

Nº 117  
DES.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

FACULTAD DE QUIMICA

DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD EXTENSIONAL  
PARA POLIMEROS FUNDIDOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO  
DE INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A  
RODOLFO TELLEZ SCHMILL



MEXICO, D. F., CIUDAD UNIVERSITARIA 1992

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

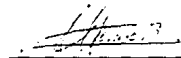
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

Jurado asignado según el tema:

Presidente Prof: Hello Flores Ramirez  
Vocal Prof: Luis Angel López Latorre  
Secretario Prof: Octavio Manero Brito  
1er. Suplente Prof: Carlos Guzman de las Casas  
2do. Suplente Prof: Francisco López Serrano Ramos

Sitio donde se desarrolló el tema: Instituto de Investigaciones  
en Materiales (U.N.A.M.)

Asesor:



Dr. Octavio Manero Brito

Sustentante:



Rodolfo Téllez Schmill



EXAMENES PROFESIONALES  
IAC. DE QUÍMICA

INDICE GENERAL.	
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
1. REOMETRIA CAPILAR Y VISCOSIDAD EXTENSIONAL.	3
1.1. Propiedades Mecánicas.	3
1.1.1. Deformación.	3
1.1.2. Corte Simple	4
1.1.3. Esfuerzo	4
1.2. Flujo y Viscosidad Extensionales	6
1.3. Reología Capilar para Viscosidad de Corte	9
CAPITULO II	
2. DEDUCCION DE ECUACIONES.	13
2.1. Ecuación de Hagen-Poiseulle para un fluido no Newtoniano	13
2.1.1. Corrección de Rabonowistch	17
2.2. Análisis de Binding para la determinación de los parámetros de Ley de Potencia de la Viscosidad Extensional	18
CAPITULO III	
3. METODO EXPERIMENTAL.	30
3.1. Viscosidad de Corte	30
3.1.1. Descripción del Equipo	30
3.1.2. Método Experimental	32
3.1.3. Manejo de Datos	32
3.2. Viscosidad Extensional	37
3.2.1. Método Experimental	38
3.2.2. Manejo de Datos	38
CAPITULO IV	
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.	42
4.1. Viscosidad de Corte	42
4.1.1. Polietileno (LLDPE)	42
4.1.1.1. Datos Experimentales y corrección de alturas	42
4.1.1.2. Corrección de Bagley	49

4.1.1.3.	Corrección de Rabinowistch	51
4.1.1.4.	Ley de Potencia	52
4.1.2.	Poliestireno Funcionalizado	53
4.1.2.1.	Datos Experimentales y corrección de alturas	53
4.1.2.2.	Corrección de Bagley	58
4.1.2.3.	Corrección de Rabinowistch	60
4.1.2.4.	Ley de Potencia	60
4.1.3.	EVA	61
4.1.3.1.	Datos Experimentales y corrección de alturas	61
4.1.3.2.	Corrección de Bagley	68
4.1.3.3.	Corrección de Rabinowistch	71
4.1.3.4.	Ley de Potencia	71
4.2.	Viscosidad Extensional	72
4.2.1.	Poliétileno (LLDPE)	72
4.2.1.1.	Datos Experimentales	72
4.2.1.2.	Ley de Potencia	74
4.2.1.4.	Viscosidad Extensional	74
4.2.2.	EVA	75
4.2.2.1.	Datos Experimentales	75
4.2.2.2.	Ley de Potencia	77
4.2.2.3.	Viscosidad Extensional	77
4.2.3.	Poliestireno Funcionalizado	78
4.2.3.1.	Datos Experimentales	78
4.2.3.2.	Ley de Potencia	80
4.2.3.3.	Viscosidad Extensional	80
	DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	81
	APENDICE	85
	BIBLIOGRAFIA	87

## ***INTRODUCCION***

El comportamiento no Newtoniano de los polímeros fundidos es bien conocido, y ha sido objeto de numerosas investigaciones reológicas. Como resultado de éstas investigaciones, se ha podido ligar ampliamente las propiedades materiales de los fluidos con su procesamiento.

El flujo que no presenta corte (flujos extensionales) recientemente se ha convertido en un foco de atención para los trabajos en reología. Los estudios experimentales y teóricos no se han podido unificar satisfactoriamente. Los trabajos experimentales han llevado al desarrollo de técnicas específicas y aparatos para la medición de la viscosidad extensional, mientras que los trabajos teóricos han mostrado una limitada concordancia con los resultados experimentales tomados a moderadas rapidezces de extensión.

Un ejemplo de los anterior son los dos métodos experimentales más importantes para la determinación de la viscosidad extensional. Uno de ellos consiste en emplear un filamento del polímero a estudiar, el cual se encuentra sumergido en un baño de aceite caliente para fundirlo. Un extremo del filamento está conectado a un transductor, y el otro extremo a unos platos rotantes. Para la determinación de la viscosidad extensional se emplea un modelo matemático muy sencillo, debido a que éste tipo de deformación está libre de corte.

Otro método para determinar la viscosidad extensional es por medio de reometría capilar, en el cual consiste en un flujo bidimensional que se produce cerca de una contracción repentina, fenómeno analizado por primera vez por Cogswell [1] en 1972. En éste tipo de flujo existe corte y el modelo matemático es mucho más complicado que en método anterior, pero es el que se presenta en la extrusión de plásticos, de gran importancia en los procesos industriales.

El estudio de estas propiedades ha sido la inquietud que me ha llevado a proponer como tema central de esta tesis a la Viscosidad Extensional, empleando el método de reometría capilar basado en el análisis de *Binding* [2,3].

El estudio de la viscosidad extensional en ésta tesis estará dirigido a fluidos no Newtonianos incompresibles bajo ciertas condiciones. Para comprender el significado matemático y físico de

la viscosidad *extensional* se definirán los conceptos más importantes en el siguiente capítulo.



***Capítulo I***  
***Reometría Capilar***  
***y***  
***Viscosidad Extensional***

Antes de iniciar la discusión del tema central de la tesis, en éste capítulo se profundizará en los conceptos básicos del comportamiento mecánico de los fluidos.

## 1.1. PROPIEDADES MECANICAS.

### 1.1.1. DEFORMACION.

Es la medida cuantitativa de la extensión que sufre un material cuando es deformado. Hay varias definiciones matemáticas de la *deformación*, las cuales concluyen en que cuando no existe *deformación*, el valor de esta medida es cero. En éste caso, se emplea la definición de la *deformación de Hencky*:

$$\epsilon \equiv \text{Ln} ( L/L_0 ) \quad (1)$$

El símbolo empleado para representarlo es la letra griega  $\epsilon$ .

Para un fluido incompresible, si el cuerpo es deformado en una de las direcciones de los ejes coordenados, disminuirá sus dimensiones en las direcciones restantes, compensando la distancia adquirida para mantener su volumen constante, cumpliendo así con la naturaleza de un fluido incompresible. Las variaciones de las dimensiones del elemento de fluido se representan con la siguiente expresión:

$$A_0 L_0 = A_r L_r \quad (2)$$

en donde  $A_0$  es el área transversal del elemento de volumen y  $L_0$  es la longitud inicial del mismo antes de la deformación,  $A_r$  y  $L_r$  son el área transversal y longitud final del mismo elemento cuando se ha deformado (Figura 1-1.).

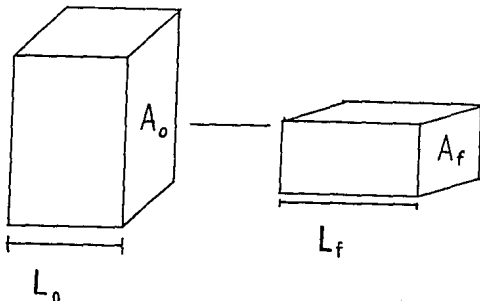


Figura 1-1. Deformación por Extensión.

### 1.1.2. CORTE SIMPLE.

Es la deformación del material originada por el movimiento de las fronteras del sistema cuando se mueve en forma de placas paralelas. Cada placa se desplaza una sobre la otra, de tal forma que existe un gradiente de velocidades constante entre las placas. Este tipo de deformación es conocida en dinámica de fluidos como flujo laminar. Una manera cuantitativa de medir ésta deformación es la *deformación cortante*, que se representa con la letra griega  $\gamma$ , (ver figura 1-2). En el estudio de los fluidos, el material es sujeto a un corte continuo con una rapidez constante.

La definición de *rapidez de corte*, que representa el gradiente de velocidades en las placas del fluido es:

$$\dot{\gamma} = d\gamma / dt \quad (3)$$

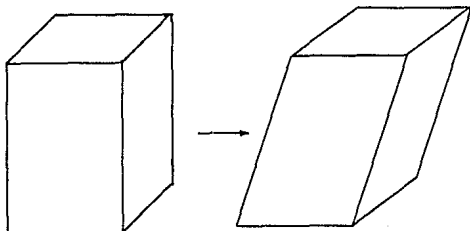
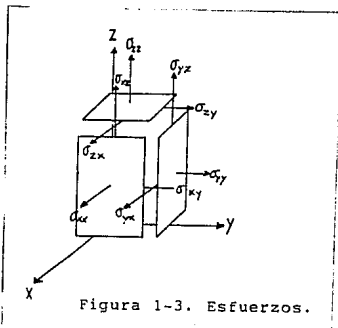


Figura 1-2. Deformación por Corte.

### 1.1.3. ESFUERZO.

Es una fuerza arbitraria aplicada sobre un área determinada. Existen dos tipos de *esfuerzos* que actúan sobre un elemento de volumen: el *esfuerzo normal* y el *esfuerzo de corte*. El primero es la fuerza que actúa en dirección perpendicular al área donde se aplica y el segundo es la fuerza que actúa en dirección tangencial al área donde se aplica. Por ésto, los esfuerzos que actúan todos sobre las áreas mutuamente perpendiculares de un elemento de volumen generan nueve componentes. Esto define el comportamiento matemático de un tensor, y de tal forma que se puede expresar a cada componente del tensor de esfuerzos como  $\sigma_{ij}$  (i es

el subíndice que representa la orientación del área donde la fuerza actúa,  $j$  representa la dirección de la fuerza). Ver figura 1-3.



Hay que hacer notar que la magnitud absoluta del *esfuerzo normal* no tiene significado si el cuerpo es incompresible, solamente lo tendrán los *esfuerzos cortantes* y las *diferencias de los esfuerzos normales*. Esto es debido a que no se podrá observar cambio aparente en las propiedades reológicas si se aplica un *esfuerzo normal balanceado*, como por ejemplo, la presión atmosférica que actúa con la misma magnitud en todas direcciones. De ésta forma el cuerpo no se deformará mientras no se le aplique otro esfuerzo normal adicional. Solamente si se aplica mayor *esfuerzo* en una dirección con respecto a la otra, se observará una deformación.

Regresando al caso de un fluido Newtoniano, las componentes correspondientes a los *esfuerzos normales* del tensor de esfuerzos dan cero, siendo la característica de fluidos isotrópicos:

$$\tau_{11} = \tau_{22} = \tau_{33} = 0 \quad (4)$$

Pero sin embargo, en los líquidos poliméricos el movimiento cortante tiene el efecto de producir alguna orientación de las moléculas de tal manera que sus propiedades se vuelven anisotrópicas, o sea que dependen de la dirección. La anisotropía de la estructura de un fluido tiene como resultado la aparición de diferencias entre los *esfuerzos normales* en movimiento cortante:

$$\tau_{11} \neq \tau_{22} \neq \tau_{33} \quad (5)$$

Estas componentes normales del *esfuerzo* no tienen significado reológico preciso como se había señalado, así que definiremos dos funciones adicionales del material, la primera y segunda diferencias del *esfuerzo normal*:

$$N_1 = \tau_{11} - \tau_{22} \quad (6)$$

$$N_2 = \tau_{22} - \tau_{33} \quad (7)$$

### 1.2. FLUJO Y VISCOSIDAD EXTENSIONALES.

Otro tipo de deformaciones basada en el comportamiento reológico de líquidos viscoelásticos es el *flujo extensional*. Como ejemplo la *extensión simple* o *extensión uniaxial*. Las variables que se pueden determinar en la *extensión simple* son la fuerza de elongación y la longitud de la deformación, que serán funciones del tiempo. Como es una fuerza tensión el *esfuerzo normal* será positivo. La cantidad de elongación resultante de un esfuerzo dado depende de la longitud de la muestra. La *deformación extensional* infinitesimal se define como:

$$dL / L_0 = de \quad (8)$$

integrando la expresión anterior obtenemos la *deformación de Hencky*. Ver figura 1-4. La rapidez de extensión está dada por:

$$\dot{\epsilon} = de / dt = 1/L dL/dt = d \ln L / dt \quad (9)$$

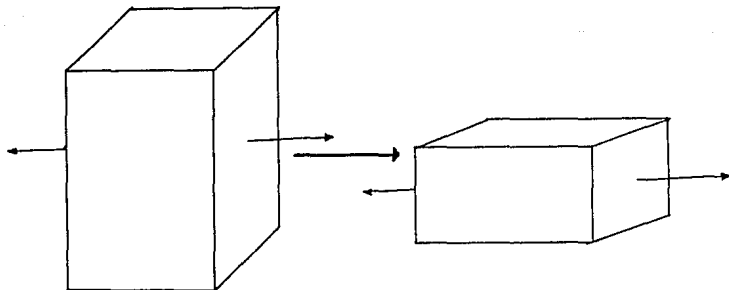


Figura 1-4. Extensión Uniaxial Simple.

se observa que  $dL / dt$  es una velocidad característica. Si la rapidez de tensión  $\dot{\epsilon}$  se mantiene constante, obtendremos un movimiento con una elongación constante. A esta deformación se le llama *extensión simple estacionaria* o *extensión uniaxial estacionaria*. Si  $\dot{\epsilon}$  es independiente del tiempo entonces el flujo es de extensión simple constante. Si suponemos que el flujo sigue la *simetría axial*  $(r, \theta, z)$ ; el *esfuerzo* es también simétrico:

$$\tau_{22} = \tau_{33} = \tau_{rr} \quad (10)$$

Se puede definir otra función del material que tiene unidades de *viscosidad*:

$$\eta_E(\dot{\epsilon}) = \frac{\tau_{11} - \tau_{22}}{\dot{\epsilon}} = \frac{\tau_{zz} - \tau_{rr}}{\dot{\epsilon}} \quad (11)$$

Esta nueva propiedad se le llama *viscosidad extensional*. Para el caso particular de un fluido Newtoniano, F. T. Trouton da su relación:

$$\eta_E = 3\mu \quad (12)$$

Además para una solución polimérica, cuando se somete a una rapidez de corte muy pequeña se comportará como un fluido Newtoniano:

$$\lim_{\dot{\epsilon} \rightarrow 0} [\eta_E(\dot{\epsilon})] = 3\eta \quad (13)$$

Para un fluido de ley de potencia, la expresión de la viscosidad extensional en función de la rapidez de deformación  $\dot{\epsilon}$  es:

$$\eta_E = \ell \dot{\epsilon}^{t-1} \quad (14)$$

en donde  $t$  y  $\ell$  son los parámetros de ley de potencia de la viscosidad extensional.

Desafortunadamente la cuantificación de los flujos extensionales bien definidos es difícil, además que dicha información es necesaria para el diseño de operaciones de procesamiento de flujo para polímeros fundidos, ya que se debe de predecir con exactitud las pérdidas de presión que se van a presentar. Para la determinación de la viscosidad extensional se deben establecer una serie de simplificaciones para poder obtener un modelo matemático poco complicado, basándose en observaciones hechas en sistemas con flujos extensionales. Se puede decir en base a lo anterior que:

- 1) Es imposible separar los flujos de corte y los extensionales.
- 2) La relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de corte

se debe de determinar en un experimento diferente.

- 3) Las fuerzas inerciales se pueden considerar como efectos de segundo orden.

Con estas simplificaciones hechas, el desarrollo matemático de un modelo en donde se pueda cuantificar los parámetros de la viscosidad extensional se puede realizar directamente. Dicho modelo estará basado en un estrangulamiento en donde el flujo cortante está incluido. En el sistema propuesto, el gradiente cortante máximo, que es el responsable del flujo cortante, se localiza en las paredes de la boquilla. El gradiente longitudinal, responsable del flujo *elongacional*, tiene lugar a lo largo de la línea central, donde la rapidez de elongación es máxima y la velocidad de corte es cero.

Para poder cuantificar los flujos extensionales, se analizará el flujo convergente, en donde la columna acelerada del fluido se acerca a la entrada de la boquilla en la región situada entre vórtices recirculantes. Los vórtices forman un embudo definido por las superficies  $r = R(z)$  que es tal que el ángulo de convergencia  $\theta$  es pequeño y de lenta variación, (figura 1-5). Se puede suponer que la velocidad periférica del vórtice es la misma que la velocidad de la columna acelerada, así que no existirá corte en la corriente convergente a lo largo de esta línea.

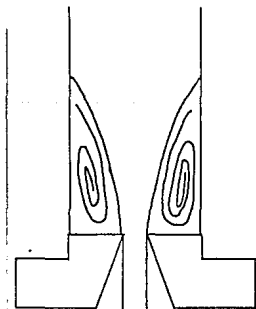


Figura 1-5. Contracción repentina.

Los vórtices ocurren en para mantener las rapideces de extensión en niveles relativamente bajos y su tamaño aumenta con el flujo.

Experimentalmente, un orificio capilar de cierto diámetro y sin longitud, es semejante al sistema descrito por D. M. Binding en su análisis matemático para éste tipo de flujo. Manipulando las ecuaciones que se obtienen en el análisis, podemos determinar experimentalmente con datos de caídas de presión y gastos volumétricos los parámetros de la viscosidad extensional.

### 1.3. REOLOGIA CAPILAR PARA VISCOSIDAD DE CORTE.

Como se mencionó anteriormente, es difícil tener un flujo extensional sin corte, así que se deben de tener forzosamente los parámetros de la viscosidad de corte de los fluidos que se estudien. Las mediciones del flujo en un tubo como función de la caída de presión  $\Delta P$  es la técnica más usual para el estudio de las propiedades reológicas de los fluidos (*Flujo capilar*). Es necesario emplear un tubo de pequeño radio para minimizar los efectos de calentamiento viscoso para líquidos con baja viscosidad. Como el esfuerzo es la fuerza por unidad de área, se puede sustituir la presión por el *esfuerzo normal axial promedio* que actúa sobre la sección de flujo:

$$\Delta P = -\Delta\sigma_{zz} \quad (15)$$

se sustituye esto para el *esfuerzo cortante* en la pared:

$$\tau_w = \frac{\Delta P}{L} \frac{R}{2} \quad (16)$$

Siendo R el radio del capilar y L su longitud. Pero este tipo de *flujo capilar* presenta ciertos efectos de entrada, para los cuales se deben de hacer ciertas correcciones. El *esfuerzo cortante* se puede determinar midiendo la presión en dos posiciones axiales en las cuales el flujo se encuentra totalmente desarrollado. Una manera muy común es midiendo la presión  $P_4$ , que se registra en el barril donde fluye el fluido, y se supone que la presión a la salida del capilar es igual a la atmosférica ( $P_a$ ), aunque prácticamente es despreciable con respecto al  $P_4$  ya que esta última es muy pequeña.

Si se conoce la fuerza que es aplicada a



la muestra  $F_d$ :

$$P_d = F_d / \pi R_b^2 \quad (17)$$

Siendo  $R_b$  el radio interno del barril. Así que reemplazamos por:

$$\Delta P = P_d - P_a \quad (18)$$

Sin embargo esto no es precisamente la caída de presión que se puede esperar para un flujo totalmente desarrollado en una longitud del capilar  $L$ . Así que es necesario hacer algún tipo de *corrección a la salida* cuando se emplea  $P_d$  para calcular  $\tau_w$ . Son cinco las razones principales por las cuales la presión registrada no corresponde a la caída de presión real:

- 1) El polímero se puede atascar en las paredes del barril y puede ser un elemento de fricción entre el pistón y las paredes del barril.
- 2) El incremento de energía cinética mientras el fluido fluya desde el barril hasta el capilar resultará en una caída de presión adicional.
- 3) El flujo del polímero a través del barril estará asociado con el *esfuerzo cortante* y una caída de presión correspondiente que puede ser despreciable a comparación de la que sucede en el capilar.
- 4) Cuando el fluido se acerca a la entrada del capilar, experimenta un cambio en la distribución de las velocidades. El flujo será desarrollado después de transcurrida cierta distancia del capilar. En las vecindades de la contracción el *esfuerzo cortante* en la pared es mayor que en caso del flujo desarrollado, lo cual genera un gradiente de presión aún mayor. El exceso de caída de presión resultante del rearreglo del perfil de velocidades se denomina *caída de presión a la entrada*.
- 5) Mientras el fluido se acerca a la salida del capilar, su perfil de velocidades cambia debido a que desaparecen las paredes del capilar. Esto es muy remarcado a bajos números de *Reynolds* para flujos de polímeros, el gradiente de presiones en la pared en ésta región será mayor que la correspondiente a un flujo totalmente desarrollado.

Los últimos dos casos van a tener una gran contribución en la caída total de presión, mientras que los primeros pueden ser en cierta manera despreciables.

Un mejor ajuste de los datos experimentales para la ley de potencia es el empleo de la corrección de Rabinowitsch:

$$\dot{\gamma} = \frac{4 Q}{\pi R^3} \cdot \frac{3 + b}{4} \quad (19)$$

Una alternativa de evaluar las correcciones necesarias, involucra el uso de una corrección de entrada al capilar "e" definida por:

$$\tau_w = \frac{P_d}{(L/R + e)} \quad (20)$$

El producto de e y R es la longitud de un flujo capilar totalmente desarrollado teniendo una caída de presión igual a la caída de presión en exceso resultante por los efectos de entrada (Figura 1-6).

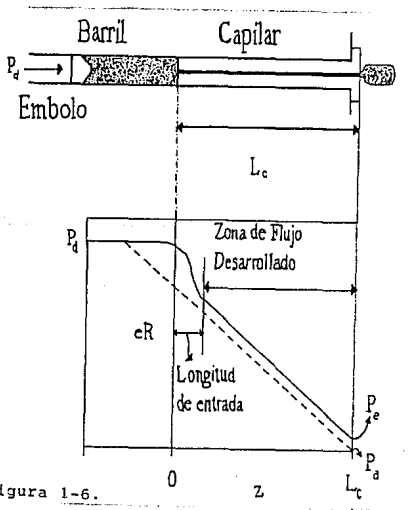


Figura 1-6.

Bagley aplicó esta técnica en polímeros fundidos, empleando una gran variedad de capilares con distintos valores de  $L/D$  y graficando valores de  $P_0$  contra  $L/R$  con la rapidez de corte en la pared como parámetro. Se obtuvieron líneas rectas implicando que la corrección a la salida es independiente de  $L/R$ . La corrección a la entrada apropiada para una rapidez de corte fue determinada por la extrapolación de una de las líneas al cero de presión, inyectando las abscisas, (Figura 1-7).

Existe también una corrección propuesta de la fuerza registrada en reómetros de émbolo vertical, que involucra el tamaño de la columna de fluido que se encuentra antes de la entrada del capilar:

$$F_{cor} = \frac{F}{1 + L_b/L_c (D_c/D_b)^{b+3/b}} \quad (21)$$

en donde  $F$  es la fuerza registrada,  $F_{cor}$  es la fuerza corregida,  $L_b$  y  $D_b$  es la longitud y diámetro del barril,  $L_c$  y  $D_c$  es la longitud y diámetro del capilar,  $b$  es el inverso de la ley de potencia  $n$ .

En base a los principios mencionados en éste capítulo se propone un método experimental para determinar los parámetros de ley de potencia de las viscosidades de corte y extensionales de tres polímeros fundidos. Las deducciones de las ecuaciones a emplear en el manejo de los datos experimentales se mostrarán en el siguiente capítulo.

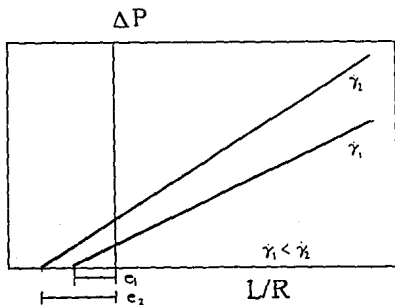


Figura 1-7. Corrección de Bagley.

*Capítulo II*

*Deducción  
de  
Ecuaciones*

En éste capítulo se muestra el análisis matemático de los sistemas estudiados en la tesis. Se deducirán todas las ecuaciones a emplear para el manejo de los datos experimentales para obtener la viscosidad de corte y viscosidad extensional.

