

2ej 15



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**LOS EFECTOS DE FRONTERAS SOLIDAS EN EL  
FLUJO DE SOLUCIONES POLIMERICAS**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A N  
SABAS ANGELES CARRANZA  
ROBERTO VAZQUEZ NUÑEZ

**México, D. F.**

**1987**



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

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

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

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

## I N D I C E

	PAG.
I. INTRODUCCION	1
II. FUNDAMENTOS	4
2.1. Fluidos Newtonianos	
2.2. Fluidos no Newtonianos	
a). Fluidos Independientes del Tiempo	
i.- Plásticos Bingham	
ii.- Fluidos Pseudoplásticos	
iii.- Fluidos Dilatantes	
b). Fluidos Dependientes del Tiempo	
i.- Fluidos Tixotrópicos	
ii.- Fluidos Reopéticos	
c). Fluidos Viscoelásticos	
2.3. Flujo Homogéneo y no Homogéneo	
2.4. Flujos Viscométricos	
III. FLUJO DE POISEUILLE Y TEORIA DEL DESLIZAMIENTO	14
3.1. Desarrollo Matemático para calcular las funciones materiales a partir de un reómetro capilar.	
3.2. Flujo en Capilares	
3.3. Efectos de entrada y de salida	
a). Corrección de Bagley	
b). Corrección de Rabinowitsch	
3.4. Teoría del fenómeno de deslizamiento	
3.5. Cuantificación del fenómeno de deslizamiento	

## IV. ANTECEDENTES EXPERIMENTALES

26

4.1. Trabajos previos sobre el fenómeno de deslizamiento aparente.

4.2. Características de las soluciones usadas

- a). Macromoléculas
- b). Poliacrilamida
- c). Xantana

## V. DESCRIPCION DEL EQUIPO Y CONSIDERACIONES EXPERIMENTALES.

40

5.1. Fluidos empleados

- a). Preparación de las soluciones
- b). Degradación del polímero
- c). Variación de la viscosidad como función de la temperatura.

5.2. Sistema Experimental

- a). Depósito de Alimentación del Fluido
- b). Sistema de Medición de Caídas de Presión
- c). Sistema de Medición de Gastos
- d). Capilares
- e). Poleas

5.3. Técnica Experimental

- a). Calibración del Transductor Diferencial de Presión.
- b). Operación del Viscosímetro Capilar
- c). Determinación de datos experimentales de gasto-caída de presión.
- d). Determinación de los diámetros de los capilares.

		PAG.
	5.4. Factores que afectan la determinación del deslizamiento aparente.	
	a). Efectos de entrada y salida	
	b). Bloqueamiento o Taponeamiento	
	c). Adsorción	
VI.	DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	54
	6.1. Resultados	
	6.2. Discusion de Resultados	
	6.3. Conclusiones	
	6.4. Tablas y Gráficas	
VII.	BIBLIOGRAFIA	59

## **I. INTRODUCCION**

## INTRODUCCION

En el presente trabajo se estudió el campo no homogéneo de esfuerzos existente en el flujo laminar de soluciones poliméricas a través de capilares, el cual es la causa de interesantes fenómenos observados en las regiones cercanas y en contacto con las fronteras sólidas.

Estos efectos indican la existencia de una delgada capa de baja viscosidad con propiedades reológicas anisotrópicas y se caracteriza en términos de una velocidad de deslizamiento sobre la pared del capilar. Esta capa de baja viscosidad produce un aumento en el flujo volumétrico con magnitudes más elevadas en relación al calculado en el caso de esfuerzo homogéneo.

El fenómeno de deslizamiento aparente en el flujo laminar de soluciones poliméricas que fluyen a través de tuberías ha sido estudiado en muchas ocasiones. A pesar de ello, los diferentes resultados obtenidos no incluyen la región de pequeños valores del esfuerzo, donde la contribución del flujo por deslizamiento puede ser más importante.

## OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo fueron los de estudiar el flujo de soluciones poliméricas a bajos valores del esfuerzo cortante para obtener evidencia experimental acerca del fenómeno de deslizamiento aparente, analizándolo con particular atención a la conformación molecular en flujo. Para lograr este último objetivo se comparó el comportamiento de un polielectrolito débil (poliacrilamida) y el de un biopolímero rígido (Xantana), analizando la influencia que la fuerza iónica del medio (concentración de cloruro de sodio) tiene sobre la velocidad de deslizamiento aparente para la solución de Xantana.

Estas soluciones poliméricas han sido empleadas en procesos de recuperación secundaria y terciaria del petróleo, cuyo estudio involucra el flujo de estas en medio poroso a un nivel de magnitudes pequeñas del esfuerzo y en un medio con un determinado grado de salinidad. Otro caso de interés es el flujo de la sangre donde también se manejan valores muy pequeños de rapidez de deformación, y los fenómenos asociados con ello.

Otro objetivo fué el de conocer los efectos que las diferentes estructuras moleculares tendrían sobre diferentes tipos de materiales, para esto se utilizaron capilares de acero y de vidrio.



Para un mejor entendimiento del objetivo de la tesis creemos que es conveniente una pequeña introducción sobre la clasificación de los fluidos , la cual se da en el Capítulo II.

En el Capítulo III se da una descripción del flujo de Poiseuille y se introduce la teoría de deslizamiento. En el Capítulo IV se dan a conocer las características de las soluciones empleadas, así como un breve resumen de los estudios realizados con anterioridad. En el Capítulo V se da una descripción del diseño del aparato experimental utilizado en este estudio y el manejo del mismo. Por último en el Capítulo VI se encuentran reportados los resultados obtenidos en el estudio experimental y también se enuncian las conclusiones finales.

## II. FUNDAMENTOS

## 2.1 FLUIDOS NEWTONIANOS

Consideremos un líquido incompresible contenido entre dos placas paralelas separadas por una distancia pequeña ( $h$ ). Si la placa superior es puesta en movimiento a una velocidad  $V$ , en el fluido se establecerá un perfil de velocidades lineal, como se muestra en la figura 2.1

Si consideramos que para mantener el perfil de velocidades, debe ser aplicado un esfuerzo cortante simple - (capas paralelas de fluido que se deslizan una sobre otra manteniendo la misma distancia de separación), podemos deducir que ese esfuerzo cortante debe ser proporcional a la variación de la velocidad con respecto a la variación de la distancia entre las placas<sup>1</sup>.

La Ley de Newton es una expresión matemática que expresa el fenómeno mencionado:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (2.1)$$

donde  $\mu$  es la constante de proporcionalidad llamada viscosidad cortante y  $\tau_{yx}$  es el tensor de esfuerzos.

Esto significa que el esfuerzo cortante  $\tau_{yx}$  es directamente proporcional a la rapidez de corte  $\frac{dv_x}{dy} = \dot{\gamma}$

donde  $\dot{\gamma}$  es la rapidez de deformación, en este caso constante.

A los materiales que siguen esta relación se les conoce como fluidos Newtonianos.

## 2.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

Los fluidos no Newtonianos son aquellos fluidos cuya viscosidad (a una temperatura y presión dadas) no es constante, sino que depende de factores tales como la rapidez de deformación, el esfuerzo cortante y de la historia previa de deformaciones del fluido.

En estos fluidos la relación del esfuerzo con el gradiente de velocidades ( $\tau_{xy}$  vs  $dv_x/dy$ ) no es lineal. Este fenómeno se presenta en líquidos como los polímeros, coloides, geles, pastas concentradas, fluidos biológicos y soluciones poliméricas.

Las diferentes manifestaciones de comportamiento no-Newtoniano pueden dividirse dentro de tres clasificaciones, las cuales se enlistan a continuación y se discutirán más adelante.

lante.

a).- Fluidos Independientes del Tiempo, donde la viscosidad del fluido ( $\eta$ ) depende solamente de la rapidez o del esfuerzo cortante.

b).- Fluidos Dependientes del Tiempo, donde la viscosidad del fluido depende de la historia de deformaciones, es decir, si ha estado sometido previamente a algún esfuerzo o deformación.

c).- Fluidos que tienen características de fluidos y sólidos a la vez, exhibiendo características viscosas y elásticas si multáneamente, llamados Fluidos Viscoelásticos.

a) Fluidos Independientes del Tiempo.

Los fluidos que forman este grupo, son: Plásticos Bingham, Fluidos Pseudoplásticos y Fluidos Dilatantes.

En la figura 2.2 están representadas las curvas de flujo para estos materiales.

i) Plásticos Bingham

Un plástico Bingham está caracterizado por una curva de flujo que es una línea recta, teniendo una intercepción  $\tau_y$  sobre el eje de los esfuerzos cortantes. Este valor recibe

el nombre de esfuerzo de cedencia y es el esfuerzo que debe ser excedido para que el material fluya. La ecuación reológica de un fluido de Bingham es:

$$\tau - \tau_y = \mu_p \dot{\gamma} \quad \tau > \tau_y \quad (2.2)$$

donde  $\mu_p$  es la viscosidad plástica.

El comportamiento de un Fluido de Bingham se puede explicar de la siguiente manera: cuando el fluido está en reposo tiene una estructura tridimensional que resiste cualquier esfuerzo menor que el crítico. Si este esfuerzo es excedido, la estructura se desintegra totalmente y el sistema se comporta como un fluido Newtoniano con esfuerzo cortante  $\tau - \tau_y$ . Cuando el esfuerzo cortante es menor a  $\tau_y$  la estructura se regenera.

ii).- Fluidos Pseudoplásticos.

Los Fluidos Pseudoplásticos muestran un decremento en la viscosidad aparente (relación de esfuerzo cortante y rapidez de deformación) cuando se incrementa la rapidez de deformación.

El comportamiento de los Fluidos Pseudoplásticos generalmente es restringido a ciertos valores de rapidez de deformación, ya que cuando una solución es sometida a muy bajos o muy altos valores de rapidez de deformación, el comportamiento es Newtoniano.

Existen muchas ecuaciones constitutivas útiles para Fluidos - Pseudoplásticos, aún cuando muchas de ellas no son universalmente aplicables, la más común es la ecuación del modelo empírico de Ostwald-de-Waele-Nutting:

En donde el esfuerzo está dado por

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.3)$$

y por lo tanto la viscosidad  $\eta$  es:

$$\eta = K \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (2.4)$$

La ecuación anterior es comúnmente denominada Ley de la Potencia, la cual contiene dos parámetros reológicos: el índice de consistencia  $K$  y el índice de comportamiento de flujo  $n$

Si los datos reológicos son graficados sobre coordenadas logarítmicas en términos de esfuerzo cortante contra rapidez de deformación, podemos determinar a partir de la línea recta obtenida la pendiente  $n$ . Cuando  $n$  toma el valor de 1 (de la ec. 2.3)

$\eta = K$  que corresponde al caso del fluido Newtoniano.

En este modelo  $K$  es una medida de la viscosidad del fluido.

y n una medida del caracter no-newtoniano. Una de las ---- principales desventajas de la Ley de la Potencia es que predice una viscosidad infinita cuando  $\dot{\gamma}(0 \tau)$  tiende a cero y una viscosidad cero cuando  $\dot{\gamma}$  tiende a infinito.

Existen otras ecuaciones de tipo empírico como la ecuación de Powell-Eyring:

$$\eta = \mu_0 \left( \frac{a \tau c \operatorname{senh} (\mu_0 \dot{\gamma} / B)}{(\mu_0 \dot{\gamma} / B)} \right) \quad (2.5)$$

donde  $\mu_0$  es la viscosidad Newtoniana cuando el esfuerzo cortante tiende a cero.

Una ecuación constitutiva la cual no muestra una dependencia de la viscosidad con respecto a la rapidez de deformación, si no una dependencia con respecto al esfuerzo cortante  $\eta = \eta(\tau)$  es el modelo de Ellis, expresado como:

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{1}{\mu_0} + K \tau^{(1/n - 1)} \right) \tau \quad (2.6)$$

$$\eta = \frac{\mu_0}{1 + \frac{K}{\mu_0} \tau^{n-1}} \quad (2.7)$$

cuando  $n=1$  se convierte en la Ley de Newton y cuando  $1/\mu_0=0$  se obtiene la Ley de la Potencia.

### iii).- Fluidos Dilatantes

En estos fluidos la viscosidad aparente aumenta a medida que se incrementa la rapidez de deformación. La Ley de la Potencia también se puede emplear en estos fluidos.



El valor de  $\eta$  para este caso deberá ser mayor a uno.

b).- Fluidos Dependientes del Tiempo.

i) Fluidos Tixotrópicos

Los materiales Tixotrópicos son aquellos cuya consistencia depende de la duración del esfuerzo, así como de la velocidad de deformación.

Si un material Tixotrópico es puesto en movimiento a velocidad constante, después de un tiempo la estructura del material progresivamente cambiará (los enlaces intermoleculares temporales se desintegran, ya que éstos son físicos y no químicos) y la viscosidad aparente disminuirá. La velocidad de rompimiento de la estructura durante la aplicación del esfuerzo, dependerá del número de enlaces estructurales en el fluido que se pueden romper y, por lo tanto, decrecerá con el tiempo. Simultáneamente existe un proceso de reformación de la estructura. Eventualmente se alcanza un estado de equilibrio dinámico cuando la velocidad de formación de la estructura es igual a la velocidad de rompimiento de la misma. Este estado de equilibrio depende de la velocidad de deformación.

ii).- Fluidos Reopécticos.

Son aquellos fluidos en los cuales la viscosidad aumenta

al incrementarse la duración de la deformación. Este fenómeno se explica en términos de una formación gradual de la estructura del fluido. Este fenómeno se observa en soluciones diluidas de pentóxido de Vanadio y Bentonita y se limita a valores de rapidez de deformación bastante pequeños. Si se sobrepasan estos valores de rapidez de deformación, la estructura no se reforma.

c) Fluidos Viscoelásticos.

Un fluido viscoelástico es aquel que simultáneamente muestra en su comportamiento respuestas elásticas y viscosas. El concepto de viscoelasticidad describe aquellos materiales cuya respuesta a un esfuerzo obedece un principio de superposición, es decir, materiales que pueden ser representados por un modelo formado por elementos que satisfacen tanto la Ley de Hooke de elasticidad como la Ley de Newton de viscosidad.

2.3 FLUJO HOMOGENEO Y NO HOMOGENEO.

Varios experimentos en fluidos macromoleculares conducen a la determinación de propiedades de los materiales que dependen de la rapidez de deformación, del tiempo y otros factores. En particular un conocimiento de los patrones de flujo usados para caracterizar líquidos poliméricos nos puede

conducir a la obtención de propiedades de los fluidos como son viscosidad y elasticidad.

Los tipos de flujo generados en estos experimentos son del tipo homogéneo y no homogéneo.

Un flujo homogéneo es aquel que presenta campos de esfuerzos homogéneos, es decir, que el esfuerzo cortante no presenta una dependencia con respecto a la posición.

Ejemplos de flujo homogéneo son: el flujo en una geometría de cono y plato (Ver figura 2.4), y el flujo anular tangencial de cilindros concéntricos con separaciones muy pequeñas.

Un flujo no homogéneo es aquel que presenta campos de esfuerzos dependientes de la posición. Como ejemplos de flujos no homogéneos tenemos el flujo laminar de líquidos poliméricos que fluyen a través de tuberías y canales (Ver figura -- 2.5).

#### 2.4 FLUJOS VISCOMETRICOS

Un flujo viscométrico es un flujo cortante unidireccional para el cual la rapidez de deformación  $\dot{\gamma}$  es independiente del tiempo. Esta definición de flujo viscométrico no es universal ( 2 ), algunos reólogos usan la palabra visco

métrico para representar un flujo cortante unidireccional.

Una forma alternativa de definir un flujo viscométrico requiere que la historia de flujo en cualquier partícula sea de corte simple, es decir, si se toman dos partículas en un plano (paralelo al flujo), las cuales están separadas una distancia  $X$  al tiempo  $t_0$ , éstas mantendrán la misma separación a un tiempo  $t > t_0$ .

Ejemplos de flujos viscométricos son: flujo anular tangencial (con separaciones muy pequeñas entre los cilindros) y flujo helicoidal de cilindros concéntricos. En la referencia<sup>2</sup> se pueden encontrar otros ejemplos de flujos viscométricos y algunas de sus características.

