

01173

3  
2e]



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
Facultad de Ingeniería

**DETERMINACION DE PROPIEDADES  
ELONGACIONALES Y DE CORTE DE  
FLUJOS NO-NEWTONIANOS  
MEDIANTE UN NUEVO DISPOSITIVO.**

**Ing. Alejandro von Ziegler Guardado**

**TESIS**

Presentada a la División de Estudios de Posgrado de la

**FACULTAD DE INGENIERIA  
DE LA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

como requisito para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERIA  
(MECANICA)**

Director de Tesis:

**Dr. Baltasar Mena Iniesta**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1994



## **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.

INDICE.

PARTE 1, FUNDAMENTOS.

I. Introducción.....	1
II. Antecedentes.....	3
1. Aspectos generales sobre la viscosidad elongacional.....	5
2. Flujos cortante y elongacional.....	9
i. Viscosimetría rotacional.....	9
ii. Naturaleza y origen de los esfuerzos normales.....	14
iii. Efectos observables de $N_1$ y $N_2$ .....	15
iv. Métodos de medición de $N_1$ y $N_2$ .....	18
v. Flujo de Couette.....	19
vi. Flujo elongacional.....	25
3. Medición de la viscosidad elongacional.....	27
3.1 Métodos de elongación uniforme.....	27
i. Experimentos con rapidez de elongación constante.....	27
ii. Experimentos con esfuerzo constante.....	29
iii. Experimentos con longitud constante.....	31
3.2 Métodos de elongación no-uniforme para polímeros fundidos..	33
i. Enrollado de fibras.....	34
ii. Flujo convergente.....	36
4. Reómetros elongacionales para soluciones poliméricas.....	37
i. El sifón abierto o flujo de Fano.....	38
ii. Mediciones de fuerza.....	42

**PARTE 2, DISEÑO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.**

**III. Aspectos generales sobre el diseño mecánico.....44**

- 1. Significado del término diseño.....45
- 2. Diseño en ingeniería mecánica.....47
- 3. Fases de diseño.....48
- 4. Identificación de necesidades y definición de problemas...48
- 5. Evaluación y presentación.....52
- 6. Consideraciones de diseño.....54
- 7. Requerimientos del proyecto.....55
- 8. Definición del problema.....57
- 9. Alternativa seleccionada.....58

**IV. Descripción del equipo experimental.....60**

- 1. Descripción genérica.....61
- 2. Elementos de que consta el equipo, funciones que cumplen, tolerancias y materiales de fabricación.....62
- 3. Justificación de materiales seleccionados.....64
- 4. Planos generales de fabricación.....65
- 5. Diagrama de flujo de torque.....66
- 6. Diagrama de flujo de masa.....67

**PARTE 3, ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL VISCOSÍMETRO  
ELONGACIONAL Y DE CORTE.**

<b>V. Descripción del arreglo experimental.....</b>	<b>68</b>
1. Determinación de diámetros del filamento mediante un sistema óptico computarizado.....	69
i. Características del sistema.....	70
ii. Calibración.....	72
2. Fluido de prueba y caracterización.....	74
3. Medición de esfuerzo.....	75
4. Metodología.....	83
<b>VI. Análisis de datos y resultados.....</b>	<b>85</b>
1. Cálculo de la velocidad.....	85
2. Cálculo de la rapidez de elongación.....	86
3. Cálculo de la viscosidad elongacional aparente.....	87
4. Fluido Newtoniano.....	88
5. Solución viscoelástica.....	89
<b>VII. Conclusiones.....</b>	<b>96</b>
<b>VIII. Referencias.....</b>	<b>98</b>
<b>IX. Bibliografía.....</b>	<b>100</b>

<b>APÉNDICE 1. Tolerancias de ensamble.....</b>	<b>103</b>
<b>APÉNDICE 2. Propiedades típicas de los aceros inoxidables.....</b>	<b>111</b>
<b>APÉNDICE 3. Propiedades típicas de aleaciones de aluminio.....</b>	<b>112</b>
<b>APÉNDICE 4. Dibujos de ensamble y planos de fabricación... </b>	<b>113</b>
<b>APÉNDICE 5. Tablas de datos y resultados.....</b>	<b>128</b>
<b>APÉNDICE 6. Gráficas de datos y resultados.....</b>	<b>138</b>
<b>i. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con     gasto Q = 40 ml/min.....</b>	<b>143</b>
<b>ii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con     gasto Q = 60 ml/min.....</b>	<b>152</b>
<b>iii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con     gasto Q = 80 ml/min.....</b>	<b>161</b>
<b>iv. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con     gasto Q = 100 ml/min.....</b>	<b>170</b>
<b>v. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con     gasto Q = 40 ml/min, y rapidez de elongación     promedio.....</b>	<b>179</b>

vi. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto $Q = 60$ ml/min, y rapidez de elongación promedio.....	182
vii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto $Q = 80$ ml/min, y rapidez de elongación promedio.....	185
viii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto $Q = 100$ ml/min, y rapidez de elongación promedio.....	188

**PARTE 1, FUNDAMENTOS.**

## I. INTRODUCCIÓN.

La viscosidad elongacional de soluciones poliméricas y de polímeros fundidos es una propiedad elusiva en su medición pero de vital importancia en muchos procesos industriales. Hasta ahora existía la idea de medir esta propiedad de manera independiente a la historia de las deformaciones que precedían a la medición. En particular, existen muy pocos aparatos de medición para soluciones poliméricas diluídas, no obstante su gran interés en procesos de recuperación de petróleo y otros procesos industriales.

El proyecto se inicia con el diseño de un nuevo viscosímetro elongacional y de corte, en el que se incluye un viscosímetro tipo Couette (de cilindros concéntricos) que mide la viscosidad de corte. A la salida del viscosímetro tipo Couette, se adapta una versión de viscosímetro elongacional, obteniéndose así, simultáneamente, mediciones de ambos tipos de viscosidad. Esto permitirá relacionar los dos tipos de deformación en un sólo aparato.

Las perspectivas del presente trabajo, a mediano y largo plazo, fueron las siguientes:

1. Presentar un nuevo sistema integral para la medición de la viscosidad de corte y la viscosidad elongacional en forma simultánea, y así, buscar establecer la relación entre ambas.
2. Obtener, por primera vez, mediciones confiables para su posterior utilización en el establecimiento de nuevas ecuaciones constitutivas para fluidos viscoelásticos.

Adicionalmente, las perspectivas del proyecto a mediano y largo plazo fueron las siguientes:

- 1.- Realizar mediciones en una enorme variedad de materiales poliméricos utilizados por un grupo internacional de laboratorios

especializados del cual formamos parte (MIT, Caltech, Stanford, Princeton, Brown, Strathclyde, Bristol, Louvain, Aberyswyth, Cambridge, entre otros) con el objeto de intercambiar resultados y conclusiones.

2.- Analizar numéricamente la geometría de flujo elongacional entre orificios alineados (utilizada en nuestro sistema de medición) con objeto predecir y cuantificar resultados experimentales de medición simultánea de propiedades al corte y a la elongación.

3.- Establecer (en todo lo posible) relaciones constitutivas válidas para reometría al corte y reometría elongacional para una variedad de materiales poliméricos de aplicación industrial.

4.- Realizar experimentos y explorar la posibilidad de emplear la geometría entre orificios para materiales compuestos y con fibras.

Este trabajo se divide en tres partes. La parte 1, "Fundamentos", comienza con una breve descripción de los objetivos y perspectivas del proyecto, y continúa con un repaso de algunas nociones y métodos fundamentales para la medición de las propiedades al corte y elongacionales de los fluidos no Newtonianos. La parte 1 incluye también un repaso sobre los principales avances logrados recientemente en el campo de la viscosimetría elongacional.

La parte 2, "Diseño del equipo experimental", referente al diseño del equipo experimental, consta de un capítulo sobre nociones fundamentales del diseño mecánico, y una descripción del equipo experimental.

En la parte 3, "Análisis experimental del viscosímetro elongacional y de corte", se aplica el material de las partes 1 y 2 al desarrollo experimental del proyecto. En la parte tres se describe el arreglo experimental, se analizan los resultados obtenidos, y se obtienen conclusiones al respecto.

## II. ANTECEDENTES.

Se define la viscosidad como la resistencia que opone un fluido al movimiento cuando se le aplica un esfuerzo cortante. Sin embargo, el mismo fluido puede estar sometido a otro tipo de esfuerzos que no sean cortantes y que, generalmente, tienen un mayor efecto en el comportamiento del fluido.

Un ejemplo de esto son los esfuerzos tensoriales. La resistencia que opone un fluido al movimiento cuando se le aplican este tipo de esfuerzos, no necesariamente es la misma que la que presenta ante un esfuerzo cortante, lo cual implica que existe otra propiedad que relaciona los esfuerzos tensoriales con la deformación del material.

A esta propiedad se le conoce como la viscosidad elongacional, que en el caso de los fluidos Newtonianos es exactamente tres veces más grande que su viscosidad al corte (relación de Trouton) pero, que en otro tipo de fluidos, puede sobrepasar el valor de la viscosidad al corte en varios órdenes de magnitud, lo cual enfatiza la importancia de esta propiedad.

Un flujo extensional es aquel flujo en el que las moléculas de fluido tienden a alinearse y alargarse al ser aplicado un esfuerzo tensorial. Este comportamiento es diferente a la respuesta del fluido al aplicársele un esfuerzo cortante simple, donde dicha respuesta es conocida como viscosidad.

La viscosidad elongacional ha sido definida [3] como el coeficiente de crecimiento del esfuerzo tensorial al someter al material a una rapidez de deformación elongacional relativa constante. Para lograr una rapidez de deformación elongacional relativa constante en una solución polimérica es necesario que ésta varíe su velocidad

exponencialmente con el tiempo. Por lo anterior, se ha establecido una viscosidad elongacional aparente que constituye un estado transitorio del material, la cual se obtiene de la relación entre el esfuerzo y la rapidez de deformación en un instante dado.

Por lo tanto, la viscosidad elongacional, proporciona un medio de diferenciación entre fluidos poliméricos que presentan el mismo comportamiento al serles aplicado un esfuerzo cortante.

Algunos autores [14,20] han comentado que el esfuerzo cortante simple es la forma común de deformación en el estudio reológico de materiales complejos y que se ha desarrollado relativamente poco trabajo en flujos extensionales. Atribuyen esta situación a la conveniencia experimental de hacer mediciones del esfuerzo cortante simple y a la considerable dificultad para llevar a cabo experimentos con un flujo elongacional a altas rapidezces de deformación.

La reometría tradicional en fluidos viscoelásticos y soluciones poliméricas, consiste en la medición de tres propiedades fundamentales: viscosidad al corte, primera y segunda diferencia de esfuerzos normales; dichas mediciones se realizan en un estado de deformaciones previamente conocido (flujo viscométrico) el cual permite caracterizar al material de acuerdo a una historia cuya rapidez de deformación es constante e impuesta mediante una geometría de flujo previamente analizada (cono-plato, placas paralelas, cilindros concéntricos, etc.).

Adicionalmente, se pueden realizar mediciones usando las geometrías anteriores bajo una rapidez de deformación de tipo oscilatoria con objeto de obtener valores reales y complejos de las propiedades fundamentales del fluido.

### 1. Aspectos generales sobre la viscosidad elongacional.

Se ha enfatizado que el número de investigaciones y la cantidad de esfuerzo realizados en el estudio de los flujos respectivos guarda poca relación con la gran importancia de la viscosidad al corte y la viscosidad elongacional desde una postura práctica. De hecho, se ha argumentado que casi cualquier operación de proceso de polímeros involucra una importante deformación extensional.

La viscosidad elongacional para el caso de fluidos lineales (Newtonianos) es constante e igual a tres veces el valor de la viscosidad al corte (relación de Trouton). Sin embargo, para fluidos poliméricos, la viscosidad elongacional llega frecuentemente a tener valores iguales a varios órdenes de magnitud superiores a la viscosidad cortante. Esta propiedad es aprovechada en numerosos procesos industriales tales como la fabricación de fibras, películas de materiales poliméricos, cintas, etc. En recuperación secundaria y terciaria de petróleo la viscosidad elongacional es primordialmente responsable del efecto de "empuje" del petróleo residual hacia la superficie después de la inyección de una solución polimérica diluida desde el fondo del yacimiento.

Tal y como la viscosidad al corte es función de la rapidez de deformación aplicada durante el flujo, la viscosidad elongacional es función de la rapidez de alargamiento a la cual se somete al fluido; sin embargo esta última es sumamente difícil de medir y establecer y la relación (en caso de existir) entre ambos valores de viscosidad no ha sido, hasta la fecha, establecida ni teórica ni experimentalmente.

El hilado de fibras es quizás la operación más ilustrativa de lo anteriormente escrito y se han realizado algunos trabajos en el análisis de los aspectos reológicos del proceso, incluyendo la estabilidad del hilo.

La observación de que la viscosidad elongacional se incrementa junto con la rapidez de deformación en el caso de algunos sistemas poliméricos, ha sido relacionada al problema de "hilatura", en el sentido de que cualquier disminución en el diámetro de alguna zona del hilo, trae como consecuencia una mayor rapidez de deformación, y por ende un aumento en la viscosidad. Esto nos lleva a disminuir el esfuerzo en la parte de dicho hilo, para lograr la estabilidad del proceso.

Existen algunos otros casos no tan obvios que muestran la importancia práctica de la viscosidad elongacional. Por ejemplo, el desgaste que algunas veces se observa en engranes inmersos en aceites con contenido de polímeros operando bajo condiciones de lubricación elasto-hidrodinámica, se debe a la conducta elongacional de este tipo de aceites. Esta afirmación se ve apoyada cualitativamente por los experimentos de Taylor, reportados por Metzner [20]. Dichos experimentos, consisten en un sistema de cuatro rodillos que giran en direcciones opuestas, inmersos en un fluido.

Cuando el sistema se encuentra sumergido en un líquido Newtoniano, el campo de velocidades esperado, es el que se indica en la Fig. 1.1.

Por otro lado, en el caso de un líquido elástico, se observa un campo de velocidades como el ilustrado en la Fig. 1.2; donde el fluido es expulsado a través de C y D, pero no es repuesto por A y B. De aquí que el espacio entre los rodillos se encuentra rápidamente libre de fluido. Metzner concluye que esto puede deberse a que existe una viscosidad elongacional mucho mayor que la viscosidad al corte bajo dichas condiciones de operación; el esfuerzo cortante realizado por los rodillos es insuficiente para vencer la gran resistencia creada por el flujo extensional (convergente) en A y B.

La viscosidad elongacional puede ser también relevante en el flujo turbulento de soluciones poliméricas muy diluidas y en suspensiones de fibras. En este campo, ha existido un significativo

aumento en la investigación del fenómeno conocido como "reducción de arrastre" [20], que consiste precisamente en la reducción del arrastre cuando son añadidas concentraciones pequeñas de polímeros o fibras, del orden de unas cuantas partes por millón a líquidos Newtonianos en flujo turbulento. Este proceso tiene el efecto de aumentar la viscosidad al corte de los líquidos reduciendo el arrastre turbulento, en ocasiones hasta en un 70%.

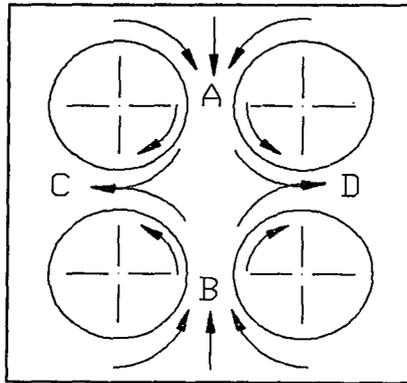


Fig. 1.1 Campo de velocidades para un fluido Newtoniano.

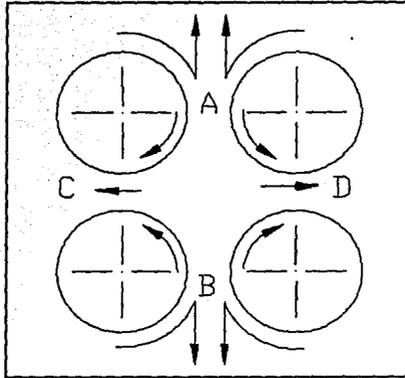


Fig. 1.2 Campo de velocidades en un fluido viscoelástico.

Un área de estudio que proporciona otros ejemplos de la importancia práctica de la viscosidad elongacional, es la relacionada con el flujo de soluciones poliméricas a través de medios porosos. Metzner [10] ha señalado que en el camino que sigue el flujo, el cambio en el área transversal, produce deformaciones por tensión y compresión alternativamente en una forma complicada, y hace notar la importancia de considerar la viscosidad elongacional.

Por último, notamos que el flujo extensional constituye una prueba experimental de cualquier Ecuación de Estado propuesta. Ya que el flujo extensional difiere en una forma significativa del flujo a cortante (donde generalmente no es posible obtener  $\eta_E$  a partir de las funciones viscométricas), proporciona un medio de diferenciación entre las ecuaciones reológicas propuestas, que pueden no ser apreciadas en pruebas al corte.

Con el fin de comprender e interpretar adecuadamente las mediciones reológicas, es necesario que los resultados no dependan de la técnica utilizada ni de alguna suposición concerniente a la conducta constitutiva del material. Es por ésto, que se definen funciones materiales las cuales caracterizan la respuesta del fluido en situaciones de flujo simple. Para flujos extensionales, se requiere que los datos sean obtenidos bajo condiciones de esfuerzo constante o de rapidez de deformación constante. Desafortunadamente, ésta es una tarea extremadamente difícil, la cual sólo ha sido lograda para materiales altamente viscosos o bien para muy bajos valores de rapidez de deformación y de deformación en sí.

La dificultad se da por la naturaleza móvil de los líquidos y por la imposibilidad de sostenerlos y estirarlos de una manera controlada. Como consecuencia, se han creado formas ingeniosas para crear flujos elongacionales y medir los esfuerzos en el fluido y las rapidezces de deformación asociadas [6]. Sin embargo, estas técnicas dan como resultado datos fluctuantes, al no ser involucrada una historia de deformación constante.

## **2. Flujos cortante y elongacional.**

### **i. Viscosimetría rotacional.**

La viscosimetría rotacional es utilizada generalmente para medir las propiedades de fluidos, los cuales presentan flujos que se aproximan a un movimiento cortante simple (fig. 2.1). Dicho flujo puede lograrse en un fluido contenido entre dos placas paralelas infinitas, una de las cuales se considera fija y la se-

gunda de ellas se mueve a una velocidad  $V$ .

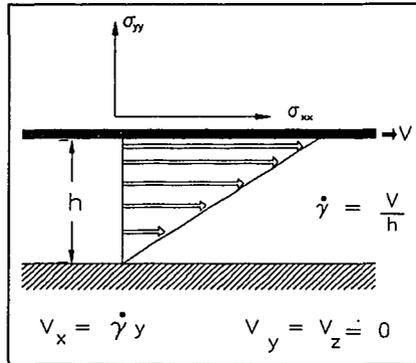


Fig. 2.1 Movimiento cortante simple.

La rapidez de deformación, estará definida por la velocidad  $V$  de la placa móvil, dividida por el espaciamento  $h$  entre ambas placas.

De los seis componentes del tensor simétrico de esfuerzo, cuatro son diferentes de cero, con  $\sigma_{xz}$  y  $\sigma_{yz}$  siendo cero (fig. 2.2).

Dado que los materiales bajo consideración son incompresibles; el esfuerzo  $\sigma$ , puede descomponerse en la presión hidrostática  $p$  y un esfuerzo extra  $\tau$ :

$$\sigma = -pI + \tau$$

2.1

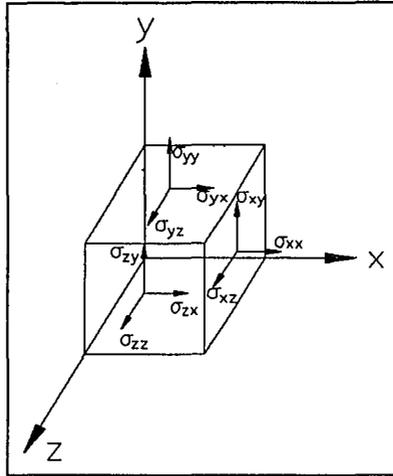


Fig. 2.2. Componentes del tensor simétrico de esfuerzos.

El signo negativo en los componentes normales del esfuerzo debido a la presión hidrostática indica que sólo las diferencias de esfuerzos normales pueden ser determinadas. Es por ello que son tres las propiedades del material que lo caracterizan completamente. Cada una de estas propiedades dependerá de la rapidez de deformación.

$$\sigma(\gamma) = \frac{V}{h} \quad 2.2$$

Estas propiedades son:

- La función de esfuerzo cortante  $\sigma$ , la primera diferencia de esfuerzos normales  $N_1$  y la segunda diferencia de esfuerzos normales  $N_2$ , de tal forma que:

$$\sigma(\gamma) = \sigma_{xy} \quad 2.3$$

$$N_1(\gamma) = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \quad 2.4$$

$$N_2(\gamma) = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} \quad 2.5$$

Sin embargo, la función del esfuerzo cortante no es comunmente utilizada, sino que se define una función de la viscosidad al corte, la cual está definida por:

$$\eta(\gamma) = \frac{\sigma(\gamma)}{\gamma} \quad 2.6$$

y es la que generalmente se utiliza.

Debido a la relativa facilidad de obtener de las mediciones de

la viscosidad al corte como función de la rapidez de deformación, predominan éstas en la literatura de reología. La primera diferencia de esfuerzos normales puede afectar en forma significativa este fenómeno tan importante.

Tanto  $\sigma$  como  $N_1$  pueden ser fácilmente medidos utilizando instrumentos disponibles, no así  $N_2$ , el cual involucra dificultades particulares en su medición. Se ha encontrado que para diversos materiales la segunda diferencia de esfuerzos normales es cerca de un orden de magnitud menor, además de tener el signo opuesto a la primera diferencia de esfuerzos normales.

Entre los viscosímetros rotacionales mayormente utilizados, se cuentan:

- Cono y plato. Generalmente es utilizado para medir la viscosidad al corte y la primera diferencia de esfuerzos normales. Además, la combinación de esfuerzos normales  $N_1 + 2N_2$  puede determinarse a partir de la distribución de presiones en la superficie de la placa.

- Placas paralelas. En este tipo de geometría, la muestra es colocada entre dos discos paralelos y coaxiales, separados una distancia  $h$ ; uno de los discos gira a una velocidad angular  $\Omega$ , mientras el segundo permanece fijo. Las magnitudes medidas son el torque en el plato superior y la fuerza total para mantener una separación constante entre ambas placas, la cual esta relacionada con la viscosidad al corte y a las funciones de esfuerzos normales.

- Cilindros concéntricos o Flujo de Couette.

## ii. Naturaleza y origen de los esfuerzos normales.

Hemos ya establecido que para un flujo en un estado estable de cortante simple, las distribuciones de esfuerzos relevantes, para un fluido no-Newtoniano están expresadas por:

$$\sigma_{xy} = \sigma = \gamma \eta(\gamma), \quad \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0, \quad 2.7$$

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = N_1(\gamma), \quad \sigma_{yy} - \sigma_{zz} = N_2(\gamma) \quad 2.8$$

Las variables  $\sigma$ ,  $N_1$  y  $N_2$  son llamadas comunmente "funciones viscométricas".

Las diferencias de esfuerzos normales están asociadas con efectos no-lineales. En condiciones experimentales de corte oscilatorio de baja amplitud, en las cuales se demuestra la viscoelasticidad lineal y los parámetros son medidos, las tres componentes de esfuerzo normal tienen el mismo valor. Son iguales a la presión ambiental, la cual es isotrópica. Similarmente, en condiciones de flujo estable, una vez establecido el flujo lo suficientemente lento para que los términos de segundo orden de  $\gamma$  sean despreciados, los esfuerzos normales son de nuevo iguales a la presión ambiente. Al ser incrementada la rapidez de deformación, las diferencias de esfuerzos normales aparecen primeramente como efectos de segundo orden, así:

$$N_1 = A_2 \gamma^2 + O(\gamma^4) \quad 2.9$$

$$N_2 = B_2 \gamma^2 + O(\gamma^4)$$

2.10

donde  $A_2$  y  $B_2$  son constantes y, las diferencias de esfuerzos normales son ambas función de la rapidez de deformación  $\gamma$ .

Desde un punto de vista físico, la generación de componentes de esfuerzo normales diferentes, y en consecuencia valores de  $N_1$  y  $N_2$  diferentes de cero, depende del hecho de que en un proceso de flujo la microestructura del líquido se torna anisotrópica. Por ejemplo, en un sistema polimérico diluido, las cadenas moleculares, las cuales ocupan en reposo un volumen prácticamente esférico, se deforman hasta adquirir una forma elipsoidal en un campo de flujo. En sistemas poliméricos en reposo, las fuerzas entrópicas determinan la forma esférica debido a la necesidad de presentar una interfase mínima libre de energía entre una gota de emulsión y el líquido envolvente. Se induce que fuerzas restitutivas son generadas en estas microestructuras deformadas y dado que la estructura es anisotrópica, las fuerzas son también anisotrópicas. La unidad esférica se deforma en un elipsoide, cuyos ejes mayores están inclinados en dirección al flujo. Así, la fuerza restitutiva es mayor en esta dirección que en las dos direcciones ortogonales. Como puede observarse, dada esta explicación de su origen, se explica porqué el mayor de las tres componentes de esfuerzo normal, es siempre  $\sigma_{xx}$ , la componente en la dirección del flujo.

### iii. Efectos observables de $N_1$ y $N_2$ .

Se espera que  $N_1$  sea una función positiva de la rapidez de deformación  $\gamma$ . Todos los datos experimentales confiables para líquidos elásticos están en congruencia con ésto y muestran valores positivos de  $N_1$  para cualquier rapidez de deformación.

Los esfuerzos normales son los responsables de efectos de laboratorio muy interesantes y de gran importancia comercial. Quizás el efecto más conocido y de los más espectaculares es el fenómeno de "subir por el rodillo" mejor conocido como el efecto "Weissenberg", el cual se produce cuando un agitador rotatorio es inmerso en un recipiente conteniendo un fluido elástico. Donde, cuando se trata de un líquido Newtoniano, puede ser forzado hacia abajo en la periferia de contacto con el rodillo debido a la inercia, y llega a producir así una superficie libre mayor en la periferia que cerca del agitador., cuando en soluciones elásticas, la mayor superficie libre se produce precisamente cerca del agitador (fig. 2.3).

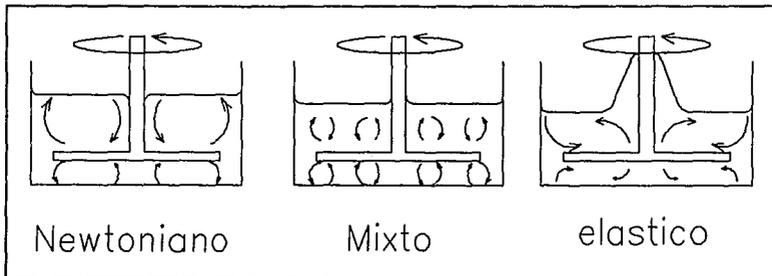


Fig. 2.3 Efecto Weissenberg.

El efecto de Weissenberg es una consecuencia directa del esfuerzo normal  $\sigma_{xx}$ , el cual actúa como un esfuerzo de anillo. Este esfuerzo "estrangula el agitador" y provoca que el líquido suba por éste. La reacción del fondo del recipiente, la cual no debe encontrarse apartada del extremo del agitador, empuja también al líquido para subir por el agitador. Si el rodillo del agitador es sustituido por un tubo, abierto por ambos lados, el efecto de Weissenberg provoca que el líquido elástico fluya hacia arriba por

el tubo. El flujo continuará hasta que la fuerza normal sea equilibrada por la fuerza gravitacional. Lo cual constituye el principio de la "bomba de fuerza normal".

Otro fenómeno que puede ser observado es el de hinchamiento a la salida de una boquilla, lo cual es muy importante en algunos procesos de manufactura. Cuando un líquido elástico es extruído por una boquilla, generalmente se hincha hasta adquirir un diámetro mayor que el de salida de la boquilla (fig. 2.4).

De hecho, este fenómeno también ocurre en fluidos Newtonianos, pero solamente a bajas rapideces de flujos, siendo el ensanchamiento despreciable, y a medida que se incrementa la rapidez de flujo, va disminuyendo el ensanchamiento, hasta llegar a una contracción. A diferencia de un fluido elástico, donde el ensanchamiento aumenta conforme aumenta la rapidez de flujo.

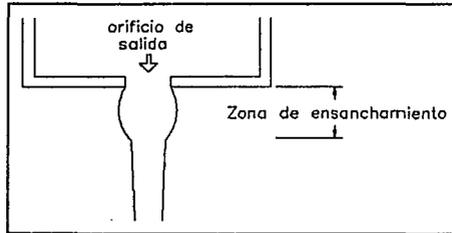


Fig. 2.4 Efecto de hinchamiento.

Una forma de entender el origen de este fenómeno, consiste en considerar el fluido elástico fluyendo hacia el orificio como una madeja de hilos estirados por el esfuerzo normal  $\sigma_{xx}$ , que al salir, es libre de expandirse. La expansión provoca que los hilos se acorten en longitud, y la madeja se ve incrementada en diámetro.

iv. Métodos de medición de  $N_1$  y  $N_2$ .

La figura 2.5 muestra esquemáticamente una modificación al arreglo básico de cilindros concéntricos de Couette, de tal forma que se pueda conocer la diferencia en empuje radial  $(s(r))_{R_2} - (s(r))_{R_1}$ .

Dadas las condiciones anteriores tenemos que:

$$\rho g \Delta h = \int_{R_1}^{R_2} \left[ \frac{N_1(\gamma)}{r} - \rho r (V_r(r))^2 \right] dr \quad 2.12$$

la cual se deriva de la ecuación de momentum en coordenadas cilíndricas.

Al tomar en cuenta la acción de las fuerzas de inercia, se debe de hacer la corrección pertinente, de tal forma que:

$$N_1 = \rho g \Delta h - \text{fuerzas de inercia}$$

por ésto, la ecuación 2.12 resulta en:

$$\rho g (\Delta h)_c = \rho g \Delta h + \int_{R_1}^{R_2} \rho (V_r(r))^2 dr \quad 2.13$$

donde todos los términos anteriores pueden ser medidos con relativa facilidad.

Este experimento es muy difícil de llevar a cabo, debido precisamente a las correcciones que deben hacerse, además de que existen otros arreglos cuyas geometrías permiten un conocimiento casi inmediato del valor de  $N_1$ , tal como en los arreglos de conoplato y de placas paralelas.

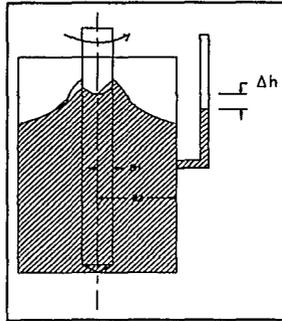


Fig. 2.5. Medición de  $N_1$ .

