm<sup>3</sup> )

$\Omega$  = Velocidad angular ( 1/ min. ).

Ahora existen varias consideraciones que deben de tomarse en cuenta.

Tanto el factor de Fricción como el Número de Reynolds son fenómenos que se manifiestan a través de todo un perfil, pero por razones de estudio y concretamente hablando del fenómeno que nos preocupa, sólo se consideraran los que ocurren sobre la superficie del husillo.

El efecto que se origina en el área adicional debido tanto a los baffles del contenedor como el área interna del husillo es desconocido, por lo tanto, los efectos posteriores también se desconocen.

Es por está razón, que el efecto del área ( tanto del husillo en el torque como el área adicional ) se puede eliminar de la ecuación 3.2.

Una vez realizada esta consideración, se originara un nuevo factor de Fricción corregido, en donde los efectos de área adicional no son tomados en cuenta.

Para el Número de Reynolds la ecuación resultante considerando la velocidad en el husillo se expresa como:

$$Re = \frac{D_i K_r \Omega \rho}{\mu} \dots\dots\dots 3.4.$$

El efecto de área que determina el diámetro interno del husillo (  $D_i$ ,  $K_r$  ) se elimina, pues al igual que en el factor de Fricción no se conocen los efectos finales debidos a el área implícita ( Baffles y área interna del husillo ), y tomando las mismas condiciones.

El Número de Reynolds nos queda como:

$$Re' = \frac{\Omega \rho}{\mu} \dots\dots\dots 3.5.$$

Este Número de Reynolds al igual que el factor de Fricción Corregido, cuenta con unidades.

**PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Para este método usted deberá hacer uso de los resultados que obtuvo en el método del factor de fricción Vs. Número de Reynolds. Para el método del factor de fricción Vs. Número de Reynolds corregidos las diluciones de Glicerina, el tiempo de cada dilucion así como sus pesos y R.P.M. son los mismos que se usaron en el método anterior, la temperatura de experimentación será de 20 °C. la primer modificación que en este caso se hará, al proceso de elaboración de la curva patrón será hacer una selección de pesos preliminar a la elaboración de esta.

**SELECCION DE PESOS ( USANDO EL MÉTODO DE MARGULES ).**

Realice una gráfica de peso o torque vs. R.P.M. de cada dilucion que se propuso en el método anterior.

Las gráficas que realice de cada dilucion presentaran tres zonas bien definidas. La primera parte de la curva que se ve, es la zona de bajo movimiento o laminar; La

segunda zona o se conoce como zona de deformación homogénea, y la tercera que se encuentra en la parte superior de la curva se conoce como de alta deformación o caótica

Cada zona se diferencia por el cambio de pendiente que se manifiesta en cada una de estas.

La zona de la gráfica que nos permite seleccionar los pesos ideales será aquella que determine una tendencia lineal que en este caso en concreto, nos referimos a la segunda zona.

una vez seleccionados los pesos, el siguiente paso será vaciar sus datos en la siguientes tablas ( tabla 3.1 ), recuerde que tanto los pesos, tiempos, R.P.M. y velocidades angulares son las mismas que en el método anterior. Calcule el factor de Fricción corregido con la ecuación 3.3 y el Número de Reynolds con la ecuación 3.5

Grafique en papel logaritmico el factor de fricción corregido Vs. el número de Reynolds corregido de cada dilucion de glicerina.

**TABLAS PARA ELABORACIÓN DE CURVAS PATRÓN**  
 Método del Factor de Fricción Vs. Número de Reynolds corregidos

TABLA 3.1

T = 20 °C      0 % en peso de glicerina				Densidad = 0.99 g/cm <sup>3</sup> Viscosidad = 1.15 c.p.	
Pesos (g.)	Tiempo (s.)	R.P.M.	Velocidad Angular	f Factor corregido	Re'. Reynolds corregido

T = 20 °C      22 % en peso de glicerina				Densidad = 1.052 g/cm <sup>3</sup> Viscosidad = 1.831E-2 c.p.	
Pesos (g.)	Tiempo (s.)	R.P.M.	Velocidad Angular	f Factor corregido	Re'. Reynolds corregido

T = 20 °C      40% en peso de glicerina				Densidad = 1.099 g/cm <sup>3</sup> Viscosidad = 3.73E-2 c.p.	
Pesos (g.)	Tiempo (s.)	R.P.M.	Velocidad Angular	f Factor corregido	Re'. Reynolds corregido



## PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA VISCOSIDAD.

Tome como problema Ciclohexanol.