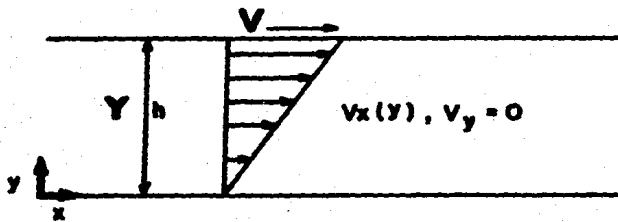


FIGURA 2.1 PERFIL DE VELOCIDADES LINEAL

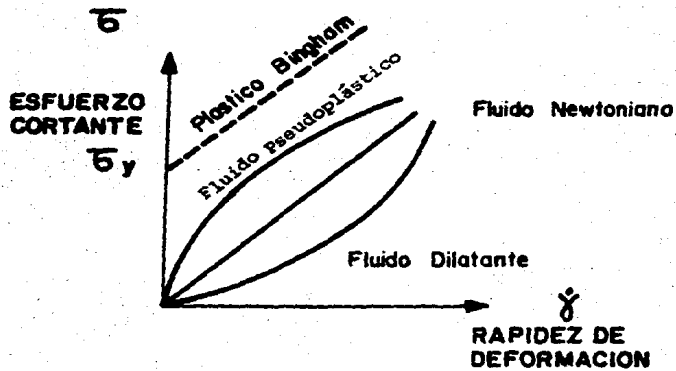


FIGURA 2.2 CURVAS DE FLUJO PARA DIFERENTES MATERIALES

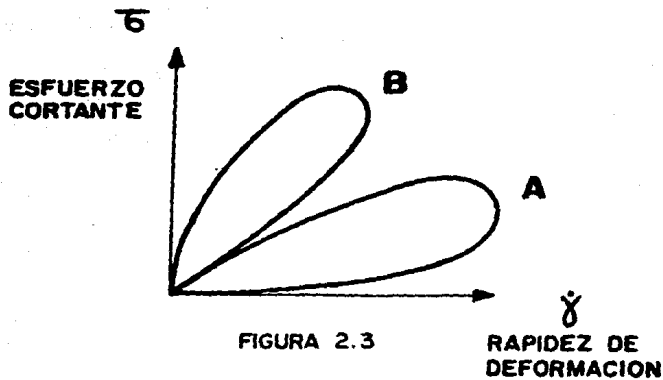


FIGURA 2.3

RAPIDEZ DE DEFORMACION

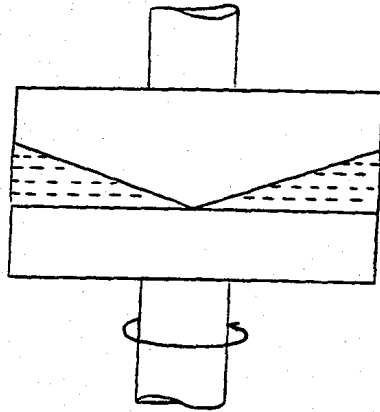
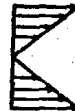
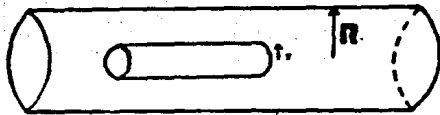


FIGURA 2.4  
GEOMETRIA DE CONO Y PLATO



$$\tau_w = \frac{PR}{2}$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{1}{\pi R^3} (3Q + \frac{P\Delta Q}{\Delta P})$$

$$\eta(\dot{\gamma}_w) = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w}$$

DONDE:

$\tau_w$  = ESFUERZO CORTANTE EVALUADO EN LA PARED

$\dot{\gamma}_w$  = RAPIDEZ DE DEFORMACION APARENTE

$\eta$  = VISCOSIDAD APARENTE



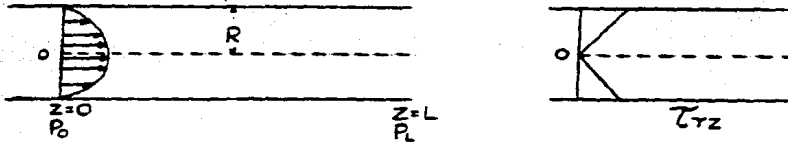
FIGURA 2.5  
TUBO CAPILAR

**III. FLUJO DE POISEUILLE Y  
TEORIA DEL DESLIZAMIENTO**

### 3.1. DESARROLLO MATEMATICO PARA CALCULAR LAS FUNCIONES MATERIALES A PARTIR DE UN REOMETRO CAPILAR.

Supongamos que un líquido incompresible fluye lenta y continuamente a través de un capilar de radio  $R$ , a una temperatura constante y con una diferencia de presión entre sus extremos. Consideremos una pequeña sección del tubo lo suficientemente lejos de los extremos, en donde el flujo está hidrodinámicamente desarrollado. En este caso, son razonables las siguientes suposiciones:

- i) Flujo laminar
- ii) Flujo unidireccional y simétrico
- iii) Régimen permanente
- iv) No hay deslizamiento en la pared



Para la solución de este problema es necesario usar las siguientes ecuaciones:

- a) Ecuación de Continuidad
- b) Ecuación de Conservación de Momentum



Los componentes de la velocidad en coordenadas cilíndricas son:

$$\begin{aligned} V_z &= V_z(r) \\ V_\theta &= V_r = 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

y las condiciones a la frontera son:

$$\begin{aligned} V_z &= 0 \text{ cuando } r=R \\ V_z &\text{ es finita cuando } r=0 \end{aligned}$$

La ecuación de continuidad en coordenadas cilíndricas, es:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

de aquí que

$$V_z = V_z(r)$$

Ecuación de Movimiento (Ecuación de Navier-Stokes).

Dado que  $V_r = V_\theta = 0$  solamente queda el componente  $z$  con las siguientes simplificaciones:

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dV_z}{dr} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{dP}{dz} = \mu \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dV_z}{dr} \right) \quad (3.4)$$

el término  $\frac{dP}{dz}$  lo escribimos como una diferencia de presión por unidad de longitud.

$$\frac{dP}{dz} = - \frac{P_0 - P}{L} \quad (3.5)$$

integrando la ecuación 3.4:

$$\left(\frac{1}{\mu}\right)\left(\frac{dP}{dz}\right)_r = \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_z}{dr}\right) \quad (3.6)$$

$$v_z = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP}{dz}\right) \left(-\frac{r^2}{4}\right) + C_1 \ln r + C_2$$

substituyendo las condiciones a la frontera en la ecuación

3.6

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = -\left(\frac{1}{\mu}\right)\left(\frac{dP}{dz}\right)\left(-\frac{R^2}{4}\right)$$

$$\therefore v_z = \frac{(P_0 - P) R^2}{4\mu L} \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \quad (3.7)$$

el gasto volumétrico está dado por:

$$Q = \pi R^2 \langle v_z \rangle = \iint v_z dA \quad (3.8a)$$

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^R v_z r dr d\theta \quad (3.8b)$$

$$Q = \frac{\pi (P_0 - P) R^4}{8\mu L} \quad (3.9)$$

Esta es la ecuación de Hagen-Poiseuille, a partir de la cual la viscosidad  $\mu$  puede ser calculada conociendo el gasto volumétrico  $Q$  para un valor del gradiente de presión  $P$ .

### 3.2. FLUJO EN CAPILARES.

El flujo de un fluido no-Newtoniano en un tubo capilar es

complejo y se puede dividir en tres regiones como se muestra - en la figura 3.2. La región de entrada I incluye la sección - donde se desarrollan altos esfuerzos debido al efecto de con-- vergencia al pasar el fluido del depósito de alimentación al ca pilar. Es también la región en la cual los esfuerzos se rela ján hasta alcanzar un valor determinado dentro del tubo (En es ta región la rapidez de deformación  $\dot{\gamma}$  y el esfuerzo cortante  $\tau_w$  dependen de la coordenada radial y de la coordenada --- axial).

En la región II el perfil de velocidades está completamente desarrollado (régimen laminar), y tanto la rapidez de deforma ción como el esfuerzo cortante dependen solamente de la coorde nada radial. Esta es la región que puede identificarse como - flujo de corte estacionario. En la región viscométrica II es donde podemos definir una viscosidad aparente dada por:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (3.1)$$

donde:  $\tau_w = \frac{\Delta P R}{L} =$  Esfuerzo cortante evaluado en la pared (3.11)

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} = \text{Rapidez de Deformación para un Fluido Newto- niano.} \quad (3.12)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \text{Gradiente de Presión}$$

$$R = \text{Radio del Capilar}$$

$$Q = \text{Gasto volumétrico.}$$

Para un fluido no-Newtoniano.

$$\dot{\gamma}_w = \frac{1}{\pi R^3} (3Q + P \frac{dQ}{dP}) \quad (3.12a)$$

En la región de salida III, la influencia restrictiva de las paredes del tubo desaparecen y el perfil de velocidades presenta un arreglo diferente a la región de flujo desarrollado.

Los efectos que resulten de la primera y última región del tubo pueden tener implicaciones de importancia sobre las mediciones que se hacen en un viscosímetro capilar, por lo que antes de obtener información útil se deben minimizar estos efectos.

### 3.3 EFECTOS DE ENTRADA Y SALIDA

Las partículas de fluido provenientes del tanque alimentador, en la región I, se aceleran hasta alcanzar sus velocidades correspondientes al flujo desarrollado. En este proceso existe una pérdida de energía que causa que la presión disminuya rápidamente en esta región. Como podemos apreciar en la figura 3.3, el gradiente de presión decrece a lo largo de la longitud de la región de entrada ( $L_e$ ) y alcanza un valor constante que se mantiene a lo largo de la región de flujo desarrollado ( $L_f$ ).

#### a) Corrección de Bagley.

En algunas ocasiones es necesario tomar la caída de presión a lo largo de todo el tubo, por lo que el gradiente de presión debe ser corregido por los efectos de entrada y salida. Bagley ideó una corrección la cual lleva su nombre.

El desarrollo de la corrección de Bagley parte de un balance de fuerzas como sigue:

$$\Delta P_T = \Delta P_e + \Delta P_{fd} + \Delta P_s \quad (3.13)$$

donde:

$\Delta P_T$  = Caída de presión total

$\Delta P_e, \Delta P_{fd}, \Delta P_s$  = Caída de presión de entrada, flujo desarrollado y de salida respectivamente.

Si asociamos los efectos de entrada y de salida

$$\Delta P_{ex} = \Delta P_e + \Delta P_s \quad (3.14)$$

entonces:  $\Delta P_{ex}$  = Caída de presión de exceso.

Utilizando la relación del esfuerzo con la caída de presión:

$$\tau = \frac{\Delta P}{L} \frac{D}{4}$$

$$\Delta P_T = 4\tau \frac{L}{D} + (4\tau \frac{L}{D})_{ex} \quad (3.15)$$

y despejando L/D

$$L/D = -(L/D)_{ex} + \frac{1}{4\tau_w} \Delta P \quad (3.16)$$

donde:  $(L/D)_{ex}$  es la longitud equivalente a la pérdida de energía en las regiones de entrada y de salida.

Una gráfica de L/D contra  $\Delta P$  determina el valor de  $(L/D)_{ex}$  de esta forma se corrige el esfuerzo debido a la energía de exceso.

El procedimiento para efectuar esta corrección es el siguiente :

Se usan diferentes capilares, del mismo radio pero diferente longitud (variando L/D), y se mide la caída de presión y el

gasto.

Se construye la gráfica de caída de presión contra rapidez de deformación para cada capilar.

A partir de las gráficas de  $\Delta P$  vs  $\dot{\gamma}_w$  para diferentes valores de  $L/D$ , se hace otra gráfica de  $\Delta P$  vs  $L/D$ , manteniendo la rapidez de deformación  $\dot{\gamma}$  constante, como se muestra en la figura 3.4.

Se toman valores de rapidez de deformación  $\dot{\gamma}$  constantes para asegurar que el esfuerzo cortante sea constante, ya que  $\tau_w = \eta \dot{\gamma}$ .

La corrección del esfuerzo cortante es:

$$\tau_w = \frac{\Delta P}{4 (L/D + (L/D)_{ex})} \quad (3.17)$$

Algunos autores predicen una relación de  $L/D$  de 20 para ciertos polímeros fundidos, de 40 a 60 para algunas soluciones poliméricas y hay quienes aseguran que en algunos casos es necesaria una relación de  $L/D$  de 350 para el establecimiento de un flujo viscométrico estable<sup>3</sup>.

b) Corrección de Rabinowitsch.

La ecuación (3.12) nos dá la rapidez de deformación en la pared del tubo para el caso de un fluido Newtoniano. Para un fluido no-Newtoniano la distribución de velocidad en el tubo depende de las propiedades reológicas del material, de esta manera esta ecuación se debe corregir para incluir los efectos del comportamiento no-Newtoniano. Esta corrección recibe el nombre de Corrección de Rabinowitsch. Utilizando la ecuación (3.12a) para la rapidez de deformación en este caso.

De la ecuación 3.8 tenemos

$$Q = 2\pi \int_0^R V_z V dr \quad (3.18)$$

integrando por partes

$$Q = \pi \int_0^R r^2 \dot{\gamma} dr \quad (3.19)$$

haciendo un cambio de variable en la ecuación 3.19 sabiendo que

$$r = \frac{R}{\tau_w} \tau \quad (3.20)$$

$$\text{a } \tau_w = cte$$

$$dr = \frac{R}{\tau_w} d\tau \quad (3.21)$$

$$Q = \pi \int_0^{\tau_w} \left(\frac{R}{\tau_w} \tau\right)^2 \dot{\gamma} \frac{R}{\tau_w} d\tau \quad (3.22)$$

cambiando límites de integración

$$\begin{array}{l} \text{en } \tau=0 \quad \tau=0 \\ \tau=R \quad \tau=\tau_w \end{array}$$

$$Q = \frac{\pi R^3}{6\omega} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau \quad (3.23)$$

rearrreglando

$$\frac{Q}{\pi R^3} \tau_w^3 = \int_0^{\tau_w} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau \quad (3.24)$$

tomando la derivada de Q con respecto a  $\tau_w$  (regla de Leibnitz) obtenemos

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left\{ \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln Q}{d \ln \tau_w} \right\}$$

otra forma de escribirlo

$$\dot{\gamma}_w = \frac{Q}{\pi R^3} \left\{ 3 + \frac{d \ln \frac{4Q}{\pi R^3}}{d \ln \tau_w} \right\}$$

dado que para un fluido Newtoniano

$$\dot{\gamma}_{new} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad Q = \frac{\pi}{4} R^3 \dot{\gamma}_{new}$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{\dot{\gamma}_{new}}{4} \left( 3 + \frac{d \ln \dot{\gamma}_w}{d \ln \tau_w} \right) \quad (3.25)$$

que es la llamada Corrección de Rabinowitsch.

### 3.4 TEORIA DEL FENOMENO DE DESLIZAMIENTO.

El Fenómeno de Deslizamiento Aparente se refiere a la reducción de viscosidad que exhiben las soluciones poliméricas en campos de esfuerzo no homogéneo ( ejemplo: tubos de diámetro pequeño) comparada con la viscosidad medida en campos de esfuerzos homogéneos (ejemplo: viscosímetro de cono y plato). En otras palabras, el fluido fluye más rápido en el capilar que el calculado a una determinada presión o a un mismo nivel de esfuerzo, cuando los cálculos se basan en el comportamiento reológico en campos de esfuerzos homogéneos.



Este efecto se ilustra en la figura 3.5 en función del gasto volumétrico a un esfuerzo dado.

El fenómeno de Deslizamiento Aparente en el flujo laminar de líquidos poliméricos que fluyen a través de tuberías pequeñas, es debido a la formación de una capa delgada de líquido de baja viscosidad cerca de la pared del tubo como resultado del campo no-homogéneo de esfuerzos existente en el capilar.

En el flujo de soluciones poliméricas en tubos capilares, las moléculas poliméricas se pueden distorsionar en gran medida cerca de la pared del tubo donde los esfuerzos cortantes son grandes.

Consecuentemente, las macromoléculas localizadas cerca de la pared del tubo tendrán una entropía más baja que las macromoléculas localizadas cerca del eje del tubo. Esta diferencia de entropías provoca un gradiente que da como resultado la migración de moléculas poliméricas cercanas a la pared, hacia el centro del tubo para minimizar el gradiente de entropía. Además, el mayor grado de distorsión y orientación de éstas en la región cercana a la pared, trae como consecuencia la zona de baja viscosidad o zona de deslizamiento.

### 3.5 CUANTIFICACION DEL FENOMENO DE DESLIZAMIENTO.

El Fenómeno de Deslizamiento Aparente puede ser estudiado ---

siguiendo el análisis de Mooney\*. Este análisis está basado en la suposición de que la capa de deslizamiento es delgada y que no se presentan efectos de adsorción en la pared del capilar.

A partir del análisis de deslizamiento aparente en tubos de sección transversal circular obtenemos las siguientes expresiones:

$$Q_{\text{exp}} = Q_{\text{sin efectos}} + Q_s$$

$$\dot{\gamma}_{\text{exp}} = \dot{\gamma}_{\text{sin efectos}} + \dot{\gamma}_s$$

$$\dot{\gamma}_{\text{sin efectos}} = \dot{\gamma}_{\text{exp}} - \dot{\gamma}_s \quad \text{o sea que}$$

$$\left(\frac{4Q}{\pi R^3}\right)_{\text{sin efectos}} = \frac{4Q}{\pi R^3} - \frac{4V_s}{R} \quad (3.26)$$

$$V_s = \frac{Q_s}{\pi R^2} \quad (3.27)$$

$Q_s$  = es la contribución del flujo de deslizamiento al gasto volumétrico total.