#### v. Flujo de Couette.

Es una variante de la geometría de placas paralelas, la cual, debido a su naturaleza es difícil de crear prácticamente. Se utiliza generalmente para mediciones de viscosidad al corte, siendo posible también obtener la primera diferencia de esfuerzos normales.

El fluido se encuentra contenido en el espacio entre dos cilindros concéntricos. En nuestro arreglo, el cilindro interior gira a una velocidad angular constante  $\Omega_1$ , en tanto que el cilindro exterior permanece fijo (fig. 2.6).

Para el análisis se utiliza un sistema de coordenadas cilíndricas en el cual el radio de los cilindros exterior e interior están dados por  $R_o$  y  $R_i$  respectivamente.

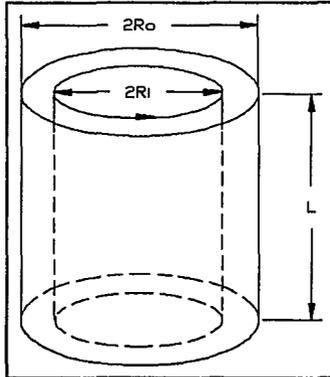


Fig. 2.6. Cilindros  
concéntricos.

Se supone que solamente existe la componente de la velocidad del flujo en la dirección  $\theta$ , y a partir de la ecuación de continuidad en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\delta V_r}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta V_\theta}{\delta \theta} + \frac{\delta V_z}{\delta z} = 0 \quad 2.14$$

se obtiene:

$$\frac{\delta V_\theta}{\delta \theta} = 0 \quad 2.15$$

luego:

$$V_{\theta} = f(r) \quad 2.16$$

donde la rapidez de deformación está dada por:

$$\gamma = r \frac{d\omega}{dr} \quad 2.17$$

Las ecuaciones de momentum expresadas en términos del esfuerzo en coordenadas cilíndricas (r,  $\theta$ , z) son:

$$\rho \left( \frac{\delta V_r}{\delta t} + V_r \frac{\delta V_r}{\delta r} + \frac{V_{\theta}}{r} \frac{\delta V_r}{\delta \theta} - \frac{V_{\theta}^2}{r} + V_z \frac{\delta V_r}{\delta z} \right) = \quad 2.18$$

$$\frac{\delta \sigma_{rr}}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta \sigma_{r\theta}}{\delta \theta} + \frac{\delta \sigma_{rz}}{\delta z} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) + \rho b_r$$

$$\rho \left( \frac{\delta V_{\theta}}{\delta t} + V_r \frac{\delta V_{\theta}}{\delta r} + \frac{V_{\theta}}{r} \frac{\delta V_{\theta}}{\delta \theta} + \frac{V_r V_{\theta}}{r} + V_z \frac{\delta V_{\theta}}{\delta z} \right) = \quad 2.19$$

$$\rho \left( \frac{\delta V_z}{\delta t} + V_r \frac{\delta V_z}{\delta r} + \frac{V_{\theta}}{r} \frac{\delta V_z}{\delta \theta} + V_z \frac{\delta V_z}{\delta z} \right) = \quad 2.20$$

$$\frac{\delta \sigma_{rz}}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta \sigma_{\theta z}}{\delta \theta} + \frac{\delta \sigma_{zz}}{\delta z} + \frac{1}{r} \sigma_{rz} + \rho b_z$$

$$\frac{\delta \sigma_{r\theta}}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta \sigma_{\theta\theta}}{\delta \theta} + \frac{\delta \sigma_{\theta z}}{\delta z} + \frac{2}{r} \sigma_{r\theta} + \rho b_\theta$$

Considerando la ecuación 2.16 y simplificando las ecuaciones anteriores, obtenemos respectivamente:

$$-\rho r \omega^2 = \frac{\delta \sigma_{rr}}{\delta r} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) \quad 2.21$$

$$0 = \frac{\delta \sigma_{r\theta}}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta \sigma_{\theta\theta}}{\delta \theta} + \frac{2}{r} \sigma_{r\theta} \quad 2.22$$

$$0 = \frac{\delta \sigma_{zz}}{\delta z} \quad 2.23$$

Sustituyendo  $\sigma = \sigma(\gamma)$  en las ecuaciones 2.21 y 2.22; además de diferenciar la primera de éstas con respecto a  $\theta$  y la segunda con respecto a  $r$  e igualando las dos expresiones utilizando el Teorema de Schwarz:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta r \delta \theta} = -\frac{\delta^2 p}{\delta \theta \delta r} \quad 2.24$$

se obtiene:

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{\delta \sigma_{r\theta}}{dr} + 2\sigma_{r\theta} \right) = 0 \quad 2.25$$

integrando la ecuación anterior:

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{2} C_1 + \frac{C_2}{r^2} \quad 2.26$$

donde  $C_1$  y  $C_2$  son las constantes de integración. La primera se evalúa sustituyendo la ec 2.26 en 2.22; utilizando la 2.17 y considerando  $\sigma = \sigma(\gamma)$  se obtiene:

$$C_1 = \frac{\delta p}{\delta \theta} \quad 2.27$$

lo cual indica que la presión  $p$  está en función de la posición angular, lo cual es físicamente imposible, por lo cual suponemos que  $C_1 = 0$ .

Para evaluar  $C_2$  se calcula el torque ( $\tau$ ) por unidad de longitud del cilindro, el cual está dado por:

$$\tau = 2\pi r^2 \sigma_{r\theta} \quad 2.28$$

la cual al sustituirla en la ecuación 2.26 se obtiene:

$$C_2 = \frac{\tau}{2\pi} \quad 2.29$$

Al considerar que la rapidez de deformación se mantendrá constante para separaciones pequeñas entre cilindros, entonces se puede definir como sigue:

$$\gamma = \frac{R_i \Delta \Omega}{R_o - R_i} \quad 2.30$$

Si se considera que la rapidez de deformación se mantiene constante, entonces el esfuerzo cortante se comportará de igual forma, lo cual al combinar las ecuaciones 2.28 y 2.30 y siendo la velocidad angular del cilindro interior  $\Omega = \Delta \Omega$

$$\eta(\gamma) = \frac{\tau (R_o - R_i)}{2\pi R_i^2 \Omega} \quad 2.31$$

De esta forma, se obtiene un valor de viscosidad al corte midiendo el torque total actuando sobre el cilindro interior y dividiéndolo entre la longitud total del mismo.

**vi. Flujo elongacional.**

La mayoría de los reómetros elongacionales caracterizan la respuesta del fluido de acuerdo a un flujo extensional uniaxial (fig. 2.7). El cual en coordenadas cartesianas puede ser descrito por medio de sus tres componentes de velocidad, de tal forma que :

$$V_1 = \epsilon X_1 \quad 2.32$$

$$V_2 = -\frac{\epsilon X_2}{2} \quad 2.33$$

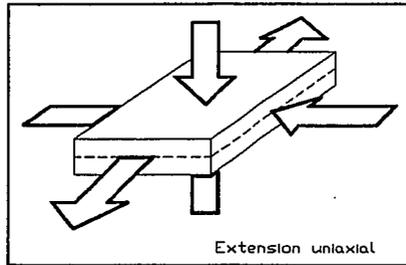
$$V_3 = -\frac{\epsilon X_3}{2} \quad 2.34$$

donde  $\epsilon$  es una rapidez de elongación constante, y la distribución correspondiente puede ser escrita como sigue:

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \sigma_{xx} - \sigma_{zz} = \epsilon \eta_E(\epsilon) \quad 2.35$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad 2.35 (a)$$

donde  $\eta_g$  es la viscosidad elongacional uniaxial. En general es una función de la rapidez de elongación  $\epsilon$ , tal y como la viscosidad al corte es función de la rapidez de deformación  $\gamma$ .



**Fig. 2.7.** Flujo uniaxial.

### **3. Medición de la viscosidad elongacional.**

#### **3.1. Métodos de elongación uniforme.**

El alargamiento uniaxial de una muestra de polímero, es el método de prueba más comunmente utilizado para obtener información reológica relevante. Esta técnica se limita a soluciones poliméricas muy viscosas o a rapidezces de deformación muy bajas. Las pruebas pueden conducirse de tal forma que se tenga: una rapidez de elongación constante, un esfuerzo constante, una velocidad constante o bien una fuerza constante. Aunque sólo las dos primeras condiciones permiten la determinación de la viscosidad elongacional.

Experimentalmente, la mayoría de los reportes publicados utilizan uno de los dos diseños básicos, uno involucra una longitud de prueba constante y el otro, una longitud de prueba variable. A menudo, la prueba se concluye antes de alcanzar un estado estable.

Los problemas más comunes se encuentran relacionados con la temperatura, la uniformidad de la rapidez de elongación y con la necesidad de disminuir la contribución de la fuerza de gravedad a la deformación. A pesar de estas dificultades, datos de varios polímeros lo suficientemente confiables, están disponibles y se pueden realizar comentarios generales con respecto a la naturaleza de la viscosidad elongacional.

#### **1. Experimentos con rapidez de elongación constante.**

En esta técnica, una muestra cilíndrica es sujeta en un extremo a un transductor de fuerza, mientras que por el otro extremo es movida hacia afuera de tal forma que la longitud de la muestra aumenta (Fig. 3.1.1), tal como se describe en la ec. 3.1.1.

$$\ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \epsilon t$$

3.1.1

La muestra es moldeada generalmente en vacío para eliminar las burbujas de aire, y es recocida a la temperatura de la prueba durante un período de tiempo anterior a ser estirada. Ballman [4]

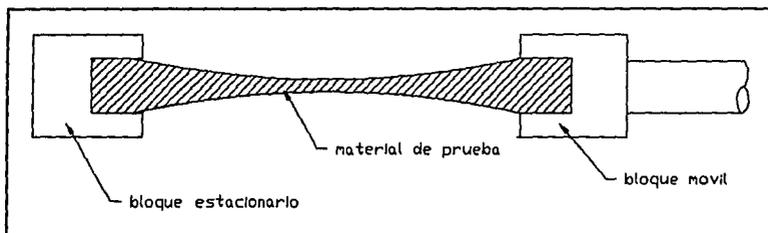


Fig. 3.1.1 Método de elongación constante.

utilizó un probador de tensión estándar y un horno de temperatura controlada para extender un filamento vertical de poliestireno a diferentes rapidezces de deformación, hasta de  $0.022 \text{ s}^{-1}$ . En este bajo rango de rapidez de deformación, obtuvo un estado estable en cada instante, y encontró que la viscosidad elongacional era básicamente constante, y aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor que la viscosidad al corte:

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left( \frac{\eta_E}{\eta_0} \right) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} Tr = 3 \quad 3.1.2$$

para un copolímero de isobutileno-isopreno a 100 °C.

Con el fin de eliminar el efecto de la fuerza de gravedad, Vinogradov [19] utilizó un aparato horizontal con la muestra de polímero flotando en la superficie de un líquido inerte; la relación de Trouton se cumplió para poliisobutileno. Los extensiómetros horizontales han sido descritos también por Rhi-Sausi, Dealy [15] y por Agraval [1]. Autores posteriores han utilizado polietileno a rapidezces de elongación mayores a  $0.1 \text{ s}^{-1}$  y encontraron que la viscosidad elongacional se incrementaba en función de la rapidez de elongación.

Debe tomarse en cuenta que la duración del experimento está limitada por el tiempo que toma al extremo de la muestra atravesar la longitud del baño a temperatura constante. Se obtienen errores si la temperatura de la muestra cambia o si la deformación de la muestra no es uniforme. También es necesario que el extremo de la muestra vaya instantáneamente del reposo a una velocidad finita predeterminada al inicio del estiramiento. Por último, el método sólo es aplicable para polímeros con alta viscosidad al corte, de sobre  $10^4 \text{ Nsm}^{-2}$  a la temperatura de ensayo.

#### **ii. Experimentos con esfuerzo constante.**

Los reómetros a esfuerzo constante son muy similares a los reómetros a rapidez de deformación constante, con la diferencia de que la fuerza de elongación varía en función de obtener un esfuerzo constante. Cogswell [2] utilizó una leva en forma espiral como polea junto con pesas para lograr este propósito. Debido a que el área transversal decrece en forma continua, la fuerza debe también decrecer, por lo tanto (asumiendo incompresibilidad):

$$F = \frac{F_0 L_0}{L}$$

3.1.3

donde el subíndice cero, denota las condiciones iniciales. La deformación es monitoreada a lo largo del experimento, y si ésta empieza a incrementarse linealmente con el tiempo, se logra una viscosidad elongacional constante.

Vinogradov [18] utilizó un arreglo mucho más sofisticado comparado al que utilizó Cogswell [2] y mostró la equivalencia de los datos de viscosidad elongacional obtenidos utilizando instrumentos a rapidez de elongación constante y de esfuerzo constante para poliestireno fundido.

El rasgo inusual de los resultados a esfuerzo constante fue que la rapidez de elongación disminuía inicialmente, tal y como se esperaba, pero llegaba a un mínimo antes de convertirse en constante; esto sugiere la presencia de esfuerzos residuales e implica un máximo transitorio en la viscosidad elongacional.

Otros extensiómetros a esfuerzo constante fueron desarrollados por Munstedt [12], un diagrama de su "fluenciómetro" se muestra en la figura 3.1.3. En éste, la muestra es extendida verticalmente y de ser posible hasta en diez veces su longitud. La última versión tiene la flexibilidad de ser usada a rapidez de elongación constante o a esfuerzo constante, y es la base de los instrumentos comerciales fabricados por las compañías Rheometric y Göttfert.

El diseño de Munstedt [12] emplea un control electrónico con retroalimentación, y utiliza muestras pequeñas 3-10mm de diámetro y 10-50mm de longitud) fijas a una celda de carga dentro de un baño de aceite. El máximo esfuerzo de Hencky que puede ser alcanzado es de 3.9 y son posibles rapidezces de elongación mayores a  $0.5 \text{ s}^{-1}$ .

La mayor ventaja de los reómetros a esfuerzo constante sobre los de rapidez de elongación constante, es que se logra un estado estable desde el punto de vista Lagrangiano a valores significati-

significativamente bajos de deformación total. Esto extiende el rango de rapidez de elongación dentro del cual puede determinarse la viscosidad elongacional en un aparato de dimensiones fijas.

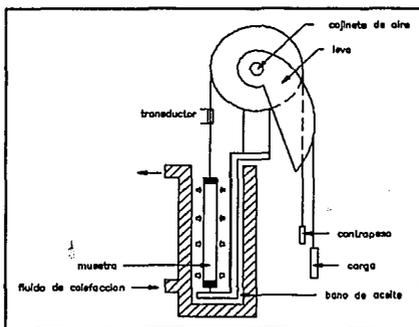


Fig. 3.1.3 Fluenciómetro de Munstedt.

### iii. Experimentos con longitud constante.

La limitación de la máxima deformación establecida por el tamaño del aparato puede ser eliminada, si se alarga una muestra a longitud constante, es necesario mantener la velocidad constante en los extremos de la muestra. Esto fue logrado por Meissner con el uso de mordazas rotatorias, dos pares de engranes que sujetan a la muestra y suministran alargamiento por medio de rotación en direcciones opuestas. Una versión del reómetro extensional de Meissner con mordazas rotatorias se muestra en la figura 2.1.3.

La mayor ventaja de las mordazas rotatorias, es que transportan material continuamente de dentro de las mordazas hacia el exterior, de tal forma que no se forma estrechamiento de cuello, y el esfuerzo de Hencky puede llegar a ser de hasta 7. Los factores limitantes para alargamientos aún más grandes parecen ser la homogeneidad de la sección transversal inicial a lo largo de la muestra. En este contexto, son necesarias muestras de 75 cm de longitud para este aparato.

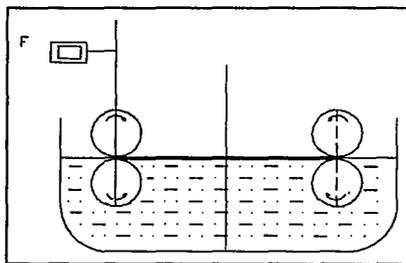


Fig. 3.1.3 Aparato de Meissner.

El desarrollo de reómetros extensionales de mordazas rotatorias ha sido descrito por Meissner [9]. La muestra de polímero es sumergida en un baño de aceite y la fuerza de alargamiento se determina montando un juego de engranes en un resorte vertical, la deflexión del resorte es conocida por medio del desplazamiento de un transductor calibrado para transmitir la fuerza. La rapidez de elongación se relaciona de una forma simple a las velocidades  $v_1$  y  $v_2$  en direcciones opuestas de los dos conjuntos de mordazas:

$$\epsilon = \frac{(V_1 + V_2)}{L}$$

donde L es la longitud de la muestra entre las mordazas.

Modificaciones recientes al diseño del reómetro le permiten trabajar bajo condiciones de esfuerzo constante.

Un aparato simple que también utiliza una muestra de longitud constante y conlleva a una rapidez de elongación constante fue desarrollado por Ide y White [7]. El cual consiste en un baño de aceite de silicón a una temperatura constante, una celda de carga Instron a la cual se sujeta uno de los extremos de la muestra de polímero y un rodillo rotatorio acoplado a un motor con control de velocidad. El filamento de polímero es alargado por el rodillo y enredado alrededor de éste. El esfuerzo se determina con la ayuda de la celda de carga, mientras que la rapidez de elongación está dada por la relación de la velocidad lineal del rodillo y la longitud del filamento.

Algunos viscosímetros rotacionales son adaptados para funcionar como aparatos alargadores con el rotor del aparato como rodillo en el cual se enreda uno de los extremos de la muestra. El otro extremo es sujeto a un carrete provisto de una ranura vertical, donde se mide la fuerza ejercida por la muestra.

### **3.2. Métodos de elongación no-uniforme para polímeros fundidos.**

Los extensiómetros uniaxiales descritos hasta ahora, sólo son útiles para materiales muy viscosos. No pueden por ejemplo, ser

utilizados para medir las propiedades de polímeros comerciales tan importantes como lo son el nylon o el poliéster, que pueden llegar a tener viscosidades al corte tan bajas como  $100 \text{ Nsm}^{-2}$  a las temperaturas de proceso. Consecuentemente son necesarias otras técnicas, pero ésto involucra invariablemente alargamiento no-uniforme. Aquí, uno no necesita que el esfuerzo o la rapidez de elongación sean constantes; además el material no se encuentra en estado virgen, libre de esfuerzos anteriores. Por lo tanto, no se puede obtener la viscosidad elongacional a partir de estas mediciones. Sin embargo, los datos de los experimentos bien diseñados de elongación no uniforme pueden ser analizados con la ayuda de ecuaciones reológicas de estado. En adición, dichos datos representan una medición simple de la resistencia que el fluido presenta a las deformaciones elongacionales.

#### **i. Enrollado de fibras.**

Este método es uno de los más utilizados en la manufactura de fibras sintéticas. Por lo general, el polímero fundido es extruído verticalmente hacia abajo a través de una hiladera o boquilla, la cual puede llegar a tener cientos de orificios. El filamento resultante es simultáneamente enfriado por una corriente cruzada de aire y alargado por la acción de los rodillos. Durante la solidificación, la madeja es enredada en una bobina. Cuando el proceso de enrollamiento de fibras es utilizado como viscosímetro elongacional, el arreglo se simplifica y solamente un filamento de sección transversal circular es utilizado. Este arreglo se muestra esquemáticamente en la figura 3.2.1.

El flujo bajo consideración es un filamento circular cuya sección transversal varía a lo largo de la dirección del flujo. Las suposiciones generalmente son tales como: incompresibilidad del fluido, estado estable del flujo, simetría axial y velocidad

uniforme a través de la sección transversal.  
 Bajo estas condiciones:

$$V=V(x_1)$$

$$A=A(x_1)$$

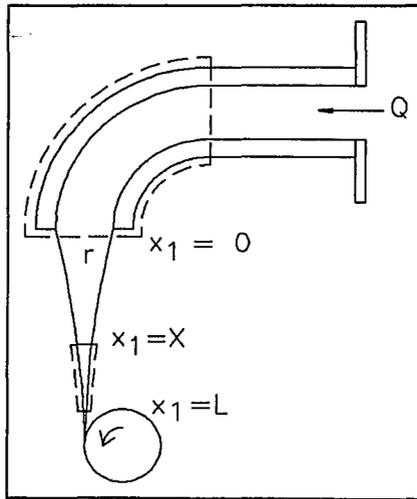


Fig. 3.2.1 Enrollado de fibra.

La suposición de un perfil de velocidades plano puede no ser descabellada. La fuerza  $F_L$  necesaria para jalar la fibra, es medida generalmente a una distancia  $L$  de la boquilla en un punto tal que el polímero ha solidificado. Esto se hace generalmente utilizando un tensiómetro, aunque por ejemplo, Spearot y Metzner han utilizado un método ingenioso con el mismo propósito; ellos han extruido una fibra horizontal dentro de un horno de temperatura constante. El filamento que abandona el horno pasa por una polea sin fricción, acoplada en el extremo a un resorte. La deflección vertical del resorte se utiliza para obtener la tensión a lo largo del hilo. El esfuerzo en el filamento en cualquier punto  $x_1$  entre cero y  $L$ , se obtiene haciendo un balance de momentum con la suposición de un perfil de velocidades plano.

**ii. Flujo convergente.**

Este método ha sido utilizado para investigar el comportamiento en líquidos muy elásticos debido a su fácil uso, sin embargo la interpretación de resultados tiene cierta dificultad. En esta técnica, los materiales de prueba fluyen desde un depósito, a través de un orificio, para introducirse en un capilar de menor diámetro (fig. 3.2.2).

En el diagrama se observa la presencia de dos regiones, la primera de ellas es solamente de recirculación, en tanto la segunda tiene una gran componente elongacional. Las mediciones de relevancia son el ángulo del cono y el gasto  $Q$ , además del empuje del chorro al abandonar el capilar, con el fin de relacionarlo con el esfuerzo elongacional.

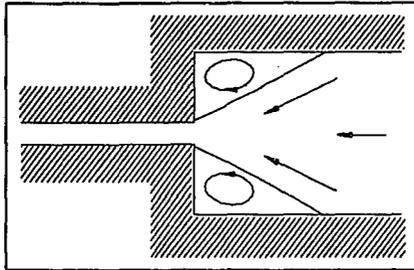


Fig. 3.2.2 Diagrama esquemático del método de flujo convergente.

#### 4. Reómetros elongacionales para soluciones poliméricas.

Mientras que avances significativos han sido realizados con respecto al desarrollo de viscosímetros elongacionales para polímeros fundidos, el progreso en cuanto a soluciones ha sido relativamente lento. Recientemente algunos nuevos diseños han sido propuestos, lo cual puede aligerar el problema. En cualquier caso, imponer una rapidez de elongación constante, es una tarea que aún no encuentra solución. Esto está relacionado con el hecho de que en todo aparato el campo de flujo es inestable desde el punto de vista Lagrangiano.

La mayoría de los viscosímetros propuestos para soluciones, son una variante del método de alargamiento de un chorro de fluido saliendo de una tobera u orificio, y de alguna forma obtener los valores de las fuerzas tensiles resultantes o del esfuerzo. Aunque

un poco diferentes, el instrumento de "chorro triple", el aparato de "Flujo de Fano", el de Sridhar y Gupta [6] y el reciente método de Mena [8] también se cuentan dentro de esta lista. La tabla 4.1 muestra los diferentes tipos de aparatos y sus diferencias.

Típicamente la descripción de estos aparatos puede ser dividida según la naturaleza del flujo, el método de alargamiento y finalmente las técnicas utilizadas para medir los esfuerzos tensiles.

clasificación de reómetros por enrollado en línea			
Nombre generico	Dirección de flujo	Técnica de alargamiento	Medición del esfuerzo
Enrollado de fibra	hacia abajo	carrete	transductor
Enrollado de fibra	hacia abajo	succión	microbalanza
Enrollado de fibra	hacia abajo	succión o carrete	caída de presión
Chorro triple	Horizontal	chorros convergentes	transductor
Flujo de Fano	hacia arriba	succión	transductor

Tabla 4.1

**i. El sifón abierto o flujo de Fano.**

Se trata de un flujo similar al de "enrollado de fibra"; en donde el fluido que se encuentra en un tanque de almacenamiento R es aspirado a través de una boquilla por una bomba de vacío. El

gasto  $Q$  y las dimensiones de la columna del fluido se miden con el propósito de obtener información acerca de la cinemática del fenómeno y el esfuerzo de elongación se determina midiendo la fuerza en la parte superior de la columna del fluido. También como en el caso de "enrollado de fibra", se asume que el perfil de velocidades es uniforme en la sección de prueba. Algunos autores señalan que este tipo de flujo tiene una ventaja muy importante sobre el de "enrollado de fibra" y es que en el método de sifón abierto, el fluido se encuentra en estado virgen, es decir, sin deformaciones previas, a diferencia con lo que pasa en el otro método, donde el material se somete a esfuerzos cortantes y elongacionales antes de ser succionado para formar el filamento.

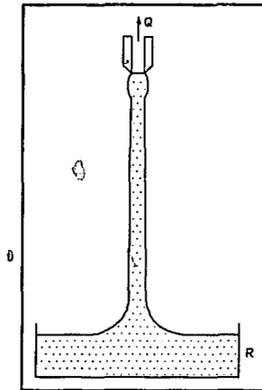


Fig. 4.1 Flujo de Fano.

El viscosímetro original diseñado por Nitschmann y Schrade

El viscosímetro original diseñado por Nitschmann y Schrade [13] empleó un tambor rotatorio para alargar un filamento de fluido, y éste ha sido el método más común para producir flujo elongacional en los aparatos por "enrollado de fibra". El método es fácil de utilizar y las variaciones en la rapidez de elongación se logran fácilmente al variar la velocidad del rodillo. Existen algunos ajustes en la velocidad en cuanto el líquido se aproxima al rodillo, y por ello, los datos correspondientes a la región cercana de éste, son generalmente ignorados. Una desventaja de esta técnica, es que el rango de rapidez de elongación obtenido es menor a  $10 \text{ s}^{-1}$  y el método trabaja mejor con soluciones altamente viscosas. Khagram superó este problema utilizando un elemento de succión donde el fluido que sale de un capilar, es succionado a otro de diámetro menor, produciéndose un chorro alargado en el espacio entre los dos capilares (fig. 4.2). A esta variación del "enrollamiento de fibra" se la llama método de "enrollamiento en línea" o "spinline".

En el viscosímetro de "spinline", la rapidez de elongación puede variar de la tobera de salida al elemento de alargamiento, dependiendo del tipo de fluido que se utilice. La rapidez de elongación local puede ser calculada midiendo el diámetro del perfil del chorro. Para un gasto constante  $Q$  y, suponiendo que no existe variación radial en la velocidad, la velocidad local y la rapidez de elongación están dadas por:

$$V = \frac{Q}{\pi r^2} \quad 4.1$$

$$\epsilon = \frac{dV}{dx_1} = -\frac{2Q}{\pi r^3} \frac{dr}{dx_1} \quad 4.2$$

El diámetro del perfil, generalmente se mide fotografiando el filamento, pero la exactitud de dicho método no es la suficiente para este tipo de variaciones. Otro método es el de proyectar el perfil del chorro en una pantalla, el cual es un poco más exacto. Con el fin de obtener la rapidez de elongación, los diámetros del perfil deben ser diferenciados numéricamente. Este procedimiento puede involucrar errores; para minimizarlos, es común el ajustar los datos de diámetro-distancia a una ecuación y diferenciarla.

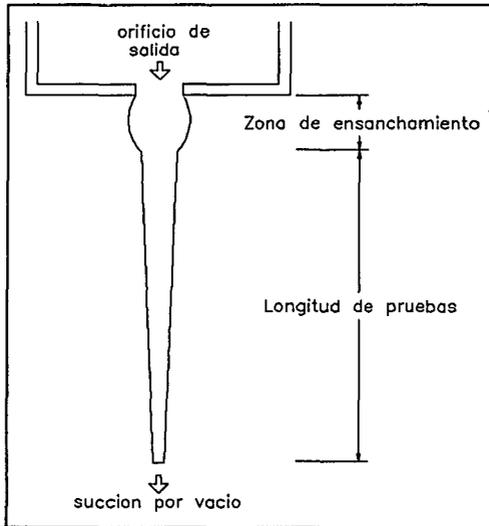


Fig. 4.2 Método de Spin-line.

ii. Mediciones de fuerza.

La fuerza ejercida en el orificio de salida debida al alargamiento, puede ser medida de muy diversas formas. La más común se refiere al uso de una barra de torsión la cual permite la deflección de la tobera de salida y mediante un transductor, se mide esta deflección. Existen otras formas utilizadas por diversos autores, pero la más interesante, la representa el arreglo presentado por Sridhar y Gupta [6] (figura 4.3), debido a la similitud de este con el arreglo que ocupa a este trabajo.

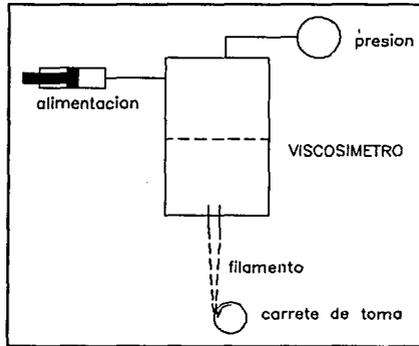


Fig. 4.3 Arreglo de Sridhar y Gupta.

Aquí el instrumento, en lugar de medir fuerzas, mide el esfuerzo tensorial en el orificio de salida. Bajo condiciones de estado estable el fluido es bombeado dentro del viscosímetro y lo abandona por un capilar. Asignando subíndices 0 y 1 correspondien-

correspondientes a los casos sin y con elongación, un balance de momentum alrededor del capilar superior nos conduce a (para un líquido Newtoniano):

$$Q_0 = \frac{\pi d^4}{128\eta L} (P_0 + \rho g L) \quad 4.3$$

$$Q_1 = \frac{\pi d^4}{128\eta L} (P_1 + \sigma_E + \rho g L) \quad 4.4$$

donde  $\sigma_E$  es el esfuerzo tensorial neto debido al alargamiento ocasionado en la salida del capilar,  $P_0$  y  $P_1$  son las presiones en el viscosímetro antes y después de la elongación,  $d$  es el diámetro del capilar,  $L$  es la longitud del capilar,  $\eta$  es la viscosidad al corte y  $\rho$  es la densidad de la solución. Al ser  $Q_0$  igual a  $Q_1$ , al hacer simultáneas las ecuaciones:

$$\sigma_E = P_0 - P_1 \quad 4.5$$

y el resultado puede ser válido aún para líquidos no-Newtonianos, si son utilizados argumentos dimensionales.

Las suposiciones involucradas en el análisis anterior, son que las pérdidas a la salida y a la entrada del capilar no cambian significativamente cuando el fluido es alargado.

Además, datos obtenidos de fluidos Newtonianos han sido utilizados para comprobar la validez de esta técnica.