En el fluido problema deberá seleccionar los pesos ideales, haciendo las gráficas de peso o torque Vs. R.P.M ( ec. 1.7 ). Los datos de la viscosidad y densidad los podrá obtener de la bibliografía según la temperatura ( 20 °C ) a la que se experimenta.

1) Calcular los factores de Fricción ( ec. 3.3 )

Con los factores de fricción ya calculados, el siguiente paso es usar la gráfica; la forma de uso es:

2) El valor obtenido se busca en las abscisas (  $f'$  ) de la gráfica, una vez que se encuentra se traza una línea recta hasta encontrar la curva.

3) Una vez que se interceptada la curva se traza una línea recta hacia las ordenadas de la gráfica.

4) Esta intersección nos dará un valor de Número de Reynolds.

5) con el valor del número de Reynolds y la ecuación 3.5 se calcula la viscosidad de el fluido en cuestión. el valor de la viscosidad será el promedio de las lecturas obtenidas.

Organice sus datos en la tabla ( Tabla 3.2 ).

TABLA MUESTRA PROLEMA  
 EVALUACIÓN DE LA VISCOSIDAD MÉTODO DEL FACTOR DE FRICCIÓN VS. NÚMERO DE REYNOLDS CORREGIDO.  
 TABLA 3.2

Cálculo del factor de fricción para una muestra problema CICLOHEXANOL. 20 °C. densidad= 0.962gr/cm <sup>3</sup>				
MASA. ( g. )	R.P.M	f' (cm <sup>2</sup> min <sup>2</sup> .)	Re' graf	VISCOSIDAD
2				
4				
6				
8				
10				
12				
14				
16				
18				
promedio ( g. / cm min )			=	
VISC. (cp.)			=	

## CUESTIONARIO.

- 1.- Compare el valor de la viscosidad que obtuvo con el reportado en la Bibliografía.
- 2.- Las relaciones que determinan tanto el factor de fricción como el número de Reynolds que se proponen en este método tienen unidades ¿ Cuáles son ?
- 3.- Si el número de Reynolds determina la relación que existe entre fuerza inercial y fuerza viscosa. Concluya si el número de Reynolds que se propone en este método, guarda esta relación.
- 4.- De la misma forma analicé el concepto para el factor de fricción.
- 5.- Qué tanta influencia tiene el área externa del husillo y el área interna del contenedor en el cálculo de la viscosidad por este método.
- 6.- Cúal es el valor de la viscosidad del Ciclohexanol reportado en bibliografía a  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y que porcentaje de desviación tiene con el que obtuvo experimentalmente



## CONCLUSIONES.

Un a vez que se ha analizado el uso de este viscosímetro se puede concluir que:

-aunque el diseño mecánico de este viscosímetro es sencillo en comparación a otros, éste puede arrojar muy buenos resultados.

-Al comparar los tres métodos propuestos en esta tesis, el mejor método para ser aplicado en cuestión del desarrollo experimental fue el que se propuso Factor de fricción Vs. Número de Reynolds corregido; debido a que los otros dos métodos propuestos, tienen las siguientes limitaciones.

a) En el método de Margules, aun cuando se puede obtener valores de viscosidad. Los resultados obtenidos se alejan mucho de los reportados en la bibliografía, esto se debe a que esta expresión en la forma que ha sido estructurada, contempla en una parte el área en donde el fluido se deforma.

b) El área está representada por una simple relación de radios: radio externo del husillo y radio interno del contenedor, ésta relación se conoce como constante del aparato, y en ningún momento totaliza el área que realmente interviene durante el proceso de experimentación: área interna del husillo y baffles del contenedor.

c) También es cierto que, en este método existe un intervalo en el cual se puede ver que la viscosidad se comporta según la teoría de los fluidos Newtonianos. Es aquí, donde este método puede ser realmente de gran utilidad, debido a que, si se realizan gráficas de revoluciones por minuto contra peso, se podrá observar un intervalo que muestra una tendencia de tipo lineal. Y que determina la zona en donde el fluido se deforma homogéneamente.

d) Así, aun cuando este método no funcione para calcular la viscosidad, bien podría servir como una alternativa para localizar la zona en donde el fluido es deformado homogéneamente.