## 2.1. ECUACION DE HAGEN-POISEUILLE PARA UN FLUIDO NO NEWTONIANO.

El análisis de un sistema de flujo en un tubo capilar, comienza con la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r U_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho U_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z) = 0 \quad (1)$$

A partir del hecho de que el polímero fundido que fluye en el capilar es un fluido no Newtoniano, incompresible e isotrópico, a régimen permanente e isotérmico, de la ecuación (1):

$$\rho \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

lo cual indica que la velocidad en la dirección axial es función únicamente de la dirección radial:

$$U_z = U_z(z) \quad (3)$$

$$U_z = U_z(r) \quad (4)$$

A continuación se plantean las componentes de la ecuación de movimiento en coordenadas cilíndricas  $(r, \theta, z)$  en función de  $\tau$ :

$$\begin{aligned} \text{Coordenada } r.- \quad & \rho \left[ \frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} - \frac{U_\theta^2}{r} + U_z \frac{\partial U_r}{\partial z} \right] = \\ & - \frac{\partial P}{\partial r} - \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right] + \rho g_r \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Coordenada } \theta.- \quad & \rho \left[ \frac{\partial U_\theta}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{U_r U_\theta}{r} + U_z \frac{\partial U_\theta}{\partial z} \right] = \\ & - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \right] + \rho g_\theta \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Coordenada } z.- \quad & \rho \left( \frac{\partial U_z}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = \\ & - \frac{\partial P}{\partial z} - \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (7)$$

Se eliminan los términos de inercia de las ecuaciones (5), (6) y (7) ya que es un flujo unidireccional en donde  $U$  y  $\nabla U$  son normales, y no existen componentes radial ni angular de la velocidad, y la coordenada axial  $U_z$  cumple con las ecuaciones (3) y (4). A continuación se muestran los esfuerzos normales y cortantes para un fluido de ley de potencia:

$$\begin{aligned} \tau_{rr} &= K \left( \frac{\partial U_r}{\partial r} \right)^n & \tau_{r\theta} &= K \left( \frac{\partial U_\theta}{\partial r} \right)^n & \tau_{\theta r} &= K \left( \frac{\partial U_r}{\partial \theta} \right)^n \\ \tau_{rz} &= K \left( \frac{\partial U_z}{\partial \theta} \right)^n & \tau_{zr} &= K \left( \frac{\partial U_r}{\partial z} \right)^n & \tau_{z\theta} &= K \left( \frac{\partial U_\theta}{\partial z} \right)^n \\ \tau_{\theta\theta} &= K \left( \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} \right)^n & \tau_{zz} &= K \left( \frac{\partial U_z}{\partial z} \right)^n \end{aligned}$$

Además de eliminar los esfuerzos anteriores, eliminamos las componentes de la fuerza de gravedad, incluyendo la componente axial ( $g_z$ ), ya que como se trata de un fluido altamente viscoso, la fuerza de gravedad no influirá en el movimiento de éste. En la realidad se observa que el polímero fundido no se mueve por efecto de la gravedad. A continuación tenemos las ecuaciones representativas del sistema:

$$\text{Coordenada } r.- \quad - \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

$$\text{Coordenada } \theta.- \quad - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0 \quad (9)$$

$$\text{Coordenada } z.- \quad - \frac{\partial P}{\partial z} - \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \right) = 0 \quad (10)$$

La ecuación (10) es la representativa del flujo através de un tubo capilar. Para integrar la ecuación haremos la siguiente consideración:

$$\frac{\partial P}{\partial z} \approx \frac{\Delta P}{L} \quad (11)$$

esto es válido si la variación de la presión en la coordenada axial es lineal, así que:

$$\frac{\Delta P}{L} = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \quad (12)$$

Como el sistema sólo depende de  $r$  podemos integrar la ecuación (12) y así obtenemos la expresión para el esfuerzo cortante  $\tau_{rz}$ :

$$- \frac{\Delta P}{L} \int r \, dr = r \tau_{rz} \quad (13)$$

$$\tau_{rz} = - \frac{\Delta P}{2L} r + \frac{C_1}{r} \quad (14)$$

La condición a la frontera de la expresión (14) es:

Cuando  $r = 0$  entonces  $\tau_{rz} = 0$

para que se pueda cumplir entonces  $C_1 = 0$ :

$$\tau_{rz} = - \frac{\Delta P}{2L} r \quad (15)$$

Para encontrar el perfil de velocidades sabemos que para un fluido de ley de potencia:

$$\tau_{rz} \approx K \left( \frac{\partial U_z}{\partial r} \right)^n = \eta \dot{\gamma}^n \quad (16)$$

Sustituimos (16) en (15), despejamos  $U_z$  y obtenemos:

$$U_z = \left( \frac{\Delta P}{2 L K} \right)^{1/n} \int r^{1/n} \, dr \quad (17)$$

Integrando la ecuación (17), obtenemos:

$$U_z = \left[ \frac{\Delta P}{2 L K} \right]^{1/n+1} \frac{r^{1/n+1}}{1/n+1} + C_2 \quad (18)$$

La condición a la frontera de la ecuación (18) es:

Cuando  $r = R$  entonces  $U_z = 0$

Sustituyendo en la ecuación (18) y realizando el álgebra, encontramos:

$$C_2 = - \left[ \frac{\Delta P}{2 L K} \right]^{1/n} \left[ \frac{n}{1+n} \right] R^{1/n+1} \quad (19)$$

Sustituimos (19) en (18) y obtenemos el perfil de velocidades en el tubo capilar:

$$U_z = - \left[ \frac{\Delta P}{L K} \frac{R}{2} \right]^{1/n} \left[ \frac{n}{n+1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n+1} \right] R \quad (20)$$

A partir de la definición de flujo volumétrico, sustituimos la ecuación (20):

$$\begin{aligned} Q &= \iint U_z \, dA = \int_0^{2\pi} \int_0^R U_z \, r \, dr \, d\theta = \\ &2\pi \left[ \frac{\Delta P}{2 L K} \right]^{1/n} \left[ \frac{n}{n+1} \right] \left[ \frac{r^{1/n+2}}{(1/n+2)} - R^{1/n+1} \frac{r^2}{2} \right]_0^R = \\ &- \pi \left[ \frac{\Delta P}{L K} \frac{R}{2} \right]^{1/n} \left[ \frac{n}{1+3n} \right] R^3 \quad (21) \end{aligned}$$

Ahora obtendremos la expresión para la rapidez de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) sustituyendo la ecuación (20) en la definición de  $\dot{\gamma}$  para la variación de la velocidad axial en la dirección radial:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial U_z}{\partial r} = \frac{d}{dr} \left[ - \left[ \frac{\Delta P}{L K} \frac{R}{2} \right]^{1/n} \left[ \frac{n}{n+1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n+1} \right] R \right] =$$



$$- \left( \frac{\Delta P}{L K} \frac{R}{2} \right)^{1/n} r^{1/n} \quad (22)$$

Para obtener una expresión semejante a la ley de Hagen-Poiseuille, evaluamos la ecuación (22) en la pared, cuando  $r = R$ , y despejamos el término que contiene a la variación de la presión:

$$\left( \frac{\Delta P}{L K} \frac{R}{2} \right)^{1/n} = - \frac{\dot{\gamma}_w}{R^{1/n}} \quad (23)$$

sustituimos la ecuación (23) en la ecuación (21):

$$Q = \pi \dot{\gamma}_w R^3 \left( \frac{n}{1 + 3n} \right) \quad (24)$$

multiplicamos y dividimos la ecuación (24) por cuatro, despejamos  $\dot{\gamma}_w$ :

$$\dot{\gamma}_w = \left( \frac{1 + 3n}{4n} \right) \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (25)$$

Valuamos la ecuación (15) en la pared para obtener  $\tau_w$ :

$$\tau_w = - \frac{\Delta P}{2L} R \quad (26)$$

Sustituimos las ecuaciones (25) y (26) en la ecuación (16), así obtenemos la ecuación de Hagen-Poiseuille para la ley de potencia:

$$\frac{\Delta P}{L} \left( \frac{R}{2} \right) = K \left( \frac{1 + 3n}{4n} \right)^n \left( \frac{4Q}{\pi R^3} \right)^n \quad (27)$$

#### 2.1.1. CORRECCION DE RABINOWISTCH.

Si trazamos una curva de  $\log \tau_w$  v.s.  $\log \dot{\gamma}_w$ , obtendremos una línea recta de pendiente "n", pero si trazamos la curva  $\log \dot{\gamma}_w$  v.s.  $\tau_w$  será también una línea recta de pendiente "b = 1/n", que nos da la corrección de Rabinowistch para  $\dot{\gamma}_w$ . Si sustituimos ésta corrección en el factor que multiplica  $\dot{\gamma}_w$ :

$$\frac{1 + 3n}{4n} = \frac{1}{4} \left( 3 + \frac{1}{n} \right) = \frac{3 + b}{4} \quad (28)$$

## 2.2. ANALISIS DE BINDING [2] PARA LA DETERMINACION DE LOS FACTORES DE LEY DE POTENCIA DE LA VISCOSIDAD EXTENSIONAL.

Para determinar la viscosidad extensional para un polímero fundido, partimos del análisis que hizo *Binding* para un flujo atraído de una contracción (convergencia libre).

Consideramos el flujo a través de un canal cilíndrico de ancho  $2R_i$  en  $z \leq 0$ , el cual repentinamente se contrae en  $z = 0$  en un canal cilíndrico de ancho  $2R_o$ .  $r = 0$  es el plano de simetría, y la profundidad del canal es "L", (Figura 2-1). Se supone que existe un flujo completamente desarrollado para las corrientes previas y después de la contracción. También hay que suponer que  $R = R(z)$ . El fluido es no Newtoniano, incompresible, isotérmico de densidad  $\rho$ .

Se hará el análisis en coordenadas cilíndricas. La velocidad principal de flujo completamente desarrollado será en la dirección "z". Existirá también una velocidad en la dirección "r", lo cual originará un flujo bidimensional. El flujo estará a régimen permanente. Así que con las suposiciones anteriores, planteamos la ecuación de conservación en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r U_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho U_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z) = 0 \quad (1)$$

Con las suposiciones mencionadas con anterioridad, la ecuación (1) queda como sigue:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_r) = - \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (2)$$

Planteamos las ecuaciones de conservación en función de  $r$  en coordenadas cilíndricas, mencionando de antemano que sólo habrá corte para la velocidad  $U_z$ , y la cuál será función de "r". Además la única componente de la gravedad es  $g_z$ , pero ésta fuerza es muy pequeña a comparación de la viscosidad del fluido:

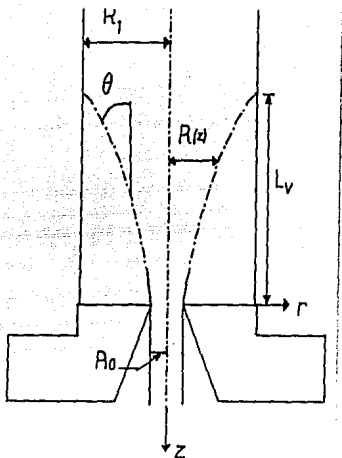


Figura 2-1. Sistema de análisis.

$$\begin{aligned} \text{Coordenada } r.- \quad & \rho \left( \frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} - \frac{U_\theta}{r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = \\ & - \frac{\partial P}{\partial r} - \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Coordenada } \theta.- \quad & \rho \left( \frac{\partial U_\theta}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{U_r U_\theta}{r} + U_z \frac{\partial U_\theta}{\partial z} \right) = \\ & - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \right) + \rho g_\theta \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Coordenada } z.- \quad & \rho \left( \frac{\partial U_z}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = \\ & - \frac{\partial P}{\partial z} - \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (5) \end{aligned}$$

Las cinco componentes del tensor de esfuerzos iguales a cero son  $\tau_{r\theta}$ ,  $\tau_{\theta r}$ ,  $\tau_{\theta\theta}$ ,  $\tau_{\theta z}$ , y  $\tau_{z\theta}$ , por lo que los únicos que prevalecen son  $\tau_{rr}$ ,  $\tau_{rz}$ ,  $\tau_{zr}$  y  $\tau_{zz}$ . Las componentes de la ecuación de movimiento son:

$$\begin{aligned} \text{Coordenada } r.- \quad \rho \left( U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = \\ - \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) - \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{Coordenada } \theta.- \quad \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Coordenada } z.- \quad \rho \left( U_r \frac{\partial U_z}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = \\ - \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) - \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho g_z \end{aligned} \quad (8)$$

Para hacer una simplificación del problema, Binding sugirió que a partir de la ecuación (8) se puede obtener el perfil de velocidades en función de "r" para un fluido de ley de potencia:

$$U_z = \frac{Q (3n + 1)}{\pi R^2 (n + 1)} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1+1/n} \right] \quad (9)$$

Sustituyó la ecuación (9) en la siguiente expresión basada en la ecuación de conservación, recordando que  $R = R(z)$ . La obtención de  $U_r$  lo hacemos paso a paso como indica la ecuación (2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_z}{\partial z} = \frac{Q}{\pi R^3} \left[ \frac{3n + 1}{n + 1} \right] \left[ \frac{dR}{dz} \right] \left[ \left[ \frac{3n + 1}{n} \right] \left[ \frac{r}{R} \right]^{1/n+1} - 2 \right] \\ - r \frac{\partial U_z}{\partial z} = \frac{Q}{\pi R^3} \left[ \frac{3n + 1}{n + 1} \right] \left[ \frac{dR}{dz} \right] r \end{aligned} \quad (10)$$

$$\cdot \left[ 2 - \left( \frac{3n+1}{n} \right) \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n+1} \right] \quad (11)$$

$$r U_r = \frac{Q}{\pi R^3} \left( \frac{3n+1}{n+1} \right) \left( \frac{dR}{dz} \right) \left[ r^2 - \frac{r^{1/n+3}}{R^{1/n+1}} \right] \quad (12)$$

$$U_r = \frac{Q}{\pi R^3} \left( \frac{3n+1}{n+1} \right) \left( \frac{dR}{dz} \right) r \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n+1} \right] \quad (13)$$

La ecuación (13) es el componente de la velocidad en la dirección "r". Los límites de integración significan que el fluido se empieza a acelerar desde el centro de flujo hacia los extremos. El tensor rapidez de deformación para éste tipo de flujo está definido:

$$D_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{\epsilon} & \dot{\gamma}/2 \\ 0 & \dot{\gamma}/2 & \dot{\epsilon} \end{pmatrix}$$

donde  $\dot{\gamma}$  es la rapidez de corte, y  $\dot{\epsilon}$  es la rapidez de elongación.

A partir de las siguientes expresiones calculamos los componentes del tensor rapidez de deformación:

$$\dot{\epsilon} = D_{zz} = \frac{\partial U_z}{\partial z} =$$

$$\frac{Q (3n+1)}{(n+1) \pi R^3} \left( \frac{dR}{dz} \right) \left[ \frac{3n+1}{n} \left( \frac{r}{R} \right)^{1+1/n} - 2 \right] \quad (14)$$

$$\dot{\gamma}/2 = D_{rz} = \left( \frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) =$$

$$-\frac{Q (3n+1)}{2 n \pi R^3} \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n} - \frac{Q (3n+1)}{\pi (n+1)} r \left\{ \frac{1}{R^3} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1+1/n} \right] \right. \\ \left. \left( \frac{d^2 R}{dz^2} \right) + \left[ \left( \frac{4n+1}{n} \right) \frac{r^{1/n+1}}{R^{1/n+5}} - \frac{3}{R^2} \right] \left( \frac{dR}{dz} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

Supondremos que  $dR/dz$  es lo suficientemente pequeño para que los términos  $(dR/dz)^2$  y  $d^2R/dz^2$  sean despreciados. Esto presupone la presencia de un movimiento de vórtices muy significativo en las esquinas de la contracción. Dicho lo anterior, la ecuación (15) queda como:

$$\dot{\gamma} = - \frac{Q (3n + 1)}{n \pi R^3} \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n} \quad (16)$$

La rapidez de elongación ( $\dot{\epsilon}$ ) varía através de la región convergente, por lo que el flujo no es un flujo extensional simple. En general, las componentes del campo de esfuerzos para éste flujo son:

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} -P + \tau_{rr} & 0 & \tau_{rz} \\ 0 & -P & 0 \\ \tau_{zr} & 0 & -P + \tau_{zz} \end{pmatrix}$$

La rapidez de trabajo por unidad de volumen de las fuerzas superficiales ( $\dot{w}$ ), se expresa como:

$$\dot{w} = \tau : \underline{D} \quad (17)$$

Como sabemos, el álgebra del doble producto punto de dos tensores cumple con el siguiente principio:

$$\underline{A} : \underline{B} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} =$$

$$a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} + a_{13}b_{31} + a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} + a_{23}b_{32} + a_{31}b_{13} + a_{32}b_{23} + a_{33}b_{33}$$

Haciendo un tratamiento análogo a los tensores que estamos analizando:

$$\begin{aligned} \dot{w} = & (-P) (0) + (0) (0) + (0) (0) + (0) (0) + (-P + \tau_{yy}) (-\dot{\epsilon}) + \\ & (\tau_{yz}) (\dot{\gamma}/2) + (0) (0) + (\tau_{zy}) (\dot{\gamma}/2) + (-P + \tau_{zz}) (\dot{\epsilon}) = \\ & \tau_{rz} \dot{\gamma} + (\tau_{zz} - \tau_{rr}) \dot{\epsilon} \quad (18) \end{aligned}$$

$$\dot{w} = \dot{w}_s + \dot{w}_e \quad (19)$$

Las siguientes definiciones nos expresan la disipación por esfuerzos viscosos:

$$\dot{w}_s = \eta_a \dot{\gamma}^2 \quad (20)$$

$$\dot{w}_e = \eta_e \dot{\epsilon}^2 \quad (21)$$

La ecuación (20) es la disipación viscosa debida al corte, y la

ecuación (21) es la disipación viscosa debida a la extensión. Si nosotros sabemos que para un fluido de ley de potencia:

$$\eta_s = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (22)$$

$$\eta_e = \ell \dot{\epsilon}^{t-1} \quad (23)$$

Sustituyendo (22) y (23) en (20) y (21) respectivamente:

$$\dot{w}_s = K \dot{\gamma}^{n+1} \quad (24)$$

$$\dot{w}_e = \ell \dot{\epsilon}^{t+1} \quad (25)$$

Ahora realizaremos un balance de energía mecánica, considerando un elemento de volumen entre los planos "z" y "z + dz", la rapidez a la cual la energía debe de ser suministrada a ese elemento para mantener el flujo es:

$$\delta \dot{E} = 2\pi \left[ \int_0^R (\dot{w}_s + \dot{w}_e) r dr \right] \delta z + \delta \dot{K} \quad (26)$$

Sustituimos la ecuación (16) en la (24), la ecuación (14) en la (25), y éstas en la ecuación (26):

$$\begin{aligned} \delta \dot{E} = 2\pi \int_0^R \left\{ K \left( \frac{Q (3n+1)}{n \pi R^{1/n+1}} \right)^{n+1} r^{1/n+2} + \right. \\ \left. \ell \left( \frac{Q (3n+1)}{(n+1) R \pi} \right)^{t+1} \left( \frac{dR}{dz} \right)^{t+1} \right. \\ \left. \left[ \frac{3n+1}{n} \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n+1} - 2 \right]^{t+1} r \right\} dr \delta z \\ + \delta \dot{K} \quad (27) \end{aligned}$$

La parte correspondiente a la disipación viscosa de corte es una integral directa, la parte de la disipación viscosa extensional es una integral que únicamente se puede resolver por un método numérico y haciendo un cambio de variable. Esta nueva variable será adimensional ( $\phi = r/R$ ), acotando entre cero y uno los límites de integración. La transformación se hace de la siguiente manera:

$$\int_0^R \left[ \frac{3n+1}{n} \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n+1} - 2 \right]^{t+1} r dr =$$

$$\int_0^1 \left[ \frac{3n+1}{n} \phi^{1+1/n} - 2 \right] R^{L+1} \phi \, d\phi \quad (28)$$

La ecuación (28) se multiplica por -1 y se obtiene posteriormente el valor absoluto:

$$Int = \int_0^1 \left| 2 - \frac{3n+1}{n} \phi^{1+1/n} \right|^{L+1} \phi \, d\phi \quad (29)$$

Finalmente K es la rapidez neta del incremento de energía cinética en el elemento:

$$\dot{K} = \iiint_V \rho \frac{\partial U^2}{\partial t} \, dV = \rho/2 \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^R \frac{\partial U^2}{\partial t} r \, dr \, d\theta \, dz \quad (30)$$

en donde  $U^2$  es la resultante del campo de velocidades de  $U_z$  y  $U_r$ :

$$U^2 = U_z^2 + U_r^2$$

$$= \frac{(3n+1)^2 Q^2}{(n+1)^2 \pi^2 R^4} \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1+1/n} \right]^2 \left( \frac{dR}{dz} \right)^2 \frac{r^2}{R^2} + \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n+1} \right]^2 \right\} =$$

$$\frac{(3n+1)^2 Q^2}{(n+1)^2 \pi^2 R^4} \left[ 1 - 2 \left( \frac{r}{R} \right)^{1+1/n} + \left( \frac{r}{R} \right)^{2+2/n} \right] \quad (31)$$

la expresión (31) resulta de despreciar el término  $(dR/dz)^2$ , que como se mencionó anteriormente es muy pequeño. A continuación derivamos la expresión anterior con respecto al tiempo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U^2}{\partial t} &= \frac{(3n+1) Q^2}{(n+1)^2 \pi^2 R^4} \left[ -\frac{2}{R^{1/n+1}} \left( 1 + \frac{1}{n} \right) r^{1/n} \frac{dr}{dt} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{R^{2/n+2}} \left( 2 + \frac{2}{n} \right) r^{2/n+1} \frac{dr}{dt} \right] \quad (32) \end{aligned}$$



sabiendo que  $dr/dt = U_r$ , y sustituyendo en (32):

$$\frac{\partial U^2}{\partial t} = \frac{2 (3n + 1)^3 Q^3 r}{(n + 1)^2 n \pi^3 R^8} \left( \frac{dR}{dz} \right) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1+1/n} \right]$$

$$\left[ \left( \frac{r}{R} \right)^{2/n+1} - \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n} \right] \quad (33)$$

sustituyendo (33) en (30), integrando con respecto a  $\theta$ , la integral queda:

$$\frac{\delta \dot{K}}{\delta z} = \frac{2 \rho (3n + 1)^3 Q^3}{(n + 1)^2 n \pi^2 R^8} \left( \frac{dR}{dz} \right) \int_0^R \left( 2 \frac{r^{2/n+3}}{R^{2/n+1}} - \frac{r^{1/n+2}}{R^{1/n}} - \frac{r^{3/n+4}}{R^{3/n+2}} \right) dr =$$

$$- \frac{2 \rho (3n + 1)^2 Q^3}{(2n + 1) (5n + 3) \pi^2 R^5} \left( \frac{dR}{dz} \right) \quad (34)$$

Finalmente sustituyendo (34) en la ecuación de la energía (27), tenemos la expresión:

$$\frac{\delta \dot{E}}{\delta z} = \frac{2 K Q}{R} \left( \frac{(3n + 1) Q}{n \pi R^3} \right)^n + 2 \pi \ell R^2 \text{Int}$$

$$\left[ \frac{(3n + 1) Q}{(n + 1) \pi R^3} \left( \frac{dR}{dz} \right) \right]^{t+1}$$

$$- \frac{2 \rho (3n + 1)^2 Q^3}{(2n + 1) (5n + 3) \pi^2 R^5} \left( \frac{dR}{dz} \right) = F ( R , dR/dz ) \quad (35)$$

Aceptando que la energía requerida para mantener las zonas recirculantes es pequeña, entonces la potencia total consumida en la sección de convergencia es:

$$\dot{E} = \int_{-L_v}^0 F ( R , dR/dz ) dz \quad (36)$$

en donde  $L_v$  es la longitud del vórtice formado en la zona de convergencia. De todos los perfiles posibles de  $R(z)$ , el que adoptará el sistema será aquél que consuma el mínimo de potencia. Si

se quiere minimizar el valor de  $E$  con respecto a la función que involucra  $R(z)$ , debemos sujetarnos a las siguientes condiciones:

- 1)  $R(0) = R_0$  siendo una constante, y que corresponde al radio de salida del líquido de la zona convergente.
- 2)  $L_v$  debe estar en la línea  $R = R_1$ , que es constante y corresponde al radio del conducto por donde fluye el líquido antes de la zona de convergencia.

Suponiendo que  $R(z)$  es una curva suave, cálculos variacionales muestran para que  $E$  tome un valor extremo,  $R$  es necesariamente una solución de la ecuación de Euler:

$$\frac{\partial F}{\partial H} - \frac{d}{dz} \left( \frac{\partial F}{\partial R'} \right) = 0 \quad (37)$$

siendo  $R' = dR/dz$ . Como  $F$  es explícitamente independiente de  $z$ , la ecuación de Euler (37) debe de ser integrada para dar:

$$F - R' \frac{\partial F}{\partial R'} = \text{cte} \quad (38)$$

La ecuación (38) debe de satisfacer la condición transversa:

$$\left( F - R' \frac{\partial F}{\partial R'} \right) \Big|_{z = -L_v} = 0 \quad (39)$$

Para cumplir con ésta condición  $\text{cte} = 0$ , así que para obtener un extremo de  $E$  se dice que mientras  $R' \neq 0$  para toda  $z$ ,  $R(z)$  debe satisfacer:

$$\frac{\partial}{\partial R'} \left( \frac{F}{R'} \right) = 0 \quad (40)$$

Realizando las operaciones de la ecuación (40) se obtiene la expresión de la variación de los radios externos del conducto de flujo de la zona convergente con respecto a  $z$ :

$$\frac{F}{R'} = \frac{2 K Q}{R} \left( \frac{(3n + 1) Q}{n \pi R^3} \right)^n \left( \frac{dR}{dz} \right)^{-1} + 2 \pi \ell R^2 \text{Int}$$

$$\left( \frac{(3n+1)Q}{n\pi R^3} \right)^{t+1} \left( \frac{dR}{dz} \right)^t - \frac{2\rho(3n+1)Q}{(2n+1)(5n+3)\pi^2 R^5} \quad (41)$$

$$\frac{\partial}{\partial R'} \left( \frac{F}{R'} \right) = - \frac{2KQ}{R} \left( \frac{(3n+1)Q}{n\pi R^3} \right) \left( \frac{dR}{dz} \right) +$$

$$2\pi \ell R^2 \text{Int } t \left( \frac{(3n+1)Q}{n\pi R^3} \right)^{t+1} \left( \frac{dR}{dz} \right)^{t-1} = 0 \quad (42)$$

Despejando  $dR/dz$  de la ecuación (42):

$$\left( \frac{dR}{dz} \right)^{t+1} = \frac{K(n+1)^{t+1}}{\ell \text{Int } t n^n (3n+1)} \left( \frac{(3n+1)Q}{n\pi R^3} \right)^{n-t} \quad (43)$$

La expresión (43) se sustituye en la ecuación (36), cambiando la variable de integración "z" por "R" y como límites  $R_1$  y  $R_0$ :

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \int_{R_0}^{R_1} \frac{2KQ}{R} \left( \frac{(3n+1)Q}{n\pi R^3} \right)^n \left( \frac{(3n+1)Q}{\pi R^3} \right)^{\frac{t-n}{t+1}} \\ &\quad \left( \frac{\ell \text{Int } t n^n (3n+1)}{K(n+1)^{t+1}} \right)^{\frac{1}{t+1}} dR + \frac{2\pi R^2 K}{t(3n+1)n^n} \\ &\quad \left( \frac{(3n+1)Q}{\pi R^3} \right)^{\frac{2t+1+n}{t+1}} \left( \frac{\ell \text{Int } t n^n (3n+1)}{K(n+1)^{t+1}} \right)^{\frac{1}{t+1}} dR \\ &\quad - \frac{2\rho(3n+1)^2 Q^3}{(2n+1)(5n+1)\pi^2 R^5} dR = \\ &\quad \left[ - \frac{2K(t+1)^2 Q}{3t(n+1)^2 t n^n} \left( \frac{\ell t(3n+1)n^n \text{Int}}{K} \right)^{\frac{1}{t+1}} \right. \end{aligned}$$

$$\left[ \frac{(3n+1)Q}{\pi} \right]^{\frac{t(n+1)}{t+1}} R - \frac{3t(n+1)}{t+1} + \frac{\rho(3n+1)^2 Q^3}{2(2n+1)(5n+3)\pi^2 R^4} \Big]_{R_0}^{R_1} \quad (44)$$

Si se sigue reduciendo en la ecuación (45), se multiplica y divide por  $R_0$ , sustituyendo en la ecuación resultante en la expresión (45), que es el inverso de la relación de contracción, y además se introduce la expresión (46), se obtiene la ecuación de ley de potencia:

$$\alpha = \frac{R_0}{R_1} \quad (45)$$

$$\dot{y}_{R_0} = \frac{(3n+1)Q}{n\pi R^3} \quad (46)$$

$$\dot{E} = \frac{2KQ(t+1)^2}{3t^2(n+1)^2} \left[ \frac{\ell t(3n+1)\dot{y}_{R_0}^{Int}}{K} \right]^{\frac{1}{t+1}} \dot{y}_{R_0}^{\frac{t(n+1)}{t+1}} \left[ 1 - \alpha^{\frac{3t(n+1)}{t+1}} \right] + \frac{\rho(3n+1)^2 Q^3}{2(2n+1)(5n+3)\pi^2 R_0^4} \left[ 1 - \alpha^4 \right] \quad (47)$$

Es necesario mencionar que  $P_A$  es la presión a la distancia  $L_A$  de la corriente previa a la contracción en donde se considera que el flujo está totalmente desarrollado, y  $P_B$  la presión a la distancia  $L_B$  de la corriente descendente de la contracción, en donde también el flujo se considera desarrollado. Bajo los principios de conservación de energía, la rapidez neta del trabajo de las fuerzas superficiales se reduce a  $(P_A / P_B)Q$ , la rapidez de la disipación viscosa en la región entre  $z = -L_A$  y  $z = -L_B$  es

$P'(-L_A, L_V)Q$  y la rapidez de disipación viscosa entre la región  $z = 0$  y  $z = L_B$  es  $P'(0, L_B)Q$ . Si suponemos que los requerimientos de energía de las regiones de recirculación se desprecian, el balance de energía se debe de escribir:

$$(P_A - P_B) Q = P'(-L_A, L_V) Q + \dot{E} + P'(0, L_B) Q \quad (48)$$

La presión de entrada "Pe" está definida por la caída de presión menos las caídas de presión correspondientes a flujos laminares desarrollados entre  $z = -L_A$  y  $Z = 0$  y entre  $z = 0$  y  $z = L_B$ :

$$P_e = (P_A - P_B) - P'(-L_A, 0) - P'(-0, L_B) \quad (49)$$

Sustituyendo (49) en (48):

$$P_e = \dot{E}/Q - P'(-L_V, 0) \quad (50)$$

Finalmente dividimos la ecuación (47) entre  $Q$  y obtenemos la ecuación que se puede emplear en la determinación de los parámetros  $t$  y  $\ell$  de la viscosidad extensional. En el siguiente capítulo se mostrará la forma que toma la ecuación y se planteará el método experimental para determinar los parámetros  $t$  y  $\ell$ .

La expresión para estimar el valor de la rapidez de elongación  $\dot{\epsilon}$  se deduce a partir de la ecuación (14), sustituyendo en la derivada la ecuación (43), quedando:

$$\dot{\epsilon} = \left[ \frac{(3n + 1) Q}{\pi R_o^3} \right]^{\frac{n-t}{t+1} + 1} \left[ \frac{K}{\ell t (3n + 1) n n I_{nt}} \right]^{\frac{1}{t+1}} \left[ \left[ \frac{r}{R_o} \right]^{1+1/n} - 2 \right] \quad (51)$$

recordando que  $R_o$  es el radio del orificio, se evalúa la ecuación anterior en  $r = R_o$ , realizamos el álgebra para poder sustituir la rapidez de corte evaluada en  $R_o$ , así obtenemos la expresión para la rapidez de elongación máxima en función de la rapidez de corte:

$$\dot{\epsilon}_{\max} = (n + 1) \left[ \frac{K}{\ell t (3n + 1) n t I_{nt}} \right]^{\frac{1}{t+1}} \dot{\gamma}^{\frac{n+1}{t+1}} \frac{R_o}{R_o} \quad (52)$$

## *Capítulo III*

### *Método Experimental*

En éste capítulo se establecen los métodos experimentales para determinar los parámetros de ley de potencia de la viscosidad de corte ( $n$  y  $K$ ), y de la viscosidad extensional ( $t$  y  $\ell$ ).