**PART 2, DISEÑO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.**

**III. ASPECTOS GENERALES SOBRE EL DISEÑO MECÁNICO.**

La creación de un plan para la construcción o fabricación de una máquina, un invento, un proceso o un sistema mecánico se llama *proyecto mecánico*. En el diseño o proyecto de máquinas hay que concebir un conjunto de partes que puedan ser acopladas entre sí para obtener los propósitos deseados y definir entonces: la geometría y el material de cada componente, el proceso de fabricación, y el acoplamiento de las partes. Así, existe una gran parte de actividad creadora en el proceso de diseño o proyecto. El diseñador debe definir, en primer lugar, el "objeto" que debe proyectar. Entonces debe tener en cuenta factores como el desgaste, el calor, la fricción, la fabricación, el costo, la seguridad, el ruido, el aspecto, la flexibilidad, el control, las fuerzas, la resistencia, la rigidez, la deformación, la lubricación, etc. Después de cuantificar los valores relativos de estos factores en el proyecto se pasa a un proceso decisivo, que puede o no ser lógico, para llegar a la etapa final del proyecto.

Es inevitable el enorme trabajo de análisis previo al proceso de decisión al comparar las características de las diversas posibilidades que se pueden presentar. Sin embargo, en el procedimiento interviene en gran parte el sentido común, la experiencia y la experimentación.

En el proyecto de máquinas, el acoplamiento de las partes necesarias consiste, en general, en uno o más mecanismos que deben estudiarse con objeto de valorarlos y, en su caso, proyectarlos adecuadamente. Para elegir estos mecanismos, el proyectista debe estar familiarizado con una infinidad de ellos.

**1. Significado del término diseño.**

*Diseñar* es formular un plan para satisfacer una demanda humana. La necesidad particular que habrá de satisfacerse puede estar completamente bien definida desde el principio.

Por otra parte, el enunciado de una necesidad particular por satisfacer puede ser tan confuso e indefinido, que se requiere un esfuerzo mental y físico considerable para enunciarlo con claridad como un problema que exige solución.

Este segundo caso de tipo de diseño se caracteriza por el hecho de que ni la necesidad ni el problema a resolver han sido identificados. Obsérvese también que el caso puede implicar no uno, sino muchos problemas.

Es posible, además, clasificar el diseño, basándonos en el producto final:

- |              |                           |
|--------------|---------------------------|
| 1 Puentes    | 6 Equipo de computación   |
| 2 Carreteras | 7 Sistemas de calefacción |
| 3 Edificios  | 8 Máquinas                |
| 4 Barcos     | 9 Herramientas            |
| 5 Procesos   |                           |

De hecho, existe un número interminable de casos, puesto que es posible realizar la clasificación según el objeto en cuestión o conforme al campo profesional.

En comparación con los problemas matemáticos o puramente científicos, los problemas de diseño no tienen una sola respuesta correcta en todos los casos; por ejemplo, sería absurdo exigir la "respuesta correcta" a un problema de diseño, porque no existe tal. En efecto, una respuesta que es adecuada o "buena" ahora, puede ser

muy bien una solución impropia o "mala" el día de mañana, si se produjo una evolución de los conocimientos durante el lapso transcurrido, o bien, si han ocurrido cambios en las condiciones de operación de nuestra solución.

En el diseño cotidiano, con frecuencia casi todo el mundo interviene en una u otra forma, incluso en la vida diaria, puesto que siempre se presentan problemas y casos que deben ser resueltos. Considérese el diseño del plan de construcción de un equipo. Puede haber siete opciones diferentes de construcción. El costo de la construcción es diferente para cada caso, y algunas opciones requieren más tiempo para su elaboración. Quizá a algunos de los futuros usuarios les gustaría una mayor funcionalidad. Otros tal vez prefieran un sistema con mejores dispositivos anti-ruido. El jefe de área quizá se incline por un equipo con buena apariencia, pero también con un alto nivel de productividad. Cuando estas necesidades y deseos se relacionan con el tiempo y los recursos, es posible plantear varias soluciones. De éstas, puede haber una o más soluciones óptimas o no haberlas. Pero la solución elegida incluirá los costos de construcción, los tiempos de fabricación, los niveles de productividad, y los detalles finales de interrelación con el usuario, como son los niveles de ruido o contaminación, la funcionalidad, la facilidad de uso y la seguridad de operación. Es fácil observar que se tiene un gran número de complejos factores interrelacionados que influyen en la obtención de la mejor solución al problema del diseño de un plan de construcción de un equipo.

Todo problema de diseño siempre está sujeto a determinadas restricciones para resolución. Por ejemplo, en el caso de la construcción del equipo, el tiempo y los recursos disponibles serían dos elementos restrictivos. Nótese también que además existen restricciones en la solución. En el citado ejemplo podrían ser los deseos y preferencias de los usuarios. Finalmente, la solución obtenida para un problema de diseño podría ser la óptima.

Tal solución en este caso habrá sido obtenida cuando todas las personas involucradas expresen en forma unánime su aprobación al respecto.

Un problema de diseño no es un problema hipotético en absoluto. Todo diseño tiene un propósito concreto: *la obtención de un resultado final al que se llega mediante una acción determinada o por la creación de algo que tiene realidad física*. En ingeniería, el término diseño puede tener diferentes significados para diferentes personas. Algunos consideran al diseñador como el técnico que dibuja en todos sus detalles un engrane, un embrague u otros elementos de una máquina. Otros creen que el diseño es la creación de un sistema complejo, como una red de comunicaciones. En algunas ramas de la ingeniería el término *diseño* ha sido sustituido por denominaciones como *ingeniería de sistemas o aplicación de la teoría de las decisiones*. Pero no importa que palabras se usen para describir la función de diseñar; en ingeniería es también el proceso en el que se utilizan principios científicos y métodos técnicos (matemáticos, gráficos y computacionales) para llevar a cabo un plan que resolverá cierta necesidad o demanda.

## **2. Diseño en ingeniería mecánica.**

El *diseño mecánico* es el diseño de objetos y sistemas de naturaleza mecánica: máquinas, aparatos, estructuras, dispositivos e instrumentos. En su mayor parte, el diseño mecánico hace uso de las matemáticas, la ciencia de los materiales, la ciencia mecánica aplicada, y recientemente, el diseño mecánico asistido por computadora.

El *diseño en ingeniería mecánica* incluye el diseño mecánico, pero en un estudio de mayor amplitud que abarca todas las disciplinas de la ingeniería mecánica, incluso las ciencias térmicas y de los flúidos. Aparte de las ciencias fundamentales que se requieren, las bases del diseño en ingeniería mecánica son las mismas que las del diseño mecánico y, por consiguiente, tal es el enfoque que se utilizará en este trabajo.

### **3. Fases del diseño.**

A menudo se describe el proceso total de diseño (desde que empieza hasta que termina) como se muestra en la figura 1. Principia con la identificación de una necesidad y con una decisión de hacer algo al respecto. Después de muchas iteraciones, el proceso finaliza con la presentación de los planes para satisfacer tal necesidad. En las siguientes secciones se examinarán en detalle estos pasos del proceso de diseño.

### **4. Identificación de necesidades y definición de problemas.**

A veces, el diseño comienza cuando a un diseñador se le encomienda la resolución de una necesidad y decide hacer algo al respecto. *Identificar la necesidad* y expresarla con determinado número de palabras es una actividad bastante creativa, pues la necesidad puede manifestarse simplemente como un vago descontento

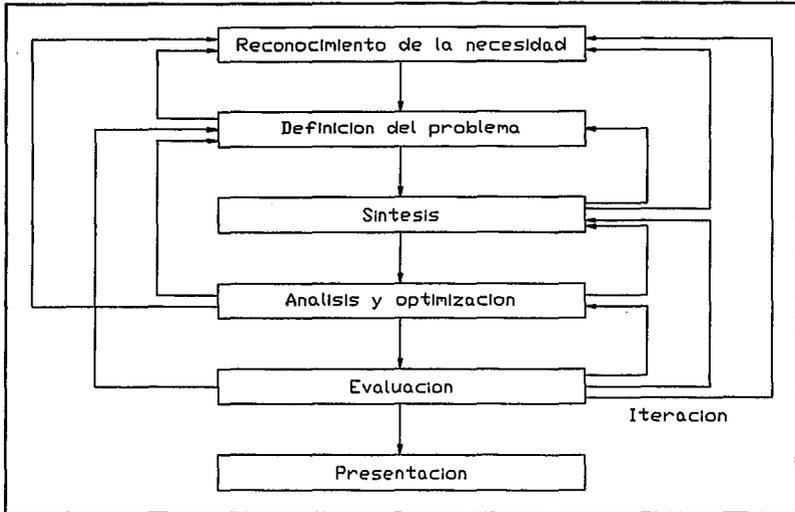


Figura 1. Fases del diseño.

o bien por la intuición de una dificultad. Con frecuencia, la necesidad no es del todo evidente; por lo general, se identifica de repente a partir de una circunstancia adversa o de una serie de circunstancias fortuitas que surgen casi al mismo tiempo. Por ejemplo, la necesidad de hacer algo acerca de una máquina empacadora de alimentos pudiera detectarse por el nivel del ruido, por la variación en el peso del paquete y por las ligeras, pero perceptibles, variaciones en la calidad del empaque o la envoltura.

Es evidente que, si una persona es sensible y percibe fácilmente las cosas, entonces es más posible que identifique una necesidad, también es más probable que haga algo al respecto. Por esta razón, las personas sensibles son las más creativas. Una necesidad se identifica con facilidad después de que alguien la ha

planteado. Así, la necesidad de tener agua y aire más limpio en muchos países, que se disponga de más sitios de estacionamiento en las ciudades, mejores sistemas para el transporte público y de una circulación de vehículos más rápida, ha llegado a ser totalmente evidente.

Hay una diferencia bien clara entre el planteamiento de la necesidad y la definición del problema que sigue a dicha expresión (Fig. 1). El problema es más específico. Si la necesidad es tener aire más limpio, el problema podría consistir en reducir la descarga de partículas sólidas por las chimeneas de las plantas de producción, o reducir la cantidad de emisiones contaminantes producidas por los automóviles, o bien, disponer de medios para apagar rápidamente los incendios forestales.

La *definición del problema* debe abarcar todas las condiciones para el objeto que ha de ser diseñado. Las condiciones o especificaciones son las cantidades de entrada y de salida, las características y dimensiones del espacio que deberá ocupar el objeto, y todas las limitaciones a estas cantidades. Se puede considerar el objeto a diseñar como algo colocado en una "caja negra". En este caso se debe especificar lo que entra y lo que sale de dicha caja, junto con sus características y limitaciones. Las especificaciones definen el costo, la cantidad de piezas a fabricar, la duración esperada, el intervalo o variedad de capacidades, la temperatura de trabajo y la confiabilidad. Entre dichas condiciones sobresalen las velocidades necesarias, las intensidades de alimentación en las máquinas, las limitaciones de temperatura, el alcance máximo, los rangos de operación esperados en las variables y las restricciones en dimensiones y peso.

Existen muchas condiciones intrínsecas que dependen del entorno particular del diseñador o de la propia naturaleza del problema. Los procesos de fabricación de que se dispone, así como las instalaciones de cierta planta industrial son restricciones a la libertad de acción del diseñador; por tanto, forman parte de las

condiciones intrínsecas. Por ejemplo, una fábrica pequeña tal vez no tenga maquinaria para trabajar metales en frío. Sabiendo esto, el diseñador seleccionará otros métodos de fabricación que se puedan aplicar en la planta. La habilidad y calificación del personal disponible y la situación competitiva son también condiciones o restricciones inherentes. Todo lo que limite a la libertad de elección del diseñador es una condición o restricción. Por ejemplo, en los catálogos, los fabricantes enlistan numerosos materiales y tamaños de productos, pero muchas veces no pueden surtirlos todos, y con frecuencia hay escasez de algunos. Además, la economía de los inventarios requiere que el fabricante tenga en existencia una cantidad mínima de materiales y tamaños de los productos a surtir.

Una vez que se ha definido el problema y obtenido un conjunto de especificaciones implícitas formuladas por escrito, el siguiente paso en el diseño, como se muestra en la figura 1, es la *síntesis* de una solución óptima. Ahora bien, esta síntesis no podrá efectuarse antes de hacer el *análisis* y la *optimización* debido a que se debe analizar el sistema a diseñar, con el fin de determinar si su funcionamiento cumplirá las especificaciones. El análisis podría revelar que el sistema no es óptimo. Si el diseño no resultase satisfactorio en una de dichas pruebas o en ambas, el procedimiento de síntesis deberá iniciarse otra vez.

Se ha indicado, y se reiterará sucesivamente, que el diseño es un proceso iterativo en el que se pasa por varias etapas, se evalúan los resultados y luego se vuelve a una fase anterior del proceso. En esta forma es posible sintetizar varios componentes de un sistema, analizarlos y optimizarlos para volver después a la fase de síntesis y ver qué efecto tiene esto sobre las partes restantes del sistema. Para el análisis y la optimización se requiere que se conceptúen o imaginen modelos abstractos del sistema que admitan alguna forma de análisis matemático. Tales consideraciones reciben el nombre de *modelos matemáticos*. Al

crearlos se espera encontrar alguno que reproduzca lo mejor posible el sistema físico real.

### **5. Evaluación y presentación.**

Como se presenta en la figura 1, la *evaluación* es una fase significativa del proceso total de diseño. Es la demostración definitiva de que un diseño es acertado y, por lo general, incluye pruebas de un prototipo en el laboratorio. En tal punto es cuando se desea observar si el diseño satisface realmente la necesidad o las necesidades. Es decir, si es confiable, si competirá con éxito contra productos semejantes, si es de fabricación y uso económicos, si es fácil de mantener y ajustar, si se obtendrán ganancias por su venta o utilización, si es probable que se ocasione un litigio como producto de riesgo, o si es probable que se requieran medios especiales para reemplazar sistemas o partes defectuosas.

La comunicación del diseño a otras personas es el paso final y vital en el proceso de diseño. Es indudable que muchos importantes diseños, inventos y obras creativas se perdieron para la humanidad sencillamente porque sus autores no quisieron o no fueron capaces de explicar sus creaciones a otras personas. La presentación es una tarea de venta. Cuando el investigador presenta o expone una nueva solución a las comunidades científicas o empresariales de alto nivel, está tratando de demostrar que su solución es la mejor. A menos que tenga éxito, el tiempo y el esfuerzo empleados para obtener la solución se habrán desperdiciado. Cuando los diseñadores venden una nueva idea, también venden su función como creadores. Si se repiten sus éxitos en la venta de conceptos, diseños, soluciones nuevas y cosas

semejantes a la dirección o gerencia de una empresa, se harán acreedores al reconocimiento de su labor en distintas formas. De hecho, así es como se progresa en el desarrollo de nuevas técnicas.

En esencia, hay solo tres medios de comunicación que se pueden utilizar: la comunicación *escrita*, *oral* y *gráfica*. En consecuencia, todo diseñador con éxito en su profesión tiene que ser técnicamente competente y hábil al emplear las *tres formas* de comunicación. Una persona con gran competencia técnica que carezca de aptitudes para comunicarse en alguna de tales formas, encontrará serios obstáculos en su carrera. Si no tiene capacidad para utilizar las tres formas, le será difícil demostrar el valor de sus desarrollos. Las tres formas de comunicación -escrita, oral y gráfica- son habilidades, es decir, aptitudes que puede adquirir o desarrollar una persona inteligente. Las habilidades o destrezas sólo se adquieren por la práctica, ejercitándose una y otra vez. Por ejemplo, músicos, escritores, y otros artistas, llegan a ser brillantes por la gran cantidad de tiempo que pasan en práctica constante. Nada de lo que vale la pena en la vida se puede lograr sin trabajo, a veces arduo, tedioso y monótono, y la ingeniería no es una excepción.

La capacidad para la expresión escrita se puede desarrollar escribiendo cartas, informes, memorándums, notas y artículos. No importa si estos últimos se publiquen o no: la práctica es lo importante. Para adquirir habilidad en el dibujo se hicieron croquis y bosquejos a lápiz, tratando de mostrar toda idea lo mejor posible, por lo general las comunicaciones escritas o habladas requieren estudios para comprenderlas, pero las imágenes se comprenden con facilidad.

El objeto de esta sección es destacar la importancia de la *presentación* de un concepto como el paso final en el proceso de diseño.

**6. Consideraciones de diseño.**

En ocasiones la resistencia de un elemento en un sistema es un asunto muy importante para determinar la configuración geométrica y las dimensiones que tendrá dicho elemento. En tal caso se dice que la *resistencia* es un factor importante de diseño. Cuando se usa la expresión *consideración de diseño* se está refiriendo a una característica que influye en el diseño de un elemento o, quizá, en todo el sistema. Generalmente se tienen que tomar en cuenta varios de estos factores en un caso de diseño determinado. Algunos de los más importantes son los siguientes:

- |                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| 1 Resistencia          | 13 Ruido                  |
| 2 Confiabilidad        | 14 Estilización           |
| 3 Propiedades térmicas | 15 Formas                 |
| 4 Corrosión            | 16 Tamaño                 |
| 5 Desgaste             | 17 Flexibilidad           |
| 6 Fricción             | 18 Control                |
| 7 Procesamiento        | 19 Rigidez                |
| 8 Utilidad             | 20 Acabado de superficies |
| 9 Costo                | 21 Lubricación            |
| 10 Seguridad           | 22 Mantenimiento          |
| 11 Peso                | 23 Volumen                |
| 12 Duración            |                           |

Algunos de estos factores se refieren directamente a las dimensiones, al material, al procesamiento o procesos de fabricación, o bien a la unión o ensamble de los elementos del sistema. Otros se relacionan con la configuración total del sistema.

Por lo general se sigue un enfoque matemático para resolver los problemas. Esto es completamente correcto y apropiado en un ambiente académico, donde en realidad se necesita utilizar tales principios para resolver problemas profesionales. Sin embargo, a fin de conservar la perspectiva correcta, se debe observar que en muchos casos los factores de diseño importantes son tales que no es necesario hacer cálculos o experimentos para definir un elemento o sistema. Los profesionistas suelen confundirse cuando se encuentran en situaciones en las que es virtualmente imposible efectuar un solo cálculo y, sin embargo, tiene que tomarse una decisión importante. Estos casos no son extraordinarios, sino que surgen todos los días. Supóngase que es deseable desde un punto de vista de ventas -por ejemplo, de equipos para laboratorio- causar una impresión de gran resistencia y durabilidad. Piezas gruesas ensambladas con pernos de mayor tamaño que el usual pueden servir para crear un artefacto de aspecto robusto. Algunas veces las máquinas y sus partes se diseñan simplemente desde el punto de vista del estilo y nada más. Estos puntos se exponen aquí de modo que no se crea que existe un enfoque matemático racional para toda decisión de diseño.

#### **7. Requerimientos del proyecto.**

La reometría tradicional en fluidos viscoelásticos y soluciones poliméricas, consiste en la medición de tres propiedades fundamentales: viscosidad al corte, primera y segunda diferencia de esfuerzos normales. Dichas mediciones se realizan en un estado de deformaciones previamente conocido (flujo viscométrico) el cual permite caracterizar el material de acuerdo a una historia cuya rapidez de deformación es constante e impuesta mediante una geome-

tría de flujo previamente analizada (cono-plato, placas paralelas, cilindros concéntricos, etc.). Adicionalmente, se pueden realizar mediciones usando las geometrías anteriores bajo una rapidez de deformación de tipo oscilatoria con objeto de obtener valores reales y complejos de las propiedades fundamentales del fluido. Existe actualmente en el mercado un número considerable de aparatos o reómetros comerciales los cuales proporcionan mediciones bastante precisas de las propiedades arriba mencionadas.

Sin embargo, en el caso de mediciones de propiedades bajo condiciones de flujo elongacional, existen tan solo unos cuantos prototipos experimentales de laboratorio, y ninguno a nivel comercial, los cuales ofrecen mediciones únicamente de viscosidad elongacional sin tomar en cuenta la historia previa de deformaciones o el valor correspondiente de viscosidad al corte.

En particular, no existe ningún aparato comercial capaz de determinar la viscosidad elongacional para el caso de soluciones poliméricas diluídas, a pesar de su importancia en situaciones prácticas (recuperación de petróleo, bio-reología, hemo-reología, etc.).

La viscosidad elongacional para el caso de fluidos lineales (Newtonianos) es constante e igual a tres veces el valor de la viscosidad al corte (relación de Trouton). Sin embargo, para fluidos poliméricos, la viscosidad elongacional llega frecuentemente a tener un valor de varias órdenes de magnitud superiores a la viscosidad cortante. Esta propiedad es aprovechada en numerosos procesos industriales tales como la fabricación de fibras, películas de materiales poliméricos, cintas, etc. En recuperación secundaria y terciaria de petróleo la viscosidad elongacional es primordialmente responsable del efecto de "empuje" del petróleo residual hacia la superficie después de la inyección de una solución polimérica diluída desde el fondo del yacimiento.

Tal y como la viscosidad al corte es función de la rapidez de deformación aplicada durante el flujo, la viscosidad elongacional

es función de la rapidez de alargamiento a la cual se somete al fluido. Sin embargo, la viscosidad elongacional es sumamente difícil de determinar y, hasta la fecha, no ha sido establecida la relación (en caso de existir) entre ambos valores de viscosidad, ni teórica ni experimentalmente.

Por lo tanto, es importante, medir simultáneamente la viscosidad al corte y la viscosidad elongacional bajo condiciones controladas de flujo, para establecer hipótesis sobre la dependencia entre ambas.

Actualmente existe un programa internacional en el cual están involucrados unos veinte laboratorios de las más prestigiosas universidades e institutos de investigación, dedicado a la determinación y al estudio de las propiedades elongacionales de algunos materiales.

#### **8. Definición del problema.**

El objetivo final del diseño de ésta máquina es poder realizar mediciones en una enorme variedad de materiales poliméricos utilizados por un grupo internacional de laboratorios especializados (MIT, Caltech, Stanford, Princeton, Brown, Strathclyde, Bristol, Louvain, Aberyswyth, Cambridge, entre otros) con el objeto de intercambiar resultados y conclusiones.

Para lograr lo anterior se requirió construir e instrumentar un reómetro generalizado para la medición simultánea de propiedades viscométricas de soluciones poliméricas diluídas y concentradas, bajo condiciones de esfuerzo cortante simple y esfuerzo elongacional uniaxial.

Los parámetros generales de operación son los siguientes:

- Velocidad angular del cilindro interior: 0.3 a 60 revoluciones por minuto.
- Gasto volumétrico: de 10 a 100 mililitros por minuto.
- Succión máxima en el área del orificio de succión: 55 cm de Hg.

#### **9. Alternativa seleccionada.**

Hace tan sólo un par de años, el grupo de reología del IIM presentó el diseño de un nuevo aparato para medir simultáneamente la viscosidad al corte y la viscosidad a la elongación para soluciones poliméricas diluidas y concentradas.

El equipo consiste en un viscosímetro al corte tipo Couette de cilindros concéntricos, los cuales se encuentran ensamblados a las tapas superior e inferior. La tapa superior cuenta con un orificio de purga, mediante el cual es evacuado todo el aire del sistema. El fluido entra al viscosímetro por un orificio de alimentación localizado en la parte alta del cilindro exterior. En la tapa inferior existe un pequeño orificio situado al centro de la separación entre los dos cilindros concéntricos, el fluido sale por dicho orificio y es succionado a través de un segundo orificio inferior colineal al primero, a una distancia variable. Así se forma un filamento equivalente a un flujo extensional uniaxial mediante el cual se determinan las propiedades elongacionales del material. La imagen del filamento se digitaliza mediante un sistema electrónico de captura de imagen, posteriormente, se utiliza un software especializado para el análisis de la imagen y la obtención de mediciones de gran precisión del diámetro del filamento.

Adicionalmente, se aprovecha el equipo de cómputo y el diverso

software seleccionado para el análisis de los datos obtenidos y la obtención de resultados.

Los resultados obtenidos en dicho aparato han sido reportados y presentan por primera vez, la influencia ejercida por una historia de deformaciones por esfuerzo cortante sobre los valores de la viscosidad elongacional. En general, si el material ha sido sometido a un esfuerzo cortante, su viscosidad elongacional aumenta proporcionalmente a la magnitud del pre-corte.

#### IV. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.

Se presenta un aparato, el cual es capaz de medir simultáneamente valores de viscosidad elongacional y al corte para soluciones poliméricas diluídas y semi-diluídas. Las mediciones de viscosidad al corte se obtienen de un flujo viscométrico entre cilindros concéntricos el cual impone una historia de deformaciones controlada al fluido. Un flujo elongacional es producido, posteriormente, aplicando succión a través de un orificio en la parte inferior del espacio entre los cilindros concéntricos. El promedio del esfuerzo tensorial es medido en el aparato de Couette y el diámetro del filamento proporciona las mediciones instantáneas de la rapidez de elongación.

Las propiedades elongacionales de un material son de extrema importancia en la mayoría, si no es que en todos, los sistemas de procesamiento de polímeros. Existen pocos viscosímetros comerciales con los cuales se puedan obtener mediciones de viscosidad elongacional bajo un flujo elongacional cuasi-estático; no obstante, siempre existen dificultades en la interpretación de las mediciones, particularmente en aquellos casos donde el material ha sido sometido a esfuerzos cortantes previos a las mediciones y cuando la historia de deformaciones no es conocida. Por esto, se desarrolló un aparato que sea capaz de efectuar mediciones simultáneas de viscosidades al corte y elongacional. Se trata de un aparato relativamente simple, el cual ofrece estas mediciones simultáneamente y es capaz de relacionar mediciones de viscosidad al corte con mediciones de viscosidad elongacional de régimen cuasi-estático, para una gran variedad de soluciones poliméricas diluídas y semi-diluídas.

## 1. Descripción genérica.

El aparato consiste básicamente en un viscosímetro de Couette de cilindros concéntricos en el cual el torque se mide como una función de la rapidez de corte. El fluido entra al viscosímetro a través del orificio I a un gasto constante, el cual es sometido a una rapidez de corte constante en el espacio entre los cilindros concéntricos (gap), antes de que salga a través del

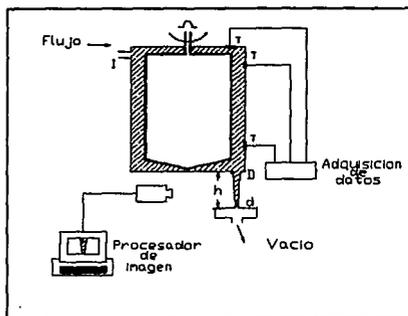


Figura 1. Arreglo experimental.

OK  
 orificio O en la parte inferior del gap. La presión en el fluido es medida por medio de transductores de presión T, localizados en tres puntos del cilindro exterior (estacionario). Una vez que se logra el régimen estacionario se aplica succión en el orificio inferior de diámetro "d", a través de un segundo orificio de diámetro menor "d", el cual está separado del primero una distancia "h". Ambos orificios están alineados coaxialmente. El orificio menor está localizado sobre una placa móvil que está conectada a una bomba de vacío que provee la succión. Cuando el vacío es aplicado, un filamento se forma entre ambos orificios; el filamento está siendo elongado por un esfuerzo tensional el cual es medido directamente por los transductores de presión del cilindro exterior.

## **DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL**

---

**2. Elementos de que consta el equipo, funciones que cumplen, tolerancias y materiales de fabricación.**

**- Cilindro interior.**

Establece el flujo cortante mediante el desplazamiento angular sobre su propio eje. El ensamble de esta pieza con el perno de acoplamiento es un ajuste de localización con interferencia (ver apéndice 1), mientras que el ensamble de esta pieza con la tapa superior es un ajuste de rotación estrecho (ver apéndice 1).  
Material: duraluminio.

**- Cilindro exterior.**

Esta pieza cumple las funciones de contener al fluido y mantener la separación y el paralelismo entre las dos tapas. También sirve para mantener concentricidad con el cilindro interior mediante un ajuste de localización con holgura (ver apéndice 1).  
Material: acero inoxidable AISI 416.

**- Soporte.**

Carga a todas las demás piezas y acopla al sistema con el motor de un viscosímetro Brookfield modelo LVT. Material: acero inoxidable AISI 416.

**- Tapa superior.**

Brinda: soporte libre al giro y alineamiento al cilindro interior, alineamiento al cilindro exterior, soporte al sello mecánico. Además, contiene al fluido en la frontera superior e incluye un barrenado de purga. Adicionalmente proporciona concentricidad a los cilindros interior y exterior mediante dos ensambles (ver apéndice 1): ajuste de rotación estrecho con el cilindro interior y ajuste de localización con holgura para el cilindro exterior. Material: acero inoxidable AISI 416.

## *DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL*

---

### **- Tapa inferior.**

Funciona como elemento alineador de los cilindros interior y exterior, contiene al fluido en la frontera inferior y desaloja al líquido por medio de un barreno de descarga. El ensamble con el cilindro exterior es del tipo de ajuste de localización con holgura. Material: acero inoxidable AISI 416.

### **- Orificio de succión.**

Establece el flujo elongacional suministrando la presión vacuométrica a través de un orificio colineal al barreno de descarga de la tapa inferior. Además, permite el ajuste de la separación entre los orificios de descarga y de succión. El ovalamiento del barreno de succión no excede del 2% del diámetro del orificio. Material: acero inoxidable AISI 416.

### **- Acoplamiento.**

Transmite el torque del motor del viscosímetro Brookfield al perno de acoplamiento del cilindro interior. Transfiere movimiento angular al perno, manteniendo un ensamble que permite el desplazamiento axial libre del acoplamiento para proporcionar un ajuste dinámico de la separación entre la tapa superior y el acoplamiento. Con el perno de acoplamiento presenta un ajuste de rotación flojo y en su parte superior cuenta con una cuerda izquierda fina de diámetro 0.2032 cm para su ensamble con la flecha de salida de torque del motor del viscosímetro Brookfield. Material: bronce.

### **- Perno de acoplamiento.**

Transmite el torque del acoplamiento al cilindro interior. Transfiere movimiento angular al cilindro interior, manteniendo un ensamble que permite el desplazamiento axial libre del acoplamiento. Con el cilindro interior tiene un ajuste de localización con interferencia, mientras que con el acoplamiento

## **DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL**

---

presenta un ajuste de rotación flojo. Material: bronce.

### **- Separador.**

Proporciona soporte estructural y paralelismo de ensamble a la tapa superior y sirve de apoyo a los pernos mediante una cuerda fina de diámetro de 0.3175 cm. Material: bronce.

### **- Perno.**

Da paralelismo y ensamble estructural a la placa inferior, también sirve como elemento tensor mediante una tuerca de sujección en su extremo inferior. Material: bronce.

## **3. Justificación de materiales seleccionados.**

### **- Acero inoxidable.**

Los aceros inoxidables se pueden dividir en tres grupos principales: ferríticos, martensíticos y auseníticos, que reciben su nombre de acuerdo con la estructura predominante.

Para esta aplicación se seleccionaron aceros austeníticos, ver apéndice 2. En estos aceros se encuentran grandes cantidades de níquel y de cromo, como en el caso de los tipos familiares 18% Cr, 8% Ni. El níquel hace que se amplíe el campo de la austenita hasta el punto de que la vuelve estable a la temperatura ambiente. Éste material nos brinda gran resistencia mecánica y a la corrosión.