- Para el segundo método o Factor de Fricción Vs. el número de Reynolds, aun cuando se hizo el análisis considerando las características del viscosímetro ( tubos concéntricos ) existieron varias limitantes:

a) El factor principal, para delimitar los cálculos de la viscosidad, fue el área.

b) Las relaciones para obtener el valor de la viscosidad se basaron tomando en cuenta el área. Ahora este factor influye mucho debido a que los efectos que de esta se originan se desconocen. Esto además del efecto que se produce en todo caso por los baffles que están dentro del contenedor y aun más por el área interna del mismo husillo.

c) Sin considerar las variantes anteriores y haciendo uso de las expresiones obtenidas e ignorando los posibles efectos que se presentan por los baffles, los resultados que de ésta se obtienen no concuerdan con los reportados en la bibliografía.

d) Otro de los factores que intervienen, es parte del método en si, ya que en la determina la elaboración de las curvas patrón propuestas para la evaluación de la viscosidad, se tomó como referencia la viscosidad de el agua y la glicerina desde 10% hasta 90% en peso para la experimentación. En esta parte se consideraron una gama amplia de pesos, los cuales no fueron preseleccionados de tal forma que solo se pudieran considerar aquellos que deformaran homogéneamente el fluido, como se estableció en el método de Margules. Esto se demuestra en los puntos que están dispersos en la curva patrón y que son característicos de los movimientos de desorden que se presentan en la zona de baja velocidad generada por el uso de bajos pesos y la

zona de alta velocidad o turbulenta propiciada por el uso de pesos altos.

-Otro factor importante que debe ser considerado, es el esfuerzo cortante, que se utilizó para el cálculo de los fluidos problema, el esfuerzo se implementó como alternativa para calcular el factor de fricción y con este dato conocer el Número de Reynolds y si el esfuerzo cortante se conoce como la fuerza entre el área, la fuerza la determina el torque, el peso que acciona el movimiento del husillo por la distancia en la que se aplica esta fuerza, y en el desarrollo de la experimentación sólo se consideró el área externa del husillo. Por tanto el área implícita que se usó tanto para el cálculo del Factor de Fricción, Número de Reynolds y esfuerzo cortante no es la correcta ya que hay una fuerte interacción del área interna del husillo y los baffles del contenedor.

-Los fluidos que se usaron en la experimentación y cuya viscosidad no se conocía, en su mayoría eran fluidos que tenían una viscosidad menor a la del agua, entonces ¿Cómo explicar el valor calculado de viscosidad en este viscosímetro; en cierta forma, para algunos de estos fluidos solo se hicieron extrapolaciones de los valores del Número de Reynolds. Y esto se debe a que el intervalo del Factor de Fricción que se obtuvo en la elaboración de las curvas patrón es muy superior en comparación con los obtenidos con los fluidos problema que fueron demasiado bajas. La causa se atribuyó a que se consideró dos veces la misma área ( área externa del husillo ). Para el cálculo del esfuerzo cortante y el Factor de Fricción, bajo esta circunstancia los posibles resultados son alterados. Esta parte del método no pudo ser resuelta, puesto que no se consideraron fluidos para la elaboración de las curvas patrón, cuya viscosidad sea menor a la del agua. y que ayudarían a ampliar el intervalo del factor de fricción. Esto junto con la consideración del área del husillo, hacen que los valores de viscosidad que resultan de la experimentación en el viscosímetro de Stormer discrepen con respecto a los reportados en bibliografía.

- Para el tercer método o Factor de Fricción Vs. Número de Reynolds corregido. Se hicieron varias consideraciones, la más importante fue el haber ignorado: El efecto que provocan tanto los baffles que se encuentran en el interior del contenedor, el área interna del husillo, y su longitud. Con esto el Factor de Fricción y Número de Reynolds corregidos, ahora cuentan con unidades, lo que podría motivar a pensar que estos no cumplen con la definición de lo que representan ( funciones adimensionales ). Pero si se analiza la esencia del concepto de estos, se podrá indentificar que la definición de estos no varia en ningún momento.

-Otra variante que complementa este método es el uso de la ecuación de Margules, como apoyo a la sustentación del método propuesto. El uso de la ecuación de Margules ayuda a delimitar las zonas en donde el fluido es deformado homogéneamente y en donde el concepto de los fluidos Newtonianos se cumple, Debido a que sigue una tendencia lineal. Y con esto lograr el objetivo de eliminar las zonas donde la deformación del fluido es muy bajo ( laminar ) o muy alto ( turbulento ).