### 3.1. VISCOSIDAD DE CORTE.

#### 3.1.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO.

Para determinar experimentalmente los parámetros de la viscosidad de corte para un fluido no Newtoniano, se empleará el método de reometría capilar. Se utiliza para éste propósito una máquina INSTRON<sup>®</sup> que se encuentra en el laboratorio de pruebas mecánicas del Instituto de Investigaciones en Materiales de nuestra Universidad. El sistema consta de un barril vertical, en su parte inferior se encuentra un capilar de cierto diámetro y longitud ( $L/D$ ). En el barril se empaca cuidadosamente el polímero, ya que su presentación comercial es en forma de granallas (*pellets*).

El aparato consta de un cabezal que se mueve a velocidad constante. En el cabezal se encuentra una celda detectora de la fuerza necesaria para hacer fluir al polímero a la velocidad del cabezal. Esta fuerza se aplica en un émbolo. El barril cuenta con un sistema para establecer y controlar la temperatura, necesaria para mantener fundido al polímero. El diámetro del barril es de 3/8 in (9.5 mm), al igual que el émbolo.

El equipo consta con un medidor del desplazamiento del cabezal con el se podrá aplicar la corrección que involucra el tamaño de la columna de fluido. El sistema mencionado lo podemos visualizar en la figura 3-1.

Se emplearon seis capilares cuya entrada es un cono que tiene 90° de ángulo de entrada, (Figura 3-2a). Estos capilares tienen las siguientes dimensiones:

Capilar	D (in)	L (in)	L/D
1	0.048	0.455	9.4792
2	0.0502	1.0009	19.9383
3	0.0804	1.9997	24.8719
4	0.045	1.975	43.8889
5	0.0501	3.0063	60.006
6	0.03	2.0004	66.68

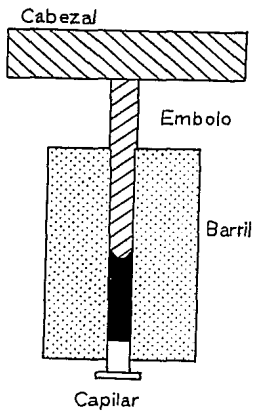


Figura 3-1. INSTRON.

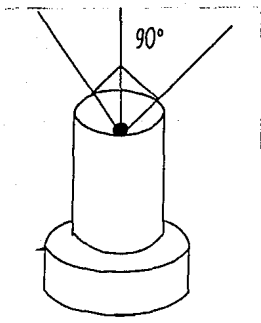


Figura 3-2a. Capilar de 90°.

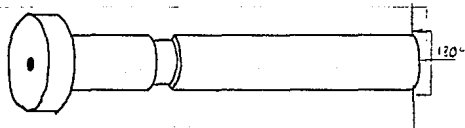


Figura 3-2b. Capilar de 180°.



Se emplearon dos capilares de entrada plana (180°), ver la figura 3-2b.

Se emplearon dos orificios de entrada de 180°:

Orificio	D (in)
1	0.05017
2	0.03

Se emplearon tres polímeros, el primero Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) fundido a 190°C. El segundo Etilen-Vinil-Acetato (EVA) fundido a 190°C y el tercero Poliestireno funcionalizado con ácido maléico fundido a 200°C.

A partir de la ecuación de Hagen-Poiseuille:

en donde: 
$$\tau_w = \eta \dot{\gamma}_w \quad (1)$$

$$\tau_w = \frac{\Delta P}{L} \frac{R_c}{2} \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4 Q_c}{\pi R_c^2} \quad (3)$$

Como el gasto másico es el mismo en el barril y en el capilar entonces:

$$\omega_b = \omega_c \quad (4)$$

Como es un fluido incompresible, a temperatura constante, el flujo volumétrico en el barril y en el capilar son los mismos:

$$Q_b = Q_c \quad (5)$$

$$Q_b = V_{embolo} \cdot A_{embolo} \quad (6)$$

$$Q_c = V_c \cdot A_{capilar} \quad (7)$$

$$V_c = V_{embolo} \cdot A_{embolo} / A_{capilar} \quad (8)$$

Para obtener la rapidez de corte:

$$A_{capilar} = \pi R_c^2 \quad (9)$$

$$Q_c = V_c \cdot \pi R_c^2 \quad (10)$$

$$\dot{\gamma}_{ap} = \frac{4 V_c \cdot \pi R_c^2}{\pi R_c^2} = \frac{4 V_c}{R_c} \quad (11)$$

### 3.1.2. METODO EXPERIMENTAL.

- 1) Se determinó el intervalo experimental de los valores que debe tomar  $\dot{\gamma}_{ap}$ . Los valores están comprendidos entre 1 y 1000  $s^{-1}$ , para el LLDPE y EVA. Para el Poliestireno se encuentran entre 42.7 y 427  $s^{-1}$  debido a que su gran viscosidad podrá dañar al equipo a velocidades elevadas. Despejamos  $V_c$  de la ecuación (11) y se hace lo mismo para  $V_{embolo}$  de la ecuación (8). Re-arrreglando:

$$V_{embolo} = \dot{\gamma}_{ap} * D_c^3 / D_b^2 * 75 \quad (12)$$

$\dot{\gamma}_{ap}$  se encuentra en  $s^{-1}$ ,  $D_c$  y  $D_b$  en cm, y 75 es el factor de conversión para pasar de cm/s a mm/min (600/8). Los intervalos tomados entre cada rapidez de deformación son logarítmicos, es decir que en una escala de  $\log \dot{\gamma}_{ap}$  son de 0.25 en 0.25, excepto en el caso del poliestireno.

- 2) Definida la velocidad del cabezal, se toman los datos de fuerza en  $k\bar{g}$  registrados por la celda para cada una de las velocidades. Se debe de tener cuidado que la temperatura permanezca constante durante cada corrida.
- 3) Se anotan los desplazamientos del cabezal.
- 4) Se repiten los mismos pasos para cada uno de los capilares y orificios. Se toman en cuenta únicamente las lecturas de fuerza más estables que se registren.

### 3.1.3. MANEJO DE DATOS.

- 1) Se transforma la fuerza de  $k\bar{g}$  a dinas multiplicando por el factor 980665.
- 2) Se calcula  $\Delta P$  dividiendo la fuerza entre el área de la sección del émbolo:

$$\Delta P = F / A_{embolo} \quad (13)$$

$\Delta P$  tiene unidades de dinas/cm<sup>2</sup>.  $A_{embolo} = 0.7088 \text{ cm}^2$ .

- 3) Se calcula el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) a partir de la ecuación (2), el cual tendrá unidades de dinas/cm<sup>2</sup>. Junto con lo anterior se calcula la rapidez de corte ( $\dot{\gamma}_{ap}$ ) con la ecuación (12) la cual tendrá unidades de  $s^{-1}$ .
- 4) Se obtienen los logaritmos del esfuerzo cortante y de la rapidez de corte, se trazan las curvas de  $\log \dot{\gamma}_{ap}$  contra  $\log \tau$  y se obtiene la pendiente de las rectas, lo cual representará el

exponente (b) para el polímero, Figura # 1:

$$b = d \log \dot{\gamma}_{ap} / d \log \tau$$

$\log \dot{\gamma}_a$

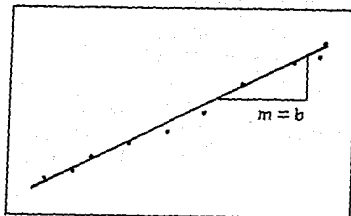


Figura # 1

$\log \tau$

- 5) Con la potencia (b) de las curvas anteriores, se corrige la fuerza que registra el equipo (F) que representa las pérdidas de presión en el barril con la siguiente ecuación:

$$F_{cor} = \frac{F}{1 + (L_b/L_c) * (D_c/D_b)^{(b+3)/3}} \quad (14)$$

en donde  $L_b$  es la altura de columna de líquido sobre el capilar en cm,  $L_c$  es la longitud del capilar en cm,  $D_c$  es el diámetro del capilar en cm y  $D_b$  es el diámetro del barril en cm. Como se aprecia en la ecuación (14) el orificio no necesita corrección de fuerza.

- 6) Se obtienen los logaritmos de la fuerza corregida ( $\log F_{cor}$ ) y de la velocidad en el capilar ( $\log V_c$ ), los cuales se grafican en la figura # 2. Todo esto se realiza para cada valor  $L/D$  del capilar. Estos datos pueden seguir un comportamiento lineal, y para cada capilar nos da línea recta paralela, la cual se traza procurando que pase por todos los puntos que sigan el comportamiento lineal.
- 7) Para cada capilar se obtiene un  $\log F_{cor}$  promedio para un  $\log V_c$  dado a partir de la línea recta más representativa de cada curva en la figura # 2. A partir de los datos anteriores se

trazan las curvas de la figura # 2 y con estas curvas se escoge el valor del logaritmo de diez velocidades para cada curva y se calcula la rapidez de deformación con la ecuación (11) la cual estará en  $s^{-1}$ .

$\log F_{cor}$

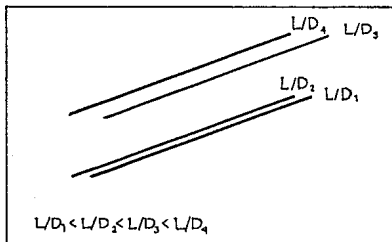


Figura # 2

$\log V_c$

- 8) Se determinan los logaritmos de las velocidades en el capilar, e encuentra también el logaritmo de la fuerza y calculamos la presión:

$$\Delta P = F_c / A_{embolo} \quad (15)$$

$$A_{embolo} = 0.708821 \text{ cm}^2$$

En la figura # 3 se aprecian las curvas de  $\log \Delta P$  v.s.  $\log \dot{\gamma}_{ap}$

$\log \Delta P$

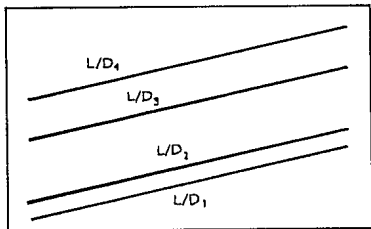
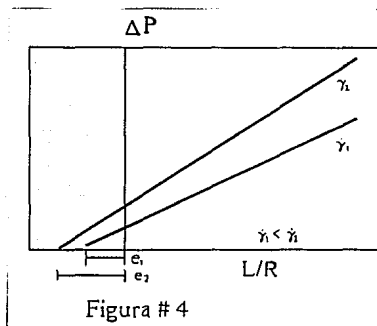


Figura # 3

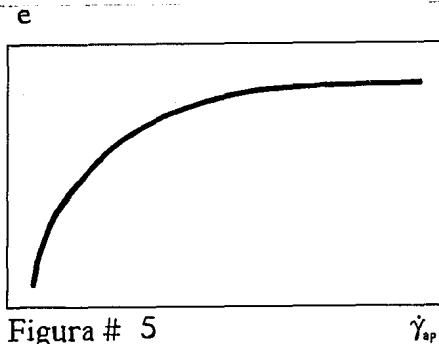
$\log \dot{\gamma}_{ap}$

$$L/D_1 < L/D_2 < L/D_3 < L/D_4$$

- 9) Basándose en un procedimiento como el anterior escogemos seis rapidezces de deformación que se encuentren dentro del intervalo experimental. Se obtiene un valor de  $\Delta P$  para cada  $L/R$  y para una  $\dot{\gamma}_{ap}$  dada y se construye la figura # 4. En la intersección en el eje de las abcisas corresponde a la corrección de Bagley para una  $\dot{\gamma}_{ap}$  dada.



- 10) Se hace una gráfica de  $e$  v.s.  $\dot{\gamma}_{ap}$  (figura # 5), si es necesario.



- 11) A continuación se corrige  $\tau$  con la siguiente ecuación:

$$\tau_w = \Delta P / 2 ( L/R + e ) \quad (16)$$

tomando los valores absolutos de "e" de la figura # 4.

- 12) Se hace una gráfica de  $\log \dot{\gamma}_{ap}$  v.s.  $\log \tau_w$ , se determina la pendiente de las rectas formadas (b), que se representan en la figura # 6, y aplicamos la corrección de Rabinowitsch a la rapidez de corte a partir de:

$$b = d [\log \dot{\gamma}_{ap}] / d [\log \tau_w]$$

$$\dot{\gamma}_w = \dot{\gamma}_{ap} ( 3 + b / 4 ) \quad (17)$$

$\log \dot{\gamma}_{ap}$

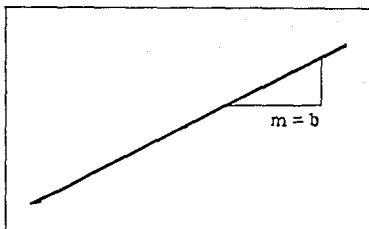


Figura # 6

$\log \tau_w$

- 13) Finalmente se calcula la viscosidad de corte con:

$$\eta = \tau_w / \dot{\gamma}_w \quad (18)$$

- 14) Para obtener n y K, se hace una gráfica de  $\log \eta$  v.s.  $\log \dot{\gamma}_w$  (figura #7) cuya pendiente es n-1 y ordenada al origen  $\log K$ .

$\log \eta$

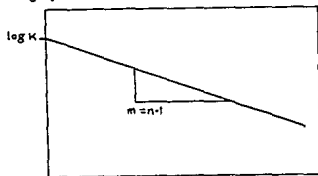


Figura # 7

$\log \dot{\gamma}_w$

### 3.2. VISCOSIDAD EXTENSIONAL.

El método experimental para determinar los parámetros de ley de potencia  $t$  y  $\ell$  de la viscosidad extensional, es similar al mencionado anteriormente para viscosidad cortante. Como se mencionó en la introducción, se deben de determinar de manera separada los parámetros de viscosidad de corte, ya que están involucrados en las expresiones resultantes del análisis de *Binding*, a partir de una expresión correspondiente al balance de energía mecánica para un fluido no Newtoniano que pase por una contracción. Esta contracción en nuestro caso son los orificios de  $L = 0$ . El balance de energía está expresado como:

$$Pe = \frac{2 K (1 + t)^2}{3 t^2 (1 + n)^2} \left( \frac{\ell t (3n + 1) n^t \text{Int}}{K} \right)^{1/(1+t)}$$

$$\left\{ 1 - \alpha^{3t(n+1)/(1+t)} \right\} \dot{\gamma}_{Ro}^{t(n+1)/(1+t)} \quad (1)$$

$Pe$  es la presión en exceso en el orificio  $n$  es la ley de potencia y  $K$  la constante en la expresión de la viscosidad cortante. Estos son los parámetros de la viscosidad de corte del fluido no Newtoniano:

$$Q = V_{\text{embolo}} * A_{\text{embolo}} \quad (2)$$

$$\dot{\gamma}_{Ro} = \frac{(3n + 1) Q}{n \pi Ro^3} \quad (3)$$

es la rapidez de corte en una contracción de radio  $Ro$  y  $Q$  el flujo volumétrico.

$$\alpha = Ro / R_1 \quad (4)$$

es la relación de contracción,  $Ro$  es el radio capilar y  $R_1$  es el radio del barril que contiene al fluido antes de la contracción.

$$\text{Int} = \int_0^1 \left( \text{abs} \left[ 2 - \frac{(3n + 1)}{n} \phi^{1/n+1} \right] \right)^{t-1} \phi d\phi \quad (5)$$

$\text{Int}$  es una integral de variable ( $\phi$ ) adimensional, que está evaluada en el intervalo  $[0;1]$ .

La relación para la rapidez de elongación máxima ( $\dot{\epsilon}_{\text{max}}$ ) es:

$$\dot{\epsilon}_{\max} = (n + 1) \left( \frac{K}{\ell t (3n + 1) n^t \text{Int}} \right)^{1/(t+1)} \dot{\gamma}_{\text{Ro}}^{(1+n)/(1+t)} \quad (6)$$

Así que la viscosidad extensional, está dada por:

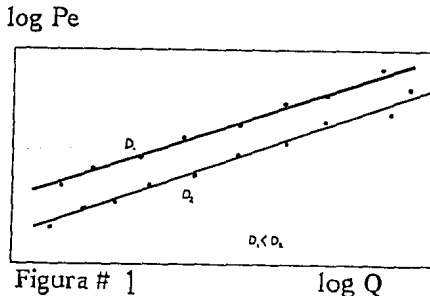
$$\eta_E = \ell \dot{\epsilon}_{\max}^{t-1} \quad (7)$$

### 3.2.1. METODO EXPERIMENTAL.

- 1) Establecer Q dentro de un mismo intervalo para ambos orificios éste corresponde al de las velocidades de cabezal definidas para la viscosidad de corte.
- 2) Medir la fuerza con la que fluye el polímero.
- 3) Al realizar el manejo de datos experimentales se comprueba que las mediciones son independientes del diámetro del orificio.

### 3.2.2. MANEJO DE DATOS.

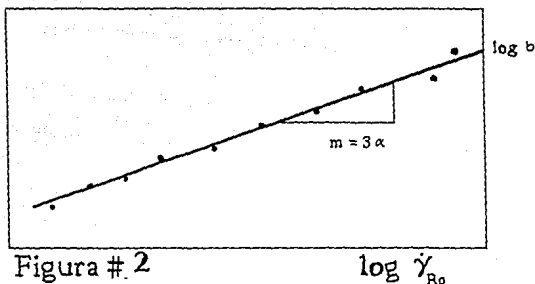
- 1) Hacer una gráfica de  $\log Pe$  v.s.  $\log Q$  (Figura # 1), a partir de los datos experimentales de la máquina INSTRON® para el orificio. En ésta figura se aprecian los datos de ambos orificios, apreciando las diferencias entre ellos.



- 2) Calcular  $\dot{\gamma}_{\text{Ro}}$  con la ecuación (3), y elaborar una gráfica de  $\log Pe$  v.s.  $\log \dot{\gamma}_{\text{Ro}}$  (Figura # 2). Con ésta gráfica se demuestra que los datos experimentales son independientes del diámetro de orificio.



log Pe



- 3) Obtener la pendiente de la recta que resulta en el punto anterior, la pendiente (m) es:

$$m = \frac{t (n + 1)}{(1 + t)} \quad (8)$$

- 3) Despejando t de la ecuación (7), conociendo de antemano la ley de potencia de la viscosidad de corte "n":

$$t = \frac{m}{1 + n - m} \quad (9)$$

- 4) La ordenada al origen de la recta del punto 1) (log b) es igual a:

$$\log b = \log \kappa + (1/1+t) \log \vartheta \quad (10)$$

en donde:

$$\kappa = \frac{2 K (1 + t)^2}{3 t^2 (1 + n)^2} \quad (11)$$

$$\vartheta = \frac{l t (3n + 1) n^l I_{nt}}{K} \quad (12)$$

- 5) Se calcula  $\kappa$  de (11), y a continuación se obtiene el logaritmo de la expresión.
- 6) La integral de la ecuación (5) se resuelve numéricamente con

- 10) Demostrar que los siguientes términos tienen los siguientes valores:

$$1 - \alpha^{3t} \frac{(n+1)}{(t+1)} = 1 - \alpha^{3n} \simeq 1 \quad (14)$$

$$\frac{\rho Q^3 (3n + 1) (1 - \alpha^4)}{2 (2n + 1) (5n + 3) \pi^2 R_0^4} \lll Pe \quad (15)$$

Estos valores fueron despreciados por sus valores numéricos.

Con el procedimiento anterior se deben de obtener los mismos valores de  $t$  y  $l$  para los dos orificios. En el siguiente capítulo se presentan los resultados experimentales y su manejo en base a los algoritmos mencionados.

## ***Capítulo IV***

# ***Resultados Experimentales y Discusión***

#### 4.1. VISCOSIDAD DE CORTE.

##### 4.1.1. POLIETILENO (LLDPE).

##### 4.1.1.1. DATOS EXPERIMENTALES Y CORRECCION DE ALTURAS.

D = 0.048 in = 0.12192 cm

L/D = 9.4791667

L = 0.455 in = 1.1557 cm

Primera Corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}^{-1}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.1506	2.3	0.0152	2255529	0.9999	83923
0.268	3.05	0.0271	2991028	1.7795	111289
0.4765	4.35	0.0482	4265892	3.1639	158724
0.847	6.75	0.0857	6619488	5.624	246296
1.506	8.5	0.1524	8335652	9.9997	310150
2.68	11.95	0.2712	11718946	17.795	436035
4.765	15.2	0.4822	14906108	31.639	554622
8.47	19.5	0.8571	19122967	56.24	711522
15.06	25	1.524	24516625	99.997	912207
26.8	34.5	2.7119	33832942	177.95	1258845

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}_{ap}$	log $\tau$	Lb (cm)	Fcor (dinas)	log Vc	log Fcor
-0.00001	4.9239	20.48	2098589	-1.817	6.3219
0.2503	5.0465	20.55	2782250	-1.5667	6.4444
0.5002	5.2006	20.65	3966780	-1.3168	6.5984
0.75	5.3915	20.85	6151172	-1.067	6.789
0.9999	5.4916	21.08	7739880	-0.817	6.8887
1.2503	5.6395	21.38	10870304	-0.5667	7.0362
1.5002	5.744	21.88	13803286	-0.3168	7.14
1.75	5.8522	22.88	17648487	-0.067	7.2467
1.9999	5.9601	23.78	22557848	0.183	7.3533
2.2503	6.1	16.88	31868627	0.4333	7.5034

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}^{-1}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.1506	2.4	0.0152	2353596	0.9999	87572
0.286	3.1	0.0271	3040061	1.7795	113114
0.4765	4.3	0.0482	4216859	3.1639	156900
0.847	6.2	0.0857	6080123	5.624	226227
1.506	8.7	0.1524	8531785	9.9997	317448
2.68	11.2	0.2712	10983448	17.795	408669
15.06	25	1.524	24516625	99.997	912207
84.7	53.5	8.571	52465577	562.4	1952123

$$b = 1.803702$$

log $\dot{\gamma}_{ap}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
-0.00001	4.9424	25.88	2150381	-1.817	6.3325
0.2503	5.0535	26.7	2776464	-1.5667	6.4435
0.5002	5.1956	26.13	3849555	-1.3168	6.5854
0.75	5.3545	26.38	5545900	-1.067	6.744
0.9999	5.5017	26.88	7769212	-0.817	6.8904
1.2503	5.6114	27.38	9985143	-0.5667	6.9994
1.9999	5.9601	15.88	23172912	0.183	7.365
2.75	6.2905	8.38	50907806	0.933	7.7068

$$D = 0.0502 \text{ in} = 0.127508 \text{ cm}$$

$$L/D = 19.938247$$

$$L = 1.0009 \text{ in} = 2.542286 \text{ cm}$$

Primera Corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap_1}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.1722	2.65	0.0159	2598762	0.9996	45971
0.3065	3.8	0.0284	3726527	1.7791	65921
0.545	5.88	0.0504	5766310	3.1635	102003
0.969	8.6	0.0896	8433719	5.6247	149188
1.722	12.2	0.1593	11964113	9.9956	211639
3.065	17	0.2836	16671305	17.791	294907
5.45	23.5	0.5042	23045627	31.635	407666
9.69	31.5	0.8965	30890947	56.247	546446
17.22	42	1.5931	41187930	99.956	728595
30.65	56	2.8356	54917240	177.91	971459
54.5	75	5.0422	73549875	316.35	1301061

$$b = 1.803702$$

log $\dot{\gamma}_{ap}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
-0.0002	4.6625	20.21	2504106	-1.7977	6.3987
0.2502	4.819	20.24	3590599	-1.5473	6.5552
0.5002	5.0086	20.29	5555479	-1.2974	6.7447
0.7501	5.1737	20.39	8123897	-1.0475	6.9098
0.9998	5.3256	20.54	11521485	-0.7977	7.0615
1.2502	5.4697	20.79	16047303	-0.5473	7.2054
1.5002	5.6103	21.19	22167073	-0.2974	7.3457
1.7501	5.7376	21.69	29686606	-0.0475	7.4726
1.9998	5.8625	23.19	39475708	0.2023	7.5963
2.2502	5.9874	24.71	52491250	0.4527	7.7201
2.5002	6.1143	26.71	70050316	0.7026	7.8454

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.1722	1.23	0.0159	1206217	0.9996	21337
0.969	8.6	0.0896	8433719	5.6247	149188
1.722	12.4	0.1593	12160246	9.9956	215109
3.065	17.5	0.2836	17161637	17.791	303581
5.45	23.5	0.5042	23045627	31.635	407666
9.69	31.5	0.8965	30890947	56.247	546446
17.22	41	1.5931	40207265	99.956	711247
30.65	55	2.8356	53936575	177.91	954112

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}_{ap}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
-0.0002	4.3291	33.15	1135795	-1.7977	6.0553
0.7501	5.1737	18.57	8150624	-1.0475	6.9112
0.9998	5.3327	18.67	11749938	-0.7977	7.07
1.2502	5.4823	18.91	16575385	-0.5473	7.2195
1.5002	5.6103	19.39	22239090	-0.2974	7.3471
1.7501	5.7375	20.09	29772229	-0.0475	7.4738
1.9998	5.852	21.19	38674468	0.2023	7.5874
2.2502	5.9796	23.2	51693453	0.4527	7.7134

D = 0.0804 in = 0.204216 cm

L/D = 24.871891

L = 1.9997 in = 5.079238

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.708	4.1	0.0255	4020726	1.0003	57016
1.258	6	0.0454	5883990	1.7774	83438
2.24	8.8	0.0808	8629852	3.1649	122376
3.98	16.5	0.1435	16180972	5.6234	229456
7.08	17.8	0.2554	17455837	10.004	247534
12.58	24.5	0.4537	24026292	17.774	340707
22.4	34	0.8079	33342610	31.649	472818
125.8	76.5	4.5373	75020872	177.74	1063839

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}_{ap}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
0.0001	4.756	6.43	3937631	-1.5929	6.5952
0.2498	4.9214	6.52	5760721	-1.3432	6.7605
0.5004	5.0977	6.66	8445258	-1.0926	6.9266
0.75	5.3607	6.88	15823679	-0.843	7.1993
1.0002	5.3936	7.25	17050146	-0.5929	7.2317
1.2498	5.5324	7.8	23426595	-0.3432	7.3697
1.5004	5.6747	8.84	32402541	-0.0926	7.5106
2.2498	6.0269	23.1	69734157	0.6568	7.8434

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ep}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.708	4.1	0.0255	4020726	1.0003	57016
1.258	5.95	0.0454	5834956	1.7774	82743
2.24	8.65	0.0808	8482752	3.1649	120290
3.98	12.2	0.1435	11964113	5.6234	169658
7.08	17	0.2554	16671305	10.003	236409
12.58	23.2	0.4537	22751428	17.774	322629
22.4	31.5	0.8079	30890947	31.649	438052
39.8	42	1.4355	41187930	56.234	584069

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}_{ep}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
0.0002	4.756	6.74	3933712	-1.5929	6.5948
0.2498	4.9177	6.81	5707397	-1.3432	6.7564
0.5004	5.0802	6.91	8294645	-1.0926	6.9188
0.75	5.2296	7.1	11691677	-0.843	7.0679
1.0001	5.3737	7.35	16278629	-0.5929	7.2116
1.2498	5.5087	7.9	22176454	-0.3432	7.3459
1.5004	5.6415	8.65	30038204	-0.0926	7.4777
1.75	5.7665	9.64	39924799	0.157	7.6012

D = 0.045 in = 0.1143 cm

L/D = 43.888889

L = 1.975 in = 5.0165 cm

Primera Corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ep}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.1242	5	0.0143	4903325	1.0009	39404
0.2205	7.6	0.0254	7453054	1.7769	59894
0.3925	10.8	0.0452	10591182	3.1629	85112
0.698	15.15	0.0804	14857074	5.6247	119394
1.242	21	0.143	20593965	10.009	165496
2.205	28.5	0.2539	27948952	17.769	224602
3.925	38	0.4519	37265270	31.629	299470
6.98	50	0.8036	49033250	56.247	394039
12.42	66.5	1.43	65214222	100.09	524072
39.25	115	4.519	1.1*10 <sup>8</sup>	316.29	906289
69.8	143	8.0364	1.4*10 <sup>8</sup>	562.47	1126951

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}_{ep}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log V <sub>c</sub>	log F <sub>cor</sub>
0.0004	4.5955	7.75	4876552	-1.8447	6.6881
0.2497	4.7774	7.82	7411994	-1.5954	6.8699
0.5001	4.93	7.92	10532092	-1.345	7.0225
0.7501	5.077	8.12	14772103	-1.0949	7.1694
1.0004	5.2188	8.32	20473299	-0.8447	7.3112
1.2497	5.3514	8.62	27779323	-0.5954	7.4437
1.5001	5.4764	9.12	37026062	-0.345	7.5685
1.7501	5.5955	10.12	48684237	-0.0949	7.6874
2.0004	5.7194	11.62	6468179 <sub>8</sub>	0.1553	7.8108
2.5001	5.9573	9.63	1.1*10 <sup>8</sup>	0.655	8.0493
2.7501	6.0519	7.6	1.4*10 <sup>8</sup>	0.9051	8.1445