### **- Aluminio.**

El aluminio tiene muchos empleos en su estado no aleado o relativamente puro. Es posible elevar la resistencia a la tracción y a la fluencia por el método de trabajo. Ver apéndice 3, vemos que

## **DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL**

---

para el aluminio comercial puro (1060) hay dos conjuntos de propiedades especificadas, en las condiciones señaladas 0 y H18 que denotan condiciones de recocido (recristalizado) y de trabajo en frío, respectivamente. Las microestructuras son semejantes a las de los latones trabajados en frío y recocidos. Como en el caso del latón, al controlar la secuencia e intensidad del recocido y del trabajo en frío, podemos obtener diferentes combinaciones de resistencia, alargamiento y dureza dentro de los extremos. Se usó este material en donde se requirió una combinación de buena resistencia a la corrosión y poco peso.

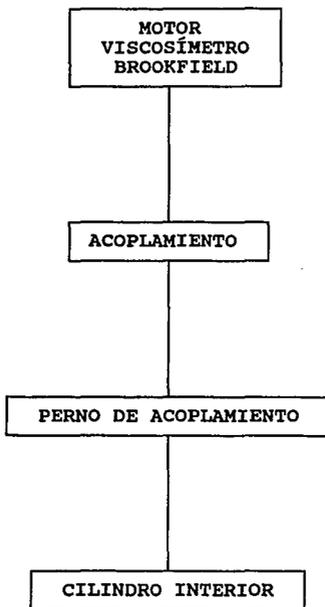
### **-Bronce.**

Las aleaciones de cobre tienen una combinación especial de características: conductividad eléctrica y térmica alta, alta resistencia a la corrosión, gran ductilidad en general y maleabilidad. Mientras que la dureza y resistencia de estas aleaciones no igualan las propiedades de los aceros más duros, en algunas aleaciones se obtienen resistencias a la tracción de 15.000 lb/pulg<sup>2</sup> ( $1.035 \cdot 10^3$  MN/m<sup>2</sup>). Se eligió este material para piezas que por su tamaño requerían de un material de fácil maquinado, pero con resistencias mecánica y a la fricción.

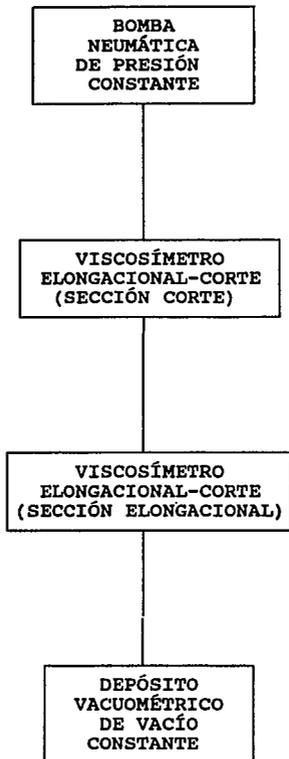
### **4. Planos generales y de fabricación.**

Se elaboraron mediante el uso de paquetería para computadora personal (Autocad, ver. 10), ver apéndice 4.

5. Diagrama de flujo de torque.



6. Diagrama de flujo de masa.



**PARTE 3, ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL VISCOSÍMETRO  
ELONGACIONAL Y DE CORTE.**

**V. DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL.**

El arreglo experimental consiste en un viscosímetro de Couette básico, de cilindros concéntricos. El fluido entra al viscosímetro a través de una entrada A con una tasa de flujo constante, entonces es sometido a una velocidad de deformación constante en la separación entre los dos cilindros concéntricos antes de salir a través de un pequeño orificio D en el fondo de la separación.

La presión en el fluido es medida por transductores de presión T, localizados en dos puntos del cilindro exterior (estacionario). Una vez conseguido el estado permanente, se aplica succión al orificio del fondo D, a través de un segundo orificio de diámetro menor  $d$ , el cual se encuentra separado del primero por una distancia variable  $h$ .

Ambos orificios son colineales. El orificio más pequeño se localiza sobre una placa móvil conectada a una bomba de vacío que provee la succión. Cuando se aplica el vacío, se forma un filamento entre ambos orificios; el filamento es elongado por un esfuerzo tensorial medido directamente por los transductores de presión del cilindro exterior. La tasa de elongación se obtiene mediante una videocámara que capta el perfil de diámetros del filamento. La imagen de video se digitaliza por una computadora, la cual nos muestra mediciones de la variación del diámetro del filamento.

El arreglo experimental se muestra en la figura 1.

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

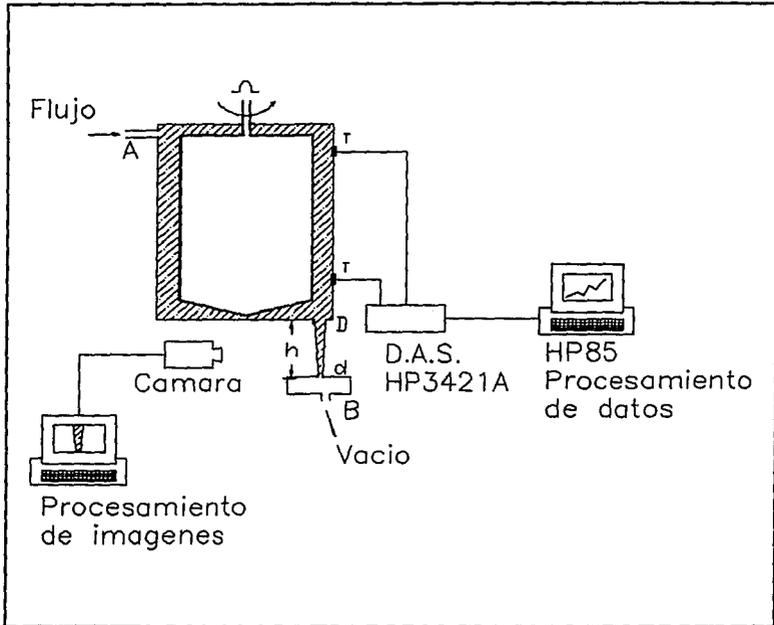


Fig. 1 Arreglo experimental.

### 1. Determinación de diámetros computarizado mediante un sistema

Cuando analizamos y procesamos imágenes digitalizadas por computadora nos proporcionan una herramienta que ofrece una serie de detalles visuales que no podrían ser interpretados en tiempo re-

al. Históricamente el proceso de análisis por imagen digital ha requerido el uso de cámaras especiales para capturar imágenes y un sistema para analizar la información capturada.

**1. Características del sistema.**

El sistema utiliza una cámara KODAK MEGAPLUS modelo 1.4 de estado sólido de alta resolución. El sistema óptico en conjunto consta de la cabeza de la cámara, la unidad de control de la cámara (CCU), cables de interconexión y cable de interfase.

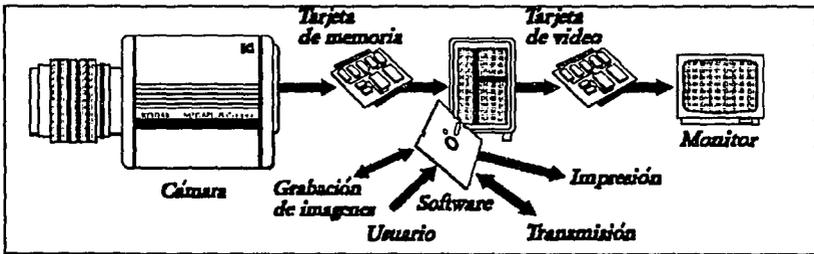


Fig. 1.1 Diagrama de bloques del sistema óptico de medición.

La operación de la cámara digital es similar a la operación de una cámara de 35mm de película sensible. En una cámara normal, la película es expuesta a la imagen abriendo el diafragma un determinado espacio de tiempo. Después se cierra el diafragma y la película es avanzada hasta el siguiente cuadro. La cámara digital tiene interconstruido un diafragma que es utilizado en una forma similar. El diafragma se abre exponiendo la imagen al sensor, después se cierra y la señal es enviada a un dispositivo de almace-

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

---

namiento. El diafragma de la cámara puede ser controlado interna o externamente.

La señal producida por la cámara es una señal de video digital, esta señal no es del mismo tipo del que se usa en video analógico convencional o en las computadoras. La imagen es producida por una serie de valores numéricos que son enviados de la cámara, en donde los números más grandes representan los tonos más claros y los números menores los tonos más oscuros. La señal presenta también pulsos periódicos que son los que le indican al sistema de almacenamiento de imágenes en donde comienza una nueva línea y cuando comienza una nueva imagen. La imagen comienza con la primera línea de la parte superior del objeto, cada imagen es rastreada de izquierda a derecha, la imagen es creada entonces por un conjunto de líneas.

Cada punto de la imagen está representado por un número cuyo valor oscila de 0 a 255. Cada punto o pequeño cuadro es llamado pixel. Cada pixel está organizado en la computadora en una matriz, para poder así ser procesados y en conjunto representar una imagen. La cámara tiene por sensor un arreglo CCD (Charge-Coupled-Device) de 1317 (H) x 1035 (V) elementos sensibles a la luz, que es la resolución máxima. Cada pixel mide 6.8 micras cuadradas y su espaciamiento es de 6.8 micras. Estos pixels pueden ser procesados por la computadora para poder resaltar o analizar una imagen. La siguiente convención es utilizada para definir los términos empleados en video digital:

- Cadenas horizontales de pixels son llamadas líneas.
- Incrementos horizontales son llamados elementos o sólo pixels.
- La línea superior es la número 0.
- El primer elemento de la izquierda es el número 0.
- La línea inferior es la número 1023.
- El último elemento de la derecha es el número 1280.

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

---

La geometría, las longitudes horizontal y vertical muy similares, simplifica las mediciones tomadas con la cámara. Los beneficios de tener un radio de acción del 100% son una mejoría en las lecturas menores al tamaño de un pixel, se reduce el traslape de puntos y se tiene un 100% de área sensible a la luz.

Como en este caso se cuenta con un monitor VGA, cuya resolución es menor (640x480), los datos son sub-muestreados por un factor de dos, es decir que sólo se muestra un cuarto de los datos en pantalla, aunque para su análisis, son tomados todos los datos.

La medición es realizada cuando ya se tiene la imagen en el sistema de almacenamiento, es entonces cuando son analizados los datos por medio de un programa. Este programa localiza los bordes del filamento dentro de un rectángulo específico, los bordes son la transición de una zona opaca a una más clara o bien su inverso. Estos rectángulos o ventanas pueden ser distribuidos con la finalidad de tomar múltiples muestreos a lo largo del filamento, si existen múltiples bordes en una ventana, es seleccionado el primero que es encontrado, la dirección en la que es buscado este primer borde puede especificarse por medio de parámetros. Si el borde encontrado tiene un umbral menor que el que fue especificado, el sistema de medición reportará la ausencia de este. Si son encontrados ambos bordes del filamento, el sistema nos dará la distancia en pixeles que separa a los dos.

### ii. Calibración.

Para calibrar la distancia, se debe de medir un objeto de dimensiones conocidas. Conociendo la magnitud del objeto para ambas escalas, pixels y unidades convencionales, se calcula la constante de conversión. Esta constante también puede ser adicionada en los parámetros iniciales del programa, por lo que las unidades finales

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

---

pueden ser directamente en el sistema internacional. En nuestro caso el factor utilizado fue 26.57 para una distancia de la cámara al objeto de 70 [cm], la resolución máxima que nos puede dar el sistema con esta configuración es de 37.45 [ $\mu$ m].

La sintaxis del programa es la siguiente:

**FLOW thresh #muestras DisBusq Promdis x1 y1 x2 y2 Dirección ppu**  
en donde:

<i>thresh</i>	Número de veces que es efectuada una prueba para encontrar la línea (1 a 254).
<i>#muestras</i>	Número de mediciones (2 a 100)
<i>DisBusq</i>	Distancia de la búsqueda (5 a 190)
<i>Promdis</i>	Número de pixel promediados antes de que el contraste coincida con el umbral (2 a 20)
<i>x1, y1</i>	Centro de la ventana de búsqueda superior izquierda
<i>x2, y2</i>	Centro de la ventana de búsqueda inferior derecha
<i>Dirección</i>	Dirección de la búsqueda (1 ó -1)
<i>ppu</i>	Pixels por unidad

En la figura 1.2 se presenta una muestra de los datos obtenidos de esa imagen.

0	Y =	12.7211,	Width =	2.4547
1	Y =	14.4148,	Width =	2.2094
2	Y =	16.1084,	Width =	1.9846
3	Y =	17.8020,	Width =	1.6945
4	Y =	19.4580,	Width =	1.5912
5	Y =	21.1517,	Width =	1.4873
6	Y =	22.8453,	Width =	1.4207
7	Y =	24.5390,	Width =	1.3542
8	Y =	26.1950,	Width =	1.4267
9	Y =	27.8886,	Width =	1.2508
10	Y =	29.5822,	Width =	1.3113
11	Y =	31.2759,	Width =	1.2691
12	Y =	32.9312,	Width =	1.1737
13	Y =	34.6255,	Width =	0.8980
14	Y =	36.3198,	Width =	0.6324

C:\FLOW>

Fig. 1.2 Muestra de datos obtenidos por el sistema de medición.

Otro factor importante es la iluminación, de ésta dependerán otros parámetros como son el umbral, el número de pixels promediados antes de que el contraste sea comparado con el umbral e incluso el plano en el que se esté enfocando a la cámara.

## 2. Fluido de prueba y caracterización.

El fluido de prueba que se utilizó es una solución polimérica de SEPARAN AP 30, una poliacrilamida aniónica fabricada por Dow Chemical Company. Se preparó una solución acuosa al 0.5%.

La caracterización del polímero se realizó en un Reómetro Weissenberg R-18, utilizando geometría de cono y plato obteniendo

mediciones de viscosidad al corte y esfuerzo normal.

### 3. Medición de esfuerzo.

Una vez que se ha establecido el flujo elongacional entre las dos placas del viscosímetro, la presión inicial del aparato, tiende a decrecer hasta que se restablece el estado cuasi-estático del flujo. Esta variación se debe al esfuerzo tensorial que existe a la salida del orificio de la placa superior. Este esfuerzo tensorial es a su vez, resultado de la extensión que está sufriendo el fluido.

Por lo tanto, el esfuerzo tensorial aplicado, se puede traducir en un cambio de presión antes y después de aplicar vacío al fluido.

El cambio de presión se mide por medio de dos transductores de presión (Druck Co Ltd, GB) los cuales se calibraron aplicándoles presiones conocidas por medio de columnas de agua y registrando sus respuestas. La posición de estos transductores T en el viscosímetro se muestra en la Fig. 1.

Un transductor es un dispositivo que convierte una cantidad física en otra con características más fácilmente cuantificables. El transductor es el elemento que se encuentra directamente expuesto a la variable a cuantificar.

Un transductor de presión convierte el desplazamiento causado por un fuerza sobre una superficie en una señal eléctrica analógica. Los transductores de presión basados en *strain-gauge*, proporcionan un confiable y conveniente medio de medir presiones en gases y líquidos. Son especialmente adecuados para fluidos corrosivos.

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

Este tipo de transductores poseen un elemento piezo-resistivo o un elemento sensor basado en materiales semiconductores. El *strain-gauge* forma parte de un puente de equilibrio de cuatro brazos del tipo Wheatstone, como se presenta en la figura 3.1. Cuando la presión provoca una deflexión en el elemento sensor, el brazo variable del puente sufre un esfuerzo. La deformación causa un cambio en la resistencia, produciéndose un cambio en la señal de salida proporcional al cambio de presión.

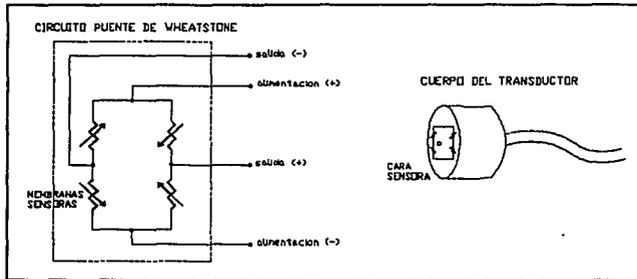


Fig. 3.1 Puente de Wheatstone.

Este tipo de transductores forman una unidad herméticamente sellada, lo que permite una conexión directa al punto de medición. Debido a su construcción no requieren de elementos capilares o de tuberías para su instrumentación. La transmisión de las señales generadas es por medio de cableado eléctrico, eliminando el tiempo de respuesta que se tendría si se transmitiera por medio del fluido. Presentan un diafragma o una cápsula que se encuentra en contacto con el fluido, la presión cambia el pequeño volumen de la cavidad por lo que el transductor presenta una resistencia mínima

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

al flujo. Este tipo de transductores están compensados contra errores de lectura causados por la temperatura para condiciones estables. Sin embargo, pueden ser producidos errores por cambios bruscos de temperatura, ya sea en el medio ambiente o en el fluido.

<i>Especificaciones</i>	<i>Druck PDCR 810</i>
<i>Rango de presiones [bar]</i>	<i>0 - 10</i>
<i>Sensibilidad [mV/V/PSI]</i>	<i>0.07</i>
<i>Offset [mV]</i>	<i>3</i>
<i>No-linealidad e histeresis [max]</i>	<i>± 0.1 %</i>
<i>Compensacion por variacion a la temperatura [ C]</i>	<i>0 - 50</i>
<i>Rango de error por temperatura [ C]</i>	<i>± 0.5 %</i>

**Tabla 3.1** Especificaciones del transductor PDCR 810.

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

De acuerdo al rango de presiones a medir en el experimento, donde la máxima es de cerca de 1.8 [bar], se escogió un tipo de transductores de uso general y construcción sólida fabricado por la compañía Druck Inc., modelo PDCR 810. El principal criterio de adquisición de esta modelo y marca fue su disponibilidad, ya que varias empresas ofrecen transductores con características eléctricas y mecánicas similares así como costo. Las especificaciones de estos elementos aparecen en la tabla 3.1. La resolución mínima de estos es de 4.2 [mbar].

El fabricante de este tipo de transductores envía con el equipo las curvas de calibración iniciales después de su elaboración, pero debido a que estas varían de acuerdo a las condiciones ambientales tales como temperatura y presión atmosférica, así como el tiempo de vida del equipo, su uso y manejo, resulta necesario volverlos a calibrar.

<i>Datos de calibración</i>	
<i>Presión [cmH2O]</i>	<i>Voltaje [V]</i>
0	0.000232
5	0.000912
10	0.001376
15	0.002432
20	0.002906
25	0.003345
30	0.004239
35	0.004932
40	0.005412
45	0.006234
50	0.006893

OK **Tabla 3.2** Datos de calibración del transductor de presión PDCR 810.

La nueva calibración se llevó a cabo al aplicar una presión conocida mediante una columna de agua a la membrana sensora, y midiendo la respuesta en voltaje a las terminales de salida. A manera de ejemplo se presentan los datos y la curva de calibración típica de este modelo de transductor en la tabla 3.2 y en la figura 3.2 la curva en sí.

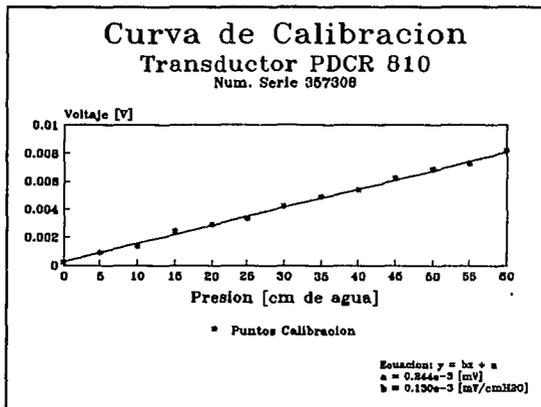


Fig. 3.2 Curva típica de calibración.

Debido a que los transductores utilizados proporcionan señales de bajo nivel de voltaje (del orden de milivolts) y para sistematizar la toma de muestras, se utilizó el sistema de adquisición de datos Hewlett Packard 3421A. Este sistema tiene la capacidad de registrar 30 lecturas diferentes, ya que cuenta con un sistema de multiplexaje y almacenamiento de datos. Otra ventaja de este sistema es que la calibración se realiza automáticamente

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

---

utilizando las constantes de calibración almacenadas en una memoria R.A.M.

Además de registrar lecturas de voltaje de CD y CA, el adquisidor HP 3421A puede leer resistencia, frecuencia y temperatura. Y también, cuenta con los elementos necesarios para la linealización de termopares y termistores, lo que elimina el empleo de circuitos adicionales para este tipo de mediciones.

El almacenamiento de datos se realiza de manera digital, ya que el adquisidor cuenta con un convertidor analógico digital con resolución programable de  $3\frac{1}{2}$  a  $5\frac{1}{2}$  dígitos. Otro aspecto importante es que las etapas de entrada del adquisidor cuentan con un alto rechazo en modo común (120 [dB]), con lo que se eliminan problemas ocasionados por ruido. Otras características de este sistema es que tiene una resolución de 300,000 unidades y una sensibilidad de 1 [ $\mu$ V].

Los datos registrados y almacenados en el adquisidor se procesan posteriormente en una computadora Hewlett Packard modelo 85, que cuenta con una interfase directa (HP-IB) para ser utilizada con el adquisidor descrito anteriormente. El tipo de comunicación establecida con esta interfase es de tipo paralelo, y pueden conectarse a este bus hasta 15 instrumentos diferentes, incluyendo el controlador, con las restricciones comunes para este tipo de comunicación. El procesamiento de las lecturas consistió en convertir las señales de voltaje registradas por los transductores a unidades adecuadas de presión. Esto se realizó por medio de un programa en basic que contiene los datos correspondientes a las curvas de calibración de cada transductor, el cual realiza un promedio de las lecturas registradas en cierto período de tiempo. Este programa aparece en el listado uno.

De esta forma, los datos obtenidos fueron impresos para un análisis posterior, por medio de paquetería en una computadora personal.

DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

---

-Listado uno:

```
10 REM * PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA *
15 REM * EL VISCOSÍMETRO ELONGACIONAL Y DE *
20 REM * CORTE, USANDO LA COMPUTADORA HP-85 *
30 DIM M(7),P(7),D(7),C(7),F(7)
40 CLEAR
60 DISP
70 DISP "      TOMANDO VALORES INICIALES"
80 DISP @ DISP "      ESPERE 10 SEGUNDOS" @ DISP
90 DISP @ DISP "  DESPUÉS DE ARRANCAR EL PROGRAMA"
100 DISP "      RECUERDE NO OPRIMIR [RUN] @ DISP @ DISP
110 DISP @ DISP "      PARA CONTINUAR OPRIMA [CONT]"
115 OUTOUT 701 ;"DCV2,3,4,7,8,9,12"
120 FOR I=1 TO 7
130 Z=0
135 READ M(I),C(I)
140 NEXT I
145 DATA 7179.027,1,9246.42,2,77674.6,3,7776.05,4,8481.76,5
147 DATA 8802.82,6,1,7
150 WAIT 1000
170 CLEAR
175 DISP "NÚMERO DE MUESTRAS ";
176 INPUT A
178 CLEAR
182 Z=0
185 FOR J=4 TO 6
186 F(J)=0
187 NEXT J
190 DISP "(PRESIÓN en PASCALES)" @ DISP
240 OUTPUT 701 ;"DCV7"
250 ENTER 701 ; P(4)
251 D(4)=.0037045
```

DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

---

```
280 OUTPUT 701 ;"DVC9"
290 ENTER 701 ;P(6)
291 D(6)=0.0031631
300 OUTPUT 701 ;"DVC12"
310 ENTER 701;P(7)
350 FOR I=4 TO 6
351 IF I=5 THEN 380
360 DISP "Transductor";C(I);"=";
370 H=P(I)-D(I)
372 F=H*M(I)*98
375 DISP USING 1001 ;F
380 NEXT I
381 DISP "MUESTRA #";Z+1;"TD";A
391 DISP "Tdiferencial=";
392 G=P(7)
393 DISP USING 1000 ; G
400 BEEP 50,50
401 Z=Z+1
402 FOR J=4 TO 6
403 IF J=5 THEN 405
404 F(J)=(P(J)-D(J))*M(J)*98+F(J)
405 NEXT J
406 IF Z=A THEN GOTO 1200
410 GOTO 190
1000 IMAGE DDD.8D
1001 IMAGE DDDDDDDDD.3D
1200 DISP @ DISP @ CLEAR
1201 DISP "(PRESIÓN EN PASCALES)" @ DISP
1202 DISP "DESPUÉS DE";A;"LECTURAS"
1205 FOR =4 TO 6
1210 DISP "PROMEDIO DE T";C(J);"=";
1220 F=F(J)/A
1230 DISP USING 1001 ; F
```

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

---

```
1240 NEXT J
1241 DISP "Tdif=";
1242 DISP USING 1000 ; G
1243 DISP "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR"
1245 INPUT X$
1246 CLEAR
1250 GOTO 170
1260 END
```

### 4. Metodología.

Pasos a seguir para la elaboración de los experimentos:

1- Preparación de la solución polimérica un día antes de ser utilizada.

2- Almacenamiento de esta solución en el recipiente alimentador a presión constante, de donde se bombea al viscosímetro.

3- Regular la presión del recipiente alimentador, según las necesidades de gasto.

4- Una vez que se tiene un gasto constante, se toman las lecturas de los transductores de presión con el sistema de adquisición de datos.

5- Aplicar succión por medio de la bomba de vacío.

6- Una vez que se establece el flujo elongacional, se toman nuevamente las lecturas de los transductores de presión con el adquisidor.

7- Digitalizar el filamento con la cámara de alta resolución y la computadora; el sistema de medición de ancho del filamento nos proporciona los valores para ese instante específico.

## DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

---

8- Para el mismo gasto, succión y separación entre placas se somete al fluido a un flujo cortante antes de salir por el orificio y ser elongado. Este flujo cortante se logra con la ayuda del viscosímetro Brookfield, con el cual se hace girar el cilindro interior del viscosímetro elongacional a una cierta velocidad angular.

9- Para una velocidad angular de 12 [r.p.m.] se toma nuevamente la lectura de los transductores de presión, se digitaliza la imagen del filamento, y se obtienen los valores del ancho del filamento. Posteriormente se repite lo anterior para una velocidad angular de 30 y 60 [r.p.m.].

10- Una vez que se tienen los datos para los cuatro casos anteriores, se detienen la bomba de vacío y el flujo de la solución polimérica.

**VI. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS.**

**1. Cálculo de la velocidad.**

Considerando que el perfil de velocidades se conserva uniforme en sentido transversal al flujo, se puede conocer su velocidad axial utilizando valores del diámetro del filamento y del gasto, mediante la siguiente relación:

$$V=4 \frac{Q}{\pi d^2}$$

donde :

- V velocidad axial [cm/s]
- Q gasto volumétrico [cm<sup>3</sup>/s]
- d diámetro del filamento [cm]

En el apéndice 6 se muestran algunos ejemplos de la variación de velocidad a lo largo del filamento. En la figura 4 se puede observar cómo la velocidad varía inversamente con el diámetro.

## 2. Cálculo de la rapidez de elongación.

Un elemento importante en el análisis de datos es el valor de la rapidez de elongación. Cuando la longitud del filamento es pequeña, algunos autores suponen que la rapidez de elongación se mantiene constante a lo largo de éste. No obstante, y a manera de comparación, se calculó la rapidez de elongación a lo largo de todo el filamento.

La rapidez de elongación se define como:

$$\epsilon' = \frac{dv}{dz}$$

donde:

$\epsilon'$  rapidez de elongación [ $s^{-1}$ ].

$v$  velocidad [cm/s].

$z$  es la longitud del filamento [cm].

entonces se puede calcular la rapidez de elongación  $\epsilon'$  en cualquier sección del filamento mediante la siguiente relación:

$$\epsilon' = \frac{V_2 - V_1}{Z_2 - Z_1}$$

donde:

$V_1$  es la velocidad en la salida del orificio superior [cm/s].

$V_2$  es la velocidad en la entrada del orificio inferior [cm/s].

$z$  es la longitud del filamento [cm].

Las gráficas obtenidas se muestran en el apéndice 6, donde se puede apreciar que la rapidez de elongación se mantiene casi constante en todo el filamento, como en la figura 5.

### 3. Cálculo de la viscosidad elongacional aparente.

Una vez obtenido el esfuerzo medido por los transductores de presión por medio de una fórmula iterativa, se puede deducir un valor de viscosidad elongacional aparente, en cada punto del filamento, mediante la siguiente relación:

$$\eta_E = \frac{P_n}{\dot{\epsilon}}$$

donde:

$\eta_E$  es la viscosidad elongacional aparente.

$P_n$  es el esfuerzo tensorial en el punto  $n$

$\dot{\epsilon}$  es la rapidez de deformación.

Bajo estas condiciones, la viscosidad elongacional varía a lo largo del filamento, aunque podrá observarse que permanece constante durante un amplio rango del mismo. Así, se observa que dicha viscosidad elongacional resulta mucho menor para los casos en que el fluido ha sido sometido a pre-corte.

#### 4. Fluido newtoniano.

Con el fin de evaluar el desempeño del aparato, se tomaron mediciones para un aceite Newtoniano (Mobil SAE-30) con una viscosidad al corte de 3.6 [poises]. Los resultados se muestran en la figura 1. Es importante notar la precisión de las mediciones tomadas, las cuales cumplen dentro de un estrecho porcentaje con la relación de Trouton, aún para un líquido de viscosidad tan baja. Es difícil encontrar mediciones de este tipo, especialmente para soluciones de viscosidad tan baja.

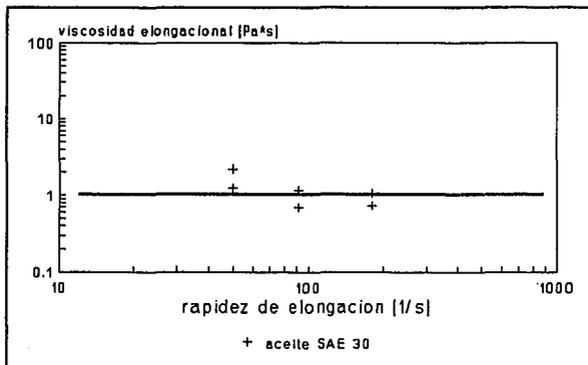


Fig. 2.6. Viscosidad elongacional vs. Rapidez de elongación (Aceite Newtoniano).

### 5. Solución Viscoelástica.

Se realizaron mediciones en una solución acuosa al 0.5% de poliacrilamida (Separan AP-30). Esta solución polimérica diluida ha sido estudiada anteriormente para un limitado rango de rapidezces de deformación y sus propiedades de deformación son bastante conocidas.

Las figuras 2 y 3 muestran el cambio en el diámetro del filamento como función de la distancia axial. En la figura 2 se presentan las mediciones reales, mientras que en la figura 3 el diámetro ha sido adimensionalizado con respecto a la diferencia de los diámetros en los orificios superior e inferior, así:

$$D^* = \frac{D}{D_1 - D_2}$$

Y la distancia axial se hizo adimensional con respecto a la separación entre ambos orificios:

$$L^* = \frac{L}{h}$$

El efecto del pre-corte que se le aplica a la muestra en el viscosímetro de Couette se manifiesta como un cambio en el diámetro del filamento.