$V_s$  = es la velocidad efectiva de deslizamiento en la pared.

$D$  = diámetro del tubo

Diferenciando la ecuación 3.26 con respecto a  $1/R$  a un valor constante del esfuerzo en la pared, obtenemos:

$$\frac{\left(\frac{4Q}{\pi R^3}\right)}{\left(1/R\right)} = 4V_s \quad (3.28)$$

por lo que una gráfica de  $4Q/\pi R^3$  vs  $1/R$  dará una línea recta con pendiente  $4Vs$

Los valores de la velocidad de deslizamiento  $Vs$  pueden usarse para obtener el comportamiento real del esfuerzo cortante y la rapidez de deformación libres de efectos de deslizamiento.

La aplicación del análisis mencionado requiere de mediciones precisas del esfuerzo cortante en la pared.

El Fenómeno de Deslizamiento Aparente puede ser analizado en forma similar para planos inclinados y medios porosos.

A pesar de que se han propuesto variaciones al análisis de -- Mooney por varios investigadores, ninguno ofrece bases para el entendimiento del origen del flujo de Deslizamiento Aparente. De esta forma el análisis de Mooney ha permanecido como el método más popular para cuantificar el Deslizamiento Aparente.

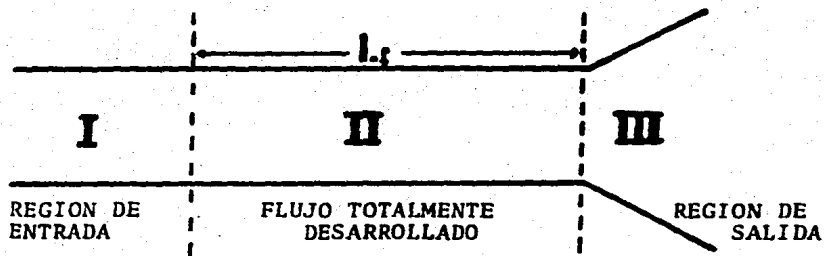


FIGURA 3.2  
 FLUJO DE UN FLUIDO NEWTONIANO  
 EN UN TUBO CAPILAR

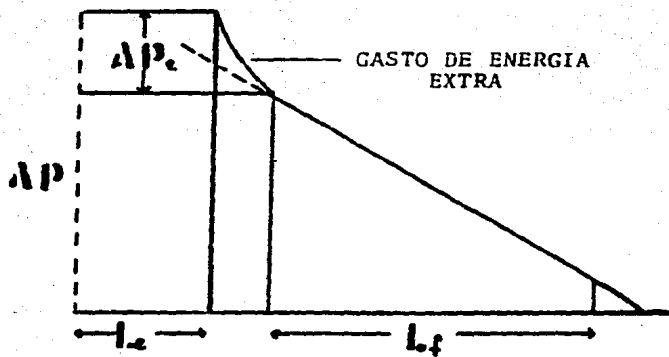


FIGURA 3.3  
 EFECTOS DE ENTRADA Y SALIDA

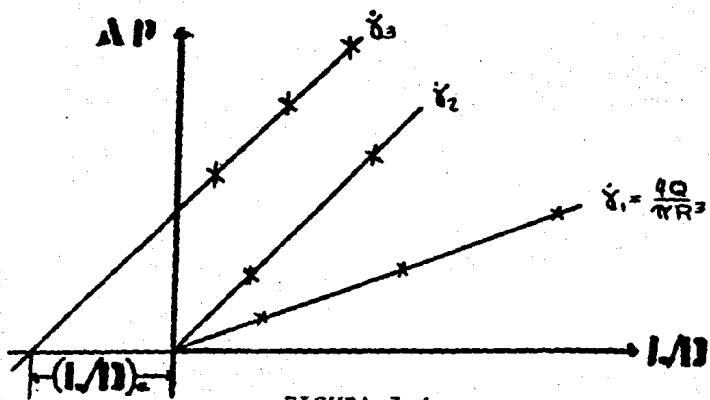


FIGURA 3.4  
CORRECCION DE BAGLEY

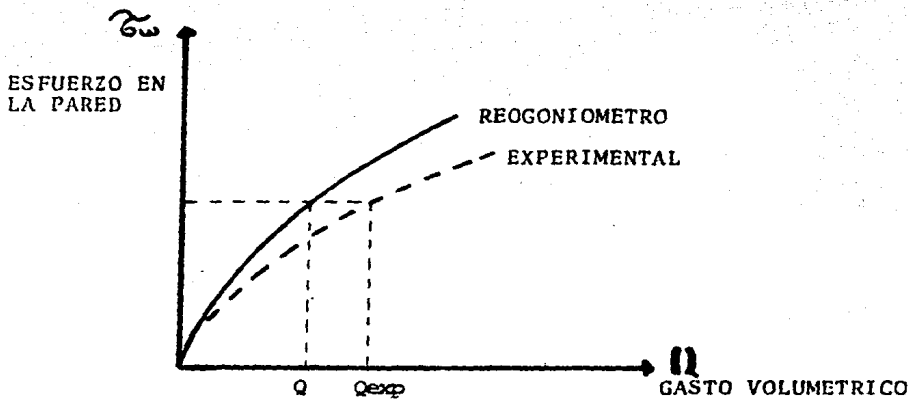


FIGURA 3.5  
FENOMENO DE DESLIZAMIENTO

#### **IV. ANTECEDENTES EXPERIMENTALES**

#### 4.1 FENOMENO DE DESLIZAMIENTO APARENTE

El Fenómeno de Deslizamiento Aparente no es nuevo en la literatura. En este capítulo, mostraremos que el deslizamiento aparente está bien documentado y su interpretación física está modelada con la hipótesis de la migración molecular debida a cambios entrópicos originados en modificaciones de la conformación de las macromoléculas del sistema. Los efectos de deslizamiento en el flujo de soluciones poliméricas y suspensiones se han reportado desde 1920. Además se han encontrado para una gran variedad de materiales y de sistemas como los de tubos capilares, planos inclinados, medios porosos y canales<sup>5</sup>.

Para el caso de deslizamiento aparente de soluciones poliméricas que fluyen en tubos capilares se conocen originalmente -- los reportes fenomenológicos de Mooney<sup>4</sup>, Reiner<sup>6</sup> y Toms<sup>7</sup>.

Fundamentalmente los trabajos de Mooney y Reiner proporcionaron el procedimiento para determinar la velocidad de deslizamiento y desde entonces se ha planteado la necesidad de entender el fenómeno desde un punto de vista mecanicista.

Desde los primeros estudios del Efecto de Deslizamiento Aparente, éste ha sido reproducido en muchos sistemas y bajo muchas condiciones experimentales. Para el flujo de soluciones poliméricas a través de capilares, además de los casos ya citados (Mooney, --

Reiner y Toms) se tienen los de Green<sup>8</sup>, Scott-Blair<sup>9</sup>, Oldroyd<sup>10</sup>, Kozicki, Vinogradov<sup>11</sup>, Kalashnikov y Vlasov<sup>12</sup>, Metzner<sup>13</sup>, Cohen y Metzner<sup>14</sup>, Kraynick y Schowalter<sup>15</sup> y Dutta y Mashelkar<sup>16</sup>. Además se ha reportado el deslizamiento de polímeros fundidos y elastómeros a través de capilares en los trabajos de Mooney y Black<sup>17</sup>, Vinogradov e Ivanova<sup>18</sup> y de Barttos y Holomeck<sup>19</sup>.

Las soluciones poliméricas también presentan el fenómeno de Deslizamiento bajo ciertas condiciones de flujo en planos inclinados como lo reportan Astarita<sup>20</sup> y Carreau<sup>21</sup>.

El fenómeno del incremento del flujo de soluciones poliméricas y microemulsiones a través de medios porosos también ha sido relacionado con el Desplazamiento Aparente.

Reiner encontró que el flujo de una solución de 1.7% de nitrocelulosa en dibutilftalato a través de tubos capilares de vidrio mostraba efectos de deslizamiento significativos. Estos efectos fueron interpretados en razón a un decremento en la viscosidad aparente al disminuir el diámetro del tubo capilar, para un esfuerzo dado.

A continuación presentamos una breve síntesis de algunos trabajos realizados anteriormente a este estudio.



En el artículo "Deslizamiento Aparente en el flujo de Soluciones Poliméricas" Metzner y Cohen<sup>22</sup> presentan una curva que describe la conducta de deslizamiento para el flujo de una solución acuosa de poliacrilamida 0.47% en peso a través de un tubo capilar de acero inoxidable de 0.0266 cm., de diámetro. Las mediciones de flujo a un nivel de esfuerzos dado son más grandes que las predicciones viscométricas (basadas en datos de cono y plato) en un 50%. Este mayor flujo está asociado con el fenómeno de Deslizamiento Aparente. En ese estudio el fenómeno de Deslizamiento Aparente es cuantificado para el flujo de varias soluciones de polímeros orgánicos a través de tubos capilares de acero inoxidable. El método experimental se basa en la determinación de la caída de presión y la velocidad de flujo para tubos de diámetro de 0.019 a 0.1097 cm y L/D de 20 a 2700 y un rango de rapidez de deformación  $\dot{\gamma}$  de 5 a 5000  $\text{seg}^{-1}$ .

Las soluciones poliméricas fueron : Poliacrilamida (Separan - AP-30, Dow Chemical, Co.), Carboximetilcelulosa (Na-CMC-7F, Hércules, Inc.) y Poliestireno (Pressure Chemical, Co.) en Tolueno y Decalina.

Estas soluciones fueron preparadas y filtradas para remover partículas o algún gel que pudiese estar presente. La caracterización reológica de las soluciones se obtuvo usando un viscosímetro de cono y plato (Weissenberg, Modelo R-18).

Dos gráficas de esfuerzo cortante contra velocidad de deformación para diferentes concentraciones de Separan y CMC muestran - que estos fluidos siguen la Ley de la Potencia.

En este artículo se encuentran varias gráficas para un selecto número de soluciones poliméricas para los cuales son detectados - los efectos de deslizamiento aparente (Separan 1%, 0.47%, 0.25%, PS-tolueno al 4% y una solución de Decalina al 3.15%).

No fueron detectados los efectos de deslizamiento aparente para las siguientes soluciones poliméricas:

2% de Poliestireno en tolueno ( $MW=1.8 \times 10^6$ ), 0.5 y 1.55% de poliestireno en Tolueno ( $MW=2.0 \times 10^7$ ).

La viscosidad de los fluidos que tuvieron efectos de deslizamiento decrece más rápidamente que el correspondiente incremento en la velocidad de deslizamiento. Consecuentemente, la contribución del deslizamiento a la velocidad total decrece cuando se incrementa el esfuerzo cortante en la pared. Se concluye entonces que la contribución del Fenómeno de Deslizamiento Aparente se incrementa más rápido en niveles de esfuerzo menores.

Finalmente se nota que la fracción de deslizamiento se incrementa con el decremento del diámetro del tubo.

En otro artículo "Efectos Anómalos en el flujo laminar de soluciones Poliméricas en Capilares". W. Kozicki<sup>23</sup> y colaboradores reportan los siguientes resultados:

Se utilizaron varias soluciones de Natrosol-250 G y los experimentos se realizaron a una temperatura de  $25^{\circ} \text{C} \pm 0.1^{\circ} \text{C}$ , utilizaron tubos capilares de diferentes diámetros. Los diámetros de los tubos fueron calibrados con agua destilada, estos valores fueron comparados con los valores dados por el proveedor de los tubos y verificados por mediciones de flujo con Etilenglicol. Adicionalmente 2 tubos fueron medidos utilizando un microscopio. Los rangos de  $(L/D)$ s de los tubos variaron de 400 a cerca de 1100.

Estos rangos minimizaron los efectos de entrada y los hicieron despreciables. Los diámetros de los tubos variaron de 0.0184 a 0.0578 cm.

Los resultados experimentales del flujo de 4 soluciones de Natrosol - 250 G de concentraciones de 0.6, 0.8, 1.0 y 1.2 por ciento a través de tuberías de diferente radio fueron graficados en función de  $\tau_w$  vs  $\dot{\gamma}$ , las curvas para los diferentes diámetros de tubo dieron curvas distintas sugiriendo una conducta anómala del fluido en la vecindad de la pared del tubo. En el caso de 0.6% de Natrosol-G, el deslizamiento de algunas de las curvas es más pequeño.

En este artículo algunas de las curvas en las gráficas de  $\tau_w$  vs  $\delta$  se intersectan con la curva de los datos reogoniométricos. Estas intersecciones junto con la distribución de las curvas en las regiones bajas y altas de  $\tau_w$  para diferentes diámetros permiten llegar a la conclusión que la conducta de estas curvas experimentales es caracterizada por una velocidad efectiva en la pared, la cual es negativa a bajos valores de esfuerzo cortante y positiva a grandes esfuerzos en la pared. En este artículo se reportó un diámetro crítico del tubo abajo del cual la velocidad efectiva en la pared es siempre positiva y es independiente de la concentración de la especie polimérica.

P.J. Carreau y colaboradores (Q.H. Bui and P. Leroux) en su artículo "Efectos de la Pared de Flujo de Polímeros sobre Planos Inclinados" <sup>23</sup>, hace un análisis de los efectos de la pared para el flujo por gravedad de fluidos poliméricos sobre planos inclinados. Este análisis es basado en la siguiente hipótesis.

- a) Las dimensiones finitas de la longitud y ancho del canal no afectan las mediciones en la zona central.
- b) El flujo es estable, unidimensional, laminar e isotérmico.
- c) La rapidez de deformación es una función única del esfuerzo en la pared.

d) En la interface líquido-aire, el momentum del flujo a través de la interface es despreciable:

c) Los efectos de pared resultan en la presencia de una capa delgada de fluido reológicamente diferente en la vecindad de la pared.

El aparato que se utilizó para llevar a cabo los experimentos fue un plano inclinado con un canal rectangular hecho de - acrílico de 10 cm., de ancho y 100 cm., de longitud. El ángulo de inclinación tenía un rango de variación de 10° a 40° pudiendo se regular cada 0.1 grados. La velocidad del flujo fue regulada a través de una válvula y determinada haciendo medidas sobre el peso del líquido. La temperatura del fluido fue controlada a 23.6° C. El espesor de la película del fluido fue medido con un micrómetro fino con precisión de 0.01 mm y montado sobre un soporte el cual puede ser puesto en varias partes del plano.

Fueron estudiados 7 fluidos.- Un aceite Newtoniano, 3 soluciones acuosas, 1.0%, 0.75% y 0.5% en peso de Na-Carboximetil Celulosa conteniendo una pequeña cantidad de preservativo para prevenir una degradación, 3 soluciones acuosas de 0.7%, 0.6% y 0.5% en peso de Poliacrilamida (Dow. Chemicals, Separan MG-700).

Estas soluciones fueron caracterizadas reológicamente usando un reogoniómetro Weissenberg (Modelo R-18) como base para una -

comparación.

En este artículo se presentan 6 gráficas en las cuales las curvas experimentales de rapidez de deformación son mucho más grandes que las curvas basadas en las predicciones de los modelos de Carreau y Ellis, llegando a alcanzar un factor de cuatro en algunos casos.

Para las soluciones <sup>2</sup>poliméricas, las contribuciones de los efectos de la pared son positivas a un incremento en la velocidad del flujo (la contribución varía de 4 a 80%), indicando que la suposición de una subcapa de baja viscosidad cerca de la pared del tubo es razonable. Los valores de L/D varían de 40 a 150 en la zona de medición y los rangos de rapidez de deformación varían de 0.02 a 1000  $\text{seg}^{-1}$ .

### RESUMEN SOBRE LA REVISION BIBLIOGRAFICA

#### I. Condiciones Experimentales

a). El Fenómeno de Deslizamiento se ha estudiado en los rangos de rapidez de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) de 20-100,000  $\text{seg}^{-1}$ , siendo la excepción el trabajo de P.J. Carreau, Q.H. Bui y P. Leroux quienes con planos inclinados hicieron sus estudios a valores bajos de rapidez de deformación ( $\dot{\gamma}$  de 0.02 - 1000  $\text{seg}^{-1}$ ).

b) Solamente se ha estudiado el Fenómeno de Deslizamiento - con soluciones de moléculas flexibles (CMC, separan, polimetil metacrilato, natrosol -250G y Polyox WSR-301).

c) En los estudios reportados se hizo uso de capilares hechos de acero inoxidable, vidrio y acrílico, pero no ha habido comparación de la magnitud del efecto de deslizamiento si se usan diferentes materiales para el capilar en el mismo estudio.

d) Los capilares usados en los artículos aquí comentados tienen diámetros que varían de .0184 cm. a .5422 cm.