Segunda Corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	V <sub>c</sub> (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ep}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.1242	7	0.0143	6864655	1.0009	55165
0.2205	9.6	0.0254	9414384	1.7769	75655
0.3925	12.8	0.0452	12552512	3.1629	100874
0.698	17.4	0.0804	17063571	5.6247	137126
2.205	32	0.2539	31381280	17.769	252185
3.925	42.5	0.4519	41678262	31.629	334933
6.98	55	0.8036	53936575	56.247	433443
12.42	73	1.43	71588545	100.09	575297
22.05	91	2.5387	8924051 <sub>8</sub>	177.69	717151
39.25	117	4.519	1.1*10 <sup>8</sup>	316.29	922051

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}_{ep}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log V <sub>c</sub>	log F <sub>cor</sub>
0.0004	4.7417	16.29	6786342	-1.8447	6.8316
0.2497	4.8788	16.33	9306723	-1.5954	6.9688
0.5001	5.0038	16.42	12408183	-1.345	7.0937
0.7501	5.1371	16.6	16865248	-1.0949	7.227
1.2497	5.4017	17.67	30993328	-0.5954	7.4913
1.5001	5.525	18.32	41144304	-0.345	7.6143
1.7501	5.6369	19.32	53208360	-0.0949	7.726
2.0004	5.7599	20.62	70557906	0.1553	7.8485
2.2497	5.8556	13.12	8841874 <sub>8</sub>	0.4046	7.9465
2.5001	5.9648	9.11	1.1*10 <sup>8</sup>	0.655	8.0569



D = 0.0501 in = 0.127254 cm

L/D = 60.005988

L = 3.0063 in = 7.636002 cm

## Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{sp}^1$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.171	8.5	0.0159	8335652	0.9985	48995
1.71	35.5	0.1588	34813607	9.9855	204624
3.05	48	0.2833	47071920	17.81	276675
5.42	63.5	0.5034	62272227	31.65	366018
30.5	140	2.833	1.4*10 <sup>8</sup>	178.1	806969
54.2	182	5.0345	1.8*10 <sup>8</sup>	316.5	1049060
96.3	235	8.945	2.3*10 <sup>8</sup>	562.34	1354555
171	395	15.886	3.9*10 <sup>8</sup>	998.55	2276806

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}_{sp}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
-0.0006	4.6901	20.45	8231385	-1.7991	6.9155
0.9994	5.311	20.87	34369309	-0.7991	7.5362
1.2507	5.442	21.15	46463223	-0.5477	7.6671
1.5004	5.5635	21.75	61444431	-0.298	7.7885
2.2507	5.9069	9.6	1.4*10 <sup>8</sup>	0.4523	8.1351
2.5004	6.0208	11.6	1.8*10 <sup>8</sup>	0.702	8.2485
2.75	6.1318	16.08	2.3*10 <sup>8</sup>	0.9516	8.3583
2.9994	6.3573	1.6	3.9*10 <sup>8</sup>	1.2009	8.5877

## Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{sp}^1$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.542	16.8	0.0503	16475172	3.165	96836
0.963	24.2	0.0894	23732093	5.6234	139490
1.71	34	0.1588	33342610	9.9855	195978
9.63	83.8	0.8945	82179727	56.234	483029
17.1	110	1.5884	1.1*10 <sup>8</sup>	99.855	634047

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}_{sp}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
0.5004	4.986	14.85	16325009	-1.298	7.2129
0.75	5.1445	14.98	23513911	-1.0484	7.3713
0.9994	5.2922	15.2	33031614	-0.7991	7.5189
1.75	5.684	16.6	81343332	-0.0484	7.9103
1.9994	5.8021	17.6	1.1*10 <sup>8</sup>	0.2009	8.0282

D = 0.03 in = 0.0762cm  
 L = 2.0004 in = 5.081016

L/D = 66.68

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}^{ap}_1$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.0654	14.4	0.0169	14121576	1.7787	74695
0.1164	20.5	0.0302	20103632	3.1603	106336
0.207	28.5	0.0536	27948952	5.6298	147834
0.3675	38.5	0.0952	37755602	9.9949	199705
1.162	68.6	0.301	67273619	31.603	355838
2.07	91	0.5362	89240515	56.298	472030
3.675	119.5	0.952	1.2*10 <sup>8</sup>	99.949	619863
6.54	156	1.6942	1.5*10 <sup>8</sup>	177.87	809200
11.62	202	3.0102	2*10 <sup>8</sup>	316.03	1047802
20.7	256	5.3636	2.5*10 <sup>8</sup>	562.98	1327907

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}^{ap}$	log $\tau$	Lb (cm)	Fcor (dinas)	log Vc	log Fcor
0.2502	4.8733	10.49	14086474	-1.771	7.1488
0.4997	5.0267	10.52	20053519	-1.5214	7.3022
0.7505	5.1698	10.57	27878952	-1.2706	7.4453
0.9998	5.3004	10.6	37660773	-1.0214	7.5759
1.4997	5.5513	10.81	67101311	-0.5214	7.8267
1.7505	5.674	11.1	89005827	-0.2706	7.9494
1.9998	5.7923	11.65	1.2*10 <sup>8</sup>	-0.0214	8.0677
2.2501	5.9081	12.5	1.5*10 <sup>8</sup>	0.229	8.1834
2.4997	6.0203	13.75	2*10 <sup>8</sup>	0.4786	8.2955
2.7505	6.1232	15.45	2.5*10 <sup>8</sup>	0.7294	8.3982

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}^{ap}_1$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.0368	7.35	0.0095	7207887	1.0008	38125
0.207	29.3	0.0536	28733484	5.6298	151983
0.3675	39.5	0.0952	38736267	9.9949	204892
2.07	80	0.5362	78453200	56.298	414971

b = 1.803702

log $\dot{\gamma}^{ap}$	log $\tau$	Lb (cm)	Fcor (dinas)	log Vc	log Fcor
0.0004	4.5812	29.88	7157087	-2.0208	6.8547
0.7505	5.1818	29.42	28534071	-1.2706	7.4554
0.9998	5.3115	29.25	38468976	-1.0214	7.5851
1.7505	5.618	27.6	77942189	-0.2706	7.8918

## 4.1.1.2. CORRECCION DE BAGLEY.

L/D = 9.4792		L/D = 19.9382		L/D = 24.8719	
log Vc	log F <sub>corn</sub>	log Vc	log F <sub>corn</sub>	log Vc	log F <sub>corn</sub>
-0.317	7.0101	-0.2976	7.3331	-0.093	7.4291
-0.217	7.0656	-0.1976	7.3885	0.007	7.4845
-0.117	7.121	-0.0976	7.4439	0.107	7.54
-0.017	7.1765	0.0024	7.4994	0.207	7.5954
0.083	7.2319	0.1024	7.5548	0.307	7.6508
0.183	7.2874	0.2024	7.6103	0.407	7.7063
0.283	7.3428	0.3024	7.6657	0.507	7.7617
0.383	7.3982	0.4024	7.7212	0.607	7.8172
0.483	7.4537	0.5024	7.7766	0.707	7.8726
0.583	7.5091	0.6024	7.832	0.807	7.9281
0.683	7.5646	0.7024	7.8875	0.907	7.9835

L/D = 43.8889		L/D = 60		L/D = 66.7	
log Vc	Log F <sub>corn</sub>	log Vc	log F <sub>corn</sub>	log Vc	log F <sub>corn</sub>
-0.345	7.6757	-0.2984	7.8116	-0.5211	7.8574
-0.245	7.7312	-0.1984	7.867	-0.4211	7.9128
-0.145	7.7866	-0.0984	7.9225	-0.3211	7.9683
-0.045	7.8421	0.0016	7.9779	-0.2211	8.0237
0.055	7.8975	0.1016	8.0333	-0.1211	8.0791
0.155	7.9529	0.2016	8.0888	-0.0211	8.1346
0.255	8.0084	0.3016	8.1442	0.0789	8.19
0.355	8.0638	0.4016	8.1997	0.1789	8.2455
0.455	8.1193	0.5016	8.2551	0.2789	8.3009
0.555	8.1747	0.6016	8.3105	0.3789	8.3563
0.655	8.2301	0.7016	8.366	0.4789	8.4118

L/R = 18.9583

log Vc	$\frac{4Vc}{R}$ (s <sup>-1</sup> )	log F	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	log $\dot{\gamma}$	log $\Delta P$
-0.317	31.623	7.0101	14441353	1.5	7.1596
-0.217	39.811	7.0656	16407765	1.6	7.215
-0.117	50.119	7.121	18641934	1.7	7.2705
-0.017	63.096	7.1765	21180319	1.8	7.3259
0.083	79.433	7.2319	24064344	1.9	7.3814
0.183	100	7.2874	27341073	2	7.4368
0.283	125.893	7.3428	31063979	2.1	7.4923
0.383	158.489	7.3982	35293816	2.2	7.5477
0.483	199.526	7.4537	40099610	2.3	7.6031
0.583	251.189	7.5091	45559786	2.4	7.6586
0.683	316.228	7.5646	51763450	2.5	7.714

L/R = 39.87649

log Vc	4Vc/R (s)	log F	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	log $\dot{\gamma}$	log $\Delta P$
-0.2976	31.623	7.3331	30375589	1.5	7.4825
-0.1976	39.811	7.3885	34511691	1.6	7.538
-0.0976	50.119	7.4439	39210987	1.7	7.5934
0.0024	63.096	7.4994	44550164	1.8	7.6488
0.1024	79.433	7.5548	50616352	1.9	7.7043
0.2024	100	7.6103	57508544	2	7.7597
0.3024	125.893	7.6657	65339213	2.1	7.8152
0.4024	158.489	7.7212	74236149	2.2	7.8706
0.5024	199.526	7.7766	84344538	2.3	7.9261
0.6024	251.189	7.832	9582933 <sub>9</sub>	2.4	7.9815
0.7024	316.228	7.8875	1.1*10 <sup>8</sup>	2.5	8.0369

L/R = 49.74378

log Vc	4Vc/R (s)	log F	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	log $\dot{\gamma}$	log $\Delta P$
-0.093	31.623	7.4291	37891914	1.5	7.5785
0.007	39.811	7.4845	43051479	1.6	7.634
0.107	50.119	7.54	48913597	1.7	7.6894
0.207	63.096	7.5954	55573933	1.8	7.7449
0.307	79.433	7.6508	63141176	1.9	7.8003
0.407	100	7.7063	71738815	2	7.8558
0.507	125.895	7.7617	81507154	2.1	7.9112
0.607	158.489	7.8172	9260560 <sub>2</sub>	2.2	7.9666
0.707	199.526	7.8726	1.1*10 <sup>8</sup>	2.3	8.0221
0.807	251.189	7.9281	1.2*10 <sup>8</sup>	2.4	8.0775
0.907	316.228	7.9835	1.4*10 <sup>8</sup>	2.5	8.133

L/R = 87.7778

log Vc	4Vc/R (s)	log F	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	log $\dot{\gamma}$	log $\Delta P$
-0.345	31.623	7.6757	66863996	1.5	7.8252
-0.245	39.811	7.7312	75968554	1.6	7.8806
-0.145	50.119	7.7866	86312837	1.7	7.9361
-0.045	63.096	7.8421	9806565 <sub>3</sub>	1.8	7.9915
0.055	79.433	7.8975	1.1*10 <sup>8</sup>	1.9	8.047
0.155	100	7.9529	1.3*10 <sup>8</sup>	2	8.1024
0.255	125.893	8.0084	1.4*10 <sup>8</sup>	2.1	8.1578
0.355	158.489	8.0638	1.6*10 <sup>8</sup>	2.2	8.2133
0.455	199.526	8.1193	1.9*10 <sup>8</sup>	2.3	8.2687
0.555	251.189	8.1747	2.1*10 <sup>8</sup>	2.4	8.3242
0.655	316.228	8.2301	2.4*10 <sup>8</sup>	2.5	8.3796

L/R = 120.0119

log Vc	4Vc/R (s <sup>-1</sup> )	log F	ΔP (dinas/cm <sup>2</sup> )	log γ	log ΔP
-0.2984	31.623	7.8116	91418131	1.5	7.961
-0.1984	39.811	7.867	1*10 <sup>B</sup>	1.6	8.0165
-0.0984	50.116	7.9225	1.2*10 <sup>B</sup>	1.7	8.0719
0.0016	63.096	7.9779	1.3*10 <sup>B</sup>	1.8	8.1274
0.1016	79.433	8.0333	1.5*10 <sup>B</sup>	1.9	8.1828
0.2016	100	8.0888	1.7*10 <sup>B</sup>	2	8.2382
0.3016	125.893	8.1442	2*10 <sup>B</sup>	2.1	8.2937
0.4016	158.489	8.1997	2.2*10 <sup>B</sup>	2.2	8.3491
0.5016	199.526	8.2551	2.5*10 <sup>B</sup>	2.3	8.4046
0.6016	251.189	8.3105	2.9*10 <sup>B</sup>	2.4	8.46
0.7016	316.228	8.366	3.3*10 <sup>B</sup>	2.5	8.5154

L/R = 133.36

log Vc	4Vc/R (s <sup>-1</sup> )	log F	ΔP (dinas/cm <sup>2</sup> )	log γ	log ΔP
-0.5211	31.623	7.8574	1*10 <sup>B</sup>	1.5	8.0068
-0.4211	39.811	7.9128	1.2*10 <sup>B</sup>	1.6	8.0623
-0.3211	50.119	7.9683	1.3*10 <sup>B</sup>	1.7	8.1177
-0.2211	63.096	8.0237	1.5*10 <sup>B</sup>	1.8	8.1732
-0.1211	79.433	8.0791	1.7*10 <sup>B</sup>	1.9	8.2286
-0.0211	100	8.1346	1.9*10 <sup>B</sup>	2	8.284
0.0789	125.893	8.19	2.2*10 <sup>B</sup>	2.1	8.3395
0.1789	158.489	8.2455	2.5*10 <sup>B</sup>	2.2	8.3949
0.2789	199.526	8.3009	2.8*10 <sup>B</sup>	2.3	8.4504
0.3789	251.189	8.3563	3.2*10 <sup>B</sup>	2.4	8.5058
0.4789	316.228	8.4118	3.6*10 <sup>B</sup>	2.5	8.5612

4.1.1.3. CORRECCION DE RABINOWISTCH.

γ̇ (s <sup>-1</sup> )	L/R = 18.9583	L/R = 39.8765	L/R = 49.7438
	ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )	ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )	ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )
300	50273472	1.1*10 <sup>B</sup>	1.3*10 <sup>B</sup>
250	45440132	95577662	1.2*10 <sup>B</sup>
200	40152371	84455514	1.1*10 <sup>B</sup>
100	27341073	57508544	71738815
50	18617438	39159463	48849324
30	14025668	29501248	36801220

γ̇ (s <sup>-1</sup> )	L/R = 87.7778	L/R = 120.012	L/R = 133.36
	ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )	ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )	ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )
300	2.3*10 <sup>B</sup>	3.2*10 <sup>B</sup>	3.5*10 <sup>B</sup>
250	2.1*10 <sup>B</sup>	2.9*10 <sup>B</sup>	3.2*10 <sup>B</sup>
200	1.9*10 <sup>B</sup>	2.5*10 <sup>B</sup>	2.8*10 <sup>B</sup>
100	1.3*10 <sup>B</sup>	1.7*10 <sup>B</sup>	1.9*10 <sup>B</sup>
50	86199421	1.2*10 <sup>B</sup>	1.3*10 <sup>B</sup>
30	64939360	88786719	98661794

4.1.1.4. LEY DE POTENCIA.

$\dot{\gamma} (\text{s}^{-1})$	$\tau_w (\text{dinas/cm}^2)$
300	1325893
250	1198421
200	1058963
100	721083
50	491009
30	369908

$\dot{\gamma} (\text{s}^{-1})$	$\log \dot{\gamma}$	$\log \tau_w$	$\dot{\gamma}_w (\text{s}^{-1})$
300	2.477	6.1225	360.28
250	2.3979	6.0786	300.23
200	2.301	6.0249	240.19
100	2	5.858	120.09
50	1.699	5.6911	60.056
30	1.4771	5.5681	36.028

$$b = 1.803702$$

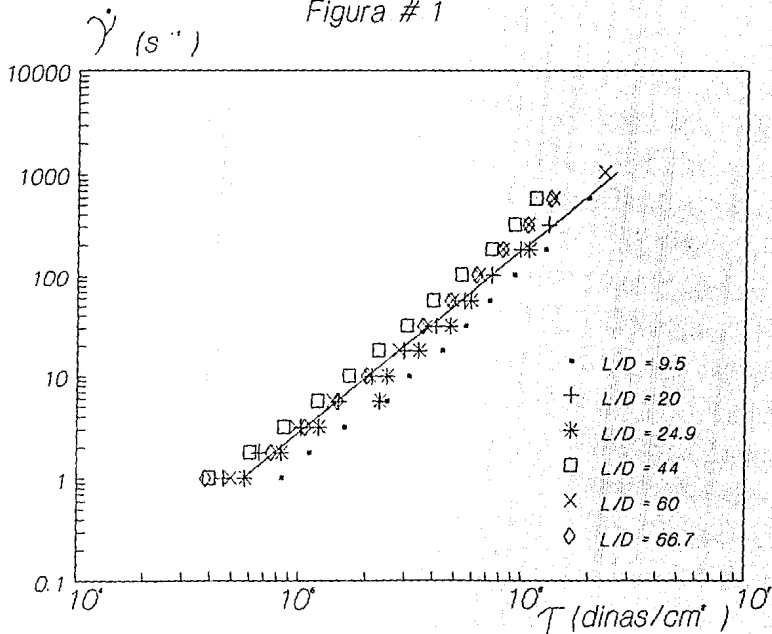
$\eta (\text{poises})$	$\log \dot{\gamma}$	$\log \eta$
3680.2	2.5566	3.5659
3991.7	2.4775	3.6011
4408.9	2.3805	3.6443
6004.4	2.0795	3.7785
8177.2	1.7785	3.9126
10267	1.5566	4.0115

Ley de potencia  $n = 0.554415$  y  $K = 50707.22$

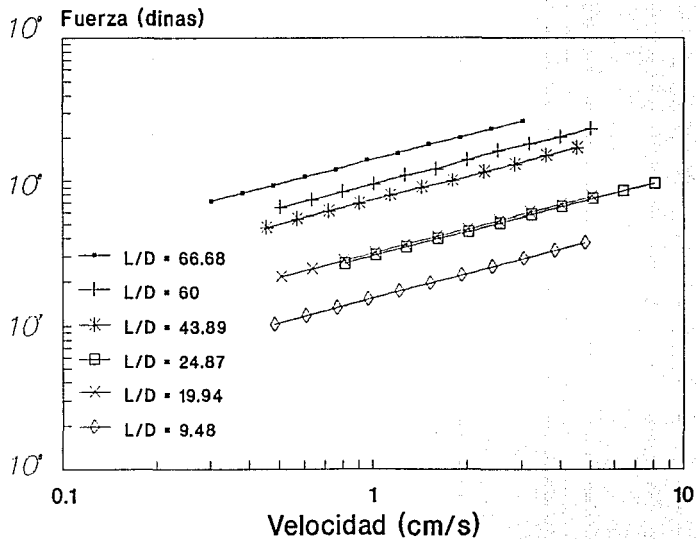
La corrección de Bagley "e", tiene valores con un orden de magnitud de  $10^{-5}$ , por lo que su tabla no se presenta, al igual que la Figura # 5.

# Polietileno (190°C)

Figura # 1



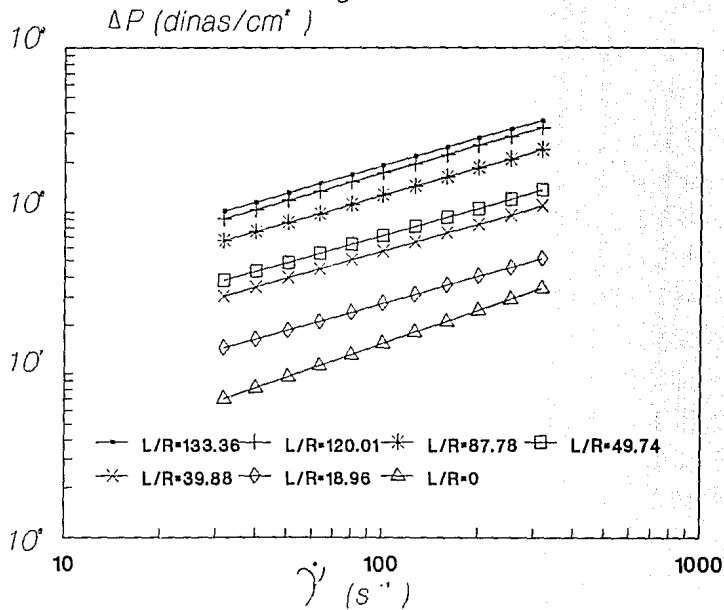
Polietileno (190 °C)  
Figura # 2





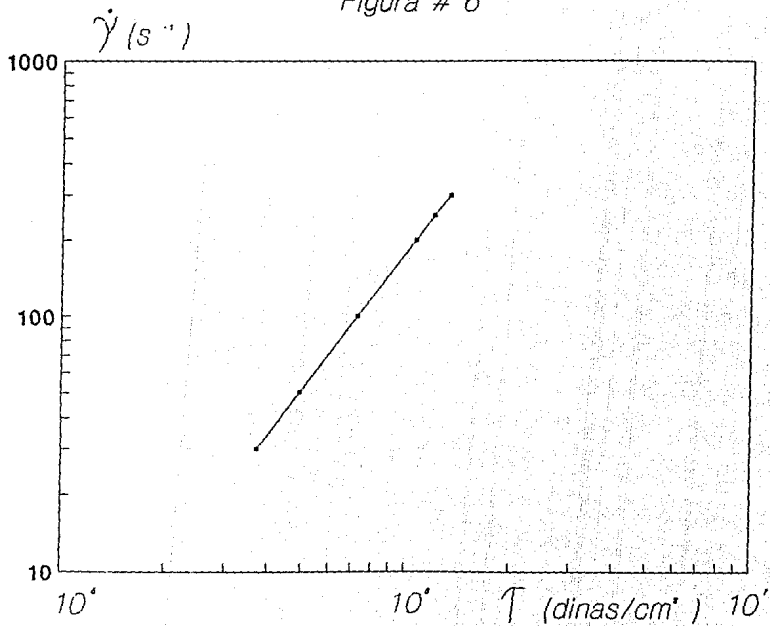
# Polietileno (190°C)

Figura # 3



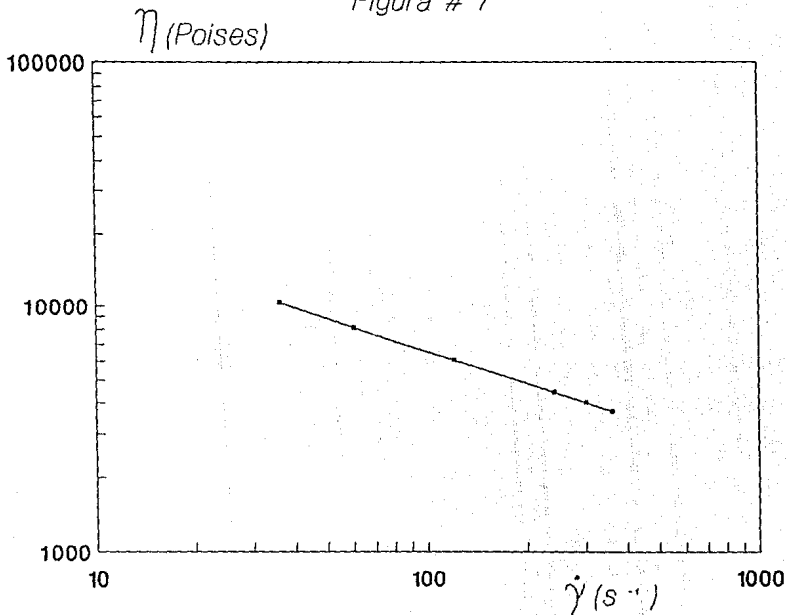
Polietileno (190 °C)

Figura # 6



Polietileno (190°C)

Figura # 7



#### 4.1.2. POLIESTIRENO FUNCIONALIZADO.

##### 4.1.2.1. DATOS EXPERIMENTALES Y CORRECCION POR ALTURAS.

D = 0.048in = 0.12192

L/D = 9.4791667

L = 0.455 in = 1.1557

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
1.072	86	0.1085	84337190	7.118	3137992
0.965	73	0.0977	71588545	6.4075	2663644
0.858	69	0.0868	67665885	5.697	2517691
0.75	64.5	0.0759	63252892	4.9799	2353494
0.643	60	0.0651	58839900	4.2695	2189297
0.536	53	0.0542	51975245	3.559	1933879
0.429	47.5	0.0434	46581587	2.8485	1733879
0.3215	41.5	0.0325	40697597	2.1347	1514263
0.2145	36.5	0.0217	35794272	1.4243	1331822
0.1072	25	0.0108	24516625	0.7118	912207

b = 2.075608

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	Fcor (dinas)	log Vc	log Fcor
0.8524	6.4967	26.88	73112504	-0.9647	7.864
0.8067	6.4255	26.18	62276461	-1.0103	7.7943
0.7556	6.401	25.68	59010652	-1.0614	7.7709
0.6972	6.3717	25.36	55250195	-1.1198	7.7423
0.6304	6.3403	24.98	51493151	-1.1866	7.7117
0.5513	6.2864	24.68	45553926	-1.2657	7.6585
0.4546	6.2388	24.48	40867547	-1.3624	7.6114
0.3293	6.1802	24.23	35750116	-1.4877	7.5533
0.1536	6.1244	24.08	31466554	-1.6634	7.4978
-0.1476	5.9601	23.98	21563261	-1.9647	7.3337

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
1.072	74	0.1085	72569210	7.118	2700132
0.965	70	0.0977	68646550	6.4075	2554179
0.858	67	0.0868	65704555	5.697	2444714
0.75	62.5	0.0759	61291562	4.9799	2280517
0.643	56.5	0.0651	55407572	4.2695	2061588
0.536	53	0.0542	51975245	3.559	1933879
0.429	47	0.0434	46091255	2.8485	1714949
0.3215	41.5	0.0325	40697597	2.1347	1514263
0.2145	35.5	0.0217	34813607	1.4243	1295334
0.1072	25.7	0.0108	25203090	0.7118	937749

b = 2.075608

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log V <sub>c</sub>	log F <sub>cor</sub>
0.8524	6.4314	16.13	66447583	-0.9647	7.8225
0.8067	6.4073	15.58	63037139	-1.0103	7.7996
0.7546	6.3882	15.18	60462393	-1.0614	7.7815
0.6972	6.358	14.83	56505431	-1.1198	7.7521
0.6304	6.3142	14.48	51175222	-1.1866	7.7091
0.5513	6.2864	14.18	48081168	-1.2657	7.682
0.4546	6.2343	13.93	42694412	-1.3624	7.6304
0.3293	6.1802	13.78	37728198	-1.4877	7.5767
0.1536	6.1124	13.65	32295749	-1.6634	7.5091
-0.1476	5.9721	13.58	23388977	-1.9647	7.369