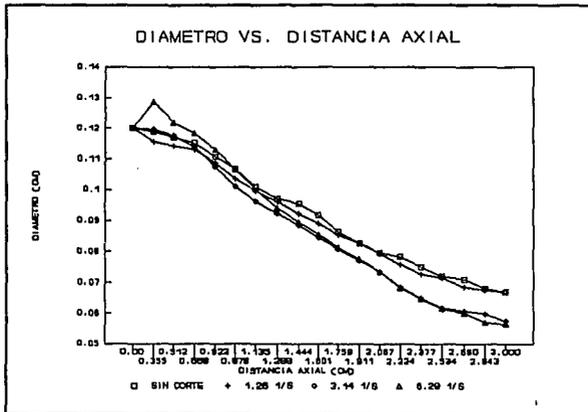


Fig. 2.7. Diámetro del filamento vs. distancia axial. OK

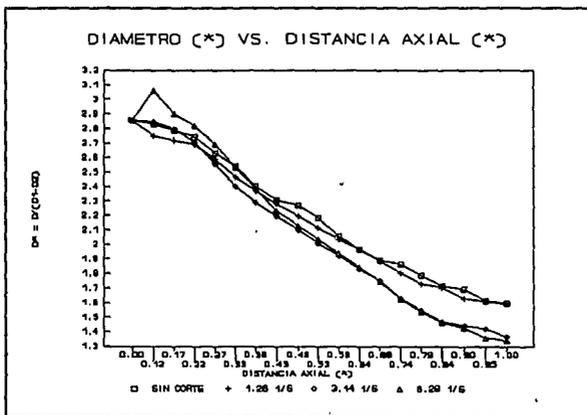


Fig. 2.8. Diámetro (\*) vs. Distancia axial (\*).

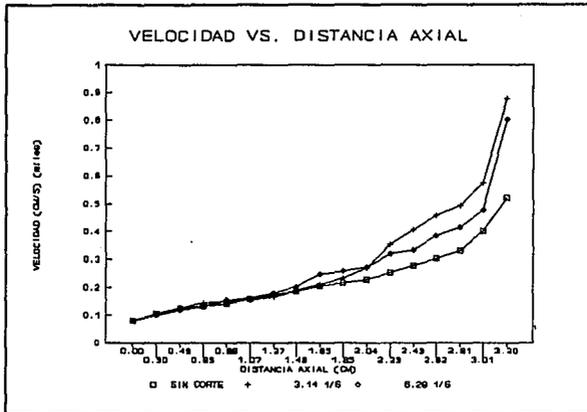


Fig. 2.9. Diámetro vs. distancia axial.

OK

Puede observarse que existen dos distintas regiones a lo largo del filamento en donde el cambio de diámetro es lo suficientemente "suave" de tal suerte que podemos considerar que la rapidez de elongación es constante. Esto es mostrado más adelante en la figura 5, donde la rapidez de elongación se calcula como una función de la distancia axial adimensional. Las dos distintas regiones de rapidez de elongación constantes antes mencionadas son claramente presentes.

Finalmente, la figura 6 muestra el efecto de la historia de pre-corte sobre el esfuerzo elongacional como una función de la rapidez de elongación. Esto es también mostrado por la figura 7 donde los valores de una viscosidad elongacional promedio vs. una rapidez de deformación promedio han sido graficados. Es también importante notar que con este aparato se pueden lograr valores elevados de rapidez de elongación, los cuales no se logran con los aparatos comerciales existentes.

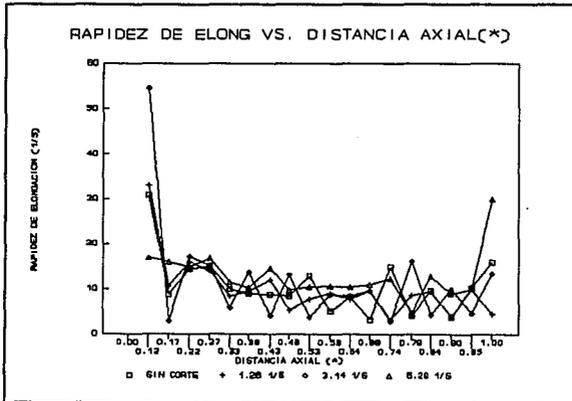


Fig. 2.10. Rapidez de elongación vs. Distancia axial (\*).

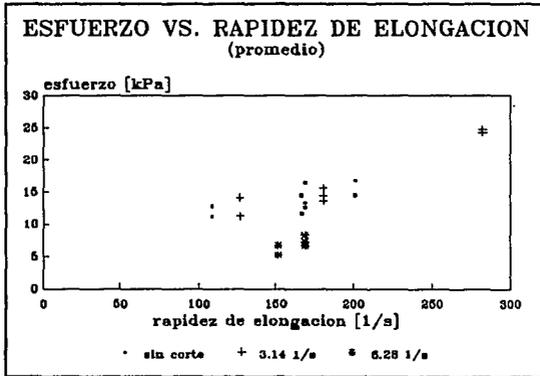
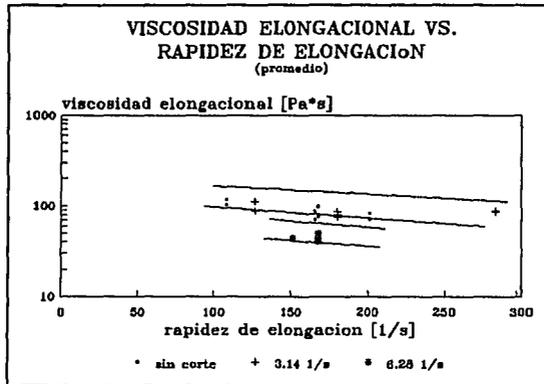


Fig.2.11. Esfuerzo promedio vs. Rapidez de elongación promedio.



OK **Fig. 2.12.** Gráfica de viscosidad elongacional promedio vs. rapidez de elongación promedio. Rango de valores  $\pm 15\%$ .

**VII. CONCLUSIONES.**

Se presentó el análisis experimental de un reómetro prototipo, los resultados obtenidos pueden resumirse de la siguiente forma:

- El flujo elongacional entre orificios alineados puede considerarse como un flujo con rapidez de elongación "constante", por lo menos en una sección que comprende casi la longitud total del filamento.

- La rapidez de deformación permanece constante a lo largo del filamento. El campo de flujo se aproxima a extensión uniaxial. Esto permite el cálculo de la viscosidad elongacional en cada punto del filamento.

- El efecto de la aplicación de un esfuerzo cortante simple modifica las propiedades elongacionales del fluido de la siguiente manera:

- Aumento del esfuerzo extensional.
- Aumento en los valores de viscosidad elongacional.

Adicionalmente, se continuará el proyecto bajo los siguientes objetivos:

- Una vez comprobada teórica y experimentalmente la validez de los resultados obtenidos, se elaborará la patente de fabricación del aparato.

- Se realizará la presentación final de resultados en foros y publicaciones en revistas internacionales.

- Analizar numéricamente por medio de soluciones basadas en elementos finitos, diferencias finitas y programas de flujo, la geometría de flujo elongacional entre orificios alineados (utilizada en nuestro sistema de medición) con objeto predecir y cuantificar resultados experimentales de medición simultánea de propiedades al corte y a la elongación.

- Establecer (en todo lo posible) relaciones constitutivas válidas para reometría al corte y reometría elongacional para una variedad de materiales poliméricos de aplicación industrial.

- Realizar experimentos y explorar la posibilidad de emplear la geometría entre orificios para materiales compuestos y con fibras.

VIII. REFERENCIAS.

- [1] Agraval P. K., Lee W. K., Lorntson J.M., Richardson C. I., Wissbrun K. F., Metzner A. B., *Trans. Soc. Rheol.* 1976, pp 21, 355.
- [2] Cogswell. *Plast. and Polym.* 1968, pp 36, 109.
- [3] Collyer, A. A., & Clegg, D.W., *Rheological Measurement.* Elsevier Applied Science, U.K., 1988.
- [4] Everage A. E., Ballman R. L., *J. Appl. Polym. Sci.* 1976, pp 20, 1137.
- [5] Flinn, Richard A., Trojan, Paul K. *Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones.* Mc. Graw Hill, México, 1980, pp 139-142, 148, 204-207.
- [6] R. K. Gupta and T. Sridhar. *Elongational Rheometers in Rheological Measurement.* A. A. Collyer and D. W. Clegg (Eds.), Elsevier Applied Sci., London, 1988.
- [7] Ide Y., White, J. L., *J. Appl. Polym. Sci.* 1978, pp 22, 1061.
- [8] B. Mena. *Third European Rheology Conference.* Ed. D. R. Oliver, Elsevier App. Sci., 1990.
- [9] Meissner, *J. Rheol. Acta.* 1969, pp 8, 78.

- [10] Metzner, A. B. *Rheol. Acta.* 1971, pp 10, 434.
- [11] Munstedt, H. *Rheol. Acta.* 1975, pp 14, 1077.
- [12] Munstedt, H. J. *Rheol.*, 1978, pp 23, 421.
- [13] Nitschmann H., Schrade J. *Helv. Chem. Acta.* 1948, pp 31, 297.
- [14] C. J. Petrie. *Elongational Flows.* Pitman, 1979.
- [15] Rhi-Sausi y Dealy J. M. *Polym. Eng. Sci.* 1976, pp 16, 799.
- [16] Shigley J. E., Mitchell, I. D. *Diseño en Ingeniería Mecánica.* McGraw-Hill, tercera edición en Español, México, 1989, pp 859-862.
- [17] Spearot J. A., Metzner A. B. *Trans. Soc. Rheol.* 1972, pp 16, 495.
- [18] Vinogradov, G. V., Radushkevich, B. V., Fikhman V.D. *J. Polym. Sci. (A2)*, 1970, pp 8, 1.
- [19] Vinogradov G. V., Fikhman V. D., Radushkevich B. V., *Rheol. Acta.* 1972, pp 11, 286.
- [20] Walters, K., *Rheometry.* Chapman & Hall Ltd, First Published, U.K., 1975.

**IX. BIBLIOGRAFÍA.**

Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K. **An introduction to rheology.** Elsevier science publishers, Rheology Series, 3 U.K., 1989.

Coleman, Markovitz, Noll. **Viscometric Flows of Non-Newtonian Fluids.** Springer-Verlag, New York, 1966.

Connelly R. W., Garfield L. G., Pearson G. H. **J. Rheol.** 1979, pp 23, 651.

Dealy, J. M. **Polymer Eng. & Sci.** 1971, pp 11, 433.

Dealy, J. M. **J. Non-Newt. Fluid Mech.** 1978, pp 4, 9.

Davis, J. M. & Walters, K. **Rheology of Lubricants.** Applied Sci., Publishers, 1973, pp 65.

Denson, C. D. & Crady, D. L. **J. Applied Polymer Sci.** 1974, pp 18, 1611.

Eng. report No. 123, University of Tennessee, Knoxville, 1978.

Hollman, Jack P. **Métodos Experimentales para Ingenieros.** Mc. Graw Hill, segunda edición en español, México, 1986.

Joye, D. D., Poehlein, G. W. & Denson, C. D. **Trans. Soc. Rheol.** 1973, pp 17, 287.

- Khagram M., Gupta R.K., Sridhar T. J. *Rheol.* 1985, pp 29, 191.
- O. Manero and B. Mena. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1981, pp 9, 379-387.
- Macosko, C. W., Lorntson J. M., *Soc. Plast. Eng. Tech. Pap.* 1973, pp 19, 461.
- Matovich M. A., Pearson J. R. A. *Ind. Eng. Chem. Fund.* 1969, pp 8, 512.
- Meissner, J. *Rheol. Acta.* 1972, pp 8, 78.
- Meissner, J. *Trans. Soc. Rheol.* 1972, pp 16, 405.
- Metzner, A. P. & Metzner, A. B. *Rheol. Acta.* 1970, pp 9, 174.
- Omega Engineering, Inc. *The Omega Complete Pressure Measurement Handbook and Encyclopedia*, EEUU, 1988.
- Phan-Thien, N., Caswell B. *J. Non-Newt. Fluid Mech.* 1986, pp 21, 225.
- Raker D., Rice H. *Inside Autocad*, New Riders Publishing, EEUU, 1990.
- Schowalter, William R. *Mechanics of non-newtonian fluids*. Pergamon press, First edition, USA, 1978.
- Shigley. *Análisis Cinemático de Mecanismos*. McGraw-Hill, México, 1970.

Shigley, J. E., Mischke C. **Diseño en Ingeniería Mecánica.**  
McGraw-Hill, cuarta edición en español, México, 1990.

Tanner, R. I. **Trans. Soc. Rheol.** 1968, pp 12, 155.

Ting, R. Y. J. **Applied Polymer Science.** 1972, pp 16, 3169.

**APÉNDICE 1. Tolerancias de ensamble [16].**

Los límites indicados en las tablas que siguen están en milésimas de pulgada. Los intervalos de tamaños comprenden todos los tamaños *superiores* al menor de cada intervalo, hasta, e *inclusive* el mayor del mismo. Los símbolos literales se definen como sigue:

**RC, Ajustes para deslizamiento y rotación.**

Estos ajustes tienen por objeto proporcionar funcionamiento semejante en el caso de rotación, con un margen por lubricación adecuado para todo el intervalo de tamaños. La holgura de las dos primeras clases, que se emplean principalmente como ajustes de deslizamiento, aumentan más despacio con el diámetro que las otras clases, de modo que se mantiene la localización exacta, aún a expensas del movimiento libre relativo.

**RC1, Ajuste de deslizamiento estrecho.**

Tiene por finalidad la localización exacta de piezas que deben ajustarse sin que haya juego perceptible.

**RC2, Ajuste de deslizamiento.**

También se emplea para localización exacta, pero tiene una mayor holgura máxima que el de clase RC1. Las piezas con este ajuste pueden moverse con facilidad, pero no están destinadas a girar libremente; en caso de tamaños grandes puede ocurrir trabamiento o agarre con pequeños cambios de temperatura.

**RC3, Ajuste de rotación de precisión.**

Es el ajuste más estrecho que puede tenerse para movimiento libre; se usa en trabajos de precisión, donde hay baja velocidad y precisión ligera entre muñón y cojinete, pero no es adecuado cuando es probable que se tengan diferencias de temperatura apreciables.

**RC4, Ajuste de rotación estrecho.**

Se emplea principalmente como ajuste de rotación en el caso de elementos de máquinas que han de funcionar con exactitud, y velocidades en la superficie y presiones de muñón de tipo moderado, y donde se desea localización exacta y juego mínimo.

**RC5-RC6, Ajustes de rotación medianos.**

Se usan en casos de alta velocidad de rotación o fuerte presión de muñón, o ambas condiciones.

**RC7, Ajustes de rotación libre.** Propio para los casos donde la exactitud no es esencial o son probables grandes variaciones de temperatura, o existen las dos condiciones.

**RC8-RC9, Ajustes de rotación flojos.**

Se destinan a los casos en que pueden necesitarse amplias tolerancias comerciales y margen (o discrepancia) en el elemento exterior.

**L, Ajustes de localización.**

Son para determinar únicamente la ubicación de piezas embonantes; pueden proporcionar localización rígida o exacta, como los ajustes de interferencia, o permitir libertad de localización, como los ajustes con holgura, de transición y con interferencia.

**LC, Ajustes de localización con holgura.**

Se emplean en piezas que normalmente son fijas pero que se pueden ensamblar o desensamblar libremente. Varían desde los ajustes apretados, para piezas que requieren exactitud de localización, pasando por los ajustes con holgura mediana que se utilizan en piezas como bolas, pistas y alojamiento de cojinetes, hasta los ajustes flojos para sujeción donde el ensamble fácil o libre es de primera importancia.

**LT, Ajustes de localización de transición.** Son un arreglo o transición entre los ajustes con holgura y los ajustes con interferencia.

**LN, Ajustes de localización con interferencia.**

Se utilizan donde la exactitud de localización es de primordial importancia, y en piezas en que se requiere rigidez y alineamiento sin requisitos especiales de presión interior. Tales ajustes no se destinan a piezas diseñadas para transmitir cargas de fricción de una pieza a otra por virtud del apriete en el ajuste, puesto que estas condiciones las cumplen los ajustes forzados.

**FN, Ajustes forzados y por contracción.**

Los ajustes con forzamiento y por contracción constituyen un tipo especial de ajuste con intrerferencia, caracterizando normalmente por mantener una presión constante de contacto o interior en todo el intervalo de tamaños. Por lo tanto, la interferencia varía casi en razón directa con el diámetro, y la diferencia entre su valor mínimo y su valor máximo es tan pequeña que en las presiones resultantes se conservan dentro de límites razonables.

**FN1, Ajuste de impulsión ligero.**

Es el que se requiere para bajas presiones de ensamble y en el caso de montajes más o menos permanentes. Es adecuado en el caso de

secciones delgadas o de gran longitud, o en elementos externos de hierro fundido.

**FN2, Ajuste de impulsión mediano.**

Sirve para piezas de acero ordinarias o para ajustes por contracción de secciones ligeras. Es el tipo con mayor apriete que puede emplearse en el caso de elementos externos de hierro fundido de alto grado.

**FN3, Ajuste de impulsión fuerte.**

Es propio para piezas de acero pesadas o para ajustes por contracción en secciones medianas.

**FN4-FN5.** Estos ajustes muy forzados, se utilizan en piezas en las que se presentarán esfuerzos de alta intensidad, o bien para ajustes por contracción donde las altas fuerzas de presión requeridas son imprácticas.

Intervalos de tamaños							
Clase		0-0.12		0.12-0.24		0.24-0.40	
RC1	Aguj.	+0.20	-0.00	+0.20	-0.00	+0.25	-0.00
	Eje	+0.10	-0.25	-0.15	-0.30	-0.20	-0.35
RC2	Aguj.	+0.25	-0.00	+0.30	-0.00	+0.40	-0.00
	Eje	-0.10	-0.30	-0.15	-0.35	-0.20	-0.45
RC3	Aguj.	+0.40	-0.00	+0.50	-0.00	+0.60 <sup>1</sup>	-0.00 <sup>1</sup>
	Eje	-0.30	-0.55	-0.40	-0.70	-0.50 <sup>1</sup>	-0.90 <sup>1</sup>
RC4	Aguj.	+0.60	-0.00	+0.70	-0.00	+0.90	-0.00
	Eje	-0.30	-0.70	-0.40	-0.90	-0.50	-1.10
RC5	Aguj.	+0.60	-0.00	+0.70	-0.00	+0.90	-0.00
	Eje	-0.60	-1.00	-0.80	-1.30	-1.00	-1.60
RC6	Aguj.	+1.00	-0.00	+1.20	-0.00	+1.40	-0.00
	Eje	-0.60	-1.20	-0.80	-1.50	-1.00	-1.90
RC7	Aguj.	+1.00	-0.00	+1.20	-0.00	+1.40	-0.00
	Eje	-1.00	-1.60	-1.20	-1.90	-1.60	-2.50
RC8	Aguj.	+1.60	-0.00	+1.80	-0.00	+2.20	-0.00
	Eje	-2.50	-3.50	-2.80	-4.00	-3.00	-4.40
RC9	Aguj.	+2.50 <sup>2</sup>	-0.00 <sup>2</sup>	+3.00	-0.00	+3.50	-0.00
	Eje	-4.00 <sup>2</sup>	-5.60 <sup>2</sup>	-4.50	-6.00	-5.00	-7.20

TABLA 1. Tolerancias del tipo RC.

Intervalos de tamaños							
Clase		0.40-0.71		0.71-1.19		1.19-1.97	
RC1	Aguj.	+0.30	-0.00	+0.40	-0.00	+0.40	-0.00
	Eje	-0.25	-0.45	-0.30	-0.55	-0.40	-0.70
RC2	Aguj.	+0.40	-0.00	+0.50	-0.00	+0.60	-0.00
	Eje	-0.25	-0.55	-0.30	-0.70	-0.40	-0.80
RC3	Aguj.	+0.70	-0.00	+0.80	-0.00	+1.00	-0.00
	Eje	-0.60	-1.00	-0.80	-1.30	-1.00	-1.60
RC4	Aguj.	+1.00	-0.00	+1.20	-0.00	+1.60	-0.00
	Eje	-0.60	-1.30	-0.80	-1.60	-1.00	-2.00
RC5	Aguj.	+1.00	-0.00	+1.20	-0.00	+1.60	-0.00
	Eje	-1.20	-1.90	-1.60	-2.40	-2.00	-3.00
RC6	Aguj.	+1.60	-0.00	+2.00	-0.00	+2.50	-0.00
	Eje	-1.20	-2.20	-1.60	-2.80	-2.00	-3.60
RC7	Aguj.	+1.60	-0.00	+2.00	-0.00	+2.50	-0.00
	Eje	-2.00	-3.00	-2.50	-3.70	-3.00	-4.60
RC8	Aguj.	+2.80	-0.00	+3.50	-0.00	+4.00	-0.00
	Eje	-3.50	-5.10	-4.50	-6.50	-5.00	-7.50
RC9	Aguj.	+4.00	-0.00	+5.00	-0.00	+6.00	-0.00
	Eje	-6.00	-8.80	-7.00	-10.50	-8.00	-12.0

TABLA 1. Tolerancias del tipo RC, continuación.

Intervalos de tamaños							
Clase		1.19-1.97		1.97-3.15		3.15-4.73	
LC1	Aguj.	+0.60 <sup>3</sup>	-0.00 <sup>3</sup>	+0.70	-0.00	+0.90	-0.00
	Eje	+0.00 <sup>3</sup>	-0.40 <sup>3</sup>	+0.00	-0.50	+0.00	-0.60
LC2	Aguj.	+1.00	-0.00	+1.20	-0.00	+1.40	-0.00
	Eje	+0.00	-0.70	+0.00	-0.90	+0.00	-1.00
LC3	Aguj.	+1.60	-0.00	+1.80	-0.00	+2.20	-0.00
	Eje	+0.00	-1.00	+0.00	-1.20	+0.00	-1.40
LC4	Aguj.	+4.00	-0.00	+4.50	-0.00	+5.00	-0.00
	Eje	+0.00	-2.50	+0.00	-3.00	+0.00	-3.50
LC5	Aguj.	+1.00	-0.00	+1.20	-0.00	+1.40	-0.00
	Eje	-0.40	-1.00	-0.40	-1.10	-0.50	-1.40
LC6	Aguj.	+2.50	-0.00	+3.00	-0.00	+3.50	-0.00
	Eje	-1.00	-2.60	-1.20	-3.00	-1.40	-3.60
LC7	Aguj.	+4.00	-0.00	+4.50	-0.00	+5.00	-0.00
	Eje	-2.00	-4.50	-2.50	-5.50	-3.00	-6.50
LC8	Aguj.	+4.00	-0.00	+4.50	-0.00	+5.00	-0.00
	Eje	-3.00	-5.50	-4.00	-7.00	-5.00	-8.50
LC9	Aguj.	+6.00	-0.00	+7.00	-0.00	+9.00	-0.00
	Eje	-5.00	-9.00	-6.00	-10.50	-7.00	-12.0
LC10	Aguj.	+10.00	-0.00	+12.00	-0.00	+14.00	-0.00
	Eje	-8.00	-18.00	-10.00	-22.00	-11.00	-25.0
LC11	Aguj.	+16.00	-0.00	+18.00	-0.00	+22.00	-0.00
	Eje	-12.00	-28.00	-14.00	-32.00	-16.00	-38.0

TABLA 2. Tolerancias del tipo LC.

Intervalos de tamaños							
Clase		0-0.12		0.12-0.24		0.24-0.40	
LN1	Aguj.	+0.25 <sup>d</sup>	-0.00 <sup>d</sup>	+0.30	-0.00	+0.40	-0.00
	Eje	+0.45 <sup>d</sup>	+0.25 <sup>d</sup>	+0.50	+0.30	+0.65	+0.40
LN2	Aguj.	+0.40	-0.00	+0.50	-0.00	+0.60	-0.00
	Eje	+0.65	+0.40	+0.80	+0.50	+1.00	+0.60
LN3	Aguj.	+0.40	-0.00	+0.50	-0.00	+0.60	-0.00
	Eje	+0.75	+0.50	+0.90	+0.60	+1.20	+0.80

TABLA 3. Tolerancias del tipo LN.

NOTAS:

- 1.- Tolerancia para el ajuste de rotación de precisión de la flecha del cilindro interior con la chumacera de la tapa superior.
- 2.- Tolerancia para el ajuste de rotación flojo del acoplamiento con el perno de acoplamiento.
- 3.- Tolerancia para el ensamble libre con holgura del cilindro exterior con las tapas superior e inferior.
- 4.- Tolerancia para el ensamble con interferencia de la flecha del cilindro interior con el perno de acoplamiento.

**APÉNDICE 2. Propiedades típicas de los aceros inoxidables.**

Número	Análisis químico porcentaje	Condición	Resistencia a la tracción, lb/pulg x 10 <sup>3</sup>	Resistencia a la fluencia, lb/pulg x 10 <sup>3</sup>	Alargamiento (%)	BHN	Uso típico
<b>Aceros austeníticos</b>							
301	17 Cr, 7 Ni	Recocido	110	40	60	160	Equipo de transporte liviano
		Trab. en frío	185	140	9	388	
304	19 Cr, 10 Ni	Recocido	85	35	60	149	Equipo químico en general
		Trab. en frío	110	75	12	240	
347	18 Cr, 11 Ni	Recocido	90	35	45	160	Construcción soldada
<b>Aceros ferríticos</b>							
430	16 Cr, <0.1 C	Recocido	80	55	25	140	Molds. de autos, equipo de cocina
		Trab. en frío	90	80	20	200	
<b>Aceros martensíticos</b>							
410	12 Cr, 0.15 C	Recocido	70	40	30	155	Resortes, de uso en general
		Trab. en frío	140	100	20	300	
440C	17 Cr, 1 C	Recocido	110	65	14	230	Instrumentos, cuchillería, válvulas
		Templ. y rev.	285	275	2	580	
<b>Aceros endurecidos por precipitación</b>							
17-7PH	17 Cr, 7 Ni, 1 Al	Endurecido	235	220	6	400	Els. de cuerpos de aviones
<b>Aceros martensíticos envejecidos</b>							
Acero martensít.	18 Ni, 7 Co	Martensítico envejecido	275	268	11	500	Componentes de aviones

APÉNDICE 3. Propiedades típicas de aleaciones de aluminio.

Tabla 1. Propiedades de aleaciones de aluminio.

Alea- ción núme- ro	Análi- sis químico (%)	Condi- ción	Resisten- cia a la tracción lb/pulg <sup>2</sup> x 10 <sup>3</sup>	Resisten- cia a la fluencia lb/pulg <sup>2</sup> x 10 <sup>3</sup>	Alarga- miento (%)	BHN	Uso típico
Aleaciones para forja de una fase							
1060	99.6 Al mínimo	0	10	4	42	19	Lámina, platina, tubería
		Dura H18	19	18	6	35	
3003	1.2 Mn	0	16	6	30	28	Páneles para camión, ductos
		Dura H18	29	27	4	55	
5052	2.5 Mg, 0.2 Cr	0	28	13	25	47	Carroce- rías de bus, aplica- ciones marinas
		Dura H38	42	37	7	77	
5050	1.2 Mg	0	21	8	24	36	Lámina, guarni- ciones, tubería de gas
		Dura H38	32	29	6	63	

**APÉNDICE 4. Dibujos de ensamble y planos de fabricación.**

A continuación se detalla una lista de los croquis de ensamble y planos de fabricación incluidos en este apéndice.