II. Dependencia del diámetro y del esfuerzo cortante con respecto a la velocidad de deslizamiento.

W. Kozicki reportó los efectos de la concentración sobre el esfuerzo crítico en la pared  $\tau_c$ , éste es, el esfuerzo cortante en la pared para una particular concentración de una solución y un diámetro del tubo en el cual la velocidad efectiva de deslizamiento en la pared es cero. Este representa el punto de transición a una velocidad negativa atribuible a efectos de adsorción y se puede conocer mediante una gráfica de  $\tau_c$  -- contra la concentración de la solución para diferentes diámetros (.0184 - .0578 cm). En este artículo se reportó también un diámetro crítico (.018 cm) del tubo, abajo del cual la velocidad --

efectiva en la pared es siempre positiva y es independiente de la concentración de la especie polimérica (Esto se hizo graficando  $\tau_c^2$  contra D para diferentes concentraciones coincidiendo las líneas en un determinado valor del diámetro).

Metzner y Cohen reportan que el fenómeno de deslizamiento aparente se incrementa más rápido en niveles de esfuerzo menores y que la fracción de deslizamiento se incrementa con el decremento del diámetro del tubo.

Otros autores reportan también el fenómeno de adsorción aun que no lo hayan cuantificado o no lo tengan bien definido y otros autores llegan a la misma conclusión de que el fenómeno de deslizamiento se incrementa con el decremento en el diámetro de los capilares. Se puede por lo tanto, concluir que es tos dos artículos engloban la tendencia de la velocidad de deslizamiento con respecto a un esfuerzo cortante o a un diámetro determinado, tomando en cuenta también los efectos de adsorción.

En la siguiente tabla se dan los resultados y las condiciones experimentales que diversos autores han utilizado en el estudio del fenómeno de deslizamiento.



AUTORES	CAPILAR O CANAL	MATERIAL	CORRECCION DE BAGLEY	SOLUCIONES	Q <sub>a</sub> /Q DESIZAMIENTO	RAPIDEZ DE DEFORMACION γ(seg <sup>-1</sup> )
P.J. Correau Q.H. Sui P. Laroux	CANAL RECTANGULAR 10 x 100	Flexiglass (Acrílico)	NO SE APLICA	POLIACRILAMIDA	4-80X	0.2-100 seg
Shertzer	0.5422 cm 0.2668 cm 0.1146 cm 0.0827 cm	Acero Inox.	NO SE HIZO	0.6% ET 597 en agua	-	-
Astarita	Planos Inclinados	-	-	2% CMC	16 al 80X	-
Quibrahim	26 μ <sub>a</sub> 1 mm.	Vidrio	NO SE APLICA	Polyox 100,300,600 2000 ppm	No hay tendencia definida	100-1500seg <sup>-1</sup>
Yoram, Cohen A.B. Metzner	Capilar 0.019 cm .1097 cm	Acero Inox.	NO SE HIZO	Separan AP-30 0.5%	0-0.42	5-100 seg <sup>-1</sup>
Garner, Missam Tirrel, Malone Metzner	0.019 cm 2000	Acero Inox.	NO SE HIZO	-	38%	-
B.A. Toms	Butan 0.404 duraluminio L/D, 30.9, 60.9, 92.7	Latón duraluminio	NO SE HIZO	Polimetil metacrilato 30 en mono- clorobenceno	No cuantificado	-
Yoram, Cohen, A.B. Metzner	0.0184 cm 0.12 cm L/D-250 2000	Acero Inox. Sup. tratada	SI SE HIZO	1% poliacrilami- da parcialmente hidrolizada 4%, 3.15% poliestire- reno	Mayor a 20X	10-1000 seg <sup>-1</sup>
W. Kocicki	0.0184 - 0.0578 cm	Acero Inox.	NO SE APLICA	Natrosol-2500	No cuantificado	20-100000seg <sup>-1</sup>
S.A. Vlasov V.N. Kashnikov	0.2-1.16mm	Vidrio	NO SE HIZO	Polyox WSR-301	No cuantificado	5- 400 seg <sup>-1</sup>

#### 4.2. Características de las Soluciones empleadas.

##### a) Macromoléculas.

Las soluciones poliméricas pueden presentar moléculas rígidas o moléculas flexibles. La presencia de un número abundante de puentes de hidrógeno intramoleculares es en gran parte responsable de la poca flexibilidad en moléculas como las proteínas y en consecuencia determina también su forma. Como regla esas formas moleculares se pueden representar adecuadamente por figuras geométricas simples como son las esferas, los elipsoides, bastones o discos. Las moléculas de polímeros sintéticos lineales poseen una gran flexibilidad. Esta flexibilidad es originada por la libertad rotacional que existe alrededor de cada enlace entre grupos de monómeros. En consecuencia, las moléculas de este tipo en los estados sólido, líquido y en solución, tienden a enredarse y asumir configuraciones relativamente compactas. En realidad, la configuración de una molécula en particular está fluctuando con el tiempo alrededor de una configuración promedio.

Si la solución está suficientemente diluida, las moléculas poliméricas se encuentran cada una separadas por una región de disolvente. Entonces cada una puede ejecutar sus complejos movimientos internos independientemente de cada una de las otras moléculas.

##### b) Poliacrilamida

La poliacrilamida es un polímero con alto peso molecular ---

soluble en agua y de caracter aniónico. Los derivados de los monómeros substituidos incluyen geles, gomas y plásticos duros. - Por reacciones adicionales en la función amida, uno puede convertir muchos de los polímeros en polielectrolitos con resinas termofijas. Ordinariamente la poliacrilamida es un polímero lineal.

La poliacrilamida es sustancialmente insoluble en casi todos los líquidos orgánicos. Las excepciones son algunos ácidos (acético, acrílicos y lácticos), algunos hidroxí compuestos nitrógenados (formamida, urea fundida).

c) Xantana

La bacteria *Xanthomonas Campestris* produce un polisacárido extracelular aniónico el cual provee al organismo de una capa protectora<sup>26</sup>. La estructura primaria de la Xantana recientemente ha sido reinvestigada y consiste de unidades de Pentasacárido repetido<sup>25</sup>; su peso molecular es mayor a  $2 \times 10^6$ .

La molécula puede ser considerada como una barra rígida de polisacárido rodeada por un cilindro de agua, existiendo poca interacción polisacárido-polisacárido.

La conformación en solución es caracterizada usando el tratamiento hidrodinámico propuesto para moléculas rígidas. La molécula asume una forma elipsoidal o cilíndrica. La conformación helicoidal de la forma extendida tiene un radio mínimo de 10 Å y una longitud alrededor de 6000 Å<sup>27</sup>.

El polímero tiene una alta viscosidad relativa, y por esta razón la Xantana tiene su uso comercial como un agente espesante<sup>26</sup>.

Experimentos de titulación muestran que la Xantana se comporta como un polielectrolito con interacciones moderadamente fuertes de los grupos  $\text{COO}^-$ .

Normalmente los polielectrolitos se expanden en su conformación bajo condiciones de baja fuerza iónica, pero se reducen a una estructura más compacta al adicionarle sal, debido a la solvatación de las cargas intramoleculares. A bajas concentraciones de sal existe una composición más extendida que es generada por repulsiones de grupos  $\text{COO}^-$ .

Es claro entonces que a baja salinidad los grupos  $\text{COO}^-$  interactúan fuertemente. A grandes concentraciones de sal los grupos  $\text{COO}^-$  actúan independientemente.

Las cargas de las cadenas de sacárido envuelven la cadena principal de celulosa, para dar una estructura rígida (en forma de barra). Incrementando la concentración de la sal se estabiliza esta conformación.

Es interesante hacer notar que la viscosidad de la solución

de Xantana al 0.4% en agua disminuye al agregarle sal.

Los efectos que la temperatura tiene sobre la conformación de la molécula se estudiaron sobre los perfiles de viscosidad-temperatura<sup>29</sup> para las dispersiones de 0.5 a 1% de polímero. Estos perfiles revelan una transición violenta a 50-60° C. en la ausencia de sal. Debido al nivel de la temperatura, hay un -- abrupto cambio en la rotación sugerida por una fusión térmica observada en DNA y proteínas.

Existe una relativa insensibilidad de la viscosidad de la solución al adicionarle sal con respecto a la temperatura y es una consecuencia directa de la rigidez molecular<sup>29</sup>.

**V. DESCRIPCION DEL EQUIPO Y  
CONSIDERACIONES EXPERIMENTALES**

## 5.1 FLUIDOS EMPLEADOS

Se realizaron los experimentos con tres diferentes soluciones de polímeros solubles en agua: la primera fue una solución de -- 0.6% poliacrilamida en agua (Separan AP-30, Dow Chemical Co.), -- la segunda fue una solución de 0.4% polisacárido en agua (Xantana) y la tercera una solución de 0.4% polisacárido (Xantana) en una solución acuosa de 0.1 N de NaCl.

### a) Preparación de las Soluciones.

Para su preparación utilizamos la siguiente técnica. En un recipiente con agua destilada se introduce un agitador, a manera de quedar centrado en el recipiente. La temperatura de preparación de todas las soluciones fue de 20° C. En la preparación -- del Separan agregamos una pequeña cantidad de alcohol isopropílico para formar una macilla, la cual lentamente adicionamos al -- agua para evitar la formación de grumos, los cuales tienden a formarse fácilmente en este tipo de soluciones. Se tomó el tiempo -- entre la adición del soluto y el tiempo total de preparación de la solución para que todas las soluciones de igual concentración fueran preparadas bajo las mismas condiciones.

Se anotó la fecha de preparación y para todas las soluciones se determinó su densidad por medio de un picnómetro a 20° C.

La caracterización reológica de estas soluciones fue realizada por medio de un viscosímetro de cono y plato (Reogoniómetro

Weissenberg modelo R-19), y con un viscosímetro Brookfield.

b) Degradación del Polímero.

La degradación de un polímero puede ocurrir como consecuencia de diferentes efectos:

Envejecimiento

Degradación Mecánica

Degradación Bacteriológica

Degradación Química

Envejecimiento.

Para cuantificar la degradación debida al envejecimiento, se hicieron mediciones en las cuales se determinaron las propiedades reológicas (viscosidad y rapidez de deformación) de las soluciones utilizadas en los experimentos como función del tiempo.

Para las soluciones de 0.6% poliacrilamida en agua no fue notable la degradación debida al envejecimiento, como se puede ver en la figura 5.1. Para la solución de 0.4% de polisacárido en agua y 0.4% polisacárido en una solución 0.1 N de NaCl obtuvimos que para 168 horas la mayor diferencia de viscosidad fue - 1.3%. Para eliminar este efecto con esta solución los experimentos se llevaron a cabo en un tiempo menor a 102 horas.



### Degradación Mecánica

La sencillez del diseño del aparato experimental tiene una razón muy importante: prevenir de alguna manera la posible degradación mecánica que puede existir cuando se usa un sistema de bombeo, ya sea con una bomba peristáltica o de engranes. Las soluciones solamente se hicieron pasar una vez por las tuberías, es decir, siempre se usaron soluciones frescas.

### Degradación Bacteriológica

Este tipo de degradación se presenta en forma apreciable en las soluciones del polisacárido Xantana. En la solución de 0.6% poliacrilamida en agua no se observó por largos períodos de tiempo (1 mes aproximadamente).

En el caso de las soluciones de Xantana, la degradación bacteriológica consiste en la aparición de hongos solamente en la superficie de la solución. Para evitar que este tipo de degradación afectara a los experimentos, en la preparación de las soluciones se agregó un conservador a base de benzoato de sodio y los experimentos se realizaron en un tiempo mucho menor al que toma la formación de hongos.

### Degradación Química.

Debido a la selección de los materiales usados en la construcción del equipo (acrílico, PVC, latex, vidrio y acero inoxidable),

no existe la posible interacción química de las soluciones con el material.

c) Variación de la Viscosidad como función de la Temperatura.

Para analizar si las pequeñas variaciones de temperatura que se observan en el Laboratorio afectan las propiedades reológicas de las soluciones utilizadas, se hicieron mediciones de las mismas, a la temperatura de laboratorio ( $19^{\circ}$  C) y a tres grados centígrados por arriba y por debajo de esta temperatura. Como se puede apreciar en la figura 5.2, no existe diferencia notable en las propiedades reológicas de las soluciones utilizadas para estas variaciones en temperatura. Para minimizar las variaciones de temperatura en el sistema, se utilizó un aislante en el depósito de alimentación, el cual fue de gran utilidad ya que con esto las variaciones de temperatura en los experimentos fueron de  $\pm 0.5^{\circ}$  C.

## 5.2 SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema utilizado para llevar a cabo los experimentos, consiste de las siguientes partes:

- a. Depósito de alimentación del fluido.
- b. Sistema de medición de caídas de presión.
- c. Sistema de medición de gastos
- d. Capilares
- e. Poleas

**Descripción de los componentes del Sistema:**

**a. Depósito de alimentación del fluido.**

El material del depósito es acrílico, el cual tiene la ventaja de evitar la posible interacción química del material del depósito con las soluciones.

El depósito es cilíndrico con un diámetro interno de 10.26 cm., (Fig. 5.3). En su parte inferior tiene una perforación de 2.5 cm., de diámetro y a esta perforación está unido un codo de 90° de PVC, una válvula de globo del mismo material y una manguera flexible de latex de aproximadamente 150 cm de longitud, la cual sirve de conexión al viscosímetro capilar. El depósito cilíndrico de alimentación tiene una perforación lateral para controlar el nivel hidrostático del fluido. Esta perforación se encuentra a 10 cm de altura de la base del depósito cilíndrico.

El depósito de alimentación se aísla con fibra de vidrio para minimizar variaciones de temperatura.

**b) Sistema de Medición de caídas de presión.**

El Sistema de Medición de caídas de presión consta de las siguientes partes:

**i) Transductor diferencial de Presión de Acero Inoxidable**

(Validyne Engineering, Co. modelo DP15STL)

.ii) Linealizador de las señales provenientes de los Transductores (Pace Engineering, Co. Modelo CD10).

iii) Multifmetro Digital (Hewlett Packard modelo 3466A) para registrar la señal proveniente del linealizador.

Como equipo complementario se tiene:

iv) Tanque de nitrógeno.

v) Regulador de presión conectado al tanque de nitrógeno.

vi) Manómetro en el tanque de nitrógeno.

vii) Manómetro diferencial.

c) Sistema de medición de gastos

Consta de las siguientes partes:

i) Balanza analítica

ii) Cronómetro digital

iii) Vasos de precipitado y probetas graduadas.

d) Capilares

Se utilizaron 5 tuberías de diferente diámetro: dos tuberías de acero inoxidable y tres tuberías de vidrio, las cuales tienen dos tomas de presión por tubería.

e) Poleas

Se utilizaron poleas para tener diferentes alturas -- del depósito de alimentación del fluido y de esta ma-

nera poder variar la presión de alimentación a los capilares.

### 5.3 TECNICA EXPERIMENTAL.

Para obtener los datos experimentales de caídas de presión y gastos, que se requieren para nuestro problema de estudio, el procedimiento a seguir es el siguiente:

#### a) Calibración del transductor diferencial de presión.

a1.- Con una jeringa de plástico de 5 ml. se llenan las -- cámaras (2) del transductor diferencial de presión -- con el fluido a usar. Las cámaras del transductor se deben purgar mediante unos pequeños orificios colocados a los lados de cada cámara para evitar que quede aire atrapado e interfiera en las lecturas.

a2.- Dos mangueras semiflexibles de Tygon son llenadas con el fluido y conectadas a cada toma de presión del --- transductor de presión. El transductor de presión se conecta al linealizador y éste a su vez al multímetro digital. Hecho ésto, se procede a una calibración del transductor de presión por medio de presiones hidrostáticas o usando nitrógeno (equipo complementario). Las - lecturas en el multímetro se obtienen en mA. Y se relacionan con las alturas hidrostáticas o la presión registrada en el manómetro diferencial asociado al cilindro

de nitrógeno.

b) Operación del viscosímetro capilar.

- b1.- El fluido a usar se introduce en el depósito de alimentación.
- b2.- El capilar con un determinado radio se conecta a la manguera flexible de látex y ésta al depósito cilíndrico de alimentación del fluido.
- b3.- Se abre la válvula de globo totalmente para llenar - tanto la manguera flexible de látex como el capilar.
- b4.- Una vez que se ha llenado el capilar, se acopla al -- transductor de presión por medio de las mangueras de Tygon, evitando que quede aire atrapado. Se introduce un termómetro en el depósito de alimentación y otro termómetro se coloca a la salida del capilar.
- b5.- Se aplica presión colocando el depósito de alimentación a cierta altura correspondiente a el valor del esfuerzo deseado.
- b6.- Se toma nota de la lectura del transductor de presión y por medio de un cronómetro digital y una balanza analítica se mide el gasto a un tiempo determinado. Se hacen varias determinaciones del gasto para sacar un promedio.

b7.- Se aumenta la altura del depósito de alimentación mediante el sistema de poleas. Esto permite tener otro valor deseado del esfuerzo y se repite el paso b6 y b7 hasta abarcar todo el rango de esfuerzos a estudiar.