D = 0.0502 in = 0.127508 cm

L/D = 19.93825

L = 1.0009 in = 2.542286 cm

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	V <sub>c</sub> (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{eR}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
1.23	166	0.1138	1.6*10 <sup>a</sup>	7.1397	2879683
1.108	148	0.1025	1.5*10 <sup>a</sup>	6.4315	2567428
0.984	143	0.091	1.4*10 <sup>a</sup>	5.7117	2480690
0.861	135	0.0797	1.3*10 <sup>a</sup>	4.9978	2341911
0.738	126	0.0683	1.2*10 <sup>a</sup>	4.2838	2185783
0.615	116	0.0569	1.1*10 <sup>a</sup>	3.5698	2012308
0.492	102	0.0455	1*10 <sup>a</sup>	2.8559	1769443
0.369	91	0.0341	89240515	2.1419	1578621
0.246	76.5	0.0228	75020872	1.4279	1327082
0.123	58	0.0114	56878570	0.714	1006154

b = 2.075608

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log V <sub>c</sub>	log F <sub>cor</sub>
0.8537	6.4593	25.9	1.5*10 <sup>a</sup>	-0.9439	8.1802
0.8083	6.4095	25.4	1.4*10 <sup>a</sup>	-0.9892	8.1309
0.7568	6.3946	24.6	1.3*10 <sup>a</sup>	-1.0408	8.117
0.6988	6.3696	24.3	1.2*10 <sup>a</sup>	-1.0988	8.0923
0.6318	6.3396	24	1.2*10 <sup>a</sup>	-1.1657	8.0627
0.5526	6.3037	23.8	1.1*10 <sup>a</sup>	-1.2449	8.027
0.4557	6.2478	23.6	93626399	-1.3418	7.9714
0.3308	6.1983	23.5	83552091	-1.4668	7.922
0.1547	6.1229	23.3	70276970	-1.6428	7.8468
-0.1463	6.0027	23.25	53289117	-1.9439	7.7266

$$b = 2.075608$$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
0.8524	6.4314	16.13	66447583	-0.9647	7.8225
0.8067	6.4073	15.58	63037139	-1.0103	7.7996
0.7546	6.3882	15.18	60462393	-1.0614	7.7815
0.6972	6.358	14.83	56505431	-1.1198	7.7521
0.6304	6.3142	14.48	51175222	-1.1866	7.7091
0.5513	6.2864	14.18	48081168	-1.2657	7.682
0.4546	6.2343	13.93	42694412	-1.3624	7.6304
0.3293	6.1802	13.78	37728198	-1.4877	7.5767
0.1536	6.1124	13.65	32295749	-1.6634	7.5091
-0.1476	5.9721	13.58	23388977	-1.9647	7.369

$$D = 0.0502 \text{ in} = 0.127508 \text{ cm}$$

$$L/D = 19.93825$$

$$L = 1.0009 \text{ in} = 2.542286 \text{ cm}$$

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
1.23	166	0.1138	1.6*10 <sup>a</sup>	7.1397	2879683
1.108	148	0.1025	1.5*10 <sup>a</sup>	6.4315	2567428
0.984	143	0.091	1.4*10 <sup>a</sup>	5.7117	2480690
0.861	135	0.0797	1.3*10 <sup>a</sup>	4.9978	2341911
0.738	126	0.0683	1.2*10 <sup>a</sup>	4.2838	2185783
0.615	116	0.0569	1.1*10 <sup>a</sup>	3.5698	2012308
0.492	102	0.0455	1*10 <sup>a</sup>	2.8559	1769443
0.369	91	0.0341	89240515	2.1419	1578621
0.246	76.5	0.0228	75020872	1.4279	1327082
0.123	58	0.0114	56878570	0.714	1006154

$$b = 2.075608$$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
0.8537	6.4593	25.9	1.5*10 <sup>B</sup>	-0.9439	8.1802
0.8083	6.4095	25.4	1.4*10 <sup>B</sup>	-0.9892	8.1309
0.7568	6.3946	24.6	1.3*10 <sup>B</sup>	-1.0408	8.117
0.6988	6.3696	24.3	1.2*10 <sup>B</sup>	-1.0988	8.0923
0.6318	6.3396	24	1.2*10 <sup>a</sup>	-1.1657	8.0627
0.5526	6.3037	23.8	1.1*10 <sup>B</sup>	-1.2449	8.027
0.4557	6.2478	23.6	93626399	-1.3418	7.9714
0.3308	6.1983	23.5	83552091	-1.4668	7.922
0.1547	6.1229	23.3	70276970	-1.6428	7.8468
-0.1463	6.0027	23.25	53289117	-1.9439	7.7266

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
1.23	158	0.1138	1.5*10 <sup>8</sup>	7.1397	2740903
1.108	149.5	0.1025	1.5*10 <sup>8</sup>	6.4315	2593449
0.984	140	0.091	1.4*10 <sup>8</sup>	5.7117	2428648
0.861	129.5	0.0797	1.3*10 <sup>8</sup>	4.9978	2246499
0.738	120	0.0683	1.2*10 <sup>8</sup>	4.2838	2081698
0.615	108	0.0569	1.1*10 <sup>8</sup>	3.5698	1873528
0.492	98.5	0.0455	96595502	2.8559	1708727
0.369	87	0.0341	85317855	2.1419	1509231
0.246	69.5	0.0228	68156217	1.4279	1205650
0.123	57.5	0.0114	56388237	0.714	997481

b = 2.075608

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	Fcor (dinas)	log Vc	log Fcor
0.8537	6.4379	19.5	1.5*10 <sup>8</sup>	-0.9439	8.1663
0.8083	6.4139	19.9	1.4*10 <sup>8</sup>	-0.9892	8.1418
0.7568	6.3854	20.35	1.3*10 <sup>8</sup>	-1.0408	8.1128
0.6988	6.3515	20.75	1.2*10 <sup>8</sup>	-1.0988	8.0784
0.6318	6.3184	21.2	1.1*10 <sup>8</sup>	-1.1657	8.0448
0.5526	6.2727	21.55	99688001	-1.2449	7.9986
0.4557	6.2327	21.95	90820087	-1.3418	7.9582
0.3308	6.1788	22.25	80151229	-1.4668	7.9039
0.1547	6.0812	22.6	63967920	-1.6428	7.806
-0.1463	5.9989	22.8	52894335	-1.9439	7.7234

D = 0.0804 in = 0.204216 cm

L/D = 24.87189

L = 1.9997 in = 5.079238 cm

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
5	227	0.1803	2.2*10 <sup>8</sup>	7.0646	3156753
4.5	221	0.1623	2.2*10 <sup>8</sup>	6.3581	3073314
4	199.5	0.1443	2*10 <sup>8</sup>	5.6517	2774327
3.5	178	0.1262	1.7*10 <sup>8</sup>	4.9452	2475339
3	160	0.1082	1.6*10 <sup>8</sup>	4.2388	2225024
2.5	146	0.0902	1.4*10 <sup>8</sup>	3.5323	2030334
2	132.5	0.0721	1.3*10 <sup>8</sup>	2.8258	1842598
1.5	116.5	0.0541	1.1*10 <sup>8</sup>	2.1194	1620095
1	97	0.0361	95124505	1.4129	1348921
0.5	69.5	0.018	68156217	0.7065	966495

$$b = 2.075608$$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>ceor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>ceor</sub>
0.8491	6.4992	23.9	2*10 <sup>8</sup>	-0.7439	8.3024
0.8033	6.4876	20.2	2*10 <sup>8</sup>	-0.7897	8.2974
0.7522	6.4432	18.8	1.8*10 <sup>8</sup>	-0.8408	8.2555
0.6942	6.3936	17.2	1.6*10 <sup>8</sup>	-0.8988	8.209
0.6272	6.3473	16.5	1.5*10 <sup>8</sup>	-0.9658	8.164
0.548	6.3076	14.8	1.3*10 <sup>8</sup>	-1.0449	8.1273
0.4511	6.2654	14.2	1.2*10 <sup>8</sup>	-1.1419	8.0863
0.3262	6.2095	13.7	1.1*10 <sup>8</sup>	-1.2668	8.0314
0.1501	6.13	13.4	89615364	-1.4429	7.9524
-0.1509	5.9852	13.2	64264496	-1.7439	7.808

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
4.5	194	0.1623	1.9*10 <sup>8</sup>	6.3581	2697842
4	188.5	0.1443	1.8*10 <sup>8</sup>	5.6517	2621356
3.5	180	0.1262	1.8*10 <sup>8</sup>	4.9452	2503152
3	169	0.1082	1.7*10 <sup>8</sup>	4.2388	2350182
2.5	160	0.0902	1.6*10 <sup>8</sup>	3.5323	2225024
2	147.5	0.0721	1.4*10 <sup>8</sup>	2.8258	2051194
1.5	131	0.0541	1.3*10 <sup>8</sup>	2.1194	1821738
1	108	0.0361	1.1*10 <sup>8</sup>	1.4129	1501891
0.5	75	0.018	73549875	0.7065	1042980

$$b = 2.075608$$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>ceor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>ceor</sub>
0.8033	6.431	18.1	1.8*10 <sup>8</sup>	-0.7897	8.2447
0.7522	6.4185	20.2	1.7*10 <sup>8</sup>	-0.8408	8.2283
0.6942	6.3985	22	1.6*10 <sup>8</sup>	-0.8988	8.205
0.6272	6.3711	23.6	1.5*10 <sup>8</sup>	-0.9658	8.1748
0.5481	6.3473	26.2	1.4*10 <sup>8</sup>	-1.0449	8.1463
0.4511	6.312	27.4	1.3*10 <sup>8</sup>	-1.1419	8.1089
0.3262	6.2605	28.2	1.1*10 <sup>8</sup>	-1.2668	8.056
0.1501	6.1766	28.9	93513350	-1.4429	7.9709
-0.1509	6.0183	29.5	64782380	-1.7439	7.8115



D = 0.045 in = 0.1143 cm

L/D = 43.888889

L = 1.975 in = 5.0165 cm

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.883	377	0.1017	3.7*10 <sup>B</sup>	7.1155	2971052
0.795	354	0.0915	3.5*10 <sup>B</sup>	6.4064	2789794
0.707	330	0.0814	3.2*10 <sup>B</sup>	5.6973	2600656
0.618	300	0.0712	2.9*10 <sup>B</sup>	4.9801	2364232
0.53	278	0.061	2.7*10 <sup>B</sup>	4.2709	2190855
0.4415	250	0.0508	2.5*10 <sup>B</sup>	3.5578	1970194
0.3535	228	0.0407	2.2*10 <sup>B</sup>	2.8486	1796817
0.265	196	0.0305	1.9*10 <sup>B</sup>	2.1355	1544632
0.1766	170	0.0203	1.7*10 <sup>B</sup>	1.4231	1339731
0.0883	128	0.0102	1.3*10 <sup>B</sup>	0.7116	1008739

b = 2.075608

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	Fcor (dinas)	log Vc	log Fcor
0.8522	6.4729	20.02	3.6*10 <sup>B</sup>	-0.9928	8.5582
0.8066	6.4456	17.02	3.4*10 <sup>B</sup>	-1.0384	8.5323
0.7557	6.4151	15.52	3.2*10 <sup>B</sup>	-1.0894	8.5025
0.6972	6.3737	14.62	2.9*10 <sup>B</sup>	-1.1478	8.4616
0.6305	6.3406	14.02	2.7*10 <sup>B</sup>	-1.2145	8.4288
0.5512	6.2945	13.72	2.4*10 <sup>B</sup>	-1.2939	8.3828
0.4546	6.2545	13.42	2.2*10 <sup>B</sup>	-1.3904	8.343
0.3295	6.1888	13.22	1.9*10 <sup>B</sup>	-1.5156	8.2774
0.1532	6.127	13.12	1.6*10 <sup>B</sup>	-1.6918	8.2156
-0.1478	6.0038	13.02	1.2*10 <sup>B</sup>	-1.9928	8.0924

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.883	385	0.1017	3.7*10 <sup>B</sup>	7.1155	3034098
0.795	360	0.0915	3.5*10 <sup>B</sup>	6.4064	2837079
0.707	335	0.0814	3.2*10 <sup>B</sup>	5.6973	2640060
0.618	305	0.0712	2.9*10 <sup>B</sup>	4.9801	2403636
0.53	280	0.061	2.7*10 <sup>B</sup>	4.2709	2206617
0.4415	254	0.0508	2.5*10 <sup>B</sup>	3.5578	2001717
0.3535	225	0.0407	2.2*10 <sup>B</sup>	2.8486	1773174
0.265	199	0.0305	1.9*10 <sup>B</sup>	2.1355	1568274
0.1766	169	0.0203	1.7*10 <sup>B</sup>	1.4231	1331851
0.0883	125	0.0102	1.3*10 <sup>B</sup>	0.7116	985097

$$b = 2.075608$$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	Fcor (dinas)	log Vc	log Fcor
0.8522	6.482	10.02	3.7*10 <sup>8</sup>	-0.9928	8.5682
0.8066	6.4529	7.32	3.5*10 <sup>8</sup>	-1.0384	8.5441
0.7557	6.4216	5.92	3.3*10 <sup>8</sup>	-1.0894	8.5185
0.6972	6.3809	5.02	3*10 <sup>8</sup>	-1.1478	8.4771
0.6305	6.3437	4.32	2.7*10 <sup>8</sup>	-1.2145	8.4314
0.5512	6.3014	3.72	2.5*10 <sup>8</sup>	-1.2939	8.3979
0.4546	6.2488	3.22	2.2*10 <sup>8</sup>	-1.3904	8.3424
0.3295	6.1954	2.82	1.9*10 <sup>8</sup>	-1.5156	8.2788
0.1532	6.1245	2.62	1.7*10 <sup>8</sup>	-1.6918	8.2304
-0.1478	5.9935	2.42	1.2*10 <sup>8</sup>	-1.9928	8.0792

#### 4.1.2.2. CORRECCION DE BAGLEY.

$$L/R = 18.958333$$

log Vc	4Vc/R (s <sup>-1</sup> )	log Fcor	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	log $\dot{\gamma}$	log $\Delta P$
-1.667	1.4125	7.5463	49629125	0.15	7.6957
-1.592	1.6788	7.5824	53934990	0.225	7.7319
-1.517	1.9953	7.6185	58614437	0.3	7.768
-1.442	2.3714	7.6547	63699876	0.375	7.8041
-1.367	2.8184	7.6908	69226532	0.45	7.8403
-1.292	3.3497	7.7269	75232686	0.525	7.8764
-1.217	3.9811	7.7631	81759939	0.6	7.9125
-1.142	4.7315	7.7992	88853502	0.675	7.9487
-1.067	5.6234	7.8353	96562509	0.75	7.9848
-0.992	6.6834	7.8715	1*10 <sup>9</sup>	0.825	8.0209
-0.917	7.9433	7.9076	1.1*10 <sup>9</sup>	0.9	8.0571

$$L/R = 39.87649$$

log Vc	4Vc/R (s <sup>-1</sup> )	log Fcor	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	log $\dot{\gamma}$	log $\Delta P$
-1.6476	1.4125	7.8692	10 <sup>8</sup>	0.15	8.0187
-1.5726	1.6788	7.9053	1.1*10 <sup>8</sup>	0.225	8.0548
-1.4976	1.9953	7.9415	1.2*10 <sup>8</sup>	0.3	8.0909
-1.4226	2.3714	7.9776	1.3*10 <sup>8</sup>	0.375	8.1271
-1.3476	2.8184	8.0137	1.5*10 <sup>8</sup>	0.45	8.1632
-1.2726	3.3497	8.0499	1.6*10 <sup>8</sup>	0.525	8.1993
-1.1976	3.9811	8.086	1.7*10 <sup>8</sup>	0.6	8.2355
-1.1226	4.7315	8.1221	1.9*10 <sup>8</sup>	0.675	8.2716
-1.0476	5.6234	8.1583	2*10 <sup>8</sup>	0.75	8.3077
-0.9726	6.6834	8.1944	2.2*10 <sup>8</sup>	0.825	8.3439
-0.8976	7.9433	8.2305	2.4*10 <sup>8</sup>	0.9	8.38

L/R = 49.74378

log Vc	4Vc/R (s <sup>-1</sup> )	log Fcor	ΔP (dinas/cm <sup>2</sup> )	log γ̇	log ΔP
-1.443	1.4125	7.9652	1.3*10 <sup>B</sup>	0.15	8.1147
-1.368	1.6788	8.0013	1.4*10 <sup>B</sup>	0.225	8.1508
-1.293	1.9953	8.0375	1.5*10 <sup>B</sup>	0.3	8.1869
-1.218	2.3714	8.0736	1.7*10 <sup>B</sup>	0.375	8.2231
-1.143	2.8184	8.1097	1.8*10 <sup>B</sup>	0.45	8.2592
-1.068	3.3497	8.1459	2*10 <sup>B</sup>	0.525	8.2953
-0.993	3.9811	8.182	2.1*10 <sup>B</sup>	0.6	8.3315
-0.918	4.7315	8.2182	2.3*10 <sup>B</sup>	0.675	8.3676
-0.843	5.6234	8.2543	2.5*10 <sup>B</sup>	0.75	8.4037
-0.768	6.6834	8.2904	2.8*10 <sup>B</sup>	0.725	8.4399
-0.693	7.9433	8.3266	3*10 <sup>B</sup>	0.9	8.476

L/R = 87.77778

log Vc	4Vc/R (s <sup>-1</sup> )	log Fcor	ΔP (dinas/cm <sup>2</sup> )	log γ̇	log ΔP
-1.695	1.4125	8.2119	2.3*10 <sup>B</sup>	0.15	8.3613
-1.62	1.6788	8.248	2.5*10 <sup>B</sup>	0.225	8.3975
-1.545	1.9953	8.2841	2.7*10 <sup>B</sup>	0.3	8.4336
-1.47	2.3714	8.3203	2.9*10 <sup>B</sup>	0.375	8.4697
-1.395	2.8184	8.3564	3.2*10 <sup>B</sup>	0.45	8.5059
-1.32	3.3497	8.3925	3.5*10 <sup>B</sup>	0.525	8.542
-1.245	3.9811	8.4287	3.8*10 <sup>B</sup>	0.6	8.5781
-1.17	4.7315	8.4648	4.1*10 <sup>B</sup>	0.675	8.6143
-1.095	5.6234	8.5009	4.5*10 <sup>B</sup>	0.75	8.6504
-1.02	6.6834	8.5376	4.9*10 <sup>B</sup>	0.825	8.6865
-0.945	7.9433	8.5732	5.3*10 <sup>B</sup>	0.9	8.7227

γ̇ (s <sup>-1</sup> )	L/R = 18.95833		L/R = 39.87649	
	ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )		ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )	
7.9	1.1*10 <sup>B</sup>	2.4*10 <sup>B</sup>		
7	1.1*10 <sup>B</sup>	2.3*10 <sup>B</sup>		
5	91247921	1.9*10 <sup>B</sup>		
3	71341007	1.5*10 <sup>B</sup>		
2	58681450	1.2*10 <sup>B</sup>		
1.4	49416406	10 <sup>B</sup>		

γ̇ (s <sup>-1</sup> )	L/R = 49.74378		L/R = 87.77778	
	ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )		ΔP(dinas/cm <sup>2</sup> )	
7.9	3*10 <sup>B</sup>	5.3*10 <sup>B</sup>		
7	2.8*10 <sup>B</sup>	5*10 <sup>B</sup>		
5	2.4*10 <sup>B</sup>	4.2*10 <sup>B</sup>		
3	1.9*10 <sup>B</sup>	3.3*10 <sup>B</sup>		
2	1.5*10 <sup>B</sup>	2.7*10 <sup>B</sup>		
1.4	1.3*10 <sup>B</sup>	2.3*10 <sup>B</sup>		

Los valores de "e" tienen un orden de magnitud de  $10^{-9}$ , por lo que su tabla no se presenta, al igual que la figura # 5.

$\dot{\gamma} (s^{-1})$	$\tau_w (dinas/cm^2)$
7.9	2999874
7	2830058
5	2406538
3	1881521
2	1547642
1.4	1303289

#### 4.1.2.3. CORRECCION DE RABINOWISTCH.

$$b = 2.075608$$

$\dot{\gamma}_{ap} (s^{-1})$	$\log \dot{\gamma}_{ap}$	$\log \tau_w$	$\dot{\gamma}_w (s^{-1})$
7.9	0.8976	6.4771	10.024
7	0.8451	6.4518	8.8823
5	0.699	6.3814	6.3445
3	0.4771	6.2745	3.8067
2	0.301	6.1897	2.5378
1.4	0.1461	6.115	1.7765

#### 4.1.2.4. LEY DE POTENCIA.

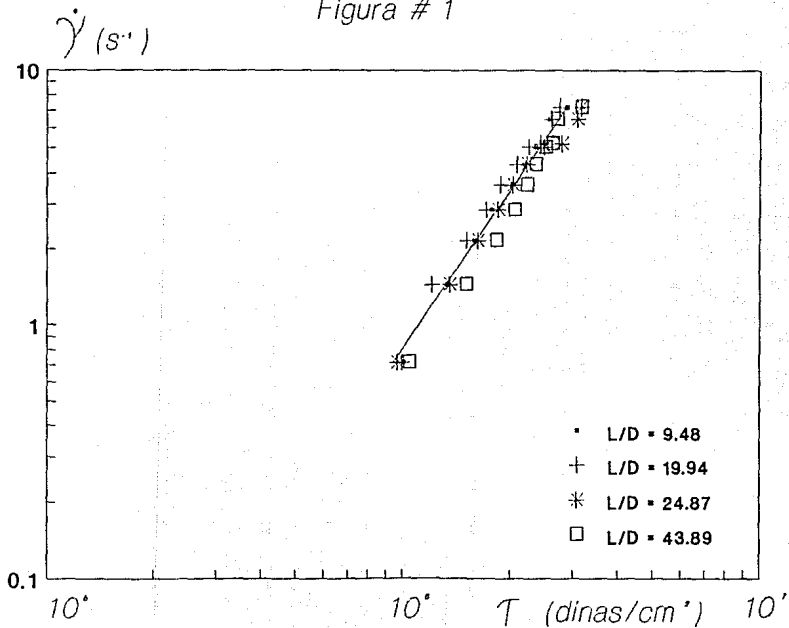
$\log \dot{\gamma}_w$	$\eta (\text{poises})$	$\log \eta$
1.001	299260	5.476
0.9485	318617	5.5033
0.8024	379310	5.579
0.5805	494265	5.694
0.4045	609835	5.7852
0.2496	733643	5.8655

$$n = 0.481786$$

$$K = 988116.60.$$

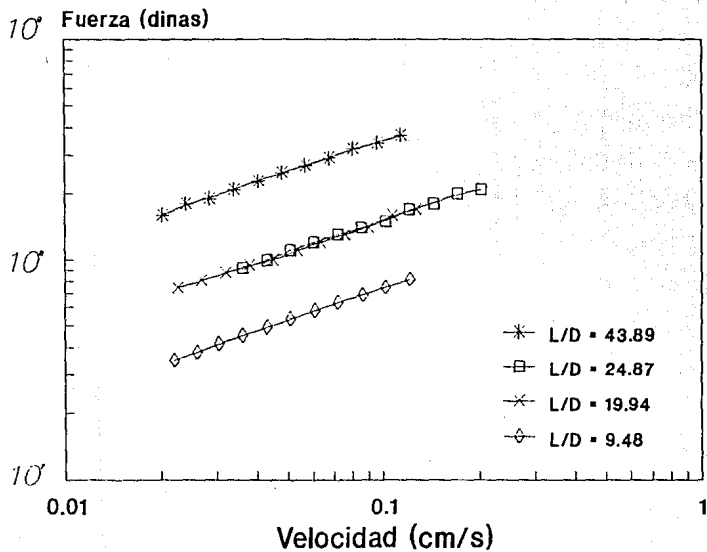
# Poliestireno (200 °C)

Figura # 1



# Poliestireno (200 °C)

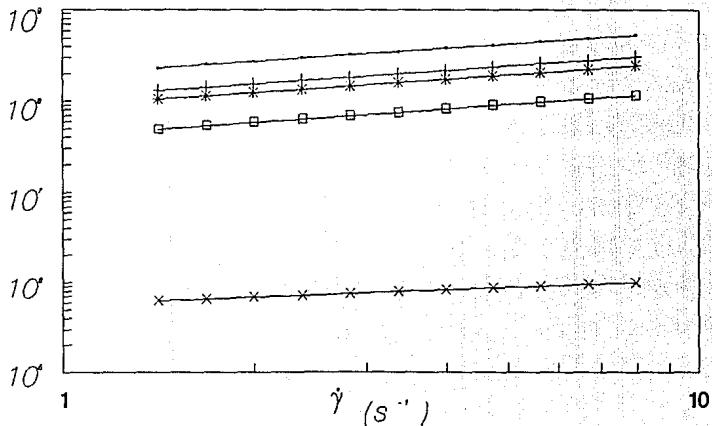
Figura # 2



# Poliestireno (200°C)

Figura # 3

$\Delta P$  (dinas/cm<sup>2</sup>)



— L/R = 87.78

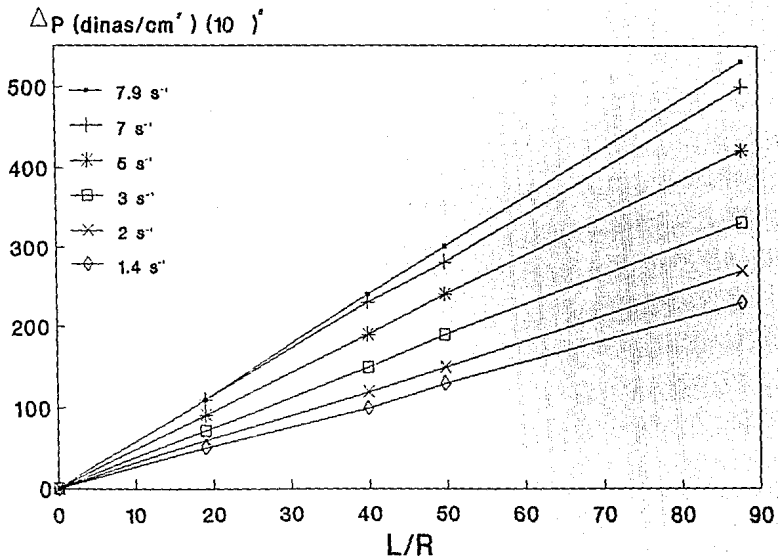
—+ L/R = 49.74

—\* L/R = 39.88

—□ L/R = 18.96

—x L/R = 0

Poliestireno (200°C)  
Figura # 4

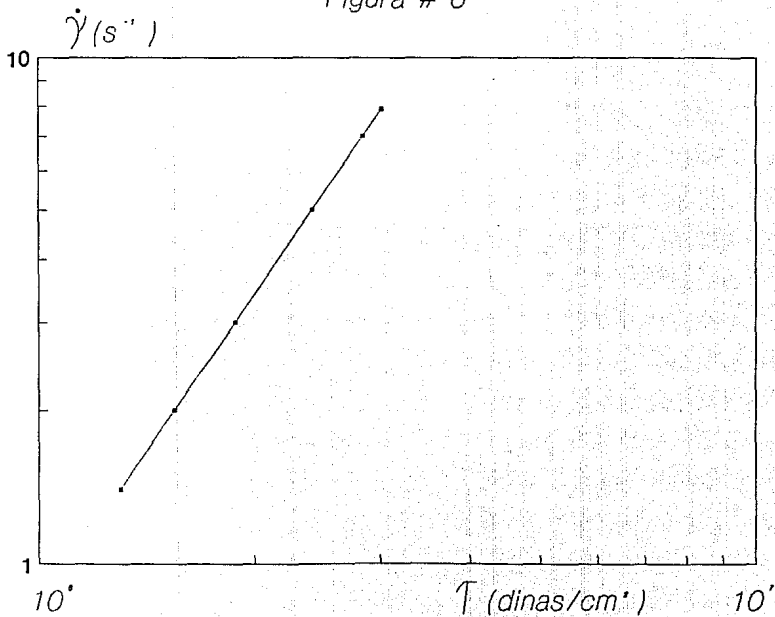


Capilares de 90°

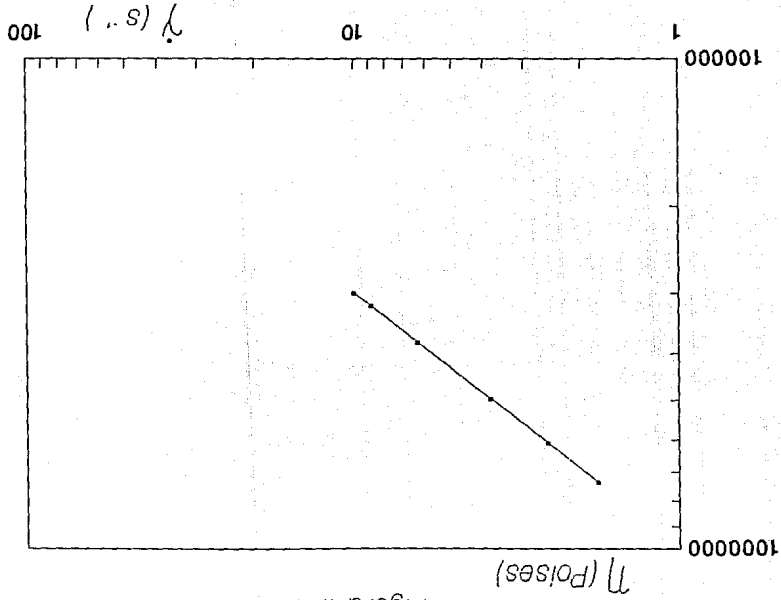


Poliestireno (200°C)