- Plano general, corte longitudinal.
- Plano general, dibujo en explosión.
- Plano de fabricación, cilindro interior.
- Plano de fabricación, cilindro exterior.
- Plano de detalles, cilindro exterior.
- Plano de fabricación, soporte.
- Plano de fabricación, tapa superior.
- Plano de detalles, tapa superior.
- Plano de fabricación, tapa inferior.
- Plano de fabricación, orificio de succión.
- Plano de fabricación, acoplamiento.
- Plano de fabricación, perno de acoplamiento.
- Plano de fabricación, separador.
- Plano de fabricación, perno.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACION EN MATERIALES



PROYECTO: VISCOSIMETRO  
ELOGACIONAL  
PLANO GENERAL  
CORTE LONGITUDINAL

ACOTACIONES: cm

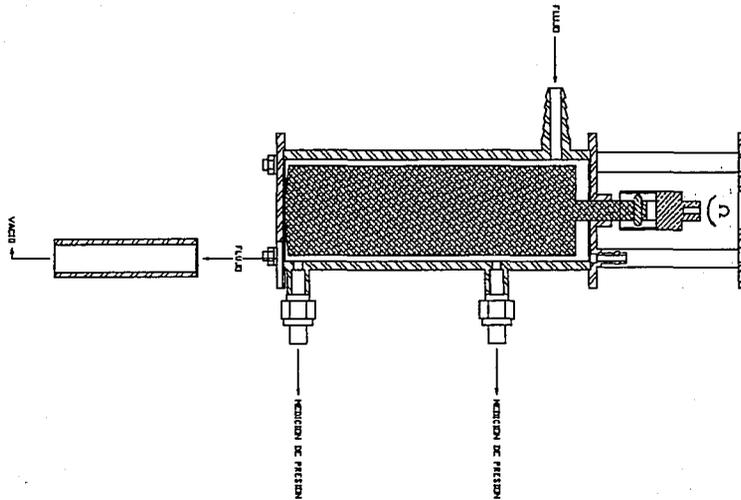
MATS. DIVERSOS

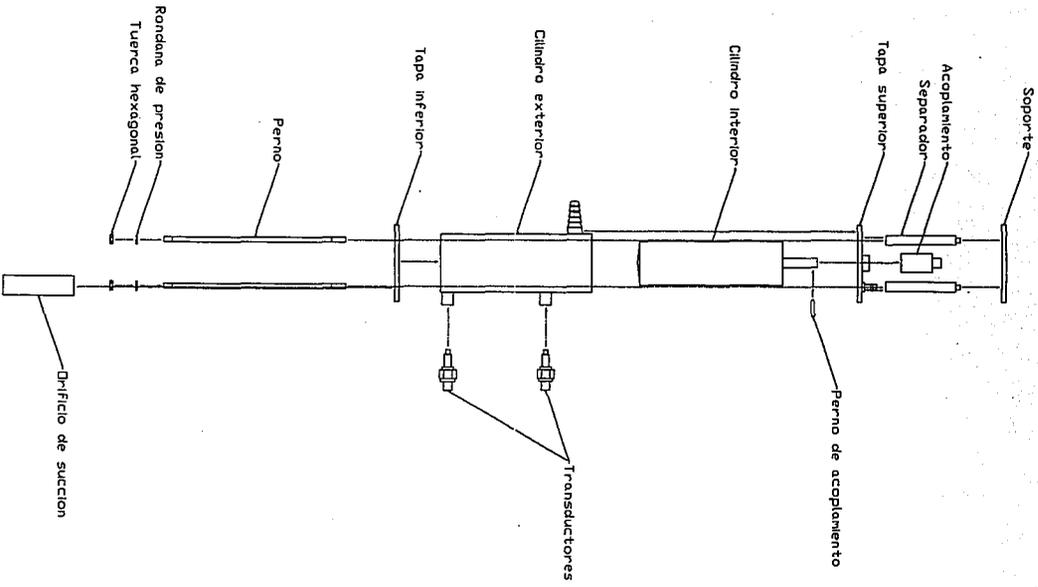
FECHA: 24-11-92

REVISION: -

COORD.: B. MENA

DIS.: A. VON ZIEGLER



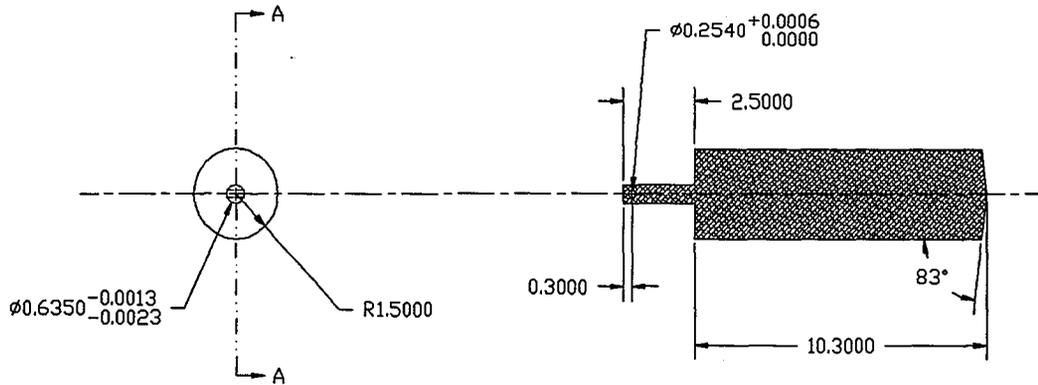
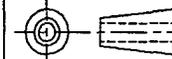


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
INSTITUTO DE INVESTIGACION EN MATERIALES	
PROYECTO: VISCOMETRO	
PLANO	
PIEZA	
MATERIAL	
FECHA	
REV	
COORD. B. MENA	
DISE. A. VON ZIEGLER	

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

PROYECTO: VISCOSIMETRO  
ELONGACIONAL  
PLANO DE FABRICACION  
CILINDRO INTERIOR

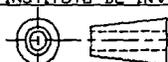
ACOTACIONES: cm MATERIAL: ALUMINIO  
FECHA: 24-07-92 REVISION: II  
COORD.: B. MENA DIS.: A. VON ZIEGLER



Corte A-A

R no acot. = 0.01 cm.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES



PROYECTO: VISCOSIMETRO  
ELONGACIONAL  
PLANO DE FABRICACION  
CILINDRO EXTERIOR

ACOTACIONES: cm    MAT.: AC. INOX. AISI 416  
FECHA: 28-07-92    REVISION: I  
COORD.: B. MENA    DIS.: A. VON ZIEGLER

Union soldada

R1.7000

Union soldada

$\phi 4.0000$   $\begin{matrix} 0.0000 \\ -0.0010 \end{matrix}$

1.2000

9.6000

Detalle "A"

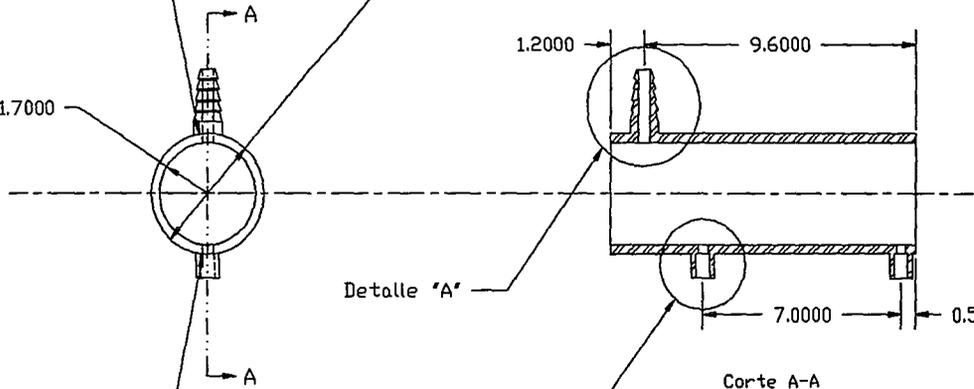
Detalle "B"

Corte A-A

7.0000

0.5088

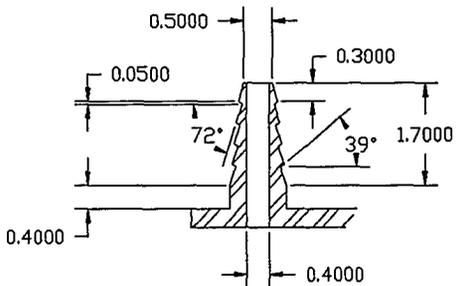
R no acot. = 0.01 cm.



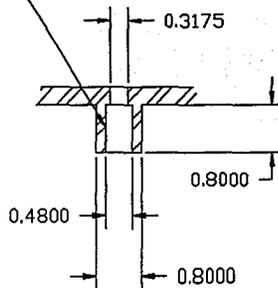


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES	
	PROYECTO: VISCOSIMETRO ELONGACIONAL
	PLANO DE DETALLES CILINDRO EXTERIOR
ACOTACIONES: cm	MAT.: AC. INOX. AISI 416
FECHA: 28-07-92	REVISIÓN: I
COORD.: B. MENA	DIS.: A. VON ZIEGLER

Cuerda fina segun muestra (transductor)

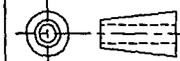


Detalle "A"



Detalle "B"

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES



PROYECTO: VISCOSIMETRO  
ELONGACIONAL  
PLANO DE FABRICACION  
SOPORTE

ACOTACIONES: cm

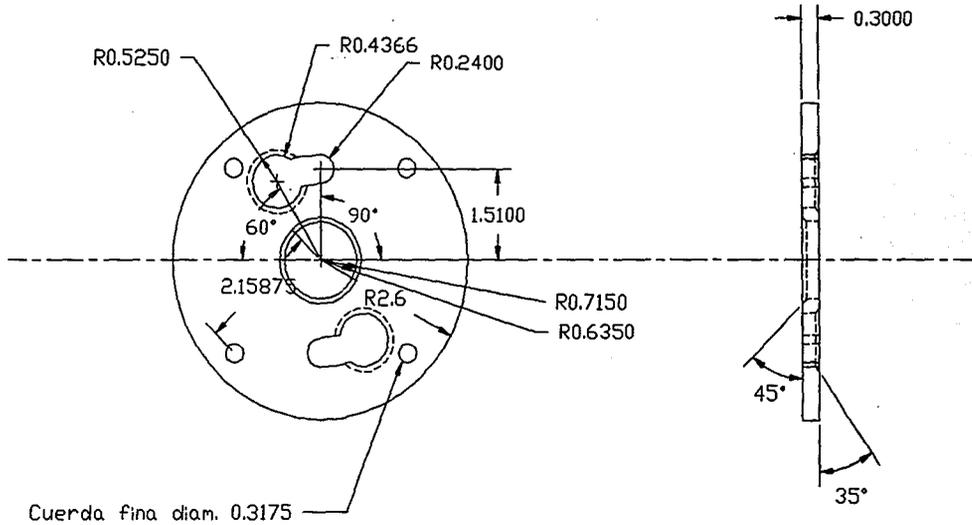
MAT.: AC. INOX. AISI 416

FECHA: 02-06-92

REVISION: II

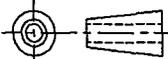
COORD.: B. MENA

DIS.: A. VON ZIEGLER



Cuerda fina diam. 0.3175

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACION EN MATERIALES



PROYECTO: VISCOSIMETRO  
FLONGACIONAL

PLANO DE FABRICACION  
TAPA SUPERIOR

ACOTACIONES: cm

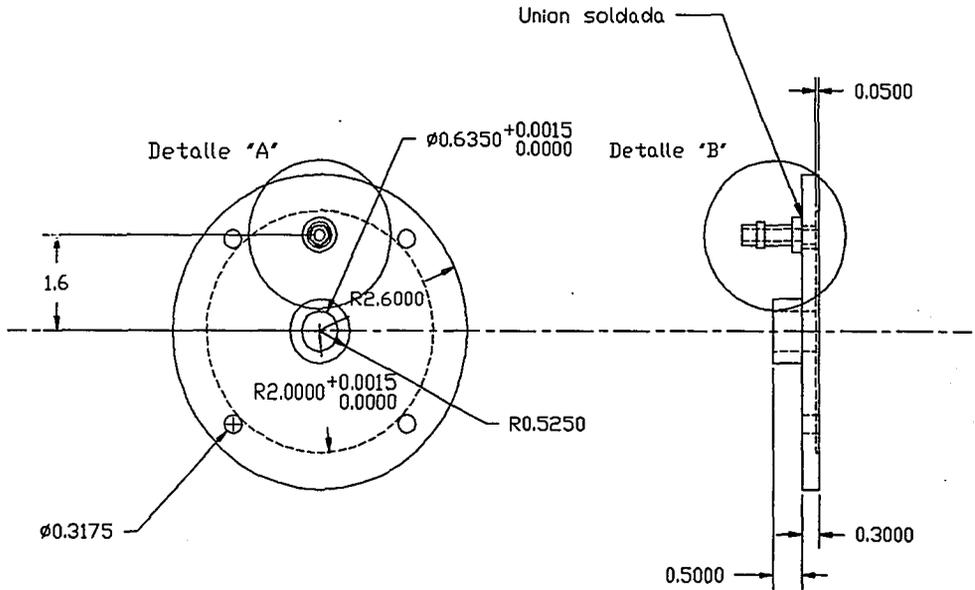
MAT.: AC. INOX. AISI 416

FECHA: 22-04-92

REVISION: II

COORD.: B. MENA

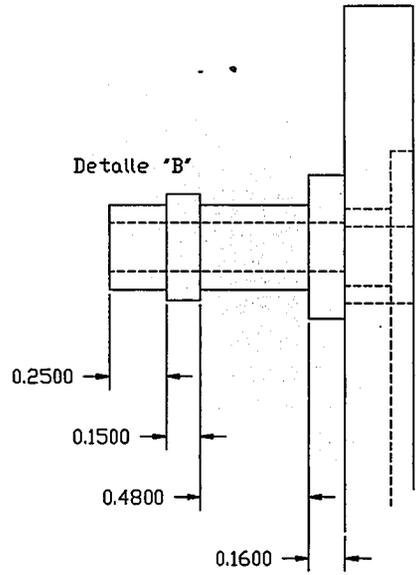
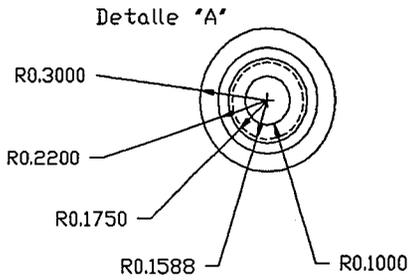
DIS.: A. VON ZIEGLER



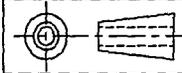
R no acot. = 0.01 cm.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES	
	
PROYECTO: VISCOSIMETRO ELONGACIONAL	
PLANO DE DETALLES TAPA SUPERIOR	
ACOTACIONES: cm	MAT.: AC. INOX. AISI 416
FECHA: 22-04-92	REVISION: II
COORD.: B. MENA	DJS.: A. VON ZIEGLER

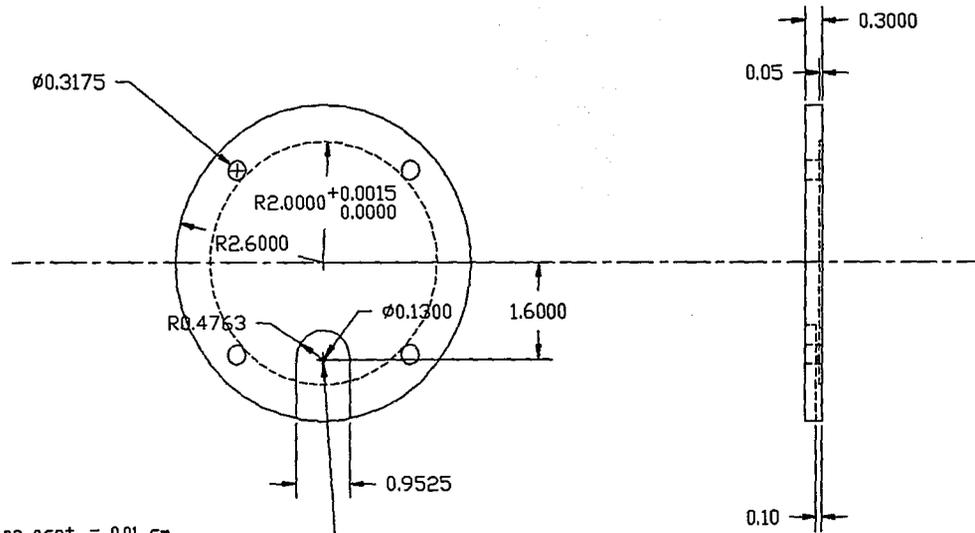


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES



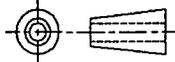
PROYECTO: VISCOSIMETRO  
 ELONGACIONAL  
 PLANO DE FABRICACION  
 TAPA INFERIOR

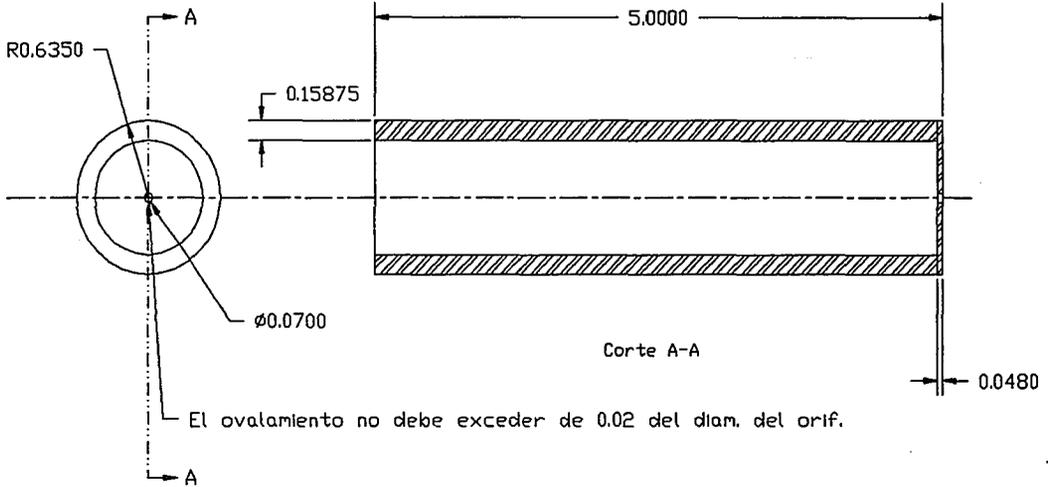
ACOTACIONES: cm      MAT.: AC. INOX. AISI 416  
 FECHA: 22-04-92      REVISION: II  
 COORD.: B. MENA      DIS.: A. VON ZIEGLER



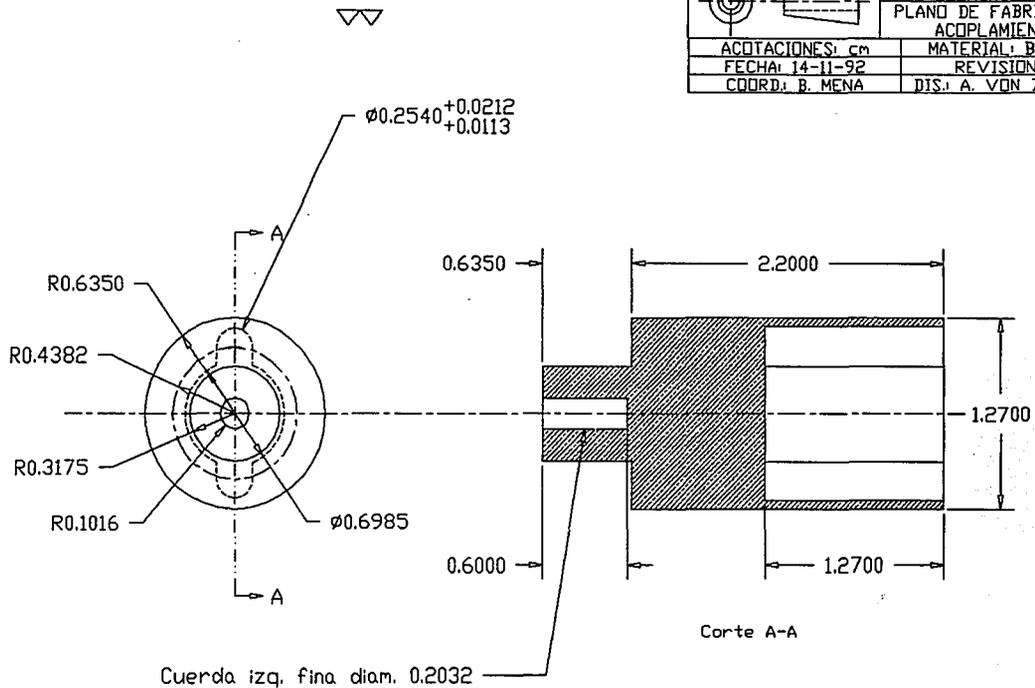
R no acot. = 0.01 cm.

El ovalamiento no debe exceder de 0.02 del diam. del orif.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
INSTITUTO DE INVESTIGACION EN MATERIALES	
	PROYECTO: VISCOSIMETRO ELONGACIONAL
	PLANO DE FABRICACION ORIFICIO DE SUCCION
ACOTACIONES: cm	MAT.: AC. INOX. AISI 416
FECHA: 08-12-92	REVISION: I
COORD.: B. MENA	DIS.: A. VON ZIEGLER

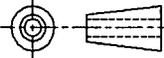


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
INSTITUTO DE INVESTIGACION EN MATERIALES	
PROYECTO: VISCOSIMETRO	
ELONGACIONAL	
PLANO DE FABRICACION	
ACOPLEMIENTO	
ACOTACIONES: cm	MATERIAL: BRONCE
FECHA: 14-11-92	REVISION: -
COORD: B. MENA	DIS: A. VON ZIEGLER



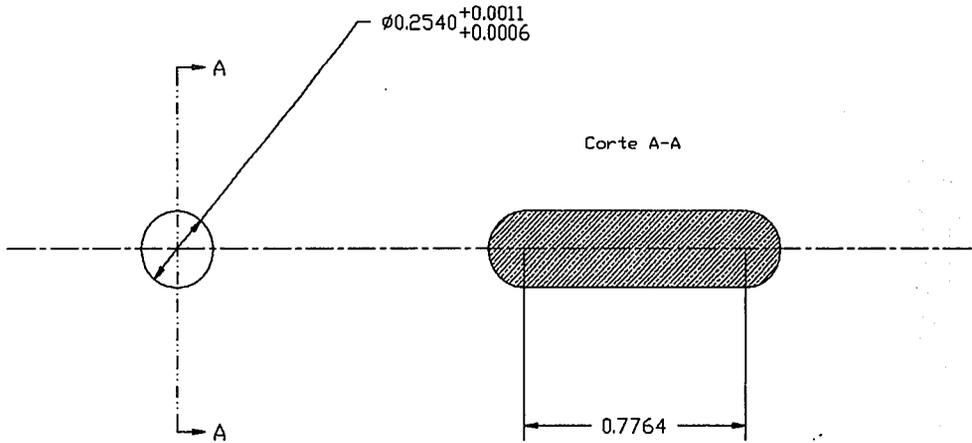
R no acot. = 0.01 cm.

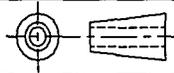
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACION EN MATERIALES

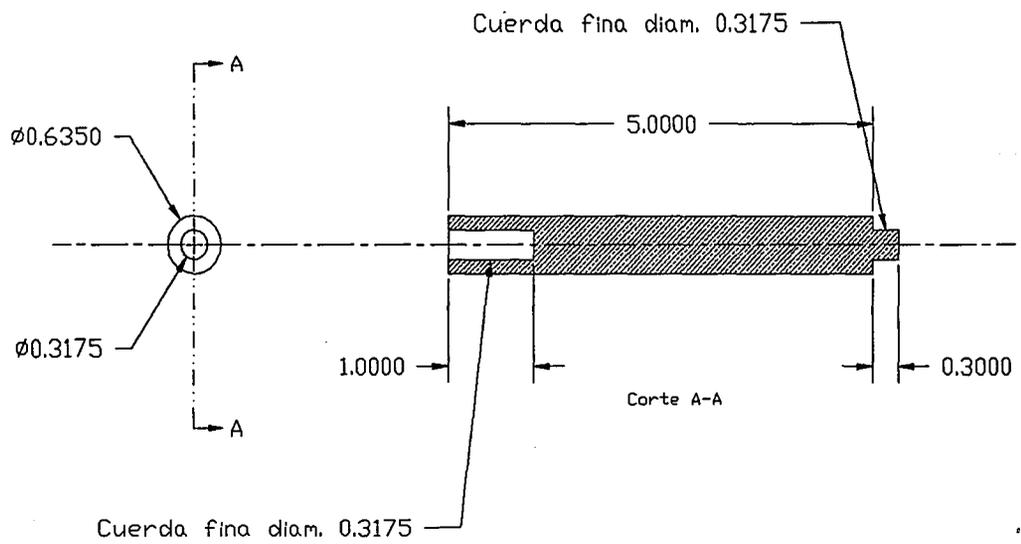


PROYECTO: VISCOSIMETRO  
ELONGACIONAL  
PLANO DE FABRICACION  
PERNO DE ACOPLAM.

ACOTACIONES: cm	MATERIAL: BRONCE
FECHA: 14-11-92	REVISION: -
COORD: B. MENA	DIS: A. VON ZIEGLER

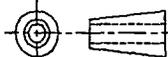


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES	
	PROYECTO: VISCOSIMETRO
	ELONGACIONAL
PLANO DE FABRICACION	
SEPARADOR	
ACOTACIONES: cm	MATERIAL: BRONCE
FECHA: 25-09-92	REVISION: -
COORD.: B. MENA	DIS.: A. VON ZIEGLER



Nota: fabricar 4 piezas.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACION EN MATERIALES



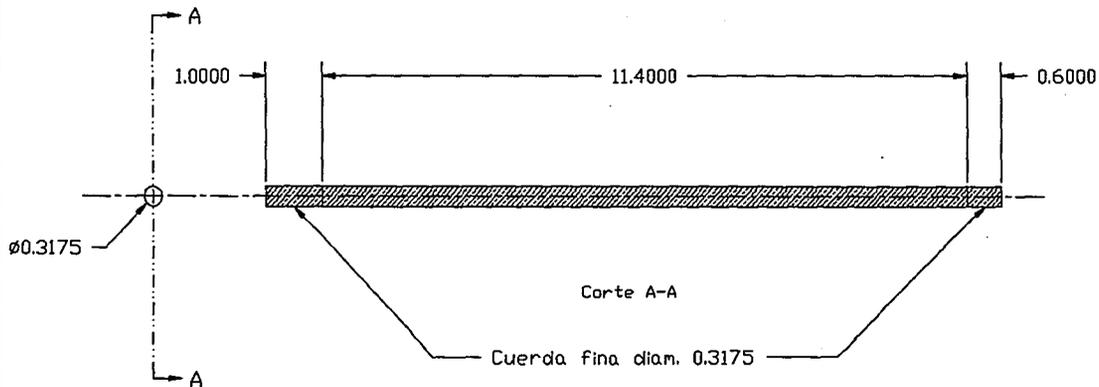
PROYECTO: VISCOSIMETRO  
ELONGACIONAL  
PLANO DE FABRICACION  
PERNO

ACOTACIONES: cm  
22-10-92

MATERIAL: BRONCE  
REVISION: -

COORD.: B. MENA

DIS.: A. VON ZIEGLER



Nota: fabricar 4 piezas.

**APÉNDICE 5. Tablas de datos y resultados.**

A continuación se detalla una lista de las tablas de datos y resultados incluidos en este apéndice.

- Tabla 1. Datos y resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 40$  ml/s.
- Tabla 2. Datos y resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 60$  ml/s.
- Tabla 3. Datos y resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 80$  ml/s.
- Tabla 4. Datos y resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 100$  ml/s.
- Tabla 5. Datos y resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 40$  ml/s, obteniendo un promedio de la rapidez de elongación sin tomar en cuenta el primero y el último dato.
- Tabla 6. Datos y resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 60$  ml/s, obteniendo un promedio de la rapidez de elongación sin tomar en cuenta el primero y el último dato.
- Tabla 7. Datos y resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 80$  ml/s, obteniendo un promedio de la rapidez de elongación sin tomar en cuenta el primero y el último dato.

- Tabla 8. Datos y resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 100$  ml/s, obteniendo un promedio de la rapidez de elongación sin tomar en cuenta el primero y el último dato.

## VISCOSIMETRO ELONGACIONAL I

**FECHA**    **SUCCIÓN**    **SEPAR.**    **GASTO**    **V. ANG.**  
**30-IV-83**    **52 CM HG**    **3 CM**    **0,67 ML/S**    **8 RPM**

Y (MM)	0,00	3,55	5,12	6,68	8,22	9,78	11,35	12,88	14,44	16,01	17,58	19,11	20,67	22,24	23,77	25,34	26,90	28,43	30,00
X (CM)	0,00	0,30	0,51	0,67	0,82	0,96	1,13	1,29	1,44	1,60	1,76	1,91	2,07	2,22	2,38	2,53	2,69	2,84	3,00
X*	0,00	0,12	0,17	0,22	0,27	0,33	0,38	0,43	0,48	0,53	0,59	0,64	0,69	0,74	0,79	0,84	0,90	0,95	1,00
D (CM)	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
D*	2,98	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91
B (LS)		30,84	6,84	14,40	15,04	9,95	8,98	8,86	8,37	12,95	5,25	5,34	3,28	15,01	4,18	9,70	3,84	10,29	15,98
V (CM/S)	58,98	86,93	74,45	84,08	96,52	108,26	118,44	127,86	139,95	162,08	199,00	165,84	182,82	206,00	238,90	280,47	270,81	300,00	348,00
V*	1,00	1,10	1,26	1,43	1,64	1,80	1,97	2,17	2,37	2,72	2,98	3,15	3,27	3,83	4,00	4,42	4,59	5,09	5,90
Po (Pa)	3306,32	3068,67	4291,87	4923,17	5780,96	6490,52	7210,75	8008,19	8901,52	10675,12	11447,41	12823,54	13444,40	16820,85	19623,50	21033,32	24201,04	28788,13	
Ne (Pa*s)		129,05	486,92	342,25	391,75	650,05	803,24	910,34	1075,44	824,28	2182,40	1537,20	4064,74	1100,59	4197,86	2057,67	5476,06	2352,00	1862,94

**FECHA**    **SUCCIÓN**    **SEPAR.**    **GASTO**    **V. ANG.**  
**30-IV-83**    **52 CM HG**    **3 CM**    **0,67 ML/S**    **12 RPM**

Y (MM)	0,00	3,55	5,12	6,68	8,22	9,78	11,35	12,88	14,44	16,01	17,58	19,11	20,67	22,24	23,77	25,34	26,90	28,43	30,00
X (CM)	0,00	0,36	0,51	0,67	0,82	0,96	1,13	1,29	1,44	1,60	1,76	1,91	2,07	2,22	2,38	2,53	2,69	2,84	3,00
X*	0,00	0,12	0,17	0,22	0,27	0,33	0,38	0,43	0,48	0,53	0,59	0,64	0,69	0,74	0,79	0,84	0,90	0,95	1,00
D (CM)	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
D*	2,98	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91
B (LS)		33,00	10,90	15,98	14,09	8,52	8,52	12,02	5,20	7,71	9,00	7,70	9,90	3,20	8,88	9,41	0,07	10,01	4,54
V (CM/S)	58,98	70,70	78,18	86,82	98,40	108,73	117,54	133,03	146,87	153,01	186,94	183,96	203,50	210,81	231,25	258,08	298,03	294,50	308,12
V*	1,00	1,20	1,29	1,47	1,67	1,81	1,99	2,26	2,39	2,59	2,90	3,11	3,45	3,57	3,92	4,33	4,51	4,90	5,22
Po (Pa)	3128,31	3832,31	4170,53	4840,21	5612,02	6177,96	6933,18	8096,90	8928,90	9678,75	10630,74	12071,68	13787,88	14422,26	16322,51	18624,50	19721,16	22998,48	24163,37
Ne (Pa*s)		118,12	391,14	303,05	398,23	715,21	727,60	670,06	1833,48	1242,44	1197,04	1567,30	1436,51	4510,31	1879,62	1900,26	4845,10	2208,07	5323,60

**FECHA**    **SUCCIÓN**    **SEPAR.**    **GASTO**    **V. ANG.**  
**30-IV-83**    **52 CM HG**    **3 CM**    **0,67 ML/S**    **30 RPM**

Y (MM)	0,00	3,55	5,12	6,68	8,22	9,78	11,35	12,88	14,44	16,01	17,58	19,11	20,67	22,24	23,77	25,34	26,90	28,43	30,00
X (CM)	0,00	0,36	0,51	0,67	0,82	0,96	1,13	1,29	1,44	1,60	1,76	1,91	2,07	2,22	2,38	2,53	2,69	2,84	3,00
X*	0,00	0,12	0,17	0,22	0,27	0,33	0,38	0,43	0,48	0,53	0,59	0,64	0,69	0,74	0,79	0,84	0,90	0,95	1,00
D (CM)	0,12	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
D*	2,98	2,48	2,45	2,30	2,15	2,10	1,98	1,92	1,79	1,78	1,68	1,60	1,52	1,50	1,36	1,35	1,29	1,28	1,18
B (LS)		54,59	2,98	17,19	15,28	5,97	13,85	4,15	13,19	3,64	6,78	5,45	9,60	2,98	16,10	4,25	10,01	4,68	13,45
V (CM/S)	58,98	78,37	79,89	91,39	103,82	108,67	125,38	130,73	148,78	155,63	171,35	187,59	207,34	213,97	262,45	263,20	290,10	300,48	343,81
V*	1,00	1,30	1,35	1,55	1,76	1,86	2,13	2,22	2,54	2,64	2,91	3,18	3,52	3,63	4,28	4,40	4,92	5,15	5,83
Po (Pa)	3108,80	4402,93	4501,20	5295,75	6109,42	6511,47	7845,06	8042,85	9505,92	9904,09	11252,33	12821,06	14378,32	14981,13	18998,32	18752,80	22578,67	24018,40	28825,47
Ne (Pa*s)		80,85	1508,19	305,72	400,45	1108,53	552,03	1937,91	720,78	2601,80	1282,23	1403,38	1498,47	5022,06	1153,05	4642,78	2254,81	5129,62	2128,85

**FECHA**    **SUCCIÓN**    **SEPAR.**    **GASTO**    **V. ANG.**  
**30-IV-83**    **52 CM HG**    **3 CM**    **0,67 ML/S**    **60 RPM**