Este procedimiento (pasos b2 al b7), se repite para -- cada capilar de diferente radio.

c) Determinación de datos experimentales de gasto-caída de -- presión.

Las mediciones de los datos experimentales gasto-caída de presión fueron realizadas de la siguiente manera: para la determinación de caídas de presión, se contó con un transductor diferencial de presión de acero inoxidable con diafragmas intercambiables para diferentes rangos de presión. El transductor diferencial de presión fue calibrado con un manómetro conectado a un cilindro de nitrógeno.

Los datos obtenidos de la calibración se ajustaron para cada corrida por medio de mínimos cuadrados obteniendo factores de correlación de 0.99 a 1.0. También se llevó a cabo antes de cada experimento una limpieza de las partes del transductor (diafragmas, cámaras y conductos), para evitar que se -- formara alguna capa remanente de las soluciones usadas y de alguna manera interfiriera en las determinaciones.

La señal proveniente del transductor de presión es linealizada mediante un linealizador modular el cual cuenta con un ajuste a cero de tal forma que las curvas obtenidas a partir de los datos de la calibración (m.A y presión) fueron lineales. Esta señal es leída en un multímetro digital.

Las mediciones de gasto fueron hechas de la siguiente forma: Para gastos pequeños, éstas se hicieron mediante una balanza pesando la muestra colectada en un determinado tiempo (la lectura del tiempo se tomó con un cronómetro digital, Casio modelo Pw-70).

El gasto volumétrico se calculó usando la densidad de las soluciones. Para los gastos más grandes las mediciones fueron hechas por medio del cronómetro y una probeta graduada.

e) Determinación de los diámetros de los capilares.

La determinación de los diámetros de los capilares fue realizada de tres maneras: a partir de mediciones de gasto-caída de presión de fluidos Newtonianos con viscosidad conocida (solución - 90% glicerina-agua); con mercurio, y como un método alternativo mediante un microscopio de barrido montando secciones de tubería en bakelita. Este método nos da un diámetro local y no un diámetro promedio como los otros dos métodos.

Para las 5 tuberías utilizadas (3 de vidrio y 2 de acero inoxidable) los resultados de las mediciones de diámetros obtenidos



se dan en la Tabla 5.1

TABLA 5.1

TUBERIA	Diámetro (cm)	% Desviación	L/D
VIDRIO	0.52222	0.506	96
	0.20186	0.82	248
	0.15084	1.1	331
ACERO	0.452291	0.756	110
	0.2665	0.329	188
INOX.			

#### 5.4 FACTORES QUE AFECTAN LA DETERMINACION DEL DESLIZAMIENTO APARENTE

Para llevar a cabo un análisis del fenómeno de deslizamiento aparente, se requiere de datos experimentales libres de cualquier tipo de efecto que pudieran obscurecer la detección y cuantificación del fenómeno. Los problemas en la interpretación de los datos se puede deber a diversos factores, los cuales deben ser minimizados con el fin de evitar cualquier error de interpretación. Los factores que a continuación mencionaremos fueron tomados en cuenta y a la vez se describe brevemente la forma como fueron eliminados o minimizados.

##### a) Efectos de entrada y salida

Como se observó en el capítulo 3, a partir de la corrección -- de Bagley, y de la ecuación de Rabinowistch, se encuentran los valores de los factores de corrección del viscosímetro.

Por medio de estos factores se corrige el esfuerzo cortante en la pared y posteriormente la rapidez de deformación. De esta -

manera nos aseguramos de tener valores precisos del esfuerzo cortante en la pared, los cuales son necesarios para efectuar el análisis del deslizamiento aparente.

En este experimento los efectos de salida y los de entrada fueron despreciables, como se puede observar en la figura 5.4 donde se representa la corrección de estos efectos, por el método de Bagley, para la solución de 0.6% poliacrilamida en agua -- usamos un capilar de vidrio de 0.522 cm., de diámetro. Para diferentes relaciones de L/D fueron medidas la caída de presión y el gasto para varios valores de rapidez de deformación ( $\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$ ) y se grafican los valores obtenidos de P/L y -- L/D.

Como se puede apreciar en la figura 5.4 las líneas pasan por el origen, lo cual implica que no es necesaria la corrección de Bagley para esta solución y geometría.

Puesto que para la tubería estudiada la relación de L/D es de 96 y las otras tuberías tienen razones de L/D mayores a la -- estudiada, podemos considerar que en todos los casos se tuvo flujo bien desarrollado hidrodinámicamente en la sección de es tudio.

b) Bloqueamiento o Taponeamiento.

Los polímeros usados, poliacrilamidas y polisacáridos poseen tamaños moleculares grandes. Al agregar una pequeña cantidad

de éstos al agua, la viscosidad de la solución aumenta considerablemente. Estos polímeros son productos comerciales, en los cuales se puede dar la formación de agregados moleculares denominados geles, los cuales pueden taponear o bloquear el flujo a través de tuberías de diámetro pequeño, por lo cual es necesario eliminarlas.

Este efecto no se encontró ya que se obtuvieron datos reproducibles de gastos-caída de presión con soluciones preparadas en diferentes días. Además la solución de Xantana fue centrifugada a 2500 rpm no encontrando material precipitado.

#### c) Adsorción

Como un fenómeno contrario al deslizamiento aparente, para una determinada caída de presión, se puede tener un decremento en el gasto para un esfuerzo dado. A este fenómeno se le conoce como adsorción, donde las moléculas poliméricas se adsorben en la interfase sólida.

En la literatura se han reportado experimentos que muestran -- este efecto, también se ha intentado separar los efectos de -- deslizamiento y adsorción, esto se ha hecho con un tratamiento para las tuberías de acero que minimizan la adsorción. Este efecto es de mucho menor magnitud que el de deslizamiento aparente, pero de suma importancia si se trata de aplicaciones -- tecnológicas, como por ejemplo recuperación secundaria y ter-

ciaria del petróleo. En el presente estudio no se hicieron correcciones debido a adsorción ya que no contamos con los medios para hacerlo. Una forma para evitar la adsorción es recubrir la superficie de la tubería con una solución de - 2% de Dimetildietoxisilano en un solvente compuesto de - 95% de Etanol y 5% de agua destilada y ajustada a un pH de 4.5 a 5.5 con ácido acético<sup>22</sup>.

**TABLA PROPIEDADES FISICAS**

POLIMERO	POLIACRILAMIDA (Separán AP-30)	POLISACARIDO (XANTANA)
MACROMOLECULA SOLUBILIDAD	FLEXIBLE TOTALMENTE SOLUBLE EN AGUA	RIGIDA TOTALMENTE SOLUBLE EN AGUA
APARIENCIA	POLVO BLANCO	POLVO BLANCO
DENSIDAD	1.0001 (SOL.AL 0.6%)	0.998 (SOL.AL 0.4%)
PESO MOLECULAR	3.0x10 <sup>6</sup> a 10.0x10 <sup>6</sup>	1.4x10 <sup>6</sup> a 3.6x10 <sup>6</sup>

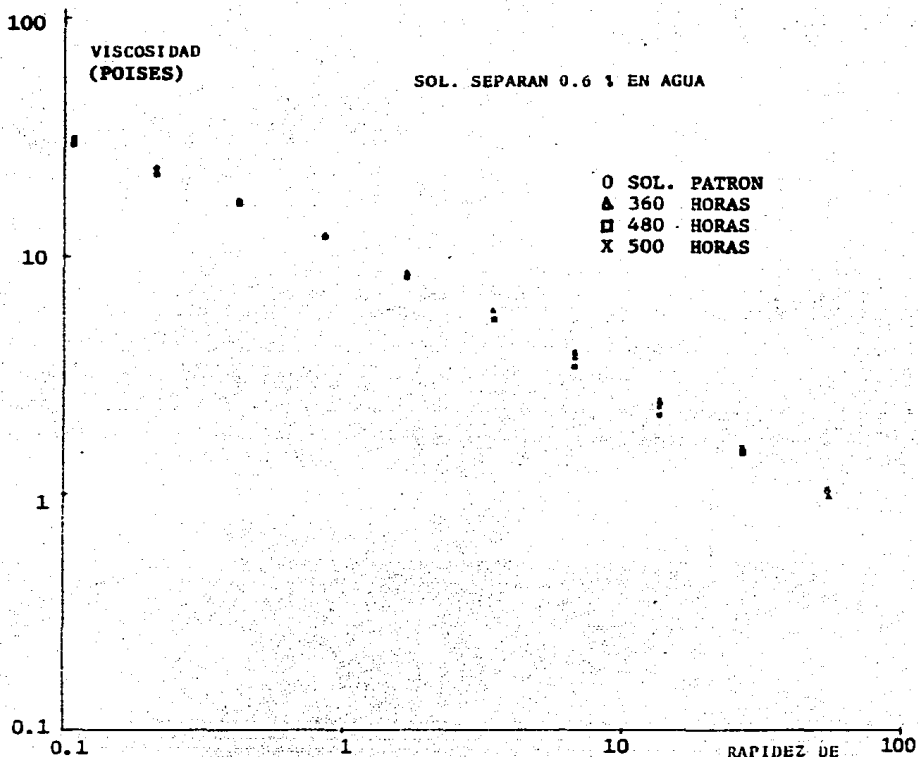


FIGURA 5.1  
 VARIACION DE LA VISCOSIDAD EN  
 FUNCION DEL TIEMPO.

(SEG. -1)

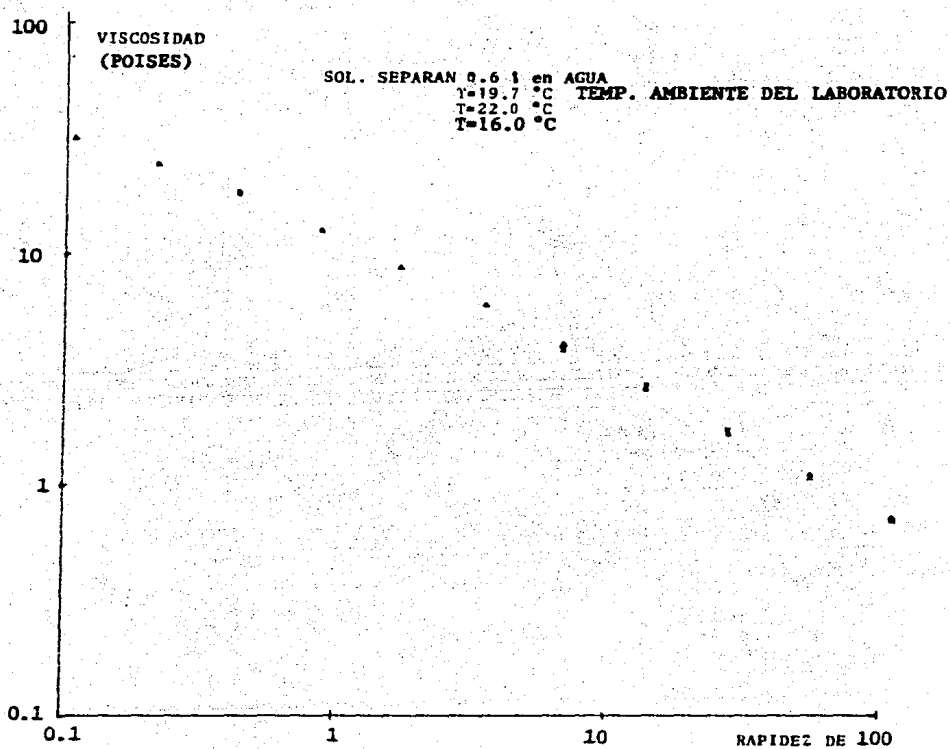
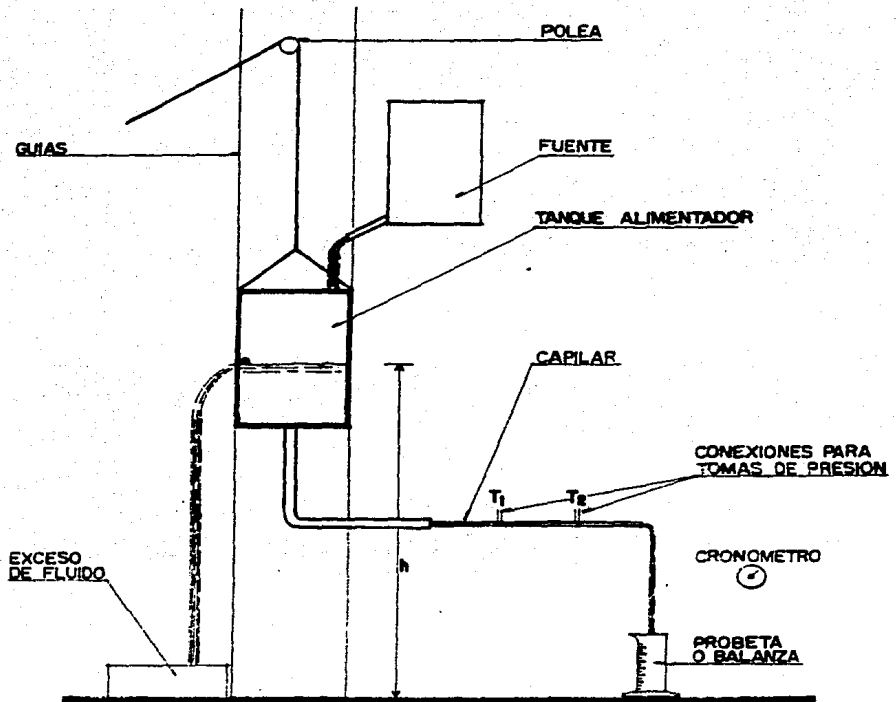


FIGURA 5.2  
 VARIACION DE LA VISCOSIDAD EN  
 FUNCION DE LA TEMPERATURA



## REOMETRO CAPILAR

Fig. 5.3



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

FIGURA 5.4  
CORRECCION DE BAGLEY  
SOLUCION 0.6 % SEPARAN EN AGUA  
DIAMETRO= 0.522 cm

20 000

10 000

50

100

150

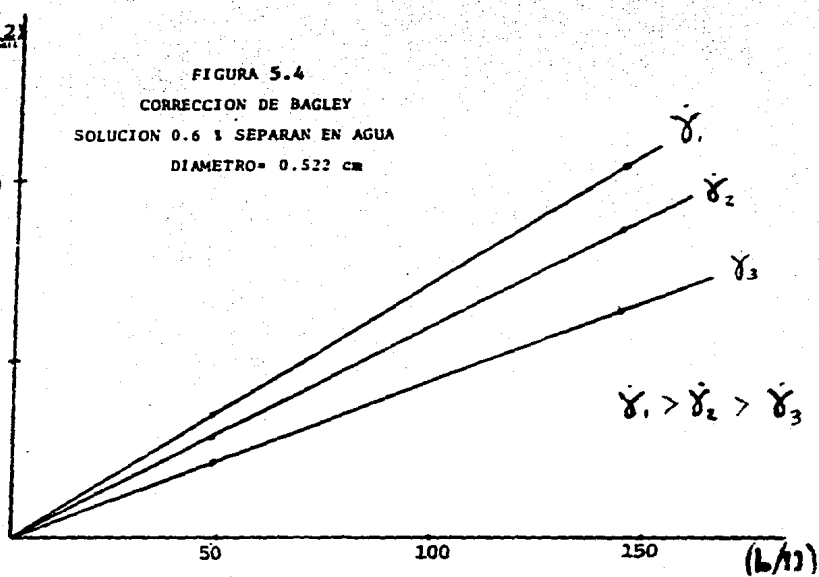
(l/h)

$\dot{\gamma}_1$

$\dot{\gamma}_2$

$\dot{\gamma}_3$

$\dot{\gamma}_1 > \dot{\gamma}_2 > \dot{\gamma}_3$



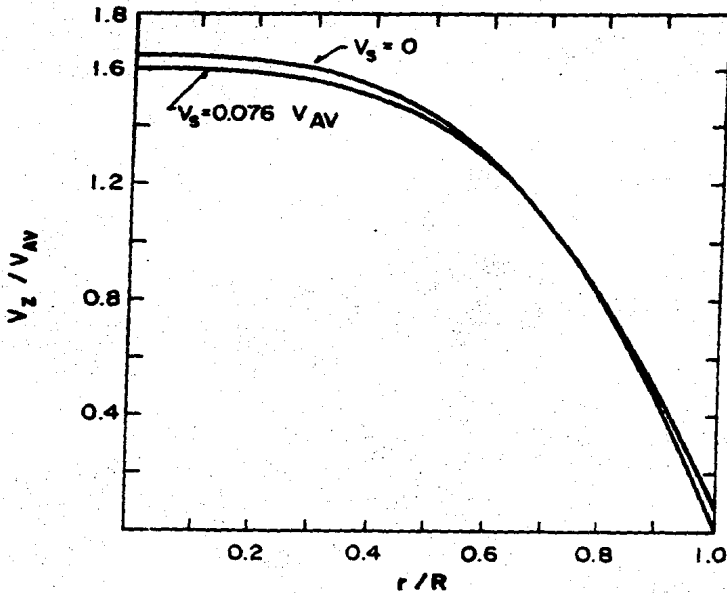


Fig. 2. Effect of  $V_s$

$n=0.489$ ,  $K=20.0$ ,  $T_w=450$ ,  $V_s=0.52$  or  $0$ ,  $R=0.05485$

Esta figura nos muestra el efecto de la velocidad de deslizamiento sobre el perfil de velocidades para una solución de 0.69% CMC en agua a través de una tubería circular.