Figura # 6



Poliestireno (200°C)  
Figura # 7



#### 4.1.3. EVA.

##### 4.1.3.1. DATOS EXPERIMENTALES Y CORRECCION POR ALTURAS.

$$D = 0.048 \text{ in} = 0.12192 \text{ cm}$$

$$L/D = 9.4791667$$

$$L = 0.455 \text{ in} = 1.1557 \text{ cm}$$

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{op}$ ( $s^{-1}$ )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.268	1.2	0.0271	1176798	1.7795	43786
0.847	2.8	0.0857	2745862	5.624	102167
1.506	3.9	0.1524	3824593	9.9997	142304
4.765	7.4	0.4822	7256921	31.639	270013
8.47	10.4	0.8571	10198916	56.24	379478
15.06	14.4	1.524	14121576	99.997	525431
26.8	22.5	2.7119	22064962	177.95	820986
47.65	30	4.8218	29419950	316.39	1094648
84.7	40	8.571	39226600	562.4	1459531

$$b = 1.574785$$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
0.2503	4.6413	21.38	1123410	-1.5667	6.0505
0.75	5.0093	21.75	2619234	-1.067	6.4182
0.9999	5.1532	21.98	3646440	-0.817	6.5619
1.5002	5.4314	23.18	6901336	-0.327	6.8389
1.75	5.5792	23.88	9684845	-0.067	6.9861
1.9999	5.7205	24.98	13378722	0.183	7.1264
2.2503	5.9143	18.48	21194363	0.4333	7.3262
2.5002	6.0393	14.98	28471914	0.6832	7.4544
2.75	6.1642	8.48	38500890	0.933	7.5855

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{op}$ ( $s^{-1}$ )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.1506	0.8	0.0152	784532	0.9999	29191
0.268	1.4	0.0271	1372931	1.7795	51084
0.4765	2.6	0.0482	2549729	3.1639	94870
0.847	3.4	0.0857	3334261	5.624	124060
1.506	4.6	0.1524	4511059	9.9997	167846
2.68	6	0.2712	5883990	17.795	218930
4.765	7.8	0.4822	7649187	31.639	284609
8.47	11	0.8571	10787315	56.24	401371
15.06	15.3	1.524	15004174	99.997	558271
26.8	21	2.7119	20593965	177.95	766254
47.65	29	4.8218	28439285	316.39	1058160
84.7	39.5	8.571	38736267	562.4	1441287

b = 1.574785

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
-0.00001	4.4652	15.63	758191	-1.817	5.8798
0.2503	4.7083	15.68	1326691	-1.5667	6.1228
0.5002	4.9771	15.78	2463326	-1.3168	6.3915
0.75	5.0936	15.98	3219890	-1.067	6.5078
0.9999	5.2249	16.18	4354453	-0.817	6.6389
1.2503	5.3403	16.48	5676067	-0.5667	6.754
1.5002	5.4542	17.28	7366252	-0.3168	6.8672
1.75	5.6035	17.93	10373870	-0.067	7.0159
1.9999	5.7468	18.83	14401405	0.183	7.1584
2.2503	5.8844	20.37	19701902	0.4333	7.2945
2.5002	6.0246	22.46	27087004	0.6832	7.4328
2.75	6.1588	24.93	36702444	0.933	7.5647

D = 0.0502 in = 0.127508 cm

L/D = 19.938247

L = 1.0009 in = 2.542286 cm

Primera Corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.3065	1.18	0.0284	1157184	1.7791	20470
0.545	2.35	0.0504	2304562	3.1635	40767
1.722	6.3	0.1593	6178189	9.9956	109289
3.065	9.8	0.2836	9610517	17.791	170005
5.45	14.8	0.5042	14513842	31.635	256743
9.69	21.75	0.8965	21329463	56.247	377308
17.22	31	1.5931	30400615	99.956	537772
54.5	60.5	5.0422	59330232 <sup>B</sup>	316.352	1049523
172.2	122	15.931	1.2*10 <sup>8</sup>	999.555	2116393

b = 1.574785

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
0.2502	4.3111	12.69	1140526	-1.5473	6.0571
0.5002	4.6103	12.9	2270846	-1.2974	6.3562
0.9998	5.0386	13.29	6085111	-0.7977	6.7843
1.2502	5.2305	13.64	9461974	-0.5473	6.976
1.5002	5.4095	14.29	14278994	-0.2974	7.1547
1.7501	5.5767	15.12	20964630	-0.0475	7.3215
1.9998	5.7306	16.17	29845171	0.2023	7.4749
2.5002	6.021	22.69	57820256	0.7026	7.7621
2.9998	6.3256	1.6	1.2*10 <sup>8</sup> <sup>B</sup>	1.2023	8.0771

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ ( $s^{-1}$ )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
9.69	22.5	0.8965	22064962	56.247	390319
17.22	31.5	1.5931	30890947	99.956	546446
30.65	44.5	2.8356	43639592	177.91	771963
54.5	62	5.0422	60801230	316.35	1075544

$b = 1.574785$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	Fcor (dinas)	log Vc	log Fcor
1.7501	5.5914	20.19	21563869	-0.0475	7.3337
1.9998	5.7375	21.19	30155497	0.2023	7.4794
2.2502	5.8876	23.47	42491773	0.4527	7.6283
2.5002	6.0316	25.18	59088785	0.7026	7.7715

$D = 0.0804 \text{ in} = 0.204216 \text{ cm}$

$L/D = 24.871891$

$L = 1.9997 \text{ in} = 5.079238$

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ ( $s^{-1}$ )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
2.24	3.2	0.0808	3138128	3.1649	44500
3.98	5.6	0.1435	5491724	5.6234	77876
7.08	9	0.2554	8825985	10.003	125158
12.58	14	0.4537	13729310	17.774	194690
22.4	21	0.8079	20593965	31.649	292034
125.8	60	4.5373	58839900	177.74	834384

$b = 1.574785$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	Fcor (dinas)	log Vc	log Fcor
0.5004	4.6484	11.11	3061159	-1.0926	6.4859
0.75	4.8914	11.46	5352893	-0.843	6.7286
1.0001	5.0975	11.8	8596417	-0.5929	6.9343
1.2498	5.2893	12.36	13355719	-0.3432	7.1257
1.5004	5.4654	13.16	19998356	-0.0926	7.301
2.2498	5.9214	22.1	56037184	0.6568	7.7435

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ ( $s^{-1}$ )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
2.24	3.3	0.0808	3236194	3.1649	45891
3.98	6.2	0.1435	6080123	5.6234	86220
7.08	9.75	0.2554	9561483	10.003	135587
12.58	15.2	0.4537	14906108	17.774	211377
22.4	22.5	0.8079	22064962	31.649	312894
39.8	32.5	1.4355	31871612	56.234	451958
70.8	45.5	2.5536	44620257	100.03	632741

$$b = 1.574785$$

$\log \dot{\gamma}$	$\log \tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	$\log V_c$	$\log F_{cor}$
0.5004	4.6617	23.16	3075019	-1.0926	6.4878
0.75	4.9356	8.65	5963383	-0.843	6.7755
1.0001	5.1322	9	9370620	-0.5929	6.9718
1.2498	5.3251	9.66	14587204	-0.3432	7.164
1.5004	5.4954	10.65	21545660	-0.0926	7.3334
1.75	5.6551	12.15	31018688	0.157	7.4916
2.0001	5.8012	15.16	43140156	0.4071	7.6349

$$D = 0.045 \text{ in} = 0.1143 \text{ cm}$$

$$L/D = 43.888889$$

$$L = 1.975 \text{ in} = 5.0165 \text{ cm}$$

Primera Corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	V <sub>c</sub> (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.1242	3	0.0149	2941995	1.0008	23642
0.2205	4.2	0.0254	4118793	1.7769	33099
0.3925	5.7	0.0452	5589790	3.1629	44920
0.698	9.5	0.0804	9316317	5.6247	74867
2.205	19	0.2539	18632635	17.769	149735
6.89	37.5	0.7933	36774937	55.522	295529
12.42	53	1.43	51975245	100.08	417681
39.25	95.7	4.519	93849640	316.29	754190
68.9	127.5	7.9327	1.3*10 <sup>8</sup>	555.22	1004798
124.2	182	14.3	1.8*10 <sup>8</sup>	1000.8	1434301

$$b = 1.574785$$

$\log \dot{\gamma}$	$\log \tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	$\log V_c$	$\log F_{cor}$
0.0004	4.3737	10.74	2928641	-1.8447	6.4667
0.2497	4.5198	20.82	4082706	-1.5954	6.6109
0.5001	4.6524	10.92	5563996	-1.345	6.7454
0.7501	4.8743	11.12	9272543	-1.0949	6.9672
1.2497	5.1753	12.37	18535296	-0.5954	7.268
1.7445	5.4706	14.12	36555804	-0.1006	7.563
2.0004	5.6208	16.12	51621967	0.1553	7.7128
2.5001	5.8775	12.63	93349110	0.655	7.9701
2.7445	6.0021	10.1	1.2*10 <sup>8</sup>	0.8994	8.0952
3.0004	6.1566	5.12	1.8*10 <sup>8</sup>	1.1553	8.2506

Segunda Corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{sp}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.2205	3.2	0.0254	3138128	1.7769	25218
0.3925	4.8	0.0452	4707192	3.1629	37828
0.698	7.6	0.0804	7453054	5.6247	59894
2.205	19.5	0.2539	19122967	17.769	153675
12.42	47	1.43	46091255	100.09	370396
22.05	66	2.5387	64723890	177.69	520131
39.25	93	4.519	91201845	316.29	732912
68.9	124	7.9327	1.2*10 <sup>8</sup>	555.22	977216
124.2	182	14.3	1.8*10 <sup>8</sup>	1000.8	1434301

b = 1.574785

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
0.2497	4.4017	16.37	3116469	-1.5954	6.4937
0.5001	4.5778	16.47	4674507	-1.345	6.6697
0.7501	4.7774	16.62	7400835	-1.0949	6.8693
1.2497	5.1866	18.12	18976984	-0.5954	7.2782
2.0004	5.5687	14.87	45802111	0.1553	7.6609
2.2497	5.7161	12.88	64371901	0.4046	7.8087
2.5001	5.8651	8.6	90870076	0.655	7.9584
2.7445	5.99	4.62	1.2*10 <sup>8</sup>	0.8994	8.0841
3.0004	6.1566	5.12	1.8*10 <sup>8</sup>	1.1553	8.2506

D = 0.0501 in = 0.127254 cm

L/D = 60.005988

L = 3.0063 in = 7.636002 cm

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{sp}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.171	4	0.0159	3922660	0.9985	23056
0.542	9.35	0.0503	9169217	3.165	53894
0.963	13.8	0.0894	13533177	5.6234	79544
1.71	20.7	0.1588	20299765	9.9855	119316
3.05	31	0.2833	30400615	17.81	178686
5.42	44.5	0.5034	43639592	31.65	256501
9.63	63	0.8945	61781895	56.234	363136
17.1	88	1.5884	86298520	99.855	507238
30.5	119	2.833	1.2*10 <sup>8</sup>	178.1	685924
54.2	161	5.0345	1.6*10 <sup>8</sup>	316.5	928015
171	290	15.886	2.8*10 <sup>8</sup>	998.55	1671579

$$b = 1.574785$$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
-0.0006	4.3628	5.12	3915023	-1.7991	6.5927
0.5004	4.7315	5.3	9150740	-1.298	6.9615
0.75	4.9006	5.44	13505187	-1.0484	7.1305
0.9994	5.0767	5.65	20256163	-0.7991	7.3066
1.2507	5.2521	6.1	30330129	-0.5477	7.4819
1.5004	5.4091	6.6	43530138	-0.298	7.6388
1.75	5.5601	7.25	61611718	-0.0484	7.7897
1.9994	5.7052	8.1	86033029	0.2009	7.9347
2.2507	5.8363	9.71	1.2*10 <sup>8</sup>	0.4523	8.0655
2.5004	5.9676	11.89	1.6*10 <sup>8</sup>	0.702	8.1964
2.9994	6.2231	1.6	2.8*10 <sup>8</sup>	1.2009	8.4537

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.171	5.35	0.0159	5246557	0.9985	30838
0.305	7.35	0.0283	7207887	1.781	42366
0.542	10.4	0.0503	10198916	3.165	59946
0.963	15	0.0894	14709975	5.6234	86461
3.05	31.5	0.2833	30890947	17.81	181568
5.42	45	0.5034	44129925	31.65	259383
9.63	63	0.8945	61781895	56.234	363136
17.1	87	1.5884	85317855	99.855	501474
30.5	119	2.833	1.2*10 <sup>8</sup>	178.1	685924
54.2	162	5.0345	1.6*10 <sup>8</sup>	316.5	933779
96.3	212	8.945	2.1*10 <sup>8</sup>	562.34	1221982
171	280	15.884	2.7*10 <sup>8</sup>	998.55	1613938

$$b = 1.574785$$

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log Vc	log F <sub>cor</sub>
-0.0006	4.4891	11.05	5224563	-1.7991	6.7181
0.2507	4.627	11.12	7177480	-1.5477	6.856
0.5004	4.7778	11.23	10155467	-1.298	7.0067
0.75	4.9368	11.43	14646197	-1.0484	7.1657
1.2507	5.259	12.1	30749199	-0.5477	7.4878
1.5004	5.4139	12.75	43916602	-0.298	7.6426
1.75	5.5601	13.55	61464600	-0.0484	7.7886
1.9994	5.7002	14.59	84846241	0.2009	7.9286
2.2507	5.8363	16.09	1.2*10 <sup>8</sup>	0.4523	8.0644
2.5004	5.9702	18.09	1.6*10 <sup>8</sup>	0.702	8.1981
2.75	6.0871	21.57	2.1*10 <sup>8</sup>	0.9516	8.3143
2.9994	6.2079	1.6	2.7*10 <sup>8</sup>	1.2009	8.4384



D = 0.03 in = 0.0762cm  
 L = 2.0004 in = 5.081016

L/D = 66.68

Primera corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	V <sub>c</sub> (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.1164	10.6	0.0302	10395049	3.1603	54984
0.3675	23.5	0.0952	23045627	9.9949	121898
0.654	34	0.1694	33342610	17.787	176363
1.162	59	0.301	57859235	31.603	306041
2.07	70	0.5362	68646550	56.298	363100
3.675	97.5	0.952	95614837	99.949	505746
6.54	134	1.6942	1.3*10 <sup>8</sup>	177.87	695077
11.62	181	3.0102	1.8*10 <sup>8</sup>	316.03	938872

b = 1.574785

log $\dot{\gamma}$	log $\tau$	L <sub>b</sub> (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log V <sub>c</sub>	log F <sub>cor</sub>
0.4997	4.7402	13.92	10376406	-1.5214	7.016
0.9998	5.086	14.08	23003823	-1.0214	7.3618
1.2501	5.2464	14.25	33281398	-0.771	7.5222
1.4997	5.4858	14.44	57751601	-0.5214	7.7616
1.7505	5.56	14.65	68516995	-0.2706	7.8358
1.9998	5.7039	15	95430083	-0.0214	7.9797
2.2501	5.842	15.65	1.3*10 <sup>8</sup>	0.229	8.1177
2.4997	5.9726	16.95	1.8*10 <sup>8</sup>	0.4786	8.2483

Segunda corrida:

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	V <sub>c</sub> (cm/s)	F (dinas)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
0.0368	3	0.0095	2941995	1.0008	15561
0.1162	9.2	0.0301	9022118	3.1603	47722
0.207	15.2	0.0536	14906108	5.6298	78845
0.654	33.5	0.1694	32852277	17.787	173769
2.07	78	0.5362	76491870	56.298	404597
3.675	97	0.952	95124505	99.949	503153
6.54	130	1.6942	1.3*10 <sup>8</sup>	177.87	674328
11.62	180	3.0102	1.8*10 <sup>8</sup>	316.03	933685
20.7	240	5.3624	2.4*10 <sup>8</sup>	562.98	1244913
36.75	320	9.5201	3.1*10 <sup>8</sup>	999.49	1659884

$$b = 1.574785$$

log $\gamma$	log $\tau$	Lb (cm)	F <sub>cor</sub> (dinas)	log V <sub>c</sub>	log F <sub>cor</sub>
0.0004	4.192	18.07	2935149	-2.0208	6.4676
0.4997	4.6787	18.15	9001032	-1.5214	6.9543
0.7505	4.8968	18.21	14871155	-1.2706	7.1723
1.2501	5.24	18.55	32773810	-0.771	7.5155
1.7505	5.607	18.95	76305240	-0.2706	7.8826
1.9998	5.7017	19.19	94889481	-0.0214	7.9772
2.2501	5.8289	19.79	1.3*10 <sup>8</sup>	0.229	8.1044
2.4997	5.9702	20.64	1.8*10 <sup>8</sup>	0.4786	8.2456
2.7505	6.0951	22.15	2.3*10 <sup>8</sup>	0.7294	8.3705
2.9998	6.2201	25.14	3.1*10 <sup>8</sup>	0.9786	8.4953

#### 4.1.3.2. CORRECCION DE BAGLEY.

$$L/R = 18.95833$$

log V <sub>c</sub>	4V <sub>c</sub> /R (s <sup>-1</sup> )	log F <sub>cor</sub>	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	log $\gamma$	log $\Delta P$
-1.317	3.1623	6.166	2067497	0.5	6.3154
-1.117	5.0119	6.293	2769787	0.7	6.4424
-0.917	7.9433	6.42	3710632	0.9	6.5694
-0.717	12.589	6.547	4971064	1.1	6.6964
-0.517	19.953	6.674	6659641	1.3	6.8235
-0.317	31.623	6.801	8921796	1.5	6.9505
-0.117	50.119	6.928	11952362	1.7	7.0775
0.083	79.433	7.055	16012355	1.9	7.2045
0.283	125.89	7.182	21451452	2.1	7.3315
0.483	199.53	7.309	28738107	2.3	7.4585
0.683	316.23	7.436	38499902	2.5	7.5855

$$L/R = 39.87649$$

log V <sub>c</sub>	4V <sub>c</sub> /R (s <sup>-1</sup> )	log F <sub>cor</sub>	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	log $\gamma$	log $\Delta P$
-1.2976	3.1623	6.4889	4348723	0.5	6.6384
-1.0976	5.0119	6.6159	5825903	0.7	6.7654
-0.8976	7.9433	6.7429	7804853	0.9	6.8924
-0.6976	12.589	6.8699	10456014	1.1	7.0194
-0.4976	19.953	6.9969	14007726	1.3	7.1464
-0.2976	31.623	7.1239	18765888	1.5	7.2734
-0.0976	50.119	7.2509	25140307	1.7	7.4004
0.1024	79.433	7.3779	33679997	1.9	7.5274
0.3024	125.89	7.5049	45120459	2.1	7.6544
0.5024	199.53	7.6319	60447031	2.3	7.7814
0.7024	316.23	7.7589	80979751	2.5	7.9084

L/R = 49.74378

log Vc	$4V_c/R$ (s <sup>-1</sup> )	log F <sub>cor</sub>	ΔP (dinas/cm <sup>2</sup> )	log τ	log ΔP
-1.093	3.1623	6.5849	5424798	0.5	6.7344
-0.893	5.0119	6.7119	7267500	0.7	6.8614
-0.693	7.9433	6.8389	9736134	0.9	6.9884
-0.493	12.589	6.9659	13043316	1.1	7.1154
-0.293	19.953	7.0929	17473885	1.3	7.2424
-0.093	31.623	7.2199	23409435	1.5	7.3694
0.107	50.119	7.3469	31361181	1.7	7.4964
0.307	79.433	7.4739	42013984	1.9	7.6234
0.507	125.89	7.6009	56285345	2.1	7.7504
0.707	199.53	7.7279	75404419 <sup>g</sup>	2.3	7.8774
0.907	316.23	7.8549	10 <sup>g</sup>	2.5	8.0044

L/R = 87.77778

log Vc	$4V_c/R$ (s <sup>-1</sup> )	log F <sub>cor</sub>	ΔP (dinas/cm <sup>2</sup> )	log τ	log ΔP
-1.345	3.1623	6.8316	9572589	0.5	6.981
-1.145	5.0119	6.9586	12824217	0.7	7.108
-0.945	7.9433	7.0856	17180363	0.9	7.235
-0.745	12.589	7.2126	23016209	1.1	7.362
-0.545	19.953	7.3396	30834383	1.3	7.489
-0.345	31.623	7.4666	41308244	1.5	7.616
-0.145	50.119	7.5936	55339878	1.7	7.743
0.055	79.433	7.7206	74137794	1.9	7.87
0.255	125.89	7.8476	99321009	2.1	7.997
0.455	199.53	7.9746	1.3*10 <sup>8</sup> <sup>g</sup>	2.3	8.124
0.655	316.23	8.1016	1.8*10 <sup>8</sup> <sup>g</sup>	2.5	8.251

L/R = 120.0119

log Vc	$4V_c/R$ (s <sup>-1</sup> )	log F <sub>cor</sub>	ΔP (dinas/cm <sup>2</sup> )	log τ	log ΔP
-1.2984	3.1623	6.9674	13087883	0.5	7.1169
-1.0984	5.0119	7.0944	17533591	0.7	7.2439
-0.8984	7.9433	7.2214	23489423	0.9	7.3709
-0.6984	12.589	7.3484	31468338	1.1	7.4979
-0.4984	19.953	7.4754	42157541	1.3	7.6249
-0.2984	31.623	7.6024	56477665	1.5	7.7519
-0.0984	50.119	7.7294	75662067 <sup>g</sup>	1.7	7.8789
0.1016	79.433	7.8564	10 <sup>g</sup>	1.9	8.0059
0.3016	125.89	7.9834	1.4*10 <sup>8</sup> <sup>g</sup>	2.1	8.1329
0.5016	199.53	8.1104	1.8*10 <sup>8</sup> <sup>g</sup>	2.3	8.2599
0.7016	316.23	8.2374	2.4*10 <sup>8</sup> <sup>g</sup>	2.5	8.3869

$$L/R = 133.36$$

log $V_c$	$4V_c/R$ ( $s^{-1}$ )	log $F_{cor}$	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	log $\dot{\gamma}$	log $\Delta P$
-1.5211	3.1623	7.0132	14543549	0.5	7.1627
-1.3211	5.0119	7.1402	19483720	0.7	7.2897
-1.1211	7.9433	7.2672	26101973	0.9	7.4167
-0.9211	12.589	7.3942	34968323	1.1	7.5437
-0.7211	19.953	7.5212	46846405	1.3	7.6707
-0.5211	31.623	7.6482	62759249	1.5	7.7977
-0.3211	50.119	7.7752	84077385	1.7	7.9247
-0.1211	79.433	7.9022	$1.1 \cdot 10^8$	1.9	8.0517
0.0789	125.89	8.0292	$1.5 \cdot 10^8$	2.1	8.1787
0.2789	199.53	8.1562	$2 \cdot 10^8$	2.3	8.3057
0.4789	316.23	8.2832	$2.7 \cdot 10^8$	2.5	8.4327

$\dot{\gamma}$ ( $s^{-1}$ )	L/R = 18.9583	L/R = 39.8765	L/R = 49.7438
	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
300	37233293	78315598	97694495
250	33162768	69753756	87014058
200	28781420	60538134	75518065
100	18533437	38982777	48628917
10	4294856	9033695	11269049
5	2765619	5817135	7256564

$\dot{\gamma}$ ( $s^{-1}$ )	L/R = 87.7778	L/R = 120.012	L/R = 133.36
	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	$\Delta P$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
300	$1.7 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^8$	$2.6 \cdot 10^8$
250	$1.5 \cdot 10^8$	$2.1 \cdot 10^8$	$2.3 \cdot 10^8$
200	$1.3 \cdot 10^8$	$1.8 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$
100	85840492	$1.2 \cdot 10^8$	$1.3 \cdot 10^8$
10	19885342	27187738	30211624
5	12804918	17507205	19454399

Los valores de "e" tienen un orden de magnitud de  $10^{-5}$ , por lo que su tabla no se incluye, al igual que la figura # 5.

$\dot{\gamma}_{op}$ ( $s^{-1}$ )	$\tau_w$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
300	981977
255	874622
200	759070
100	488794
10	113271
5	72939

4.1.3.3. CORRECCION DE RABINOWISTCH.

$\dot{\gamma}_{sp}(s^{-1})$	$\log \dot{\gamma}_{sp}$	$\log \tau_w$
300	2.4771	5.9921
250	2.3979	5.9418
200	2.301	5.8803
100	2	5.6891
10	1	5.0541
5	0.699	4.863

$b = 1.574785$

$\dot{\gamma}_{sp}(s^{-1})$	$\dot{\gamma}_w(s^{-1})$
300	343.11
255	285.92
200	228.74
100	114.37
10	11.437
5	5.7185

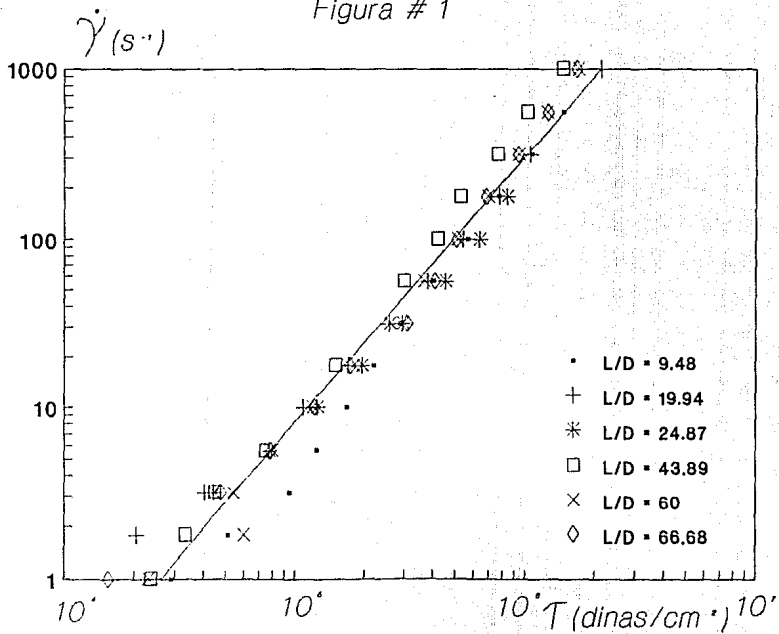
4.1.3.4. LEY DE POTENCIA.