Y (MM)	0,00	3,55	5,12	6,68	8,22	9,78	11,35	12,88	14,44	16,01	17,58	19,11	20,67	22,24	23,77	25,34	26,90	28,43	30,00
X (CM)	0,00	0,30	0,51	0,67	0,82	0,96	1,13	1,29	1,44	1,60	1,76	1,91	2,07	2,22	2,38	2,53	2,69	2,84	3,00
X*	0,00	0,12	0,17	0,22	0,27	0,33	0,38	0,43	0,48	0,53	0,59	0,64	0,69	0,74	0,79	0,84	0,90	0,95	1,00
D (CM)	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
D*	2,98	2,72	2,96	2,40	2,23	2,11	2,00	1,98	1,77	1,68	1,60	1,52	1,49	1,36	1,29	1,21	1,16	1,04	1,04
B (LS)		18,07	16,04	15,01	14,91	11,54	10,28	14,80	9,70	10,55	10,65	14,48	10,94	12,32	4,70	12,62	6,90	10,07	23,65
V (CM/S)	58,98	65,00	73,22	83,25	87,14	106,43	120,07	136,67	153,01	169,80	186,82	208,64	231,25	258,08	299,84	302,33	326,51	365,15	444,71
V*	1,00	1,10	1,24	1,41	1,65	1,84	2,04	2,35	2,58	2,88	3,20	3,54	3,62	4,00	4,58	5,13	5,54	6,02	7,54
Po (Pa)	3268,24	3982,15	4186,06	4845,08	5791,19	6588,80	7438,05	8570,12	9983,70	11389,56	13004,63	14810,71	16949,05	19981,16	20639,96	24351,07	27103,00	30519,22	42278,52
Ne (Pa*s)		215,78	280,93	322,71	392,48	571,02	725,05	607,56	1211,33	1079,80	1221,07	1413,78	1549,40	1597,27	4429,40	1889,02	3015,95	3029,33	1418,29

## VISCOSIMETRO ELONGACIONAL I

**FECHA** 3-V-85 **SUCCION** 30 CM HG **SEPAR.** 3 CM **GASTO** 1.0 ML/S **V. ANG.** 6 RPM

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	8.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X'</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.58	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07
<b>D'</b>	2.98	2.83	2.79	2.74	2.64	2.54	2.40	2.31	2.27	2.19	2.06	1.97	1.86	1.68	1.79	1.71	1.60	1.62	1.90
<b>B (L/S)</b>		5.05	5.46	4.38	9.86	7.00	11.84	7.97	3.17	6.99	11.31	7.98	7.40	2.80	7.80	7.84	2.33	6.55	2.21
<b>V (CM/S)</b>	88.42	90.21	93.01	95.94	103.90	111.83	126.00	136.32	150.00	170.98	183.17	201.45	227.28	255.75	245.81	261.81	278.17	292.70	
<b>V'</b>	1.00	1.02	1.05	1.09	1.18	1.29	1.41	1.53	1.59	1.71	1.83	2.11	2.26	2.36	2.55	2.78	2.85	3.12	3.20
<b>Pa (Pa)</b>	1893.98	2040.78	2130.00	2226.30	2496.30	2788.64	3273.60	3903.78	4673.47	4356.05	6275.26	6033.31	6842.64	7186.10	6227.75	9448.00	8950.47	11486.30	11981.80
<b>Na (Pa<sup>2</sup>)</b>	403.80	300.87	508.05	257.50	350.53	278.48	482.44	1223.68	823.36	488.62	756.05	625.34	2569.56	1082.04	1205.90	4235.20	1343.65	5412.64	

**FECHA** 3-V-85 **SUCCION** 30 CM HG **SEPAR.** 3 CM **GASTO** 1.0 ML/S **V. ANG.** 6 RPM

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	8.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X'</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.58	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
<b>D'</b>	2.98	2.76	2.72	2.69	2.58	2.47	2.37	2.28	2.20	2.12	2.04	1.97	1.86	1.61	1.73	1.70	1.63	1.61	1.98
<b>B (L/S)</b>		19.31	4.26	3.37	6.56	11.32	6.57	7.84	7.62	7.28	7.43	6.51	7.07	6.54	6.37	2.94	6.54	2.65	1.98
<b>V (CM/S)</b>	88.42	95.26	97.48	99.71	107.50	116.63	128.36	138.44	149.45	161.10	174.17	189.62	202.47	221.02	240.00	248.36	271.35	279.45	294.48
<b>V'</b>	1.00	1.06	1.10	1.13	1.22	1.34	1.45	1.57	1.69	1.82	1.97	2.11	2.29	2.50	2.72	2.81	3.07	3.18	3.22
<b>Pa (Pa)</b>	1892.44	2073.57	2142.67	2215.19	2475.81	2684.30	3228.22	3922.53	4078.46	4567.83	5192.12	6799.98	6620.19	7844.88	6821.06	9283.10	10778.66	11331.28	11981.52
<b>Na (Pa<sup>2</sup>)</b>	107.30	503.18	656.58	258.18	253.12	376.68	482.13	535.07	830.48	688.36	862.54	893.24	419.74	1054.48	3153.50	1261.44	3677.60	8900.18	

**FECHA** 3-V-85 **SUCCION** 30 CM HG **SEPAR.** 3 CM **GASTO** 1.0 ML/S **V. ANG.** 6 RPM

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	8.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X'</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.58	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
<b>D'</b>	2.98	2.85	2.80	2.71	2.58	2.40	2.29	2.20	2.10	2.01	1.92	1.83	1.75	1.63	1.55	1.47	1.45	1.42	1.37
<b>B (L/S)</b>		1.97	5.97	9.01	14.23	15.22	10.78	9.44	6.50	9.64	9.26	10.32	9.82	18.32	12.24	13.43	4.13	3.60	0.86
<b>V (CM/S)</b>	88.42	80.01	92.08	98.49	110.18	126.08	137.30	149.45	183.30	178.74	195.02	214.75	235.05	271.35	300.43	334.46	343.57	358.05	395.10
<b>V'</b>	1.00	1.01	1.04	1.11	1.25	1.41	1.56	1.68	1.85	2.02	2.21	2.43	2.69	3.07	3.40	3.78	4.20	4.00	1.58
<b>Pa (Pa)</b>	1153.40	1160.51	1235.18	1383.92	1891.75	2008.83	2475.45	2870.88	3377.48	3878.33	4894.62	5596.43	6561.45	8952.71	10416.01	12769.29	13871.88	14383.88	18677.18
<b>Na (Pa<sup>2</sup>)</b>		690.45	207.00	144.21	118.21	137.62	229.63	305.07	352.32	412.53	503.56	539.44	870.30	527.03	851.32	949.98	3286.21	3897.15	1722.05

**FECHA** 3-V-85 **SUCCION** 30 CM HG **SEPAR.** 3 CM **GASTO** 1.0 ML/S **V. ANG.** 6 RPM

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	8.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X'</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.58	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>D'</b>	2.98	2.85	2.83	2.82	2.80	2.53	2.30	2.24	2.13	2.03	1.94	1.85	1.75	1.62	1.54	1.46	1.43	1.30	1.34
<b>B (L/S)</b>		2.06	1.78	1.14	10.62	12.42	12.42	13.85	10.32	5.54	10.00	10.38	11.46	11.71	12.80	13.25	8.93	13.44	2.70
<b>V (CM/S)</b>	88.42	88.16	90.08	90.83	99.71	112.47	126.56	144.40	159.31	174.56	192.18	211.96	235.09	273.74	304.18	337.73	353.86	391.88	400.27
<b>V'</b>	1.00	1.01	1.02	1.03	1.13	1.27	1.43	1.63	1.89	1.97	2.17	2.40	2.67	3.10	3.44	3.82	4.00	4.43	4.53
<b>Pa (Pa)</b>	878.70	880.83	915.18	925.93	1105.94	1304.63	1751.83	2261.31	2736.85	3271.20	3945.15	4789.90	5895.21	7888.01	9719.31	11948.85	13086.00	18028.23	18714.32
<b>Na (Pa<sup>2</sup>)</b>		428.22	516.98	811.98	1026.32	1067.97	1411.01	1832.24	2652.26	3421.93	394.46	4806.73	5113.35	461.56	759.54	801.74	2208.31	10029.23	6881.86

## VISCOSIMETRO ELONGACIONAL I

**FECHA 3-V-93 SUCCION 18 CM HG SEPAR. 3 CM GASTO 1.33 ML/S V. ANG. 6 RPM**

Y (MM)	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.86	14.44	16.01	17.58	18.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
X (CM)	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.75	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
X*	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D (CM)	0.12	0.13	0.13	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
D*	2.86	2.62	2.54	2.39	2.23	2.13	2.03	1.94	1.85	1.73	1.68	1.61	1.58	1.46	1.43	1.38	1.33	1.27	1.18
B (US)		61.84	17.89	28.78	30.26	18.90	17.94	17.71	16.73	25.68	14.48	16.67	8.55	30.00	8.32	19.38	7.06	20.56	31.84
V (CM/S)	117.89	139.78	148.90	168.04	182.80	212.36	232.71	255.52	278.69	321.12	339.55	371.40	384.95	451.67	471.46	503.56	541.21	586.69	625.46
V*	1.00	1.19	1.26	1.43	1.64	1.90	1.97	2.17	2.72	2.96	3.15	3.71	3.93	4.05	4.42	4.90	5.60	5.90	6.50
Po (Pa)	1825.56	2478.81	2774.22	3462.71	4484.24	5336.90	6330.70	7545.45	8848.25	11631.47	12036.09	15357.53	16449.50	22374.17	24308.61	28444.45	31762.57	38750.22	51747.62
Ne (Pa*s)		40.18	157.07	120.51	147.51	268.27	352.87	426.10	634.94	449.30	1234.15	821.17	2510.61	745.83	2820.31	1519.26	4136.53	1884.90	1620.40

**FECHA 3-V-93 SUCCION 18 CM HG SEPAR. 3 CM GASTO 1.33 ML/S V. ANG. 12 RPM**

Y (MM)	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.86	14.44	16.01	17.58	18.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
X (CM)	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.75	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
X*	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D (CM)	0.12	0.13	0.13	0.10	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07
D*	2.86	3.12	3.14	2.98	2.90	2.79	2.70	2.62	2.53	2.39	2.30	2.21	2.13	2.09	1.95	1.87	1.79	1.78	1.75
B (US)		53.38	2.05	15.08	4.73	11.79	7.20	8.79	7.07	11.11	7.88	7.96	7.62	3.75	13.14	9.38	6.62	3.75	1.43
V (CM/S)	117.89	98.90	97.85	103.83	111.62	123.35	131.52	140.27	150.48	168.37	181.88	197.08	212.83	221.17	252.41	276.13	300.13	310.78	315.03
V*	1.00	0.84	0.83	0.92	0.96	1.06	1.12	1.19	1.28	1.43	1.54	1.67	1.81	1.88	2.14	2.34	2.56	2.84	2.87
Po (Pa)	2315.33	1751.83	1722.49	2010.87	2127.89	2482.20	2786.73	3075.97	3456.98	4175.02	4780.53	5483.95	6242.56	6975.40	8422.61	9861.75	11475.35	12220.30	12523.87
Ne (Pa*s)		32.81	94.03	133.37	449.45	211.40	364.47	432.78	486.70	373.67	810.49	868.85	810.35	1779.55	840.67	1055.05	1286.34	3201.99	8943.60

**FECHA 3-V-93 SUCCION 18 CM HG SEPAR. 3 CM GASTO 1.33 ML/S V. ANG. 30 RPM**

Y (MM)	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.86	14.44	16.01	17.58	18.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
X (CM)	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.75	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
X*	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D (CM)	0.12	0.13	0.13	0.10	0.12	0.12	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07
D*	2.86	3.05	3.08	2.92	2.86	2.70	2.61	2.47	2.37	2.27	2.18	2.04	1.84	1.86	1.77	1.70	1.62	1.55	1.55
B (US)		-40.18	-1.57	15.16	14.63	8.20	12.64	6.86	9.19	9.74	15.41	10.90	10.62	11.28	9.67	12.62	12.51	0.41	
V (CM/S)	117.89	103.59	102.79	112.92	117.87	131.98	141.29	157.83	171.78	188.48	202.72	232.17	254.89	278.67	308.70	331.08	364.00	408.48	401.71
V*	1.00	0.88	0.87	0.96	1.00	1.12	1.20	1.34	1.46	1.58	1.72	1.97	2.16	2.37	2.54	2.81	3.10	3.40	3.41
Po (Pa)	3382.76	2904.77	2774.55	3164.70	3354.63	3625.89	4365.62	5140.36	5845.70	6625.83	7539.52	8331.10	10355.14	12543.34	14586.36	16945.27	19265.51	22870.53	23001.70
Ne (Pa*s)		98.81	1785.05	208.61	580.25	270.20	532.48	400.83	605.28	721.34	816.12	605.41	665.80	1158.90	1292.45	1699.77	1569.02	1836.72	50176.08

**FECHA 3-V-93 SUCCION 18 CM HG SEPAR. 3 CM GASTO 1.33 ML/S V. ANG. 60 RPM**

Y (MM)	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.86	14.44	16.01	17.58	18.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
X (CM)	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.75	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
X*	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D (CM)	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07
D*	2.86	3.12	2.96	2.81	2.70	2.56	2.47	2.36	2.28	2.20	2.11	2.02	1.85	1.91	1.80	1.73	1.70	1.63	1.57
B (US)		52.96	20.41	18.54	12.28	14.94	10.17	9.53	8.90	9.88	9.64	8.53	8.79	4.28	14.47	9.86	9.75	9.06	9.86
V (CM/S)	117.89	68.05	109.50	121.80	131.98	148.59	158.13	170.40	183.40	192.22	216.70	234.81	253.03	282.58	298.96	322.01	334.80	360.66	366.83
V*	1.00	0.64	0.93	1.03	1.12	1.24	1.24	1.45	1.58	1.68	1.84	1.98	2.15	2.23	2.52	2.73	2.84	3.08	3.11
Po (Pa)	3382.33	2656.63	3030.22	3527.37	3665.17	4011.54	5180.63	5774.40	6457.70	7338.54	8390.36	9505.84	10708.83	11365.27	13666.24	15901.15	18668.92	19222.08	21915.72
Ne (Pa*s)		49.77	148.49	194.22	322.05	308.70	507.53	606.00	717.95	742.24	841.49	907.29	1221.61	2682.45	960.28	1067.38	3657.87	2113.36	2208.11

## VISCOSIMETRO ELONGACIONAL I

**FECHA** **SUCCION** **SEPAR.** **GASTO** **V. ANG.**  
**3-V-93** **38 CM HG** **3 CM** **1.67 ML/S** **9 RPM**

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X*</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>D*</b>	2.86	2.86	2.83	2.55	2.36	2.27	2.13	2.05	1.96	1.94	1.86	1.78	1.70	1.63	1.56	1.48	1.44	1.37	1.29
<b>B (LS)</b>	53.00	14.88	18.77	36.77	26.90	17.03	17.08	5.30	15.22	18.09	17.99	17.99	17.36	8.09	30.05	10.96	22.62	26.10	
<b>V (CM/S)</b>	147.39	173.63	185.04	215.25	234.19	264.38	286.31	311.84	320.33	347.06	379.35	416.34	454.90	474.23	502.39	579.97	644.20	722.51	
<b>V*</b>	1.00	1.13	1.18	1.25	1.48	1.59	1.79	1.94	2.12	2.17	2.35	2.57	2.85	3.09	3.22	3.73	3.93	4.37	4.90
<b>Pa (Pa)</b>	4098.57	4941.26	5302.27	5865.67	7475.27	8656.44	10068.25	12018.25	13002.14	14557.05	16720.55	19523.70	22988.27	26027.11	29968.65	37827.18	41704.35	50557.40	62743.63
<b>Pe (Pa*)</b>		93.23	134.13	203.27	349.13	443.40	705.73	768.50	2746.91	1008.56	1158.04	1265.42	1549.36	3582.07	1262.02	3003.86	2234.78	2383.26	

**FECHA** **SUCCION** **SEPAR.** **GASTO** **V. ANG.**  
**3-V-93** **38 CM HG** **3 CM** **1.67 ML/S** **12 RPM**

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X*</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>D*</b>	2.86	2.86	2.75	2.51	2.31	2.20	2.05	1.96	1.87	1.79	1.70	1.63	1.56	1.51	1.44	1.41	1.33	1.20	1.12
<b>B (LS)</b>		15.94	12.02	26.32	90.07	23.06	33.23	21.00	29.91	21.99	21.53	22.84	9.99	22.81	24.13	9.45	26.60	53.62	40.15
<b>V (CM/S)</b>	147.39	152.95	166.10	178.66	228.05	248.60	286.31	313.36	343.56	377.53	415.10	454.98	475.85	526.39	583.73	607.67	679.24	832.27	922.71
<b>V*</b>	1.00	1.04	1.06	1.20	1.53	1.86	1.94	2.13	2.33	2.56	2.82	3.09	3.23	3.57	3.98	4.12	4.61	5.85	6.40
<b>Pa (Pa)</b>	4638.28	4867.74	5194.50	6085.05	8823.86	10385.90	13069.71	15181.43	17890.61	20718.54	24390.26	28596.92	30867.90	36904.81	43330.30	47843.36	58212.32	64318.10	108228.85
<b>Pe (Pa*)</b>		313.06	432.17	231.27	148.56	450.44	363.07	721.83	845.78	682.20	1133.20	1371.92	3060.37	1818.14	1837.84	5041.24	2189.39	1698.60	2995.84

**FECHA** **SUCCION** **SEPAR.** **GASTO** **V. ANG.**  
**3-V-93** **38 CM HG** **3 CM** **1.67 ML/S** **30 RPM**

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X*</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>D*</b>	2.86	2.86	2.45	2.37	2.20	2.13	1.91	1.89	1.79	1.71	1.70	1.66	1.61	1.58	1.58	1.51	1.39	1.24	1.10
<b>B (LS)</b>	100.19	32.81	22.85	36.81	19.05	56.25	12.59	20.17	21.32	1.30	1.61	11.11	11.21	0.59	6.09	16.72	4.96	2.86	
<b>V (CM/S)</b>	147.39	182.96	199.88	214.82	247.53	268.18	329.90	348.20	375.33	406.43	411.71	415.18	438.15	483.00	484.48	481.40	626.36	534.77	543.90
<b>V*</b>	1.00	1.24	1.35	1.48	1.86	1.81	2.24	2.35	2.55	2.78	2.79	2.82	2.97	3.14	3.15	3.27	3.57	3.93	3.90
<b>Pa (Pa)</b>	4871.28	6483.44	7369.04	8385.45	10372.92	11898.45	18693.90	17691.75	20201.92	23918.86	24148.22	24497.90	26980.97	29658.54	29741.10	31857.57	37029.87	38077.53	39186.31
<b>Pe (Pa*)</b>		94.51	229.69	385.77	260.53	612.06	229.20	1429.48	1022.49	1122.93	1852.76	13520.29	2418.81	2636.60	51561.70	4735.13	2215.07	13807.05	13677.40

**FECHA** **SUCCION** **SEPAR.** **GASTO** **V. ANG.**  
**3-V-93** **38 CM HG** **3 CM** **1.67 ML/S** **60 RPM**

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X*</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>D*</b>	2.86	2.86	2.46	2.26	2.26	2.14	2.06	1.97	1.94	1.88	1.78	1.75	1.63	1.56	1.54	1.44	1.37	1.24	1.11
<b>B (LS)</b>	52.17	40.74	34.95	25.71	32.05	16.55	19.55	7.95	17.26	17.85	7.85	29.52	21.30	8.71	22.42	23.06	10.57	9.80	
<b>V (CM/S)</b>	147.39	185.93	188.78	210.14	231.27	262.62	283.87	308.84	320.33	347.07	370.35	393.90	454.90	502.39	520.08	579.97	641.96	672.00	701.85
<b>V*</b>	1.00	1.13	1.27	1.43	1.57	1.78	1.82	2.10	2.17	2.36	2.67	2.97	3.09	3.41	3.55	3.93	4.36	4.56	4.76
<b>Pa (Pa)</b>	7274.31	8502.84	9898.42	11715.99	13392.11	18047.41	17042.92	20337.89	21459.41	24262.29	27897.25	29305.05	36730.30	42981.90	45855.33	54198.25	64095.73	69174.22	74926.03
<b>Pe (Pa*)</b>		182.97	244.69	335.21	620.90	500.67	967.23	1040.00	2968.41	1407.98	1551.39	3838.66	1244.22	2017.91	5262.70	2417.76	2776.10	6642.22	7818.70

## VISCOSIMETRO ELONGACIONAL I

**FECHA SUCCION SEPAR. GASTO V. ANG.**  
30-IV-83 1/2 CM HRS 3 CM 0,67 ML/S 30 RPM

	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
Y (MM)	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.36	2.53	2.69	2.84	3.00
X (CM)	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.36	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D* (CM)	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
D**	2.96	2.61	2.54	2.30	2.23	2.13	2.03	1.94	1.86	1.73	1.68	1.61	1.58	1.48	1.43	1.36	1.33	1.27	1.18
B (US)		6.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21	9.21
V (CM/S)	58.98	66.93	74.45	84.06	96.52	106.26	118.44	127.98	136.05	140.68	146.84	152.64	158.22	162.62	166.00	169.47	173.01	176.61	180.00
V*	1.00	1.19	1.26	1.43	1.64	1.80	1.97	2.17	2.37	2.72	2.68	3.15	3.27	3.83	4.00	4.42	4.59	5.09	5.90
Pa (Pa)	3306.32	3666.67	4291.67	4929.17	5780.00	6489.52	7210.75	8068.19	9001.52	10075.12	11447.41	12623.54	13944.40	15503.86	17482.50	19664.20	21033.32	24201.04	29786.13
Nc (Pa*s)		434.17	495.96	535.20	627.60	702.45	782.83	875.81	977.38	1150.06	1242.93	1392.35	1457.59	1763.77	1906.21	2166.80	2283.75	2627.96	3232.26

**FECHA SUCCION SEPAR. GASTO V. ANG.**  
30-IV-83 1/2 CM HRS 3 CM 0,67 ML/S 12 RPM

	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
Y (MM)	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.36	2.53	2.69	2.84	3.00
X (CM)	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.36	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D* (CM)	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
D**	2.96	2.61	2.51	2.35	2.21	2.12	2.02	1.90	1.85	1.77	1.69	1.62	1.54	1.51	1.44	1.37	1.35	1.28	1.25
B (US)		6.09	8.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09
V (CM/S)	58.98	70.70	78.18	88.82	98.40	106.73	117.54	133.03	140.67	150.01	169.94	183.96	210.61	231.25	255.06	290.03	294.50	306.12	
V*	1.00	1.20	1.29	1.47	1.67	1.81	1.90	2.26	2.30	2.59	2.86	3.11	3.45	3.57	3.62	4.33	4.51	4.80	5.22
Pa (Pa)	3126.31	3632.31	4170.53	4649.21	5612.02	6177.96	6933.16	8056.60	8626.90	9578.75	10550.74	12071.86	13787.88	14422.29	16322.51	18624.50	19721.18	22986.48	24103.37
Nc (Pa*s)		421.60	458.00	533.47	617.38	679.64	762.72	868.31	949.27	1053.77	1193.70	1326.02	1518.80	1596.61	1705.06	2044.60	2198.55	2495.76	2854.24

**FECHA SUCCION SEPAR. GASTO V. ANG.**  
30-IV-83 1/2 CM HRS 3 CM 0,67 ML/S 30 RPM

	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
Y (MM)	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.36	2.53	2.69	2.84	3.00
X (CM)	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.36	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D* (CM)	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
D**	2.96	2.48	2.45	2.30	2.15	2.10	1.96	1.92	1.78	1.77	1.68	1.60	1.52	1.50	1.36	1.35	1.29	1.26	1.18
B (US)		8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83
V (CM/S)	58.98	78.37	79.98	91.30	103.67	125.38	137.87	140.78	155.83	171.35	187.50	207.34	213.67	252.45	282.23	290.18	303.48	343.81	
V*	1.00	1.35	1.36	1.55	1.78	1.99	2.13	2.22	2.54	2.84	2.91	3.18	3.52	3.63	4.28	4.46	4.82	5.15	5.83
Pa (Pa)	3190.80	4402.93	4501.20	5255.75	6108.42	6511.47	7845.06	8042.85	9505.92	9994.09	11252.33	12621.89	14378.32	14981.13	18006.32	19752.80	22570.67	24018.40	29625.47
Nc (Pa*s)		498.63	509.78	595.21	661.90	737.43	865.67	910.06	1078.55	1131.83	1274.33	1429.41	1628.12	1698.62	2113.97	2207.01	2558.13	2720.00	3241.84

**FECHA SUCCION SEPAR. GASTO V. ANG.**  
30-IV-83 1/2 CM HRS 3 CM 0,67 ML/S 60 RPM

	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
Y (MM)	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.36	2.53	2.69	2.84	3.00
X (CM)	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.36	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D* (CM)	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04
D**	2.86	2.72	2.56	2.40	2.23	2.11	2.00	1.88	1.77	1.68	1.60	1.52	1.44	1.34	1.26	1.21	1.18	1.04	1.04
B (US)		11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87
V (CM/S)	58.98	85.00	73.52	83.25	97.14	108.43	120.07	126.67	153.01	169.80	188.62	208.94	231.25	258.61	290.94	302.13	325.51	355.15	444.71
V*	1.00	1.10	1.24	1.41	1.65	1.84	2.04	2.35	2.59	2.86	3.20	3.54	3.92	4.30	4.56	5.13	5.54	6.02	7.54
Pa (Pa)	3280.24	3062.15	4188.08	4845.00	5791.19	6588.96	7438.95	8670.12	9993.70	11398.56	13004.63	14810.71	16948.65	19681.18	20636.98	24361.07	27103.60	30519.22	42278.52
Nc (Pa*s)		315.57	300.71	417.50	480.03	567.78	641.01	764.34	861.15	961.44	1120.61	1278.24	1480.55	1695.02	1795.75	2098.33	2335.51	2628.83	3642.96

## VISCOSIMETRO ELONGACIONAL I

FECHA 3-V-83	SELECCION 33 CM HG	SEPAR. 3 CM	GASTO 1.0 ML/S	V. ANG. 12 RPM															
Y (MM)	0	3.5222	5.1184	8.6848	8.2153	8.7815	11.3477	12.8783	14.4448	18.0108	17.577	18.1077	20.6738	22.2401	23.7707	25.337	28.0032	28.4338	30
X (CM)	0.00	0.355	0.512	0.668	0.822	0.978	1.135	1.288	1.444	1.801	1.758	1.911	2.067	2.224	2.377	2.534	2.690	2.843	3.000
X*	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D (CM)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07
D*	2.857	2.829	2.780	2.743	2.638	2.402	2.543	2.402	2.271	2.186	2.055	1.980	1.863	1.854	1.780	1.714	1.663	1.617	1.568
B (US)	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070	7.070
V (CM/S)	88.41820	80.21447	83.01195	85.84097	103.8866	111.5083	128.0624	138.3211	138.6682	151.0650	170.8672	185.1850	201.4336	207.8758	225.1507	243.5080	251.8802	278.1856	282.7000
V*	1.000	1.020	1.052	1.085	1.115	1.282	1.414	1.530	1.589	1.706	1.833	2.106	2.278	2.349	2.551	2.778	2.94	3.123	3.188
Pz (Pa)	1.084.0	2.040.8	2.130.8	2.225.4	2.405.4	2.778.9	3.273.8	3.873.7	4.365.9	5.275.3	6.033.3	6.842.9	7.186.1	8.227.7	9.203.2	10.555.5	11.483.3	13.051.8	13.561.8
Pa (Pa*)		286.7	301.4	314.9	353.0	391.8	483.0	521.0	547.9	618.1	748.1	853.4	967.9	1.016.4	1.183.8	1.330.5	1.393.3	1.624.5	1.690.5

FECHA 3-V-83	SELECCION 33 CM HG	SEPAR. 3 CM	GASTO 1.0 ML/S	V. ANG. 12 RPM															
Y (MM)	0	3.5222	5.1184	8.6848	8.2153	8.7815	11.3477	12.8783	14.4448	18.0108	17.577	18.1077	20.6738	22.2401	23.7707	25.337	28.0032	28.4338	30
X (CM)	0.00	0.355	0.512	0.668	0.822	0.978	1.135	1.288	1.444	1.801	1.758	1.911	2.067	2.224	2.377	2.534	2.690	2.843	3.000
X*	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D (CM)	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
D*	2.857	2.752	2.721	2.680	2.560	2.487	2.371	2.283	2.196	2.117	2.030	1.987	1.868	1.807	1.731	1.705	1.631	1.507	1.563
B (US)	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030	7.030
V (CM/S)	88.41820	85.27812	87.45780	89.71308	107.5001	118.0208	128.3483	138.4432	149.4533	161.1037	174.1714	186.6100	202.4708	211.098	240.6018	248.3068	271.3468	278.4483	284.4833
V*	1.000	1.078	1.102	1.126	1.218	1.342	1.452	1.598	1.680	1.822	1.970	2.111	2.290	2.500	2.725	2.908	3.069	3.180	3.217
Pz (Pa)	1.852.4	2.073.8	2.142.7	2.215.2	2.475.8	2.884.3	3.226.2	3.622.5	4.078.5	4.587.8	5.182.1	5.800.0	6.244.7	6.821.1	7.593.2	8.207.7	9.178.3	10.778.3	11.331.3
Pa (Pa*)		295.0	304.8	315.1	352.1	407.4	458.9	515.3	580.2	652.8	736.6	825.0	941.7	1.087.4	1.254.8	1.330.5	1.533.2	1.611.8	1.681.7

FECHA 3-V-83	SELECCION 33 CM HG	SEPAR. 3 CM	GASTO 1.0 ML/S	V. ANG. 30 RPM															
Y (MM)	0	3.5222	5.1184	8.6848	8.2153	8.7815	11.3477	12.8783	14.4448	18.0108	17.577	18.1077	20.6738	22.2401	23.7707	25.337	28.0032	28.4338	30
X (CM)	0.00	0.355	0.512	0.668	0.822	0.978	1.135	1.288	1.444	1.801	1.758	1.911	2.067	2.224	2.377	2.534	2.690	2.843	3.000
X*	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D (CM)	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
D*	2.857	2.848	2.802	2.737	2.582	2.432	2.302	2.180	2.102	2.010	1.923	1.853	1.732	1.651	1.569	1.485	1.424	1.359	1.360
B (US)	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230	10.230
V (CM/S)	88.41820	80.11828	82.04847	84.08410	111.1773	125.0624	137.2665	148.4533	163.3005	178.7410	195.0232	212.7472	235.0443	251.3818	300.4328	334.4556	345.6585	358.0405	368.0000
V*	1.000	1.007	1.041	1.114	1.248	1.414	1.553	1.690	1.847	2.022	2.208	2.429	2.658	3.009	3.386	3.783	3.808	4.027	4.365
Pz (Pa)	1.153.4	1.186.5	1.236.2	1.385.9	1.861.7	2.098.5	2.475.4	2.880.0	3.377.5	3.978.3	4.884.8	5.688.4	6.681.4	8.622.7	10.418.0	12.758.3	15.571.7	14.383.8	18.077.2
Pa (Pa*)		114.0	120.7	135.5	184.4	205.2	242.0	281.5	330.2	380.9	456.0	544.3	643.3	840.8	1.018.2	1.240.9	1.328.7	1.494.1	1.820.2