Las dos líneas sólidas están basadas en la siguiente ecuación:

$$V_z - V_s = \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^{1/n} \frac{R}{\frac{1}{n} + 1} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n + 1} \right]$$

la cual fue desarrollada por Metzner usando la ley de la potencia, y con la condición a la frontera en  $r=R$   $V_z=V_s$ .

(Figura tomada del artículo "The effect of Wall slip on the Flow of Viscoelastic Fluids in a Small Channel. T.Q. Jiang and A.B. Metzner).

**VI. DISCUSION DE RESULTADOS  
Y CONCLUSIONES**

## 6.1 RESULTADOS

A partir de los resultados experimentales de gasto-caída de presión obtenidos en este estudio, se evaluó el esfuerzo cortante en la pared  $\tau_w = \frac{\Delta P R}{2L}$  y la rapidez de deformación aparente  $\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3}$  (Ver Tabla 6.1). Se graficaron dichos parámetros de flujo (figuras 6.2, 6.3 y 6.4) para las tres soluciones poliméricas usadas (0.6% poliacrilamida en agua, 0.4% polisacárido en agua y 0.4% polisacárido sol 0.1N de NaCl).

Los resultados para la solución de 0.6% poliacrilamida en agua están en concordancia con los reportados recientemente en un estudio sobre flujo de capilares<sup>30</sup>.

En los tres casos de las soluciones empleadas (figuras 6.2, 6.3 y 6.4) se observa un corrimiento de las curvas hacia la región de mayores gradientes de velocidad a medida que el radio del capilar disminuye. Este efecto es más pronunciado en los capilares de acero (Figs. 6.3 y 6.4). Debido a este efecto, la viscosidad aparente ( $\mu_{ap}$ ), definida como:

$$\mu_{ap} = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (6.1)$$

disminuye a medida que el radio del capilar es más pequeño. Esto trae como consecuencia un mayor gasto volumétrico comparado con el gasto medido en los capilares de mayor diámetro. Esta dife-

rencia se denomina, como se mencionó en el capítulo III, gasto por deslizamiento (este llegó a ser mayor hasta en un 50%).

A partir de las curvas de flujo (figuras 6.2, 6.3 y 6.4) para cada solución se obtienen valores de rapidez de deformación aparente para valores específicos del esfuerzo cortante. Después se grafica la rapidez de deformación aparente contra el inverso del diámetro figuras 6.5, 6.6 y 6.7 para cada uno de los esfuerzos predeterminados.

Se procedió a una evaluación cuantitativa del fenómeno de deslizamiento para cada solución, utilizando la relación de Mooney

$$\partial(4Q/\pi R^3) / \partial(1/D) \Big|_{\tau_w} = 8 V_s \quad (6.2)$$

Para cada curva correspondiente a un esfuerzo dado, la pendiente asociada tiene una magnitud igual a  $(8V_s)$ . Estas velocidades para los diferentes esfuerzos fueron calculadas y se encuentran reportadas en la tabla 6.5

Los resultados obtenidos de la velocidad de deslizamiento  $V_s$ , como una función del esfuerzo cortante, son graficados para cada una de las soluciones empleadas, en las figuras 6.8, 6.9 y 6.10.

En la figura 6.11 se muestran los valores de velocidad de deslizamiento  $V_s$  contra el esfuerzo cortante en escala logarítmica para las soluciones empleadas.

Para la solución de 0.4% de polisacárido Xantana en agua se muestra en la figura 6.12 la curva de fracción de deslizamiento contra el esfuerzo cortante.

## 6.2 DISCUSION DE LOS RESULTADOS

El fenómeno de deslizamiento aparente se ve afectado por las características moleculares de las soluciones poliméricas usadas y por los diferentes materiales utilizados en los capilares.

La solución de 0.6% de poliacrilamida en agua presenta velocidades de deslizamiento muy pequeñas (Ver figura 6.8) ya que su viscosidad es relativamente elevada, de tal forma que en ese rango de concentraciones, las macromoléculas forman entrelazamientos entre ellas. Este tipo de estructura inhibe de cierta manera su alineamiento y extensión, disminuyendo la posibilidad de formación de la capa anisotrópica junto a las paredes sólidas de los capilares.

Comparando los resultados de la velocidad de deslizamiento ( $V_s$ ) para las soluciones de 0.4% polisacárido en agua y 0.4% polisacárido en solución 0.1 N de NaCl (Ver figuras 6.9 y 6.10) podemos observar que la adición de sal al polisacárido produce un aumento en la velocidad de deslizamiento ( $V_s$ ) en el mismo rango de esfuerzos (efecto de la fuerza iónica).

En las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 se puede observar la existencia de un esfuerzo crítico arriba del cual la velocidad de deslizamiento siempre es positiva, esto debido a que el efecto de adsorción (las moléculas poliméricas se adsorben en la interfa

se sólida) es de mucho menor magnitud que el de deslizamiento aparente en esta región. Los mayores efectos de deslizamiento aparente se observaron en las tuberías de acero inoxidable.

En la figura 6.11 presentamos la gráfica en escala logarítmica de velocidad de deslizamiento contra esfuerzo cortante - en la que observamos que la velocidad de deslizamiento va siempre en aumento, siendo más pronunciado este efecto en el caso de la solución de 0.4% polisacárido en solución 0.1 N de NaCl. En esta gráfica no encontramos el comportamiento que Metzner reporta en la literatura (19) ( $V_s = a\tau_w^n$ ) y con el cual correlaciona los datos para obtener una ecuación para  $Q_s/Q$ .

Otra forma de presentar los datos es mediante la fracción de deslizamiento ( $Q_s/Q$ ), esta gráfica se construyó bajo la suposición de que en la tubería grande no existen o eran despreciables los efectos de deslizamiento. En la gráfica 6.12 podemos observar un máximo de  $Q_s/Q$  para la tubería de acero de diámetro igual a 0.53 cm a un esfuerzo cortante de 35 dinas/cm<sup>2</sup> y un máximo de  $Q_s/Q$  para la tubería de vidrio de diámetro igual a 0.25 cm a un esfuerzo cortante de 39 dinas/cm<sup>2</sup>. A bajos esfuerzos la contribución de deslizamiento al flujo se incrementa hasta que la viscosidad del fluido decrece más rápidamente que el correspondiente incremento en la velocidad de deslizamiento. Consecuentemente la contribución de deslizamiento a el flujo total decrece con el incremento del esfuerzo cortante. En el rango de  $\tau_w$  estudiado también encontramos un esfuerzo crítico  $\tau_c$  menor para la tubería de acero ( $\tau_c=26$

dinas/cm<sup>2</sup>) que para la tubería de vidrio ( $\tau_c=32$  dinas/cm<sup>2</sup>) y un esfuerzo cortante  $\tau_w$  en el cual  $Q_s/Q$  tiende a un valor constante como función del radio para la tubería de acero.

### 6.3 CONCLUSIONES

1.- La velocidad de deslizamiento aparente en tuberías depende del radio de la tubería usada, de los rangos de esfuerzos cortantes, de la solución empleada y del material de la tubería.

2.- Para la tubería de acero inoxidable se encontraron mayores efectos de deslizamiento que para las tuberías de vidrio a un mismo esfuerzo cortante, esto es debido a las propiedades de las macromoléculas y de la frontera sólida, pero dada la complejidad del fenómeno no se puede explicar con los resultados obtenidos en este estudio completamente.

3.- Al disminuir el radio del tubo aumenta la velocidad de deslizamiento debido a que la capa de deslizamiento tiene una mayor contribución en las tuberías mas pequeñas.

4.- La adición de sal a la solución de 0.4% polisacárido en agua estabiliza la naturaleza rígida de la macromolécula dando lugar a que haya un mayor grado de alineamiento y orientación y una mayor velocidad de deslizamiento, con respecto a la solución de polisacárido sin sal.

5.- A esfuerzos cortantes muy pequeños se puede presentar el fenómeno de adsorción debido a que la macromolécula se puede adsorber en la interfase sólida. A un mayor gasto la contribución debida a la adsorción es despreciable.



#### 6.4 TABLAS Y GRAFICAS

En esta sección presentamos las siguientes gráficas:

3 gráficas para cada solución de:

- Esfuerzo cortante contra rapidez de deformación
- Rapidez de deformación contra el inverso del diámetro
- Velocidad de deslizamiento contra esfuerzo cortante

1 gráfica de:

- Velocidad de deslizamiento contra esfuerzo cortante en escala logarítmica

1 gráfica de:

- Contribución al gasto por deslizamiento contra esfuerzo cortante para la solución de Xantana 0.4% en agua

SEPARAN 0.45 EN AGUA				
SOLUCION MATERIAL RABIG (cm)	VIRBIO 0.241109			
	GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dias/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE REFORMACION (l/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dias/cm <sup>2</sup> )
	0.0039	134.04	0.44	17.30
	0.0124	164.78	0.89	21.80
	0.0179	203.98	1.28	26.89
	0.0244	232.83	1.73	30.48
	0.0285	248.43	2.04	34.08
	0.0345	277.19	2.41	38.80
	0.0391	304.39	2.80	40.00
	0.0482	333.94	3.45	43.60
	0.0537	353.88	4.00	46.20
	0.0713	382.98	5.10	50.00
	0.1007	428.10	7.20	55.89
	0.1321	461.11	9.45	60.20
	0.1479	493.28	12.15	64.40

SEPARAN 0.45 EN AGUA				
SOLUCION MATERIAL RABIG (cm)	VIRBIO 0.1007208			
	GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dias/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE REFORMACION (l/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dias/cm <sup>2</sup> )
	0.0004	324.98	0.30	18.40
	0.0020	447.66	0.94	23.66
	0.0041	544.92	1.34	27.60
	0.0043	588.53	1.54	29.78
	0.0047	673.74	2.05	34.90
	0.0070	735.17	2.50	37.10
	0.0074	792.64	3.00	40.00
	0.0078	836.23	3.44	42.20
	0.0038	937.29	4.64	47.30
	0.0047	1006.65	5.81	50.00
	0.0055	1087.98	7.15	54.90
	0.0078	1173.10	9.43	59.20
	0.0087	1184.99	9.83	59.00

SEPARAN 0.45 EN AGUA				
SOLUCION MATERIAL RABIG (cm)	VIRBIO 0.0754175			
	GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dias/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE REFORMACION (l/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dias/cm <sup>2</sup> )
	3.0002	392.48	0.33	14.00
	0.0002	574.48	0.83	22.30
	0.0005	742.53	1.39	28.00
	0.0006	795.57	1.75	30.00
	0.0008	928.17	2.25	35.00
	0.0013	1164.31	4.00	43.98
	0.0019	1307.39	5.71	49.30
	0.0021	1332.47	6.37	51.00
	0.0034	1453.24	7.67	54.80
	0.0027	1443.59	7.87	55.19
	0.0034	1544.42	10.15	59.00
	0.0036	1591.14	10.75	60.00
	0.0040	1644.10	12.00	62.00

TABLA 6.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA SOLUCION 0.45 SEPARAN EN AGUA

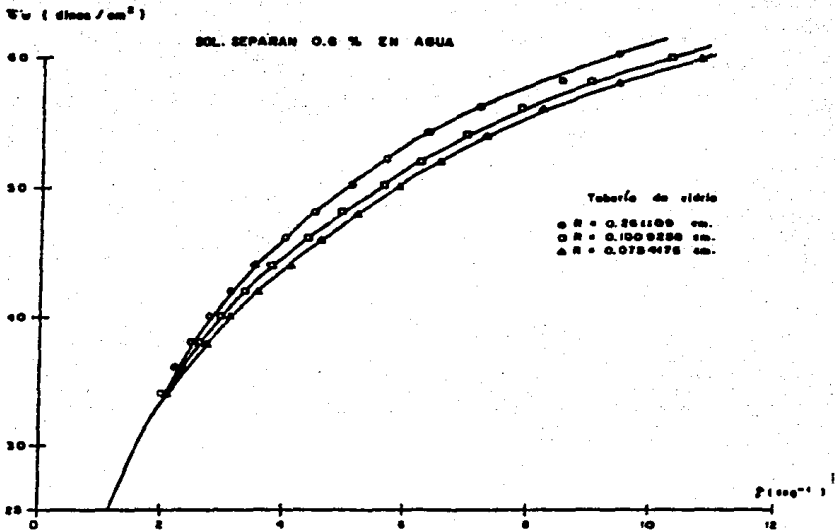


FIGURA 6.2

GRAFICA DE ESFUERZO CORTANTE CONTRA RAPIDEZ DE DEFORMACION

SOLUCION MATERIAL (cm)		XANTANA 0.40% en agua VICRIO 0.241109			
GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dinas/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE DEFORMACION (1/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dinas/cm <sup>2</sup> )		
0.0141	192.25	1.01	25.10		
0.0291	233.62	2.01	30.50		
0.0511	302.86	3.80	39.34		
0.0852	306.46	6.31	40.01		
0.2304	359.15	16.48	46.39		
0.2551	367.74	18.32	48.01		
0.3479	391.23	23.00	51.08		
0.4719	417.37	33.75	54.47		
0.6711	454.98	48.00	59.48		

SOLUCION MATERIAL (cm)		XANTANA 0.40% en agua VICRIO 0.100288			
GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dinas/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE DEFORMACION (1/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dinas/cm <sup>2</sup> )		
0.0004	479.23	0.70	29.73		
0.0019	411.52	2.37	30.86		
0.0028	473.74	3.30	34.05		
0.0042	703.00	5.21	39.04		
0.0057	853.67	10.73	43.08		
0.0133	915.85	14.42	46.22		
0.0197	996.15	24.45	50.27		
0.0273	1063.52	33.83	52.67		
0.0400	1194.46	45.50	58.36		

SOLUCION MATERIAL (cm)		XANTANA 0.40% en agua VICRIO 0.0754175			
GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dinas/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE DEFORMACION (1/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dinas/cm <sup>2</sup> )		
0.00019	654.75	0.64	24.02		
0.00046	745.19	1.62	28.10		
0.00072	937.54	2.43	31.58		
0.00158	755.20	4.93	34.06		
0.00298	1033.83	9.79	40.87		
0.00540	1202.64	16.27	45.35		
0.00745	1273.44	22.01	49.02		
0.011527	1413.47	34.22	53.30		
0.01808	1554.26	53.43	56.61		

TABLA 6.1 b RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA SOLUCION XANTANA 0.4% EN AGUA

SOLUCION MATERIAL		KANTANA 0.40% en agua AC. INOX. 0.225142			
GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (din/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE DEFORMACION (1/seg)	ESFUERZO CORTANTE (din/cm <sup>2</sup> )		
0.0033	189.33	0.36	28.39		
0.0127	248.25	1.42	28.87		
0.0330	287.25	3.36	32.46		
0.0617	342.77	9.00	38.78		
0.1199	371.43	13.20	42.08		
0.2193	419.78	24.17	47.44		
0.2543	442.20	28.80	50.08		
0.3932	488.81	48.29	53.27		
0.7934	574.94	87.37	53.19		

SOLUCION MATERIAL		KANTANA 0.40% en agua AC. INOX. 0.13325			
GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (din/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE DEFORMACION (1/seg)	ESFUERZO CORTANTE (din/cm <sup>2</sup> )		
0.0017	385.14	0.92	25.56		
0.0067	477.45	3.58	31.21		
0.0134	543.74	7.31	34.36		
0.0167	570.26	9.00	38.06		
0.0287	635.40	15.44	42.40		
0.0401	690.58	21.60	46.01		
0.0671	744.62	30.72	49.61		
0.0895	819.51	48.04	54.50		
0.1379	910.92	74.22	60.69		

TABLA 5.1 b (cont)

SOLUCION MATERIAL RADIO (cm)		XANTANA 0.4% en sol. 0.1 N NaCl VIRIO 0.261107			
		GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dinas/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE DEFORMACION (1/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dinas/cm <sup>2</sup> )
		0.0106	153.71	0.76	20.07
		0.0361	211.96	2.90	27.67
		0.0622	247.96	6.31	32.37
		0.1242	281.56	8.88	36.73
		0.1983	323.93	14.18	42.29
		0.3191	359.93	22.18	46.99
		0.4144	398.34	29.63	50.96
		0.6117	426.64	43.75	55.70
		0.8420	457.96	61.63	60.03