$\log \dot{\gamma}_w$	$\eta(\text{poises})$	$\log \eta$
2.5354	2862	3.4567
2.4563	1058.9	3.4856
2.3593	3118.5	3.5209
2.0583	4273.8	3.6308
1.0583	9903.9	3.9958
0.7573	12755	4.1057

$n = 0.635007$

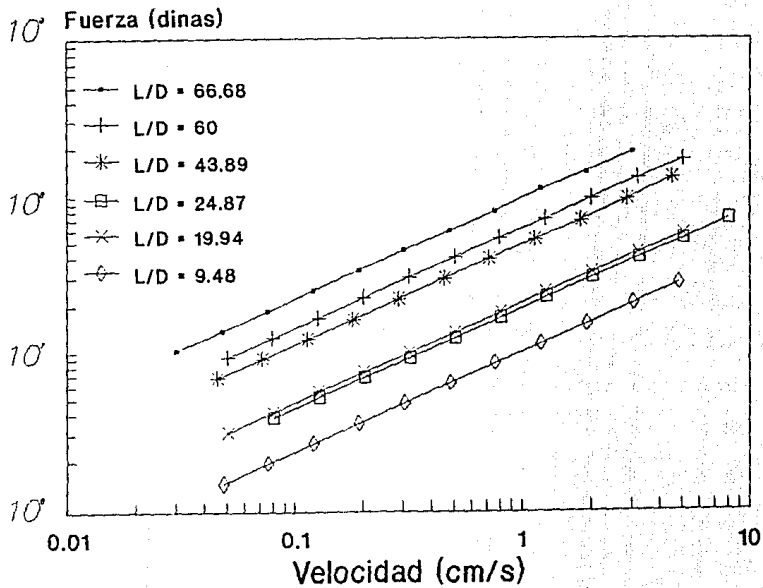
$K = 24103.60$

EVA (190°C)  
Figura # 1



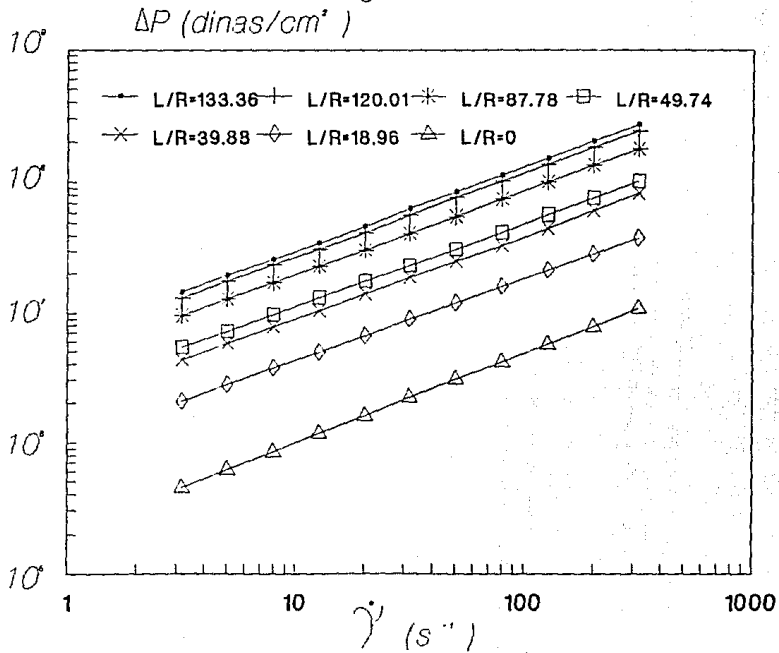
EVA (190 °C)

Figura # 2



EVA (190 °C)

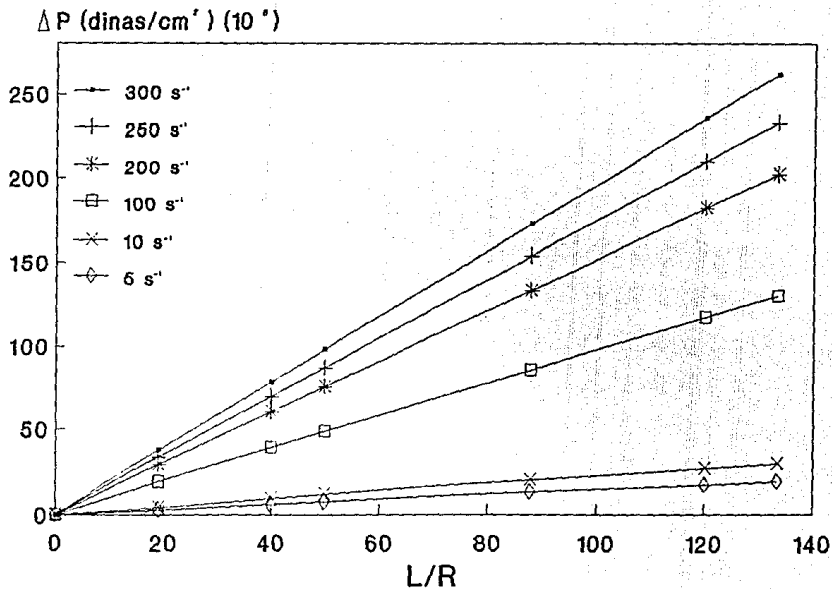
Figura # 3





# EVA (190 °C)

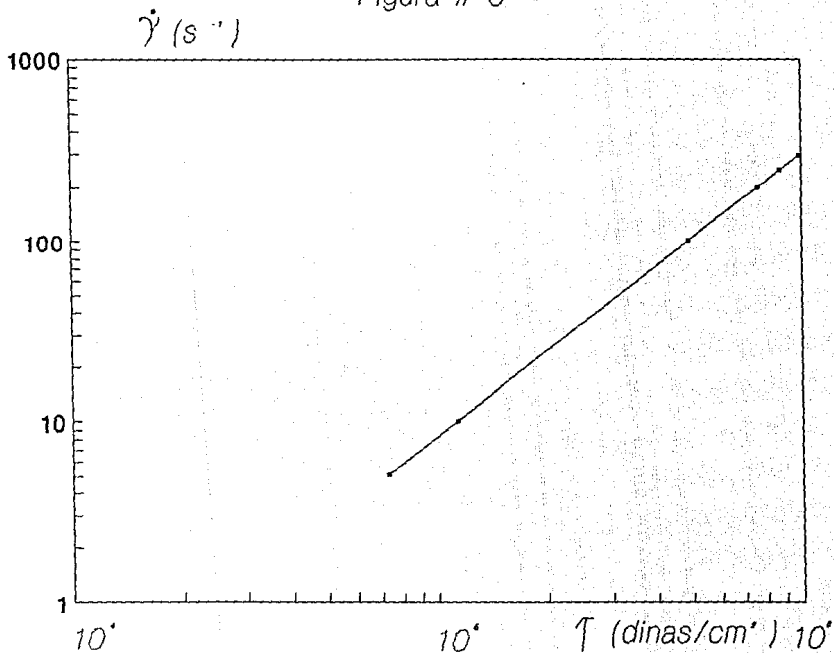
Figura # 4



Capilares de 90°

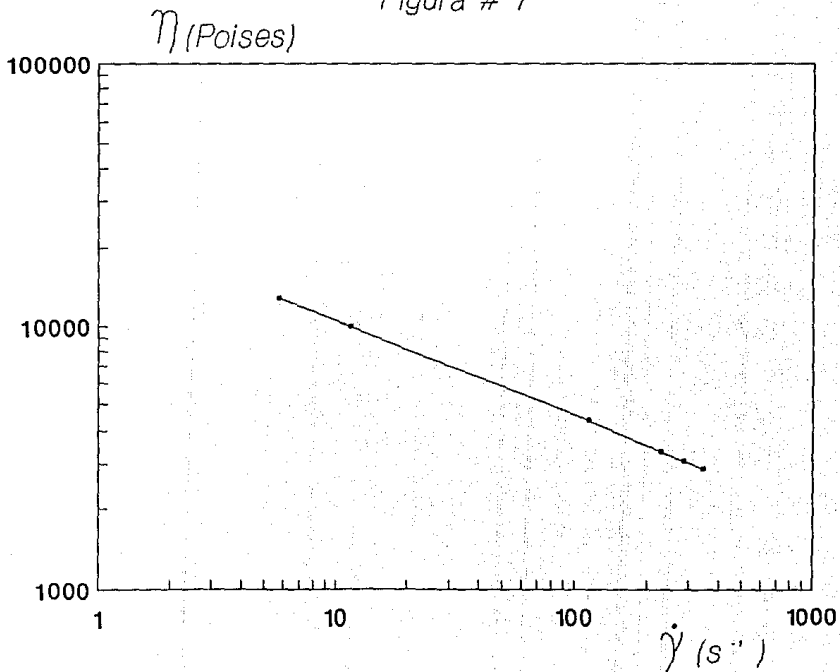
EVA (190°C)

Figura # 6



EVA (190°C)

Figura # 7



#### 4.2. VISCOSIDAD EXTENSIONAL.

##### 4.2.1. POLIETILENO (LLDPE 190°C).

##### 4.2.1.1. DATOS EXPERIMENTALES.

$n = 0.554415$  y  $K = 50707.22$

Orificio 0.05017 in

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	$V_c$ (cm/s)	F (dinas)
171.2	26.5	15.858	25987622
108	23	10.004	22555295
54.1	16.5	5.0112	16180972
27.1	9.65	2.5102	9463417
13.6	6.8	1.2597	6668522
6.8	4	0.6299	3922660
3.455	2.4	0.32	2353596
1.728	1.35	0.16	1323897
0.864	0.85	0.08	833565
0.432	0.7	0.04	686466
0.216	0.5	0.02	490333
0.108	0.12	0.01	117680

$Pe$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$\log Pe$	$\dot{\gamma}_{Ro}$ (s <sup>-1</sup> )	$\log \dot{\gamma}_{Ro}$
36663123	0.2023	7.5642	149.45	2.1745
31820823	0.1276	7.5027	94.276	1.9744
22827982	0.0639	7.3585	47.225	1.6742
13350910	0.032	7.1255	23.656	1.3739
9407895	0.0161	6.9735	11.872	1.0745
5534056	0.008	6.743	5.9359	0.7735
3320433	0.0041	6.5212	3.016	0.4794
1867744	0.002	6.2713	1.5084	0.1785
1175986	0.001	6.0704	0.7542	-0.1225
968460	0.0005	5.9861	0.3771	-0.4235
691757	0.0003	5.84	0.1886	-0.7246
166022	0.0001	5.2202	0.0943	-1.0256

Orificio 0.03 in

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	V <sub>c</sub> (cm/s)	F (dinas)
171.2	81.5	44.35	79924197
108	60.9	27.978	59722498
54.1	39.3	14.015	38540134
27.1	25	7.0203	24516625
13.6	16	3.5231	15690640
6.8	10.5	1.7616	10296982
3.455	6.85	0.895	6717555
1.728	4.4	0.4476	4314926
0.864	2.8	0.2238	2745862
0.432	1.84	0.1119	1804423
0.216	1.18	0.056	1157184
0.108	0.76	0.028	745305

Pe (dinas/cm <sup>2</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s)	log Pe	$\dot{\gamma}_{Ro}$ (s <sup>-1</sup> )	log $\dot{\gamma}_{Ro}$
1.1*10	0.2023	8.0521	698.96	2.8445
84256007	0.1276	7.9256	440.93	2.6444
54372103	0.0639	7.7354	220.87	2.3441
34587852	0.032	7.5389	110.64	2.0439
22136225	0.0161	7.3451	55.525	1.7445
14526897	0.008	7.1622	27.762	1.4435
9477071	0.0041	6.9767	14.106	1.1494
6087461	0.002	6.7844	7.0549	0.8485
3873839	0.001	6.5881	3.5274	0.5475
2545665	0.0005	6.4058	1.7637	0.2464
1632546	0.0003	6.2129	0.8819	-0.0546
1051470	0.0001	6.0218	0.4409	-0.3556

$\phi$	f( $\phi$ )	$\phi$	f( $\phi$ )	$\phi$	f( $\phi$ )
0	0	0.21	0.6453	0.42	0.9098
0.01	0.0324	0.22	0.671	0.43	0.9029
0.02	0.0647	0.23	0.6959	0.44	0.8938
0.03	0.0971	0.24	0.7198	0.45	0.8824
0.04	0.1294	0.25	0.7428	0.46	0.8689
0.05	0.1617	0.26	0.7646	0.47	0.853
0.06	0.1939	0.27	0.7853	0.48	0.835
0.07	0.226	0.28	0.8048	0.49	0.8147
0.08	0.258	0.29	0.8229	0.5	0.7922
0.09	0.2899	0.3	0.8397	0.51	0.7675
0.1	0.3216	0.31	0.8551	0.52	0.7406
0.11	0.3531	0.32	0.8689	0.53	0.7116
0.12	0.3843	0.33	0.8812	0.54	0.6806
0.13	0.4152	0.34	0.8918	0.55	0.6477
0.14	0.4457	0.35	0.9007	0.56	0.6129
0.15	0.4759	0.36	0.9078	0.57	0.5764
0.16	0.5056	0.37	0.9131	0.58	0.5383
0.17	0.5347	0.38	0.9165	0.59	0.4989
0.18	0.5634	0.39	0.9179	0.6	0.4583
0.19	0.5914	0.4	0.9173	0.61	0.4167
0.2	0.6187	0.41	0.9146	0.62	0.3744

$\phi$	$f(\phi)$	$\phi$	$f(\phi)$	$\phi$	$f(\phi)$
0.63	0.3317	0.76	0.0609	0.89	1.6995
0.64	0.289	0.77	0.105	0.9	1.9434
0.65	0.2466	0.78	0.1606	0.91	2.2087
0.66	0.205	0.79	0.2282	0.92	2.4963
0.67	0.1648	0.8	0.3083	0.93	2.8072
0.68	0.1266	0.81	0.4013	0.94	3.1427
0.69	0.0911	0.82	0.508	0.95	3.5038
0.7	0.0592	0.83	0.629	0.96	3.8917
0.71	0.0322	0.84	0.765	0.97	4.3077
0.72	0.0116	0.85	0.9169	0.98	4.7531
0.73	0.0004	0.86	1.0854	0.99	5.129
0.74	0.0072	0.87	1.2714	1	5.7369
0.75	0.0282	0.88	1.4758	Int	= 0.871767

#### 4.2.1.2. LEY DE POTENCIA.

$m = 0.63708$	$\kappa = 83290$	$\vartheta = 171.29$
$\log b = 6.2388$	$\log \kappa = 4.9206$	$\ell = 8113646$
$t = 0.69449$	$\log \vartheta = 2.2337$	

#### 4.2.1.3. VISCOSIDAD EXTENSIONAL.

$\dot{\gamma}_{RD} (s^{-1})$	$\dot{\epsilon}_{max} (s^{-1})$	$\eta_E$ (Poises)
698.96	30.385	2859243
440.93	19.912	3253301
220.87	10.561	3948790
149.45	7.3802	4405676
110.64	5.6014	4792965
94.276	4.8365	5012863
55.525	2.9759	5814614
47.225	2.5652	6084510
27.762	1.5757	7061319
23.656	1.3605	7385259
14.106	0.8467	8536849
11.872	0.7228	8959472
7.0549	0.4484	10366385
5.9359	0.3827	10880462
3.5274	0.2374	12589029
3.016	0.2057	13154039
1.7637	0.1257	15288229
1.5084	0.1089	15973086
0.8819	0.0666	18566161
0.7542	0.0577	19397858
0.4409	0.0352	22546911
0.3771	0.0305	23556931
0.1886	0.0162	28607746
0.0943	0.0086	34741500

# Polietileno (190°C)

Viscosidad Extensional

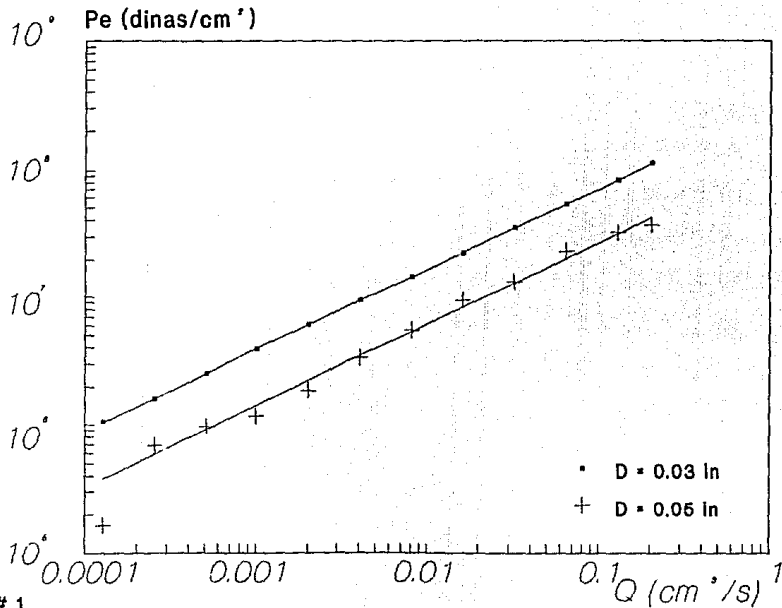


Figura # 1

# Polietileno (190 °C)

## Viscosidad Extensional

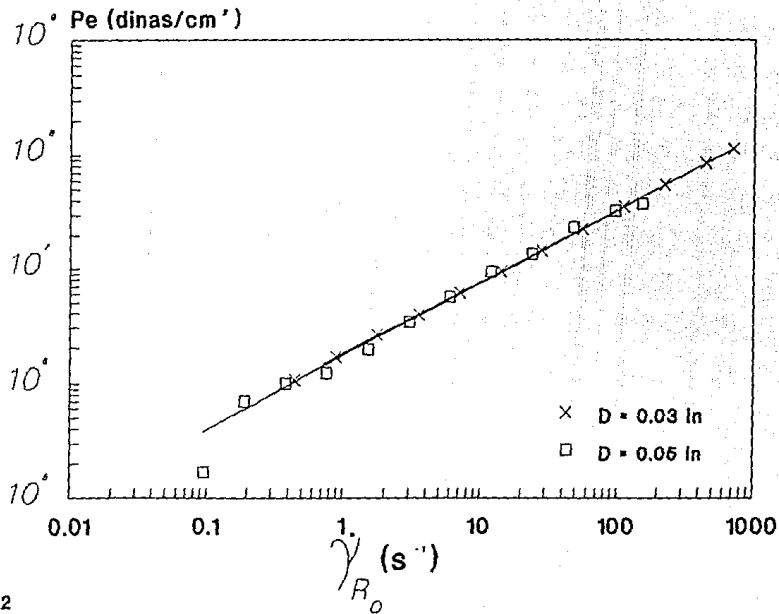


Figura # 2



*Polietileno (190 °C)*  
*Integral Numerica*

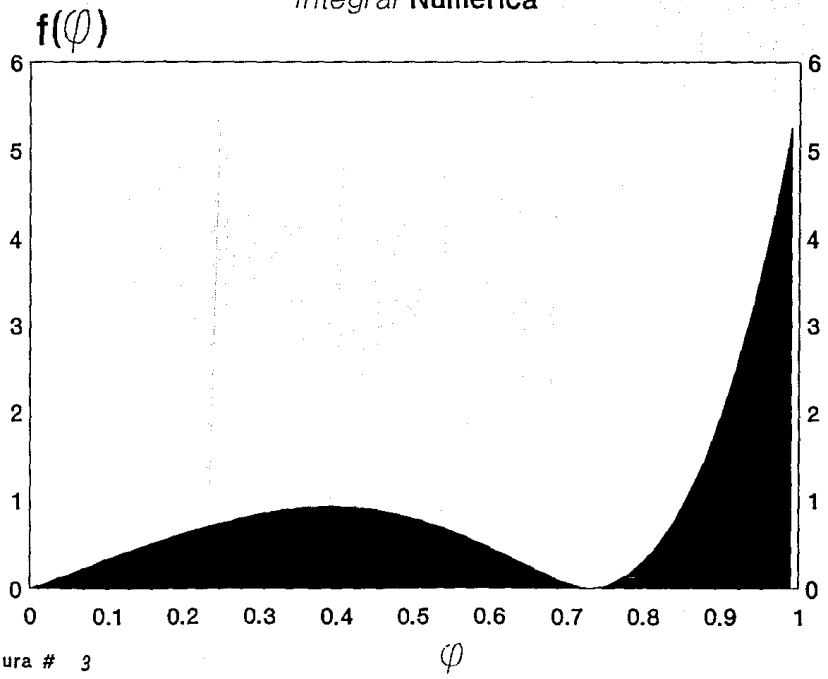


Figura # 3

*Polietileno (190°C)*  
*Viscosidad Extensional*

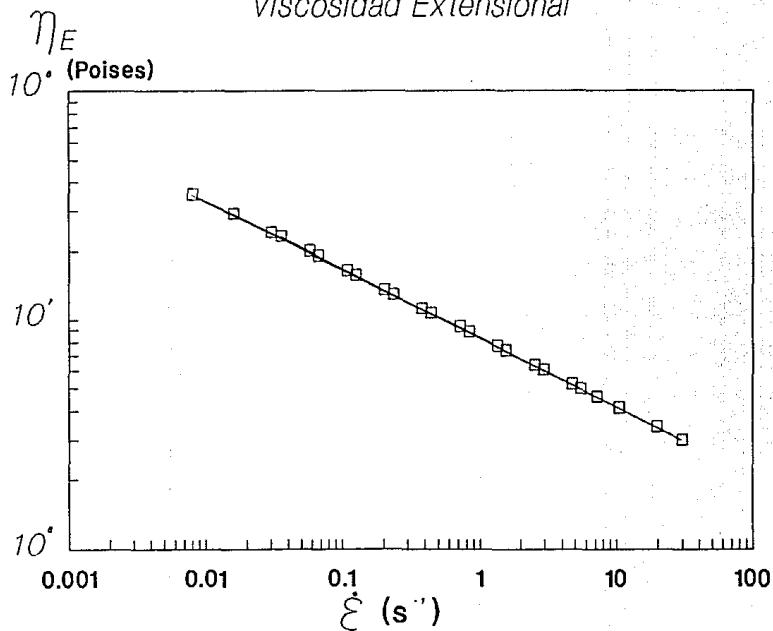


Figura # 4

Si empleamos el  $\alpha$  mayor:

$R_b = 0.95 \text{ cm}$  y  $R_o = 0.05017 \text{ in} = 0.1274 \text{ cm}$

$\alpha = R_o/R_b = 0.1341$        $m = 0.6371$        $3m = 1.9112$

$1 - \alpha^{3m} = 0.9785$

$\rho = 0.77269 \text{ g/cm}^3$  a  $190^\circ\text{C}$

$Q = 0.20225 \text{ cm}^3/\text{s}$

$\alpha = 0.1341$

$R_o = 0.1274 \text{ cm}$

$n = 0.554415$

$$\frac{\rho (3n + 1)^2 Q^2 (1 - \alpha^4)}{2 (2n + 1) (5n + 1) \pi^2 R_o^2} = 5.4125 \text{ dinas/cm}^2$$

4.2.2. EVA  $190^\circ\text{C}$ .

4.2.2.1. DATOS EXPERIMENTALES.

$n = 0.635007$  y  $K = 24103.68$

Orificio  $0.05017 \text{ in}$

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	$V_c$ (cm/s)	F (dinas)
171.2	15.5	15.858	15200307
108	11	10.004	10787315
54.1	9.25	5.0112	9071151
27.1	5.5	2.5102	5393657
13.6	3.1	1.2597	3040061
6.8	1.95	0.6299	1912296
3.455	1.1	0.32	1078731
1.728	0.67	0.16	657046

$Pe$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$\log Pe$	$\dot{\gamma}_{R_o}$ (s <sup>-1</sup> )	$\log \dot{\gamma}_{R_o}$
21444468	0.2023	7.5642	142.32	2.1533
15218654	0.1276	7.5027	89.784	1.9532
12797505	0.0639	7.3585	44.975	1.653
7609327	0.032	7.1255	22.529	1.3527
4288893	0.0161	6.9735	11.306	1.0533
2697852	0.008	6.743	5.653	0.7523
1521865	0.0041	6.5212	2.8722	0.4582
926954	0.002	6.2713	1.4365	0.1573

Orificio 0.03 in

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	V <sub>c</sub> (cm/s)	F (dinas)
171.2	72.5	44.35	71098212
108	51	27.978	50013915
54.1	30	14.015	29419950
27.1	17.5	7.0203	17161637
13.6	10.2	3.5231	10002783
6.8	6.5	1.7616	6374322
3.455	3.3	0.895	3236194
1.728	2.3	0.4476	2255529
0.864	1.1	0.2238	1078731
0.432	0.75	0.1119	735499
0.216	0.43	0.056	421686
0.108	0.25	0.028	245166

Pe (dinas/cm <sup>2</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s)	log Pe	$\dot{\gamma}_{Ro}$ (s <sup>-1</sup> )	log $\dot{\gamma}_{Ro}$
1*10	0.2023	8.0013	665.65	2.8232
70559218	0.1276	7.8486	419.92	2.6232
41505422	0.0639	7.6181	210.35	2.3229
24211496	0.032	7.384	105.37	2.0227
14111843	0.0181	7.1496	52.879	1.7233
8992841	0.008	6.9539	26.439	1.4223
4565596	0.0041	6.6595	13.434	1.1282
3182082	0.002	6.5027	6.7187	0.8273
1521865	0.001	6.1824	3.3594	0.5263
1037635	0.0005	6.016	1.6797	0.2252
594911	0.0003	5.7745	0.8398	-0.0758
345879	0.0001	5.5389	0.4199	-0.3768

$\phi$	f( $\phi$ )	$\phi$	f( $\phi$ )	$\phi$	f( $\phi$ )
0	0	0.21	0.7024	0.42	0.9016
0.01	0.0362	0.22	0.7284	0.43	0.8887
0.02	0.0723	0.23	0.7532	0.44	0.8735
0.03	0.1084	0.24	0.7767	0.45	0.8561
0.04	0.1445	0.25	0.7989	0.46	0.8364
0.05	0.1804	0.26	0.8196	0.47	0.8145
0.06	0.2163	0.27	0.8388	0.48	0.7905
0.07	0.2519	0.28	0.8564	0.49	0.7644
0.08	0.2874	0.29	0.8723	0.5	0.7363
0.09	0.3226	0.3	0.8866	0.51	0.7063
0.1	0.3575	0.31	0.899	0.52	0.6744
0.11	0.392	0.32	0.9096	0.53	0.6408
0.12	0.4261	0.33	0.9182	0.54	0.6057
0.13	0.4596	0.34	0.9249	0.55	0.5691
0.14	0.4927	0.35	0.9296	0.56	0.5312
0.15	0.5251	0.36	0.9321	0.57	0.4923
0.16	0.5568	0.37	0.9326	0.58	0.4526
0.17	0.5877	0.38	0.9308	0.59	0.4122
0.18	0.6178	0.39	0.9269	0.6	0.3714
0.19	0.647	0.4	0.9207	0.61	0.3307
0.2	0.6752	0.21	0.9123	0.62	0.2901

$\phi$	$f(\phi)$	$\phi$	$f(\phi)$	$\phi$	$f(\phi)$
0.63	0.2502	0.76	0.0611	0.89	1.6366
0.64	0.2113	0.77	0.1008	0.9	1.8801
0.65	0.1739	0.78	0.1513	0.91	2.1464
0.66	0.1384	0.79	0.2131	0.92	2.4365
0.67	0.1053	0.8	0.2871	0.93	2.7517
0.68	0.0753	0.81	0.374	0.94	3.0934
0.69	0.049	0.82	0.4745	0.95	3.4628
0.7	0.0273	0.83	0.5895	0.96	3.8613
0.71	0.0111	0.84	0.7199	0.97	4.2904
0.72	0.0016	0.85	0.8666	0.98	4.7514
0.73	0.0014	0.86	1.0306	0.99	5.246
0.74	0.0012	0.87	1.2129	1	5.7756
0.75	0.0316	0.88	1.4146		Int = 0.860948

#### 4.2.2.2. LEY DE POTENCIA.

$m = 0.7532$	$\kappa = 28323$	$\vartheta = 368.15$
$\log b = 5.836$	$\log \kappa = 4.4521$	$\ell = 6121907$
$t = 0.854202$	$\log \vartheta = 2.566$	

#### 4.2.2.3. VISCOSIDAD EXTENSIONAL.

$\dot{\gamma}_{Ro} (s^{-1})$	$\dot{\epsilon}_{max} (s^{-1})$	$\eta_E (Poises)$
665.65	16.915	4053308
419.92	11.268	4300631
210.35	6.1249	4700346
142.32	4.34	4942446
105.37	3.3294	5137215
89.784	2.8911	5244023
52.879	1.8127	5613361
44.945	1.5716	5731419
26.439	0.9838	6136545
22.529	0.8543	6264119
13.434	0.5415	6694666
11.3061	0.4651	6844714
6.7187	0.2939	7318359
5.653	0.2524	7482664
3.3594	0.1595	8000454
2.8722	0.1389	8163215
1.6797	0.0866	8746123
1.4365	0.0754	8923722
0.8398	0.047	9561291
0.4199	0.0255	10452435

Con  $\alpha = 0.1341$  y  $m = 0.7532$

$3m = 2.2596$        $1 - \alpha^{3m} = 0.9893$

# EVA (190 °C)

## Viscosidad Extensional

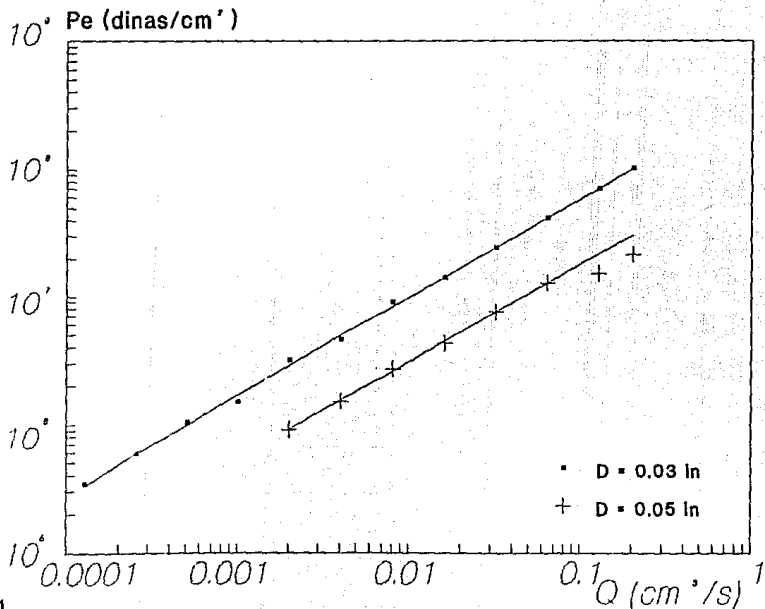


Figura # 1

# EVA (190°C)

Viscosidad Extensional

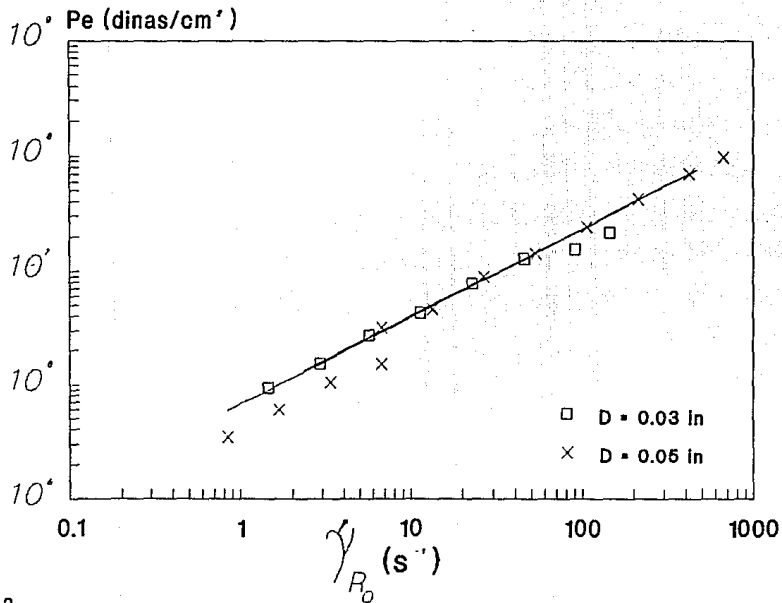


Figura # 2

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

EVA (190 °C)  
Integral Numerica

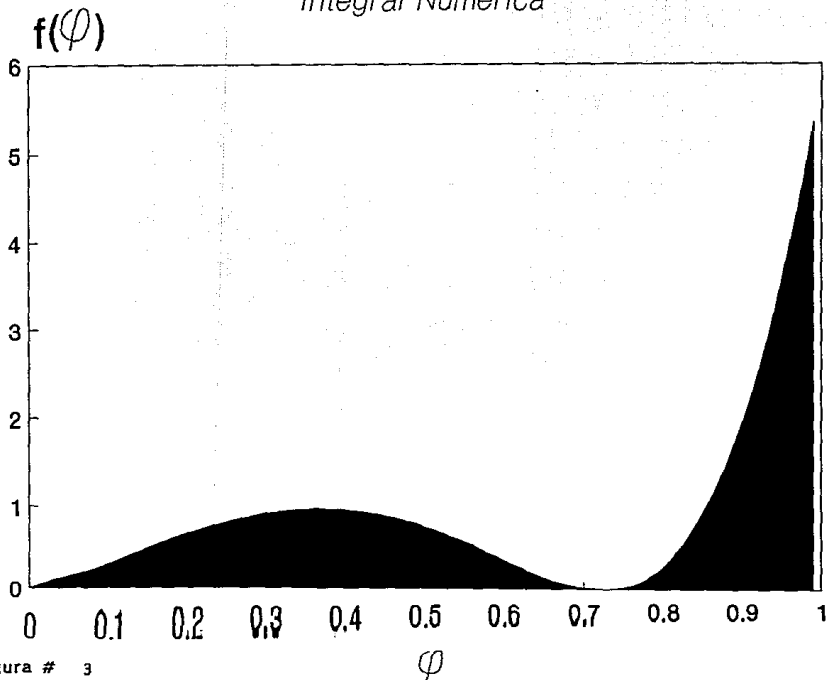


Figura # 3



EVA (190°C)