FECHA 3-V-83	SELECCION 33 CM HG	SEPAR. 3 CM	GASTO 1.0 ML/S	V. ANG. 60 RPM															
Y (MM)	0	3.5222	5.1184	8.6848	8.2153	8.7815	11.3477	12.8783	14.4448	18.0108	17.577	18.1077	20.6738	22.2401	23.7707	25.337	28.0032	28.4338	30
X (CM)	0.00	0.355	0.512	0.668	0.822	0.978	1.135	1.288	1.444	1.801	1.758	1.911	2.067	2.224	2.377	2.534	2.690	2.843	3.000
X*	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
D (CM)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
D*	2.857	3.062	2.862	2.819	2.600	2.533	2.368	2.286	2.129	2.033	1.988	1.845	1.750	1.624	1.540	1.462	1.428	1.367	1.343
B (US)	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810	11.810
V (CM/S)	88.41820	86.06873	85.88438	85.82508	98.71308	112.4871	128.5631	144.4005	159.3087	174.5795	192.1858	211.0652	235.0685	273.7413	304.1596	337.3721	353.6788	381.8856	400.2880
V*	1.000	0.971	0.998	1.027	1.128	1.272	1.431	1.633	1.802	1.974	2.173	2.398	2.689	3.096	3.440	3.820	4.000	4.432	4.527
Pz (Pa)	878.1	828.6	828.6	828.6	1.108.9	1.264.8	1.451.8	1.671.8	1.921.3	2.238.9	2.671.2	3.045.2	3.488.9	4.088.2	4.768.0	5.588.2	6.588.0	7.718.3	8.948.7
Pa (Pa*)		67.3	70.2	78.4	93.7	118.1	148.3	191.5	231.7	277.0	334.1	404.8	498.3	608.8	820.0	1.011.7	1.108.2	1.367.3	1.415.3

## VISCOSIMETRO ELONGACIONAL I

**FECHA 3-V-89 SECCION 19 CM HRS SEPAR. 3 CM GASTO 1.33 ML/S V. ANG. 4 RPM**

<b>V (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.08	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X* (CM)</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
<b>D*</b>	2.96	2.96	2.54	2.36	2.23	2.13	2.03	1.94	1.85	1.73	1.66	1.61	1.56	1.51	1.46	1.41	1.36	1.31	1.26
<b>R (US)</b>	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41	18.41
<b>V (CM/S)</b>	117.86	130.76	148.80	188.04	182.80	212.30	232.71	262.52	270.98	321.12	330.55	371.40	384.95	451.87	471.45	520.56	541.21	568.90	606.48
<b>V*</b>	1.00	1.00	1.26	1.43	1.84	1.86	1.97	2.17	2.32	2.72	2.86	3.15	3.27	3.83	4.00	4.42	4.59	5.00	5.60
<b>Pn (Pa)</b>	1826.50	2478.81	2774.22	3402.71	4464.24	5335.90	6330.70	7545.45	8664.25	11633.41	12636.90	15357.53	16449.50	22374.71	24305.61	28444.45	31752.57	39726.22	51747.62
<b>Nc (Pa<sup>2</sup>)</b>		134.54	150.69	168.09	242.42	280.94	343.87	406.95	480.05	631.80	702.72	834.18	863.51	1215.33	1320.24	1569.37	1724.75	2105.34	2810.86

**FECHA 3-V-89 SECCION 19 CM HRS SEPAR. 3 CM GASTO 1.33 ML/S V. ANG. 4 RPM**

<b>V (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.08	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X*</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.06	0.06	0.07
<b>D*</b>	2.96	3.12	3.14	2.90	2.93	2.70	2.70	2.62	2.53	2.30	2.30	2.21	2.13	2.00	1.96	1.79	1.79	1.78	1.75
<b>R (US)</b>	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
<b>V (CM/S)</b>	117.86	96.80	97.85	107.90	111.82	125.35	131.52	140.27	150.46	166.37	181.66	197.06	212.83	223.11	252.41	276.15	300.13	310.78	315.03
<b>V*</b>	1.00	0.84	0.83	0.92	0.95	1.02	1.12	1.19	1.29	1.43	1.54	1.67	1.81	1.89	2.14	2.34	2.55	2.64	2.72
<b>Pn (Pa)</b>	2315.33	1751.53	1722.40	2010.67	2127.60	2402.20	2786.73	3075.97	3456.98	4175.02	4780.53	5483.65	6242.56	6975.40	8422.01	9681.75	11475.35	12220.30	12623.87
<b>Nc (Pa<sup>2</sup>)</b>		226.00	222.00	250.47	274.54	321.57	357.00	398.60	446.05	530.71	614.28	703.63	805.50	861.34	1068.70	1275.06	1480.90	1758.61	1815.96

**FECHA 3-V-89 SECCION 19 CM HRS SEPAR. 3 CM GASTO 1.33 ML/S V. ANG. 4 RPM**

<b>V (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.08	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X*</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
<b>D*</b>	2.96	3.05	3.08	2.92	2.96	2.70	2.61	2.47	2.37	2.27	2.16	2.04	1.94	1.86	1.77	1.71	1.62	1.56	1.50
<b>R (US)</b>	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42
<b>V (CM/S)</b>	117.86	103.56	102.79	112.92	117.87	131.96	141.29	157.83	171.78	186.46	202.72	232.17	254.86	278.87	305.79	331.06	364.60	400.48	401.71
<b>V*</b>	1.00	0.86	0.87	0.96	1.00	1.12	1.20	1.34	1.46	1.56	1.72	1.87	2.16	2.37	2.59	2.81	3.10	3.40	3.41
<b>Pn (Pa)</b>	3302.79	2804.77	2774.55	3184.70	3354.83	3955.08	4369.02	5146.38	5845.70	6825.83	7838.52	8931.10	10395.14	12543.34	14586.83	16645.27	19095.51	22070.53	23061.79
<b>Nc (Pa<sup>2</sup>)</b>		269.17	266.27	303.71	321.98	379.02	419.26	483.60	561.01	635.80	723.47	825.50	1038.84	1203.71	1369.64	1567.44	1861.53	2204.47	2218.10

**FECHA 3-V-89 SECCION 19 CM HRS SEPAR. 3 CM GASTO 1.33 ML/S V. ANG. 4 RPM**

<b>V (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.08	8.22	9.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.38	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.76	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.69	2.84	3.00
<b>X*</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
<b>D*</b>	2.86	3.19	2.98	2.91	2.70	2.59	2.47	2.38	2.29	2.21	2.02	1.96	1.81	1.80	1.73	1.70	1.63	1.57	1.51
<b>R (US)</b>	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67
<b>V (CM/S)</b>	117.86	90.05	106.50	121.80	131.98	146.59	158.13	170.40	183.40	190.22	216.70	234.91	253.03	262.56	296.96	322.01	334.80	360.95	386.83
<b>V*</b>	1.00	0.84	0.89	1.00	1.12	1.24	1.34	1.45	1.56	1.66	1.84	1.90	2.15	2.23	2.52	2.73	2.84	3.06	3.31
<b>Pn (Pa)</b>	3382.33	2635.63	3030.22	3527.37	3665.17	4611.54	5180.83	5774.40	6457.70	7338.54	8396.36	9505.94	10768.83	11965.27	13696.24	15991.15	18066.02	18220.08	21015.72
<b>Nc (Pa<sup>2</sup>)</b>		240.26	278.20	321.55	360.54	420.26	470.43	526.39	589.87	669.78	762.66	869.54	978.01	1098.03	1266.75	1443.80	1645.94	1752.26	1987.70

## VICOSIMETRO ELONGACIONAL I

**FECHA** **SUCCION** **SEPAR.** **GASTO** **V. ANG.**  
**3-V-93** **15 IN HG** **3 CM** **1.67 MLS** **8 RPM**

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	8.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.78	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.68	2.84	3.00
<b>X°</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.36	0.43	0.48	0.53	0.58	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.96	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>D°</b>	2.86	2.90	2.75	2.51	2.36	2.27	2.13	2.05	1.98	1.94	1.88	1.78	1.70	1.63	1.58	1.48	1.44	1.37	1.29
<b>B (LS)</b>	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05	18.05
<b>V (CMS)</b>	147.30	186.22	163.61	185.04	215.25	234.19	264.36	283.31	311.84	320.33	347.08	378.30	418.34	464.90	474.23	560.36	579.87	644.20	722.51
<b>V°</b>	1.00	1.13	1.11	1.26	1.49	1.59	1.79	1.94	2.12	2.17	2.36	2.57	2.82	3.00	3.22	3.70	3.93	4.37	4.90
<b>Pn (Pa)</b>	4098.57	4941.26	4810.24	5853.87	7475.27	8585.44	10068.25	12012.28	13802.74	14657.55	16720.55	18523.79	22969.27	28927.11	28988.98	37627.10	41701.50	50557.40	62474.60
<b>Nc (Pa%)</b>	273.78	287.03	324.43	414.14	475.65	562.05	655.63	770.20	808.52	926.38	1061.65	1274.14	1491.61	1892.46	2101.23	2310.48	2800.98	3461.21	

**FECHA** **SUCCION** **SEPAR.** **GASTO** **V. ANG.**  
**3-V-93** **15 IN HG** **3 CM** **1.67 MLS** **12 RPM**

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	8.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.78	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.68	2.84	3.00
<b>X°</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.36	0.43	0.48	0.53	0.58	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.96	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>D°</b>	2.86	2.90	2.75	2.61	2.31	2.20	2.06	1.98	1.87	1.79	1.70	1.63	1.58	1.51	1.44	1.41	1.33	1.20	1.12
<b>B (LS)</b>	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52	26.52
<b>V (CMS)</b>	147.30	144.01	159.10	178.90	220.05	245.80	288.31	313.38	343.58	377.33	415.18	454.90	478.85	528.38	563.73	607.87	670.24	832.27	852.71
<b>V°</b>	1.00	0.98	1.08	1.20	1.53	1.80	1.94	2.13	2.33	2.56	2.82	3.09	3.23	3.57	3.98	4.12	4.61	5.65	5.48
<b>Pn (Pa)</b>	4830.26	4480.29	5164.50	6085.95	8023.00	10385.00	13062.71	15101.43	17068.61	20718.54	24300.26	28586.92	30887.06	38804.81	44340.30	47843.30	58212.32	84318.10	106224.85
<b>Nc (Pa%)</b>	188.94	185.87	220.49	336.49	301.63	492.56	571.70	698.60	781.24	920.03	1077.94	1184.90	1391.58	1671.98	1795.51	2195.03	3179.42	4080.86	

**FECHA** **SUCCION** **SEPAR.** **GASTO** **V. ANG.**  
**3-V-93** **15 IN HG** **3 CM** **1.67 MLS** **30 RPM**

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	8.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.78	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.68	2.84	3.00
<b>X°</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.36	0.43	0.48	0.53	0.58	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.96	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>D°</b>	2.86	2.90	2.45	2.20	2.13	1.91	1.86	1.79	1.71	1.71	1.71	1.70	1.68	1.61	1.51	1.58	1.51	1.38	1.48
<b>B (LS)</b>	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30	17.30
<b>V (CMS)</b>	147.30	182.98	190.98	214.82	247.53	268.19	320.60	348.20	375.33	408.43	411.71	415.18	438.15	483.08	494.46	481.40	528.38	534.77	643.36
<b>V°</b>	1.00	1.24	1.35	1.49	1.88	1.81	2.24	2.36	2.56	2.78	2.70	2.82	2.87	3.14	3.15	3.27	3.57	3.63	3.98
<b>Pn (Pa)</b>	4871.28	6453.44	7263.44	8478.93	10372.82	11859.45	16033.90	17991.75	20032.82	23819.88	24445.22	24487.93	28980.57	29588.54	28741.10	31887.57	37028.87	38077.83	30185.31
<b>Nc (Pa%)</b>	373.81	427.34	478.93	599.56	673.98	659.78	1038.99	1191.98	1382.50	1365.85	-1418.08	1853.70	1710.32	1710.14	1628.92	2140.48	2201.01	2283.89	

**FECHA** **SUCCION** **SEPAR.** **GASTO** **V. ANG.**  
**3-V-93** **15 IN HG** **3 CM** **1.67 MLS** **60 RPM**

<b>Y (MM)</b>	0.00	3.55	5.12	6.68	8.22	8.78	11.35	12.88	14.44	16.01	17.58	19.11	20.67	22.24	23.77	25.34	26.90	28.43	30.00
<b>X (CM)</b>	0.00	0.36	0.51	0.67	0.82	0.98	1.13	1.29	1.44	1.60	1.78	1.91	2.07	2.22	2.38	2.53	2.68	2.84	3.00
<b>X°</b>	0.00	0.12	0.17	0.22	0.27	0.33	0.36	0.43	0.48	0.53	0.58	0.64	0.69	0.74	0.79	0.84	0.90	0.96	1.00
<b>D (CM)</b>	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>D°</b>	2.86	2.90	2.54	2.30	2.28	2.14	2.06	1.97	1.84	1.86	1.78	1.75	1.83	1.58	1.52	1.44	1.37	1.34	1.31
<b>B (LS)</b>	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12	21.12
<b>V (CMS)</b>	147.30	165.93	186.78	210.14	231.27	262.82	283.67	308.84	320.33	347.87	378.35	383.98	454.90	502.38	523.08	678.87	841.98	672.00	701.86
<b>V°</b>	1.00	1.13	1.27	1.43	1.57	1.79	1.92	2.10	2.17	2.36	2.57	2.67	3.00	3.41	3.55	3.83	4.38	4.58	4.78
<b>Pn (Pa)</b>	7274.31	8602.84	9698.42	11715.90	13362.11	16047.41	17942.82	20322.96	21458.41	24922.20	27897.25	28350.50	38730.30	42861.90	45869.33	54196.25	64008.73	88124.22	74926.00
<b>Nc (Pa%)</b>	402.50	471.90	554.73	634.10	759.82	849.57	862.50	1018.07	1150.20	1311.42	1388.72	1739.12	2035.13	2171.37	2586.21	3033.48	3272.93	3517.76	

**APÉNDICE 6. Gráficas de datos y resultados.**

A continuación se detalla una lista de las gráficas de datos y resultados incluidos en este apéndice.

**1. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 40$  ml/min.**

- Gráfica 1. Diámetro vs. distancia axial.
- Gráfica 2. Diámetro adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 3. Velocidad vs. distancia axial.
- Gráfica 4. Velocidad adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 5. Esfuerzo vs. distancia axial.
- Gráfica 6. Esfuerzo vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 7. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 8. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

**ii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 60$  ml/min.**

- Gráfica 9. Diámetro vs. distancia axial.
- Gráfica 10. Diámetro adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 11. Velocidad vs. distancia axial.
- Gráfica 12. Velocidad adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 13. Esfuerzo vs. distancia axial.
- Gráfica 14. Esfuerzo vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 15. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 16. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

**iii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 80$  ml/min.**

- Gráfica 17. Diámetro vs. distancia axial.
- Gráfica 18. Diámetro adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 19. Velocidad vs. distancia axial.

- Gráfica 20. Velocidad adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 21. Esfuerzo vs. distancia axial.
- Gráfica 22. Esfuerzo vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 23. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 24. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

**iv. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto Q = 100 ml/min.**

- Gráfica 25. Diámetro vs. distancia axial.
- Gráfica 26. Diámetro adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 27. Velocidad vs. distancia axial.
- Gráfica 28. Velocidad adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 29. Esfuerzo vs. distancia axial.
- Gráfica 30. Esfuerzo vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 31. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.

- Gráfica 32. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

v. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 40$  ml/min, y rapidez de elongación promedio.

- Gráfica 33. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.

- Gráfica 34. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

vi. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 60$  ml/min, y rapidez de elongación promedio.

- Gráfica 35. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.

- Gráfica 36. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

vii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 80$  ml/min, y rapidez de elongación promedio.

- Gráfica 37. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.

- Gráfica 38. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

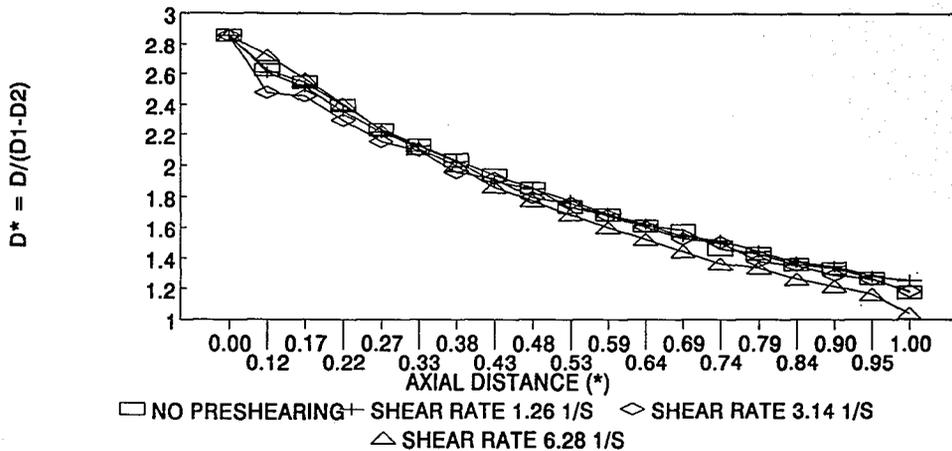
viii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 100$  ml/min, y rapidez de elongación promedio.

- Gráfica 39. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 40. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

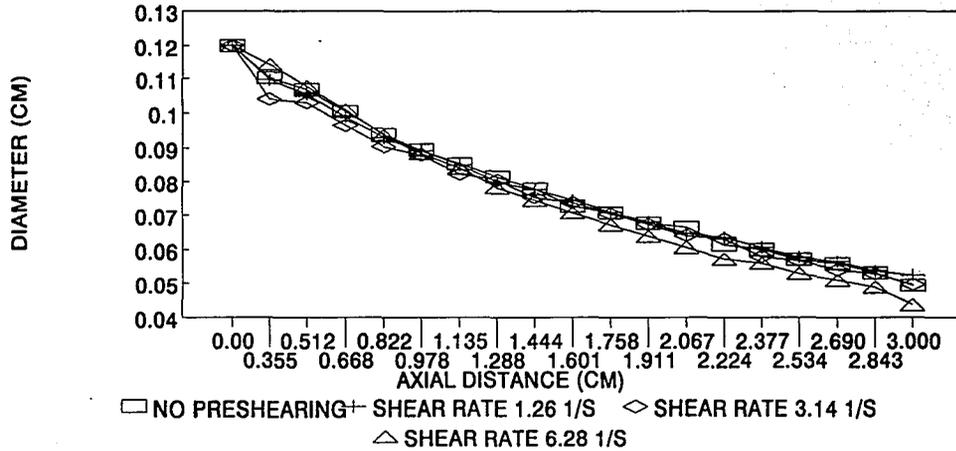
i. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 40$  ml/min.

- Gráfica 1. Diámetro vs. distancia axial.
- Gráfica 2. Diámetro adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 3. Velocidad vs. distancia axial.
- Gráfica 4. Velocidad adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 5. Esfuerzo vs. distancia axial.
- Gráfica 6. Esfuerzo vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 7. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 8. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

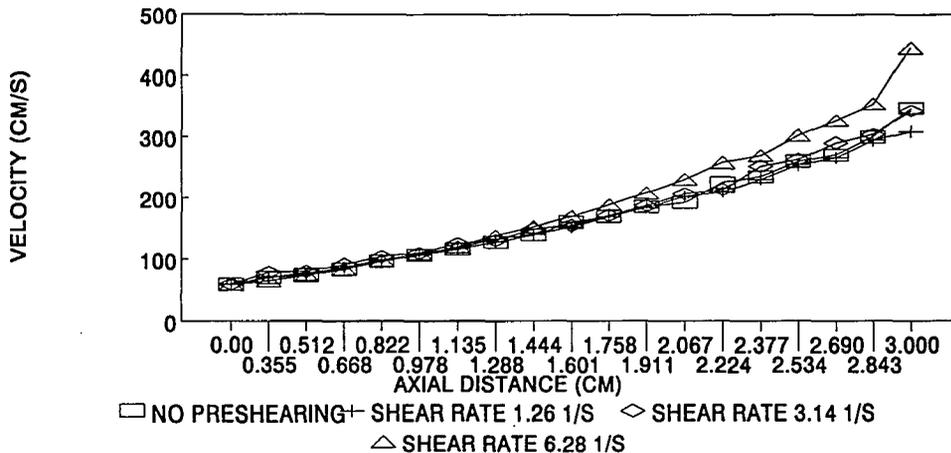
DIAMETER (\*) VS. AXIAL DISTANCE (\*)



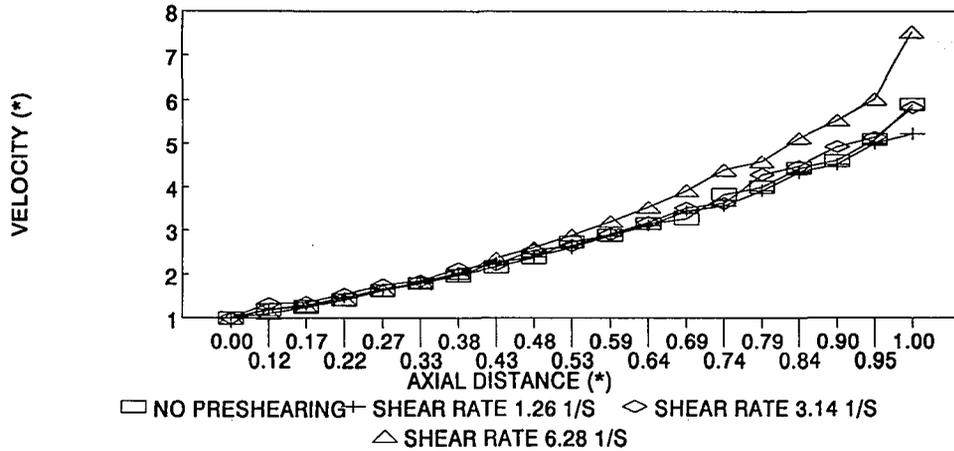
DIAMETER VS. AXIAL DISTANCE



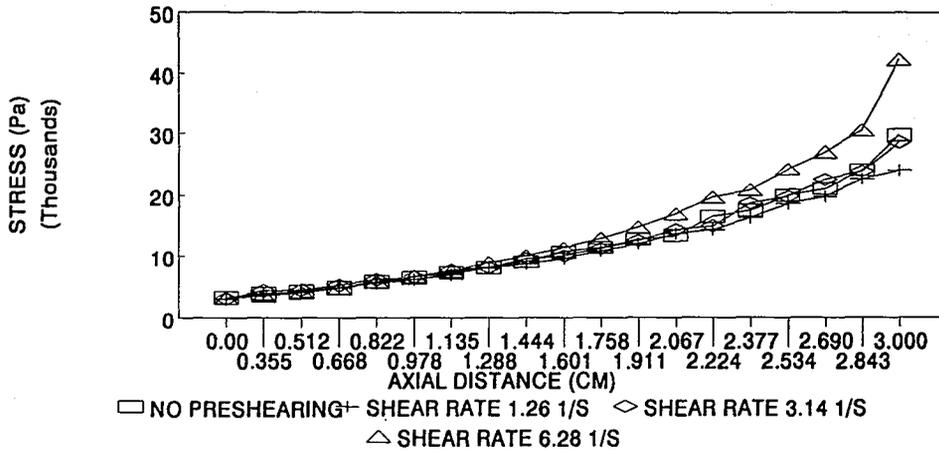
VELOCITY (CM/S) VS AXIAL DISTANCE (CM)



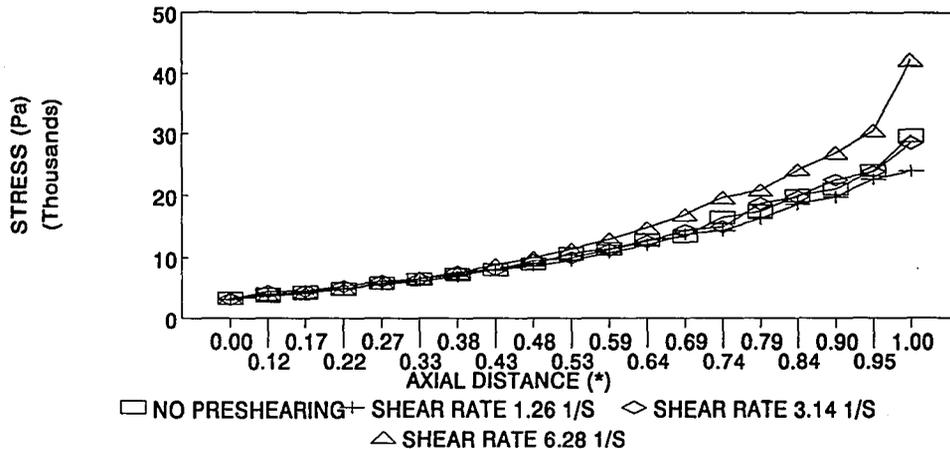
VELOCITY (\*) VS AXIAL DISTANCE (\*)



STRESS VS. AXIAL DISTANCE

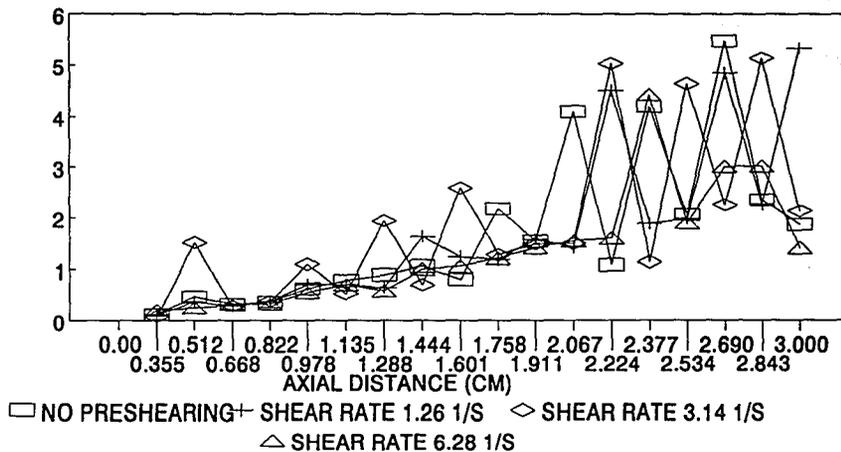


STRESS VS. AXIAL DISTANCE



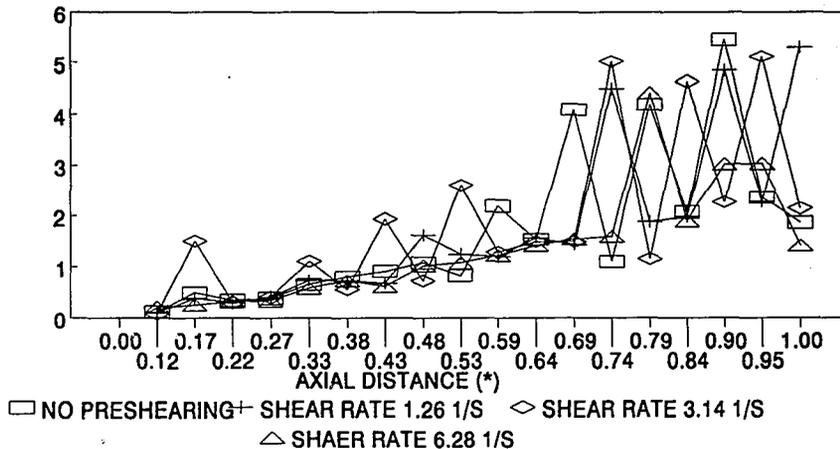
ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

ELONG. VISCOSITY VS. AXIAL DISTANCE



ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

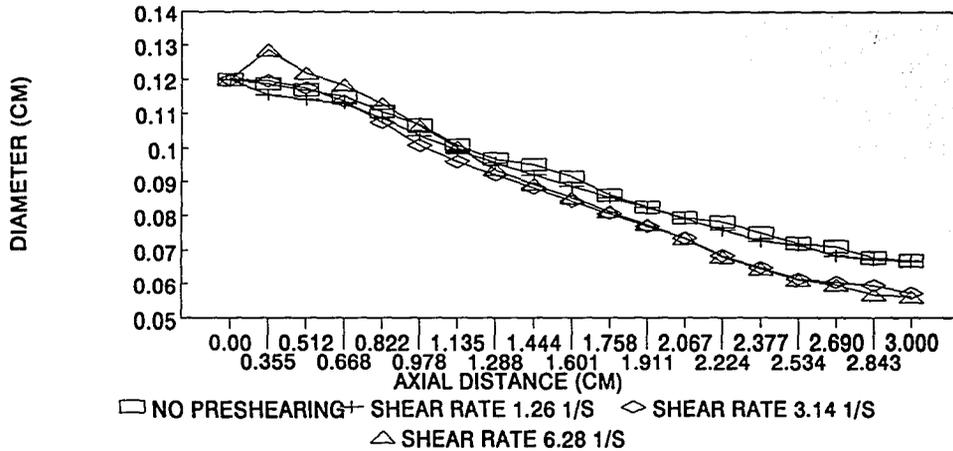
ELONG. VISCOCITY VS. AXIAL DISTANCE



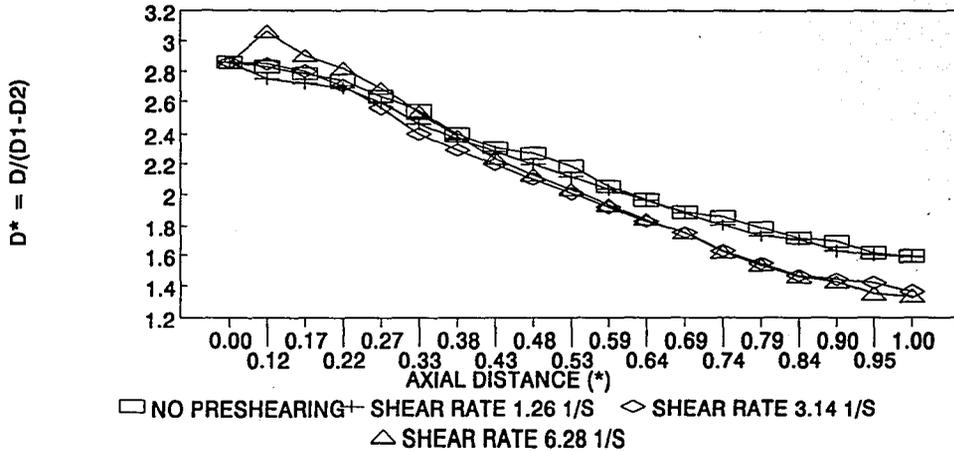
ii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 60$  ml/min.

- Gráfica 9. Diámetro vs. distancia axial.
- Gráfica 10. Diámetro adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 11. Velocidad vs. distancia axial.
- Gráfica 12. Velocidad adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 13. Esfuerzo vs. distancia axial.
- Gráfica 14. Esfuerzo vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 15. Viscocidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 16. Viscocidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