-Tomando los fluidos de referencia que se usaron en el método anterior, ( Factor de Fricción vs. Número de Reynolds ) y aplicando las variantes antes descritas para la elaboración de las curvas patrón y los cálculos de las viscosidades de los fluidos problema, el método del Factor de Fricción Vs. el Número de Reynolds corregidos alcanza un intervalo muy amplio con respecto a los valores del Factor de Fricción. Ya que los valores del Factor de Fricción que se obtienen de los fluidos problema entran dentro del intervalo que determinan los fluidos que se usaron para la elaboración de las curvas patrón. Esto no es mas que el resultado de haber omitido el área en las relaciones que determinan el Factor de Fricción y Número de Reynolds, así como, el limitar los pesos que deforman al fluido mediante el uso de la ecuación de Margules.

-Los resultados que de este se obtienen son muy precisos si se maneja el método adecuadamente.

-Cabe recalcar que la temperatura en los tres métodos juega un papel muy importante, debido a que cualquier variación de estos provoca alteraciones en los resultados.

- Para fluidos no Newtonianos el método se complica un poco más. A manera de repaso deberá recordarse que en fluidos Newtonianos la viscosidad permanece constante bajo todo el perfil de deformación, esto significa que bajo cualquier esfuerzo cortante el gradiente de velocidad no varía esto es, se mantiene constante, y como consecuencia el valor de la viscosidad guarda un valor constante. Para un fluido no Newtoniano la viscosidad varía a través de todo el perfil de deformación, esto quiere decir que el gradiente de velocidad y el esfuerzo cortante no son constantes en el espacio que existe entre el husillo y el contenedor. Por esta razón los métodos aplicados para fluidos Newtonianos no pueden ser válidos para los no Newtonianos.

-Para la determinación de la viscosidad en fluidos no Newtonianos se recurrió a un modelo predeterminado para el cálculo de la viscosidad.

-El modelo que en esta tesis se seleccionó para la determinación de la viscosidad de fluidos no Newtonianos, fue el de la ley de la potencia. Este modelo presentó una dificultad en cuestión experimental. Como bien se dijo anteriormente el viscosímetro con el que se trabajó no da la viscosidad como dato directo, lo que significa realmente un problema pues para poder hacer uso de la ley de la potencia es necesario calcular el índice de consistencia o " $n$ ", este depende directamente del valor de la viscosidad. Así, si se observa la relación de la ley de la potencia se podrá identificar que se desconocen dos de las variables que hacen posible el uso del modelo determinado.

Este problema fue resuelto, haciendo uso de otro viscosímetro cuya característica es, el que la viscosidad resulta como dato directo.

Ya con el dato de la viscosidad conocido, se procede a calcular el índice de consistencia y una vez que se obtiene se calcula la viscosidad según la ecuación propuesta para la determinación de viscosidades de fluidos no Newtonianos en el viscosímetro de Stormer.

En el desarrollo experimental, al hacer uso de las muestras propuestas en el viscosímetro de Stormer se encontraron una serie de limitantes, la primera es que los lapsos de tiempo para el conteo de las revoluciones por minuto no se repiten, esto como consecuencia de la misma deformación del fluido.

Al deformarlo, y volver hacer uso de la misma muestra provoca que los tiempos no sean iguales pues este se mantiene deformado, por lo tanto es necesario cambiar de muestra en el contenedor para repetir la experimentación o hacer una nueva prueba.

No existe un límite de pesos que deforman al fluido. En estos fluidos en particular no existe una zona de deformación homogénea.

El área del husillo tampoco es considerada en este método, pues en el desarrollo experimental se usaron dos tipos de husillo uno hueco ( que se uso a lo largo de todo el desarrollo experimental ) y otro sólido, al comparar los resultados obtenidos en los lapsos de tiempo no se encontró variación alguna.

El comportamiento del fluido también participa, pues en ciertas partes de la experimentación la deformación del fluido era tal que la muestra muchas de las veces se salía del contenedor.

En este método no existe forma de comparar los resultados que se obtienen, pues los valores del gradiente de velocidad y esfuerzo cortante son distintos. Dependiendo de la geometría en la que se deforma el fluido.