Viscosidad Extensional

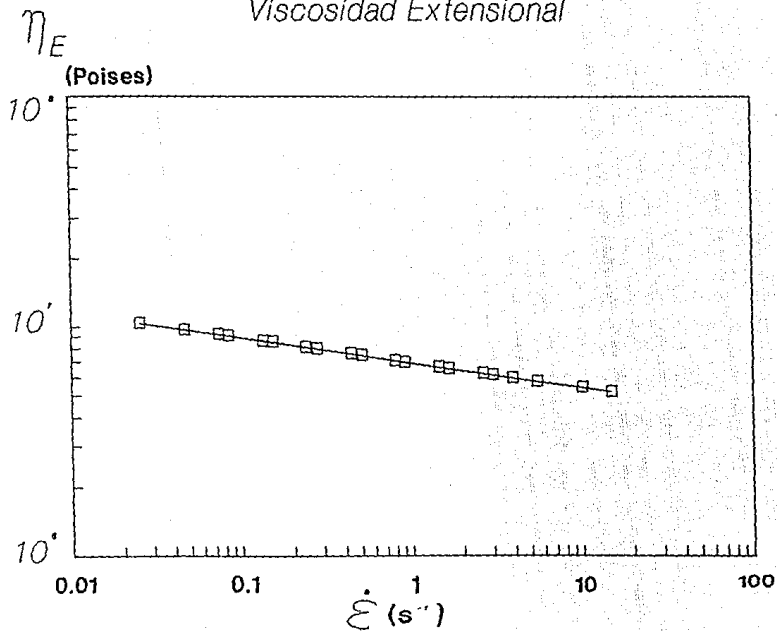


Figura # 4

$$\rho = 0.832593 \text{ g/cm}^3 \text{ a } 190^\circ\text{C} \quad Q = 0.20225 \text{ cm}^3/\text{s} \quad \alpha = 0.134138$$

$$R_o = 0.1274 \text{ cm} \quad n = 0.635007$$

$$\frac{\rho (3n + 1)^2 Q^2 (1 - \alpha^4)}{2 (2n + 1) (5n + 1) \pi^2 R_o^3} = 5.8242 \text{ dinas/cm}^2$$

#### 4.2.3. POLIESTIRENO FUNCIONALIZADO 200°C.

##### 4.2.3.1. DATOS EXPERIMENTALES.

$$n = 0.481786 \text{ y } K = 988116.6$$

Orificio = 0.05017 in

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	V <sub>c</sub> (cm/s)	F (dinas)
1.22	8	0.113	7845320
1.098	7.4	0.1017	7256921
0.976	6.9	0.0904	6766588
0.854	6.2	0.0791	6080123
0.732	5.5	0.0678	5393657
0.61	4.8	0.0565	4707192
0.488	4	0.0452	3922660
0.366	3.3	0.0339	3236194
0.244	2.5	0.0226	2451662
0.122	1.5	0.0113	1470997

Pe(dinas/cm <sup>2</sup> )	Q(cm <sup>3</sup> /s)	log Pe	$\dot{\gamma}_{R_o} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	log $\dot{\gamma}_{R_o}$
11068112	0.0014	7.0441	1.1253	0.0513
10238004	0.0013	7.0102	1.0127	0.0055
9546247	0.0012	6.9798	0.9002	-0.0457
8577787	0.001	6.9334	0.7877	-0.1037
7609327	0.0009	6.8813	0.6752	-0.1706
6640867	0.0007	6.8222	0.5626	-0.2498
5534056	0.0006	6.743	0.4501	-0.3467
4565596	0.0004	6.6595	0.3376	-0.4716
3458785	0.0003	6.5389	0.2251	-0.6477
2075271	0.0001	6.3171	0.1125	-0.9487

## Orificio 0.03 in

Embolo (mm/min)	Fuerza (kg)	Vc (cm/s)	F (dinas)
1.22	22.5	0.316	22064962
1.098	21.5	0.2844	21084297
0.976	20	0.2528	19613300
0.854	18.5	0.2212	18142302
0.732	16.5	0.1896	16180972
0.61	14	0.158	13729310
0.488	12.6	0.1264	12356379
0.366	9.3	0.0948	9120184
0.244	7.2	0.0632	7060788
0.122	4.4	0.0316	4314926

Pe(dinas/cm <sup>2</sup> )	Q(cm <sup>3</sup> /s)	log Pe	$\dot{\gamma}_{Ro}$ (s <sup>-1</sup> )	log $\dot{\gamma}_{Ro}$
31229066	0.0014	7.4932	5.2628	0.7212
29745552	0.0013	7.4734	4.7365	0.6755
27670281	0.0012	7.442	4.2103	0.6243
25595010	0.001	7.4082	3.684	0.5663
22827982	0.0009	7.3585	3.1577	0.4994
19369197	0.0007	7.2871	2.6314	0.4202
17432277	0.0006	7.2414	2.1051	0.3233
12866680	0.0004	7.1095	1.5788	0.1983
9961301	0.0003	6.9983	1.0526	0.0222
6087461	0.0001	6.7844	0.5263	-0.2788

$\phi$	f( $\phi$ )	$\phi$	f( $\phi$ )	$\phi$	f( $\phi$ )
0	0	0.21	0.7638	0.42	1.0965
0.01	0.0379	0.22	0.7951	0.43	1.0883
0.02	0.0758	0.23	0.8255	0.44	1.0772
0.03	0.1136	0.24	0.8548	0.45	1.0634
0.04	0.1515	0.25	0.883	0.46	1.0468
0.05	0.1893	0.26	0.91	0.47	1.0273
0.06	0.2271	0.27	0.9356	0.48	1.0049
0.07	0.2648	0.28	0.9598	0.49	0.9797
0.08	0.3024	0.29	0.9826	0.5	0.9517
0.09	0.3399	0.3	1.0037	0.51	0.9209
0.1	0.3772	0.31	1.023	0.52	0.8874
0.11	0.4144	0.32	1.0406	0.53	0.8514
0.12	0.4513	0.33	1.0563	0.54	0.8128
0.13	0.4879	0.34	1.07	0.55	0.7718
0.14	0.5242	0.35	1.0816	0.56	0.7287
0.15	0.5601	0.36	1.091	0.57	0.6835
0.16	0.5955	0.37	1.0981	0.58	0.6366
0.17	0.6305	0.38	1.1028	0.59	0.5881
0.18	0.6648	0.39	1.1051	0.6	0.5384
0.19	0.6986	0.4	1.1048	0.61	0.4878
0.2	0.7316	0.41	1.102	0.62	0.4367

$\phi$	$f(\phi)$	$\phi$	$f(\phi)$	$\phi$	$f(\phi)$
0.63	0.3855	0.76	0.0289	0.89	2.0574
0.64	0.3347	0.77	0.063	0.9	2.4128
0.65	0.2848	0.78	0.1118	0.91	2.8081
0.66	0.2363	0.79	0.1764	0.92	3.2459
0.67	0.19	0.8	0.2583	0.93	3.7292
0.68	0.1466	0.81	0.359	0.94	4.2611
0.69	0.1068	0.82	0.4801	0.95	4.8446
0.7	0.0717	0.83	0.6234	0.96	5.4832
0.71	0.0421	0.84	0.7906	0.97	6.1801
0.72	0.0193	0.85	0.9837	0.98	6.9392
0.73	0.0046	0.86	1.2047	0.99	7.7641
0.74	0.0001	0.87	1.4558	1	8.6589
0.75	0.0082	0.88	1.7393	$I_{nt} = 1.104682$	

#### 4.2.3.2. LEY DE POTENCIA.

$$\begin{aligned}
 m &= 0.710543 & \kappa &= 1304777 & \vartheta &= 49.223 \\
 \log b &= 6.9963 & \log \kappa &= 6.1155 & \ell &= 38299215 \\
 t &= 0.921296 & \log \vartheta &= 1.6922 & &
 \end{aligned}$$

#### 4.2.3.3. VISCOSIDAD EXTENSIONAL.

$\dot{\gamma}_{Ro} (S^{-1})$	$\dot{\epsilon}_{max} (S^{-1})$	$\eta_c$ (Poises)
5.2628	0.6726	39513629
4.7365	0.6201	39767140
4.2103	0.5662	40052467
3.684	0.5108	40378421
3.1577	0.4536	40758007
2.6314	0.3941	41211571
2.1051	0.3318	41773564
1.5788	0.2658	42509422
1.1253	0.2047	43392375
1.0127	0.1887	43670771
1.0526	0.1944	43568618
0.9002	0.1723	43984107
0.7877	0.1554	44342057
0.6752	0.138	44758904
0.5626	0.1199	45256991
0.5263	0.1139	45440808
0.4501	0.101	45874150
0.3376	0.0809	46682242
0.2251	0.0592	47845411
0.1125	0.0347	49901379

Con  $\alpha = 0.1341$  y  $m = 0.7105$

$$3m = 2.1316 \quad 1 - \alpha^{3m} = 0.9862$$

No se cuentan con los datos de la densidad del Poliestireno.

# Poliestireno (200°C)

## Viscosidad Extensional

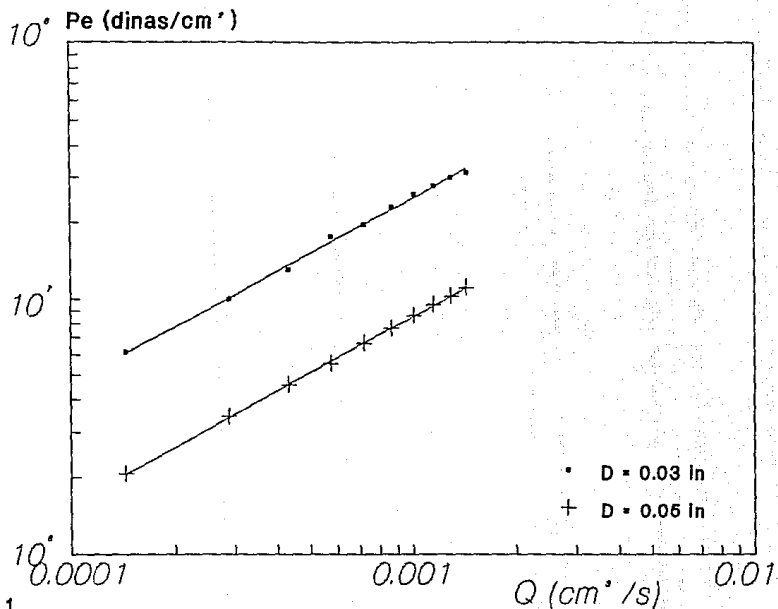


Figura # 1

# Poliestireno (200°C)

## Viscosidad Extensional

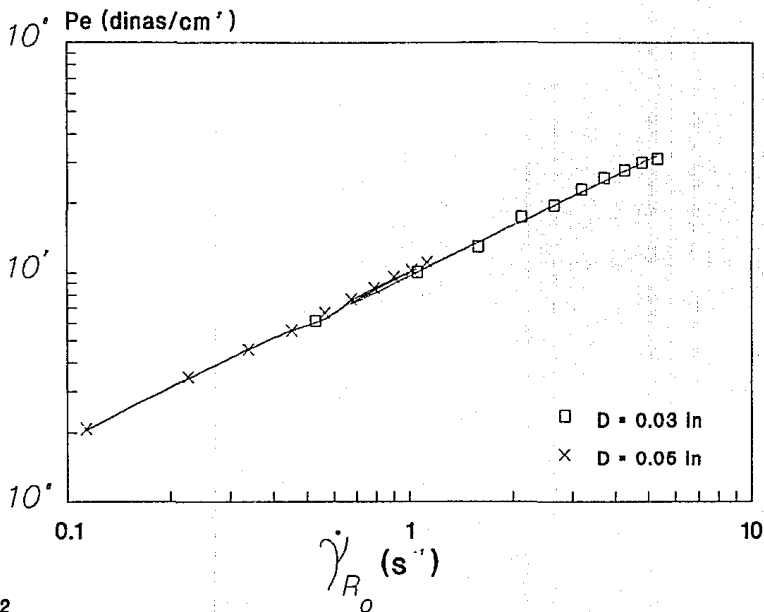


Figura # 2

*Poliestireno (200 °C)*  
*Integral Numerica*

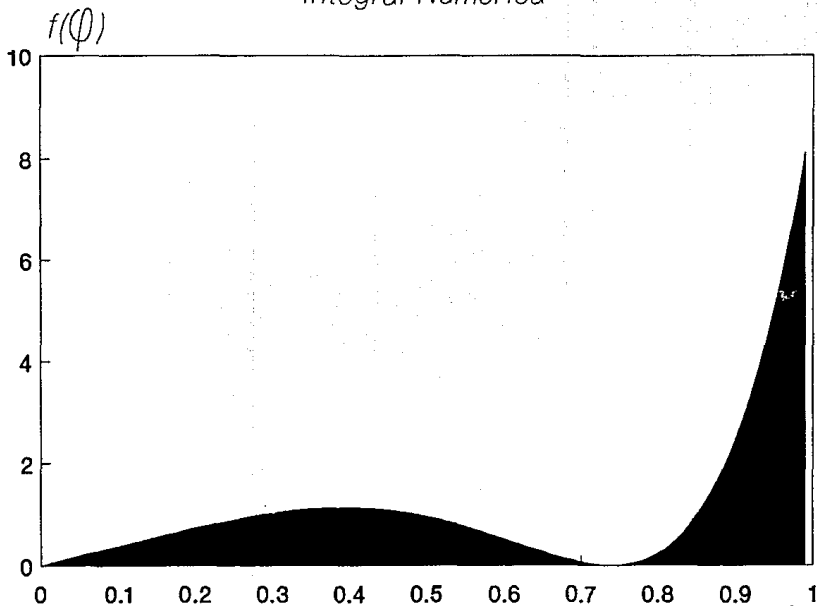


Figura # 3

$\phi$

# Poliestireno (200°C)

Viscosidad Extensional

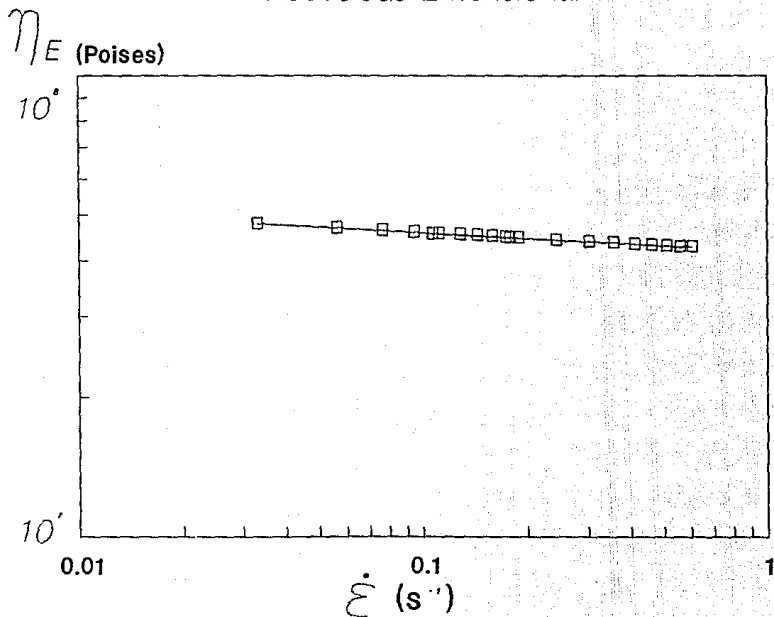


Figura # 4



***DISCUSION DE RESULTADOS***  
***y***  
***CONCLUSIONES***

## DISCUSION DE RESULTADOS.

Se compararán los resultados experimentales del Polietileno a 190°C (LLDPE) con los reportados en la literatura de los últimos quince años. Es difícil de encontrar en la literatura datos para el Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE). De varios artículos [7,8,9,10,11] y libros [15,17] consultados, que proporcionan datos de Polietileno de Baja Densidad (LDPE) y de Polietileno de Alta Densidad (HDPE). Solamente los artículos de Donald H. Sebastian [4] y el de W. Minoshima & J. L. White [5], proporcionan datos de Viscosidad Extensional para el LLDPE. El empleado en la tesis fue manufacturado por la Union Carbide.

Los datos proporcionados por los artículos antes mencionados se obtuvieron realizando experimentos totalmente distintos a los de esta tesis, como se mencionó en la introducción, se empleó un aparato de platos rotantes, en donde un filamento del polímero se extiende y se registran las fuerzas en un transductor. El filamento está sumergido en aceite caliente, en donde se funde.

El artículo con los datos más aproximados a los obtenidos en la tesis es el de D. H. Sebastian, ya que la temperatura del Polietileno es de 190°C, el de Minoshima & White no especifican la temperatura, pero al parecer trabajan a 180°C.. Los datos obtenidos son los siguientes:

$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	$\eta_E$ (Poises)
0.01	2682695
0.02	2275845
0.05	1451793
0.1	1389495
0.2	1056354
0.5	886378

$$t = 0.709089$$

$$l = 688000$$

Como se puede observar, el exponente de la Ley de Potencia del artículo es muy parecido al obtenido en la tesis, que es de aproximadamente de 0.69. El valor de  $l$  del artículo es diez veces menor al de la tesis, podemos atribuir a la naturaleza individual de los experimentos. En el artículo se lleva a cabo una extensión libre de corte.

Lo que también se hace patente es el comportamiento de que al aumentar la rapidez de extensión disminuye la Viscosidad Exten-

sional, comportamiento presentado en la tesis para los tres polímeros. La Viscosidad Extensional calculada para el Poliestireno Funcionalizado permaneció prácticamente constante, pero con una tendencia a disminuir conforme aumenta la rapidez de deformación.

Otra cuestión importante es que en los resultados de la tesis no se puede apreciar la regla de Trouton, debido a que nos encontramos en la zona de Ley de Potencia; esto se aprecia en los resultados para Viscosidad de Corte en el artículo de Minoshima & White. En el artículo se llega a  $\eta_0$  en rapidezces de deformación menores de  $0.1 \text{ s}^{-1}$ . Un valor aproximado de  $\eta_0$  para el LLDPE a  $190^\circ\text{C}$  es de 66812 Poises, si decimos que a bajas rapidezces de deformación extensional ( $\dot{\epsilon}$ ) la viscosidad extensional según la regla de Trouton es de aproximadamente 200,436 Poises a  $190^\circ\text{C}$ . Si comparamos éste valor con la Viscosidad Extensional del artículo de Sebastian con una  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ , es 13.4 veces más grande a lo que se debería de esperar. (Ver figura C-1).

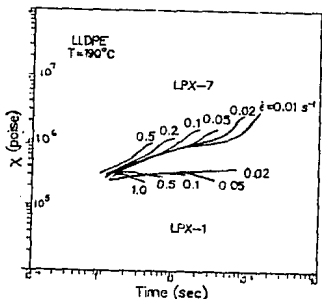


Figura C-1.

Otra posibilidad por la que no se aprecia la regla de Trouton es que como estamos calculando una  $\dot{\epsilon}_{\text{max}}$  en función de  $\dot{\gamma}_w$ ; esta última es por lo menos diez veces mayor que la primera, por lo que se están comparando una Viscosidad Extensional muy grande debida a la pequeña rapidez de deformación  $\dot{\epsilon}_{\text{max}}$ , con una Viscosidad de Corte muy pequeña debida a una rapidez de deformación  $\dot{\gamma}_w$  gran-

de. (Ver figura C-2).

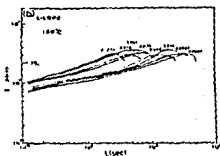


Figura C-2.

Esta no es la única discrepancia que se encuentra en la bibliografía, el intervalo de  $\epsilon$  del artículo de Sebastian se encuentra dentro del intervalo del artículo de Minoshima & White y estos últimos concluyen que la Viscosidad Extensional es prácticamente constante, el intervalo se encuentra al rededor de 0.1 y 0.0001  $s^{-1}$ . Lo cual no concuerda tampoco con los resultados de la tesis. (Ver figura C-3).

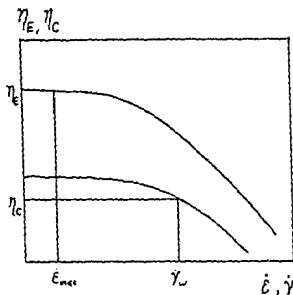


Figura C-3.

Una observación adicional, con respecto al artículo de Minoshima & White, afirman que las propiedades reológicas del Polietileno de Alta Densidad (HDPE) son muy similares a las propiedades del LLDPE, debido a que tienen una distribución de pesos moleculares muy similar. Si se observa la figura C-4, a rapideces de deformación muy bajas, la Viscosidad Extensional es más de diez veces mayor que  $3\eta_0$ , para el HDPE.

### CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos en la tesis para la Viscosidad Extensional del polietileno lineal (LLDPE), la ley de potencia "t" es similar a la de los datos reportados en la literatura. A pesar de que se emplearon dos experimentos de distinta naturaleza uno empleando un filamento del polímero, y el otro en un reómetro capilar. Pero ambos análisis coinciden en que la Viscosidad Extensional disminuye conforme aumenta la rapidez de elongación. Mismo comportamiento presentado por el EVA y Poliestireno Funcionalizado.

En base a esto, se podrá concluir que los flujos en una contracción son muy útiles para estimar los parámetros de ley de potencia de la Viscosidad Extensional para polímeros fundidos; y se puede afirmar por los resultados obtenidos que el análisis de Binding es sólo para la zona de Ley de Potencia. Sería conveniente hacer un estudio con otro análisis a rapidezces de deformación menores a la de la tesis, de menos de  $1 \text{ s}^{-1}$ , y así poder apreciar su comportamiento en donde se debe cumplir la regla de Trouton.

Una observación pertinente en lo concerniente a la corrección de Bagley en el cálculo de la Viscosidad de Corte, sugiere que si se emplean capilares con entrada de  $90^\circ$ , entonces la corrección de Bagley "e" es muy pequeña y se puede omitir. También sucede lo mismo con la corrección por la altura de la columna de polímero, la cual también es muy pequeña, y se puede omitir de los cálculos. Al parecer ésta última es grande para líquidos menos viscosos que los polímeros empleados en la tesis.

## *Apéndice*

Características principales de los polímeros empleados:

**POLIETILENO LINEAL DE BAJA DENSIDAD (LLDPE):**

Como información, el polietileno de cualquier clase, ya sea el lineal de baja densidad (LLDPE), el de baja densidad (LDPE) y el de alta densidad (HDPE); se obtienen industrialmente a partir de etileno o copolímeros del etileno con hidrocarburos insaturados, los cuales se comprimen entre 15,000 a 45,000 psipara el LDPE y a bajas presiones para el LLDPE y HDPE.. Posteriormente son llevados a un reactor catalítico, el cual tiene un catalizador de peróxido para el LDPE y catalizador de coordinación para los LLDPE y HDPE.

El polietileno está compuesto por moléculas de etileno formando largas cadenas, y las características de cada formulación dependen del número promedio de unidades en la cadena y la manera en que se combinan. La densidad está dada por la forma de las moléculas, así que cadenas muy juntas provocan una alta densidad, cadenas espaciadas debido a ramificaciones provocan una baja densidad. En el caso del HDPE las cadenas son lineales pero muy próximas, en el caso del LLDPE son cadenas lineales pero espaciadas. Las densidades de los polietilenos de baja densidad se encuentran en el intervalo de 0.91 a 0.94, y los de alta densidad entre 0.94 a 0.965.

El polietileno empleado en el trabajo experimental fue proporcionado por la Union Carbide de México. Su nombre comercial es G-7040, con las siguientes características físicas:

Densidad relativa = 0.919

Peso molecular = 84000

**ETILEN-VINIL-ACETATO:**

Es un copolímero especial del polietileno que se caracteriza por su gran flexibilidad, dureza, claridad y gran resistencia a la ruptura. Entre sus propiedades, puede retener la luz ultravioleta y el ozono. El EVA empleado en la tesis es una muestra de corte--sía de procedencia desconocida.

**POLIESTIRENO FUNCIONALIZADO CON ACIDO MALEICO:**

El poliestireno es un polímero de estireno, es un producto

amorfo y frágil, empleado para la fabricación de diversos objetos moldeados y espumas. El poliestireno empleado en la tesis fue proporcionado por Industrias Resistol S.A., es una resina del tipo Dylark 332, con 14% de anhídrido maléico.



## ***BIBLIOGRAFIA***

- 1.- F.N. Cogswell, *Polym. Eng. Sci.*, 12 (1972) 64-73.
- 2.- D.M. Binding, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 27 (1988) 173-189
- 3.- D.M. Binding & K. Walters, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 30 (1988) 233-250.
- 4.- D.H. Sebastian & J.R. Dearborn, *Polym. Eng. Sci.*, 23 (1983) 572-575.
- 5.- W. Minoshima & J. L. White, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 19 (1986) 251-274.
- 6.- Valenza, Spadaro, La Mantia & Acierno, *Rheol. Acta*, 25 (1986) 50-54.
- 7.- La Mantia, Valenza & Acierno, *Polym. Eng. Sci.*, 28 (1988) 90.
- 8.- Lou & Tanner, *Rheol. Acta* 26 (1987) 499-507.
- 9.- Meissner, *J. Appl. Polym. Sci.*, 16 (1972) 2877.
- 10.- Ide & White, *J. Appl. Polym. Sci.*, 22 (1987) 1061.
- 11.- White & Baird, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 20 (1986) 93-101.
- 12.- *Rheometers for Molten Plastics*, J. M. Dealy, Van Nostrand Reinhold Co., 1982, U.S.A.
- 13.- *Curso de extrusión de termoplásticos*, M. A. Sánchez Urrutia, O. Manero Brito, C. A. Guerrero Salazar, Septiembre 1990.
- 14.- *Fenómenos de Transporte*, R. B. Bird, W. E. Stewart & E.N. Loghtfoot, Ediciones REPLA S.A., México, 1987.
- 15.- *Dynamics of Polymer Liquids*, Bird, Armstrong & Hassager, J. Wiley, New York, 1987.
- 16.- *Ecuaciones diferenciales y cálculo variacional*, L. Elsgoltz, 3ra. Ed., Editorial Mir, Moscú, 1983.
- 17.- *Fundamentals of Polymer Engineering*, S. Middleman, McGraw-Hill, New York, 1977.