SOLUCION MATERIAL RADIO (cm)		XANTANA 0.4% en sol. 0.1 N NaCl VIRIO 0.0754173			
		GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dinas/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE DEFORMACION (1/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dinas/cm <sup>2</sup> )
		0.00221	333.31	0.63	20.13
		0.00681	742.02	2.40	28.00
		0.00252	947.93	7.40	35.77
		0.00317	1106.66	15.25	41.76
		0.00727	1254.01	27.80	47.32
		0.01139	1325.03	33.00	50.00
		0.01337	1388.37	39.67	52.39
		0.01842	1479.93	54.66	56.66
		0.02493	1635.00	73.71	61.73

SOLUCION MATERIAL RADIO (cm)		XANTANA 0.4% en sol. 0.1 N NaCl AC. INOX. 0.226143			
		GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dinas/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE DEFORMACION (1/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dinas/cm <sup>2</sup> )
		0.0057	177.76	0.63	20.10
		0.0227	242.00	2.90	27.36
		0.0471	282.92	5.18	31.99
		0.0727	318.38	8.00	36.00
		0.1114	351.99	12.26	39.00
		0.1981	411.99	21.81	44.58
		0.2946	453.46	32.44	51.50
		0.3516	482.00	39.81	54.50
		0.6269	538.94	69.02	63.20

SOLUCION MATERIAL RADIO (cm)		XANTANA 0.4% en sol. 0.1 N NaCl AC. INOX. 0.13325			
		GASTO VOLUMETRICO (cm <sup>3</sup> /s)	CAIDA DE PRESION (dinas/cm <sup>2</sup> )	RAPIDEZ DE DEFORMACION (1/seg)	ESFUERZO CORTANTE (dinas/cm <sup>2</sup> )
		0.0012	294.99	0.64	19.65
		0.0013	299.48	0.71	19.70
		0.0046	422.36	2.50	28.14
		0.0099	459.96	5.25	35.31
		0.0149	543.34	8.00	36.00
		0.0342	649.91	18.42	43.30
		0.0534	720.43	29.00	48.00
		0.0747	782.44	40.18	52.13
		0.1191	874.99	64.12	58.30

TABLA 6.1 c RESULTADOS EXPERIMENTALES SOLUCION XANTANA 0.4% EN SOL. 0.1 N de NaCl

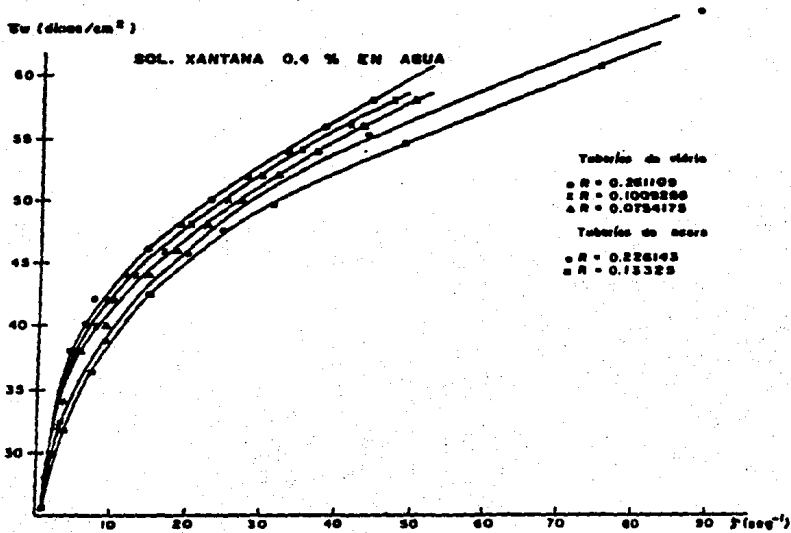


FIGURA 6.3

GRAFICA DE ESFUERZO CORTANTE CONTRA RAPIDEZ DE DEFORMACION

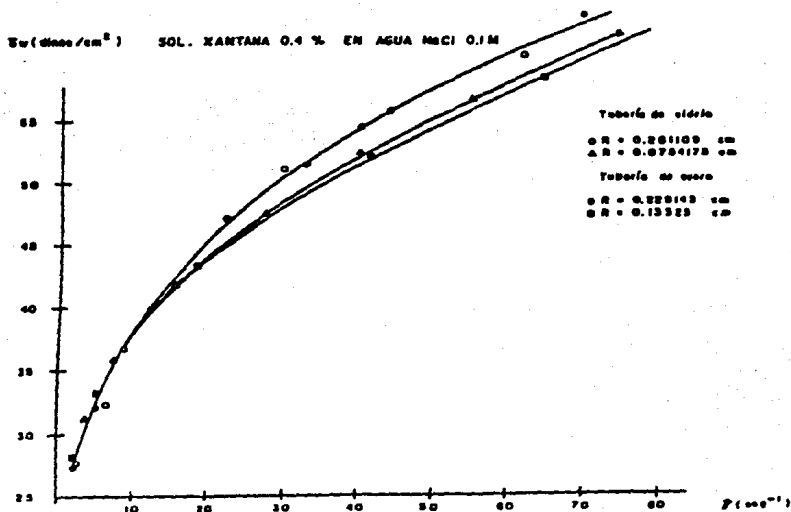


FIGURA 6.4

GRAFICA DE ESFUERZO CORTANTE CONTRA RAPIDEZ DE DEFORMACION

**TABLA 4.2**  
**VALORES DE RAPIDEZ DE DEFORMACION APARENTE PARA**  
**VALORES ESPECIFICOS DEL ESFUERZO CORTANTE (CONTI-**  
**NIDOS A PARTIR DE LA CURVA DE FLUJO. VER FIG. 4.2)**

SOLUCION PASTRAL 1/D (cm)	SEPARAN 0.4 % en agua					
	1.9149 VIBRIO		4.954 VIBRIO		6.5298 VIBRIO	
ESFUERZO CORTANTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE
32.00	1.75	18.31	1.75	18.31	1.75	18.31
34.00	2.04	16.67	2.05	16.59	2.10	16.19
36.00	2.24	15.93	2.34	15.38	2.41	14.94
38.00	2.50	15.23	2.65	14.34	2.75	13.62
40.00	2.80	14.29	3.00	13.33	3.15	12.78
42.00	3.15	13.33	3.40	12.35	3.55	11.67
44.00	3.55	12.39	3.80	11.58	4.10	10.73
46.00	4.00	11.58	4.40	10.45	4.60	10.00
48.00	4.55	10.95	4.90	9.80	5.20	9.23
50.00	5.10	9.53	5.60	8.92	5.70	8.47
52.00	5.67	9.17	6.25	8.32	6.55	7.94
54.00	6.35	8.50	6.95	7.77	7.30	7.48
56.00	7.20	7.78	7.62	7.16	8.25	6.79
58.00	8.30	6.82	9.00	6.44	9.48	6.17
60.00	9.45	6.35	10.25	5.83	10.75	5.58



**TABLA 6.3**  
**VALORES DE RAPIDEZ DE DEFORMACION APARENTE PARA**  
**VALORES ESPECIFICOS DEL ESFUERZO CONSTANTE (OBTENIDOS A PARTIR DE LA CURVA DE FLUJO. VER FIG. 6.3)**

SOLUCION MATERIAL 1/2 (cm)	XANTANA 0.4 EN AGUA VIRGIC		4.934		6.6298	
	ESFUERZO CONSTANTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION
30.00						
32.00						
34.00	3.50	9.71429	3.50	9.71429	3.50	9.71429
35.00						
36.00	4.30	8.83721	5.10	7.43090	5.60	6.78371
40.00	6.30	6.34921	7.60	5.26316	9.00	4.44444
42.00	7.50	5.60000	9.00	4.64447	10.00	4.20000
44.00	11.50	3.82439	13.00	3.38452	14.50	3.03440
46.00	14.50	3.17241	16.50	2.78700	18.00	2.53356
48.00	18.30	2.62795	19.70	2.43655	22.00	2.18182
50.00	22.50	2.22222	24.70	2.02429	26.50	1.86679
52.00	27.20	1.91174	29.50	1.74271	31.30	1.66130
54.00	32.30	1.67189	34.50	1.54322	36.70	1.47139
56.00	37.50	1.49553	41.00	1.36585	42.50	1.31765
58.00	43.50	1.33333	46.70	1.24197	49.50	1.17172

SOLUCION MATERIAL 1/2 (cm)	XANTANA 0.4 EN AGUA scars		3.7523	
	ESFUERZO CONSTANTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION
30.00	2.20	13.63636	2.80	4.87013
32.00				
34.00	4.80	7.08333	5.00	1.41667
36.00				
38.00	8.40	4.52381	9.00	0.56265
40.00				
42.00	13.20	3.18182	14.30	0.22250
44.00				
46.00	19.60	2.34694	21.60	0.10065
48.00				
50.00	28.00	1.78571	31.60	0.05651
52.00				
54.00	48.00	1.35000	46.00	0.02785
56.00				
58.00	55.20	1.85072	62.40	0.01604
60.00	63.60	0.94340	71.00	0.01329

**TABLA 6.4**  
**VALORES DE RAPIDEZ DE DEFORMACION APARENTE PARA**  
**VALORES ESPECIFICOS DEL ESFUERZO CORTANTE (OBTENIDOS A PARTIR DE LA CURVA DE FLUJO. VER FIG. 6.4)**

SOLUCION MATERIAL		XANTANA 0.4 % EN SOL. 0.1 N NaCl				
1/2 (cm)		1.9149		6.4290		
ESFUERZO CORTANTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE
36.00	8.00	4.50000	8.00	4.50000		
40.00	12.20	3.27849	12.20	3.27849		
42.00	14.00	2.83784	14.00	2.83784		
44.00	17.60	2.50000	17.60	2.50000		
46.00	20.00	2.21154	20.00	2.21154		
48.00	24.40	1.74625	24.40	1.74625		
50.00	28.00	1.56827	28.00	1.56827		
52.00	33.20	1.41361	33.20	1.41361		
54.00	36.20	1.26126	36.20	1.26126		
56.00	44.00	1.13503	44.00	1.13503		
58.00	51.10	1.02041	51.10	1.02041		
60.00	58.00		58.00			

SOLUCION MATERIAL		XANTANA 0.4 % EN SOL. 0.1 N NaCl				
1/2 (cm)		2.211		3.7523		
ESFUERZO CORTANTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE	RAPIDEZ DE DEFORMACION	VISCOSIDAD APARENTE
36.00	8.00	4.50000	8.00	4.50000		
40.00	12.20	3.27849	12.20	3.27849		
42.00	14.00	2.83784	14.00	2.83784		
44.00	17.60	2.50000	17.60	2.50000		
46.00	20.00	2.21154	20.00	2.21154		
48.00	24.40	1.74625	24.40	1.74625		
50.00	28.00	1.56827	28.00	1.56827		
52.00	33.20	1.41361	33.20	1.41361		
54.00	36.20	1.26126	36.20	1.26126		
56.00	44.00	1.13503	44.00	1.13503		
58.00	51.10	1.02041	51.10	1.02041		
60.00	58.00		58.00			

FIGURA 6.5  
RAPIDEZ DE DEFORMACION CONTRA INVERSO DEL DIAMETRO

SOL. SEPARAN 0.6% EN AGUA

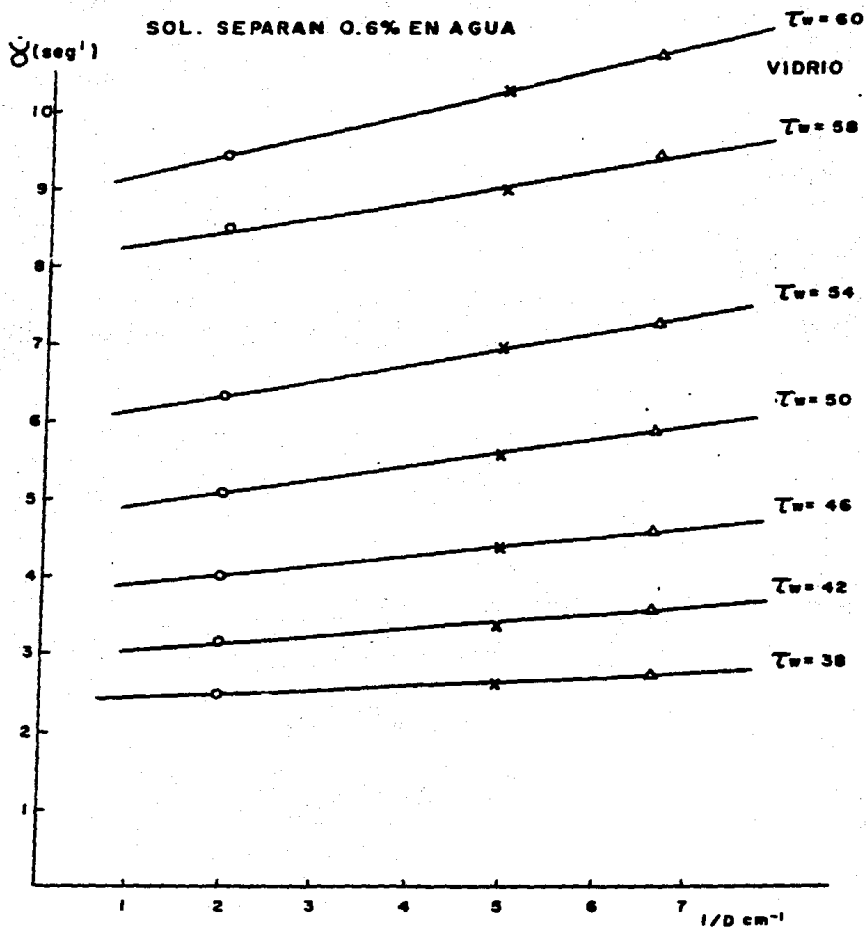


FIGURA 6.6  
 RAPIDEZ DE DEFORMACION CONTRA INVERSO DEL DIAMETRO  
 SOL. XANTANA 0.4 % EN AGUA

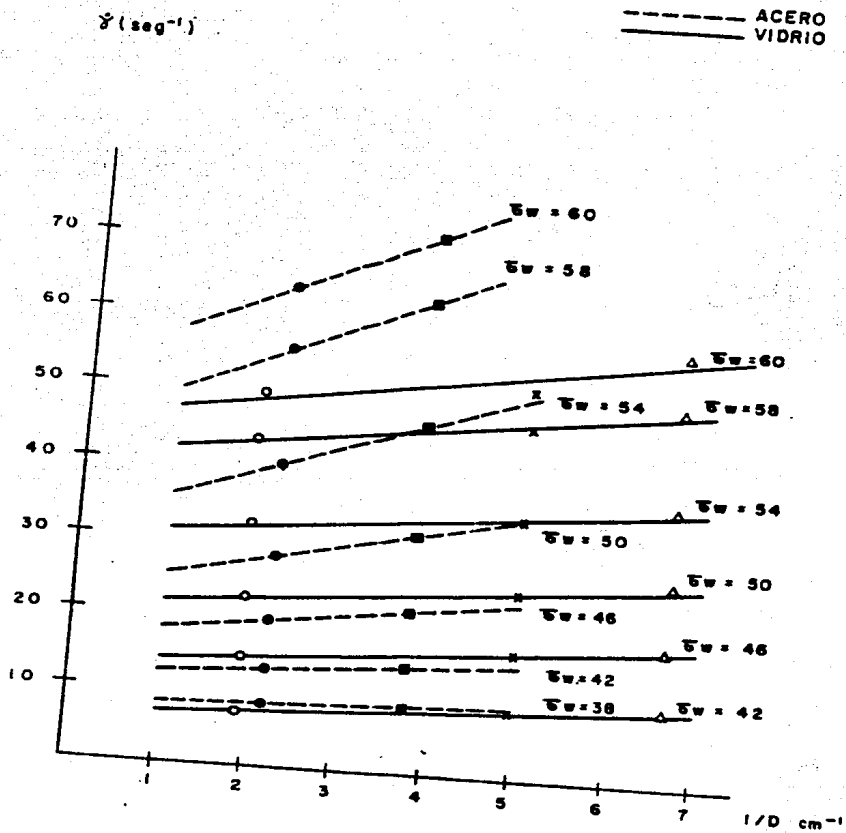
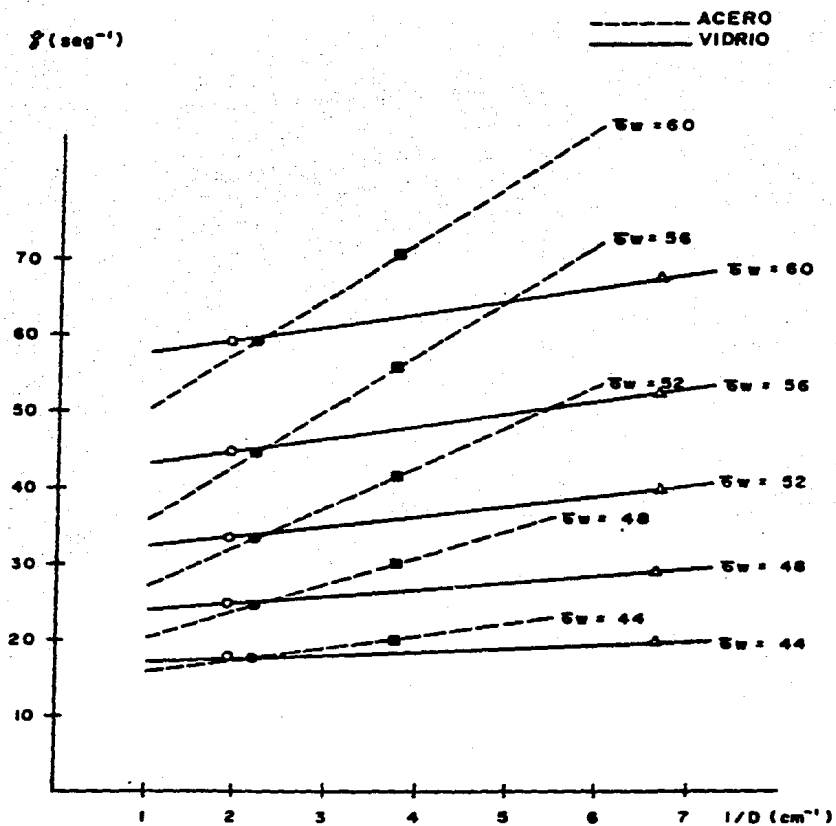


FIGURA 6.7  
 RAPIDEZ DE DEFORMACION CONTRA INVERSO DEL DIAMETRO  
 SOL. XANTANA 0.4 % EN AGUA 0.1 M NaCl.