Sin embargo, los cambios de velocidad de deformación en este viscosímetro son muy marcados, estos se logran identificar en los reogramas de los fluidos que se presentan en esta tesis.

## BIBLIOGRAFIA,

- Martin. H. Wohl.  
Isotermal Laminar flow of Non Newtonian Fluids in pipes.  
Chemical Engineering.  
Vol. I April 8, 1968 pag. 143 - 146.
  
- García and Borrás.  
Calibrate Rotational Viscometer for non Newtonian fluids.  
Chemical Engineering.  
Vol I, January 18 1965 pag. 176 - 177.
  
- Martin. H. Wohl.  
Isotermal turbulent Flow in pipes.  
Chemical Engineering.  
Vol. I June 3, 1968. pag. 95 - 100.
  
- Lombard Squires and R.L. Dockendorff.  
Extending the useful Range of concentric cylinder viscometers.  
Industrial and Engineering Chemistry.  
Vol 8 No. 4 April 27, 1936. pag. 295.- 297.
  
- Martin H. Wohl.  
Rheology of Non - Newtonian Materials.  
Chemical Engineering.  
Vol. I February 12, 1968. Pag. 130 - 136.
  
- Ludwig Wassermann.  
From Heraklit to W. Scott Blair.  
Rheology 91.  
April 1991, iPag. 32 - 39.
  
- García Andres.  
Introducción a la reologia de los polimeros.  
Plastinoticias.  
Septiembre 1981, Pag. 37 - 54.
  
- Martin H. Wohl.  
Desingning for Non - Newtonian fluids.  
Chemical Engineering.  
Vol. I January 15, 1968. pag. 148 - 151.



- Martin H. Wohl.  
Mixing of Non - Newtonian Fluids.  
Chemical Engineering.  
Vol. I August 26, 1968. Pag. 113 - 118.

- Martin H. Wohl.  
Proprieties of liquids.  
Chemical Engieneering. Desk book ISSUE.  
Vol. I April 14, 1969. pag. 11 - 17.

- Martin H. Wohl.  
Instrument for Viscometry.  
Chemical Engineering.  
Vol I March 25, 1968. Pag. 99 - 104.

- Martin H. Wohl.  
Heat transfer in laminar flow.  
Chemical Engineering.  
Vol. I July 1, 1968. Pag. 81 - 86.

- Rodge and Sabin.  
Consistency of Paints by the Stormer Viscometer.  
Journal of Industrial and Engineering.  
Vol.3, 1911 Pag 737.

-Rigg and Carpenter.  
The Stormer Viscosimeter and the Value of viscosity  
determinations by it's use.  
Journal of industrial an Engineering Chemistry.  
Vol. 4, 1912 pag. 901.

- Martin H. Wohl.  
Sizing. pipe for Non - Newtonian Flow.  
Chemical Engineering.  
December 19 1988. pag. 140 - 146.

- American Society for testing Materials.  
A.S.T.M. Standar 1947 Supplement. Part II  
Non metallic Materials.  
Constructional. pag. 183 - 184.

- American Society for testing materials A.S.T.M. standar  
Suplement Part. II Non metalics materials.  
Constructionals. Pag. 183 - 184.

- J.A. Gaddes and D.H. Dawson.  
Calculation of viscosity from Stormer viscometer Data.  
Industrial and Engineering. Chemistry.  
Vol. 34 No. 2 February 1942 pag. 163 - 166.

- Bird. R. W. and Ed.  
Transport Phenomena.  
Wiley New York U.S.A.

-Aris.  
Transport. Phenomena.  
Pag. 5 - 82.

- Brodkey, Rand H hershey.  
Transprt Phenomena a Unifield approach.  
MacGraw - Hill. 1989.

- Ray W. Fahien.  
Fundamentals of transport. phenomena.  
MacGraw Hill  
New York. 1983.

-Arthur H Thomas. Co.  
Tecnology and service Manual.  
Philadelphia. P.A. 19105 U.S.A.

- Broofield.  
Brokfield Engineering Laboratories. Inc.  
Massachusetts. U.S.A.

- Perry y Chilton.  
Manual del ingeniero quimico  
Segunda edicion en español. Mcgraw - Hill.  
Vol. 1 Quinta edición.

- Zbigniew D. Jastrzebski.  
Materiales para ingeniería.  
Segunda edición, Interamericana.