**TABLA 4.3**  
**VELOCIDADES DE RESLIZAMIENTO PARA CADA SOLUCION**  
**(VALORES OBTENIDOS UTILIZANDO LA RELACION DE MOONEY E.C. 4.2)**

SOLUCION MATERIAL	SEPARAN 0.4% en agua VISIVO		0.4% XANTANA en agua VISIVO		0.4% XANTANA en agua ACERO	
	ESFUERZO CERTANTE	VELOCIDAD DE RESLIZAMIENTO	ESFUERZO CERTANTE	VELOCIDAD DE RESLIZAMIENTO	ESFUERZO CERTANTE	VELOCIDAD DE RESLIZAMIENTO
	30.00	0.00308	42.00	0.07153	30.00	0.04870
	36.00	0.03208	48.00	0.09276	36.00	0.01620
	39.00	0.04443	50.00	0.10070	38.00	0.04870
	40.00	0.01167	54.00	0.11390	42.00	0.08730
	42.00	0.01270	58.00	0.15933	44.00	0.16200
	44.00	0.01330	60.00	0.19800	50.00	0.27200
	46.00	0.01550			54.00	0.48700
	48.00	0.01750			58.00	0.58400
	50.00	0.02174			60.00	0.60000
	52.00	0.02200				
	54.00	0.02378				
	56.00	0.02700				
	58.00	0.02583				
	60.00	0.03330				

SOLUCION MATERIAL	0.4% XANTANA + NaCl VISIVO		0.4% XANTANA + NaCl ACERO	
	ESFUERZO CERTANTE	VELOCIDAD DE RESLIZAMIENTO	ESFUERZO CERTANTE	VELOCIDAD DE RESLIZAMIENTO
	42.00	0.02180	42.00	0.09740
	44.00	0.02302	44.00	0.13480
	46.00	0.07753	46.00	0.32470
	48.00	0.11140	48.00	0.43030
	50.00	0.13790	50.00	0.53370
	52.00	0.16770	52.00	0.64040
	54.00	0.20680	54.00	0.77920
	56.00	0.22270	56.00	0.87660
	58.00	0.23530	58.00	0.94870
	60.00	0.21740	60.00	0.96910

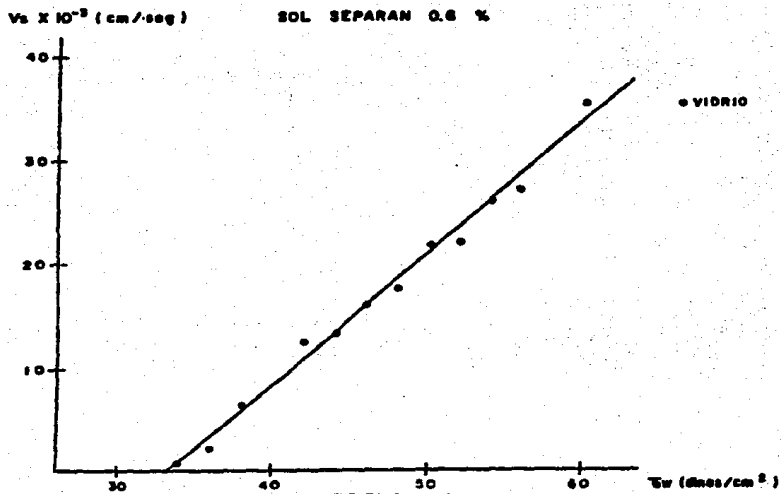


FIGURA 6.8

GRAFICA DE VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO CONTRA ESFUERZO CORTANTE

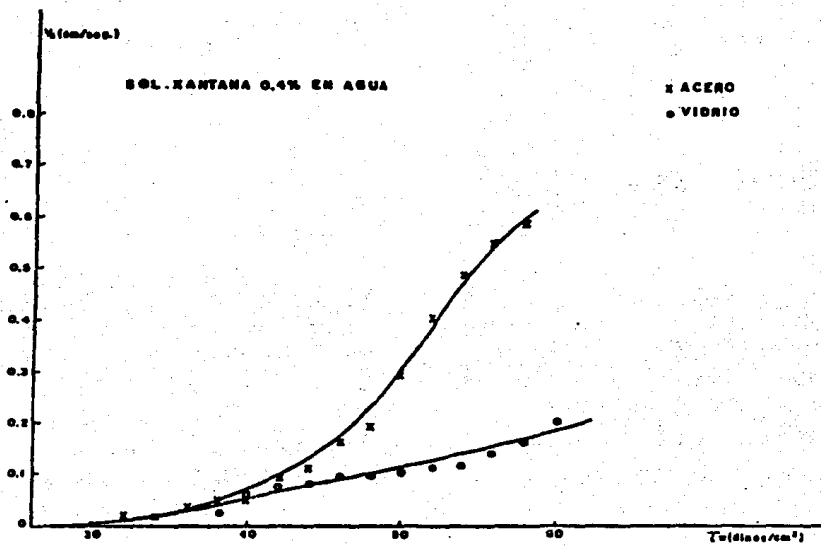


FIGURA 6.9

GRAFICA DE VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO CONTRA ESFUERZO CORTANTE

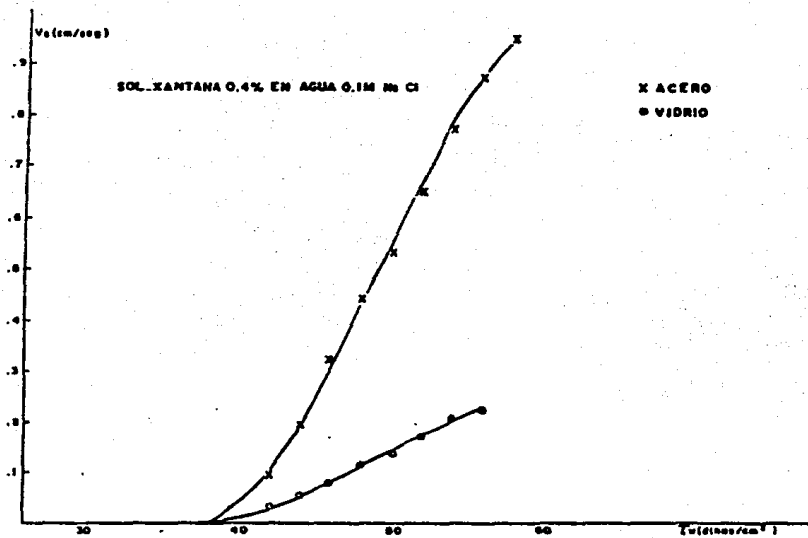


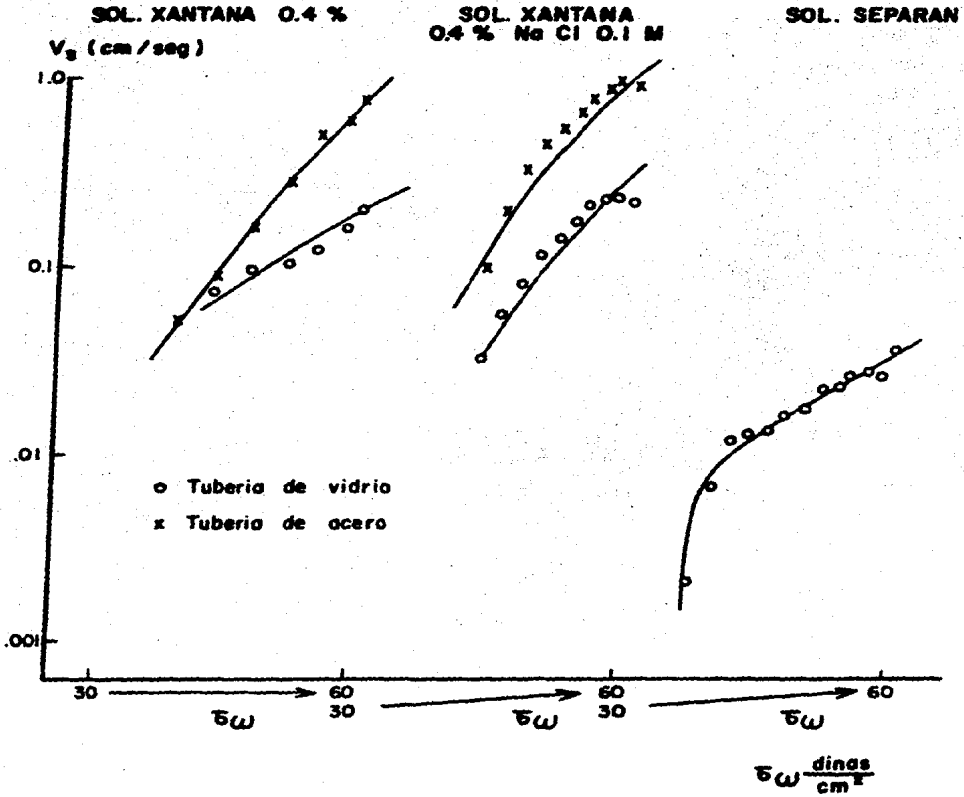
FIGURA 6.10

GRAFICA DE VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO CONTRA ESFUERZO CORTANTE



FIGURA 6.11

Gráfica de velocidad de deslizamiento contra esfuerzo cortante en la pared



$Q_s/Q$

SOL. XANTANA 0.4 % EN AGUA

Tubería de acero

●  $R = 0.226143$  cm

■  $R = 0.13325$  cm

Tubería de vidrio

○  $R = 0.1009288$  cm

△  $R = 0.0754175$  cm

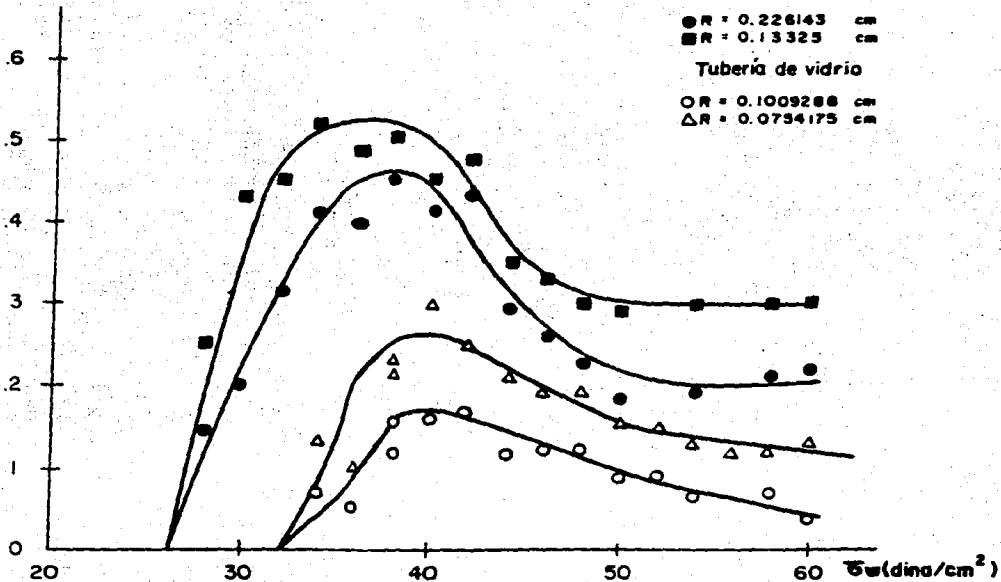


Fig. 6.12

GRAFICA DE FRACCION DE DESLIZAMIENTO CONTRA ESFUERZO CORTANTE

VII. BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- 1.- R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot  
Transport Phenomena  
John Wiley & Sons  
New York 1981
- 2.- R. B. Bird, R. Armstrong, O. Hassager  
Dynamics of Polymeric Liquids  
Volume 1 Fluid Mechanics  
John Wiley & Sons  
New York 1976
- 3.-  
Rheometry  
Halstead Press SW 85.  
New York 1975
- 4.- M. Mooney, J. Rheol., 2,210 (1931)
- 5.- Y. Cohen and A.B. Metzner, AICHE Symp. No. 212,78,77 (1982a)
- 6.- M.J. Reiner, J. Rheol., 2,337 (1931)
- 7.- B.A. Toms, J. Colloid Sci., 4,511 (1949)
- 8.- H. Green, Proc. Am. Soc. Test Mater. II,20,451 (1920)
- 9.- G.W. Scott-Blair, J. Rheol., 1,127 (1930)
- 10.- J.G. Oldroyd, J. Colloid Sci., 4,333 (1949)
- 11.- G.V. Vinogradov, G.B. Froishteter, K.K. Triliss Kii and  
E.L. Smorodinskii, Rheol. Acta., 14,765 (1975)
- 12.- V.N. Kalashnikov and S.A. Vlasov  
Rheol. Acta., 17,196 (1978)
- 13.- A.B. Metzner, Y. Cohen, and C. Rangel-Nafaile  
Non-Newtonian Fluid Mech., 5,449 (1979)
- 14.- Y.Cohen and A.B. Metzner, Macromolecules, 15,1425 (1982b)
- 15.- A.M. Kraynick, W.R. Schowalter, J. Rheol., 25,95 (1981)
- 16.- A. Dutta and R.A. Mashelkar, Rheol. Acta., 121,52,(1982)
- 17.- M. Mooney, S.A. Black, J. Colloid Sci., 7,204 (1952)

- 18.- G.V. Vinogradov, L.I. Ivanova, *Rheol.Acta.*, 6,209 (1967)
- 19.- O. Bartog, J. Homolek, *Polym. Eng. Sci.*, 11,324 (1971)
- 20.- G. Astarita, G. Marrucci, G. Palumbo, *Ind. Eng. Chem.*
- 21.- P.J. Carreau, Q.H. Bui, P. Leroux, *Rheol.Acta.*, 18,606 (1979)
- 22.- Y. Cohen and A.B. Metzner, *Journal of Rheology* 29, (1), (1985)
- 23.- W.C. Kozicki, S.M. Pasari, A.R.K. Rao and C. Tiu, *Chem. Eng. Sci.*, 25,41 (1970)
- 24.- Herman F. Mark, N. G. Gaylord, N.M.B. Kales. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* Vol. 1. Ed. Board Copyright by John Wiley & Sons P 177-197.
- 25.- R. Moorhouse, M.D. Walkinshaw, and S. Arnott. *Xanthan Gum Conformation and Interactions* p. 90-102. *Extracellular Microbial Polysaccharides* P.A. Sanford and A. Laskin eds. ACS Symposium Series # 45
- 26.- G. Holzwarth *Conformation of the extracellular polysaccharide of Xanthomonas Campestris. Biochemistry* Vol. 15, No. 19 p. 4333-4339 (1976)
- 27.- M. Rinaudo and M.Milas *Polyelectrolyte Behavior of a Bacterial Polysaccharide from Xanthomonas Campestris. Biopolymers*, Vol. 17 p. 2663-2678 (1978)
- 28.- E.R. Morris *Molecular Origin of Xanthan Solution Proprieties* p.81-89. *Extracellular Microbial Polysaccharides* P.A. Sanford and A. Laskin eds. ACS Symposium Series # 45
- 29.- Andrea W. Chow and Gerald G. Fuller *Flow Birefringence in Transient Flows.* Stanford University, Stanford, California 94305 October 1982
- 30.- O. Manero, L. de Vargas, S. Angeles, R. Vázquez *Estudios sobre el flujo de Soluciones Poliméricas en Tuberias. Memorias XI Congreso ANIAC* San Luis Potosi, Mexico 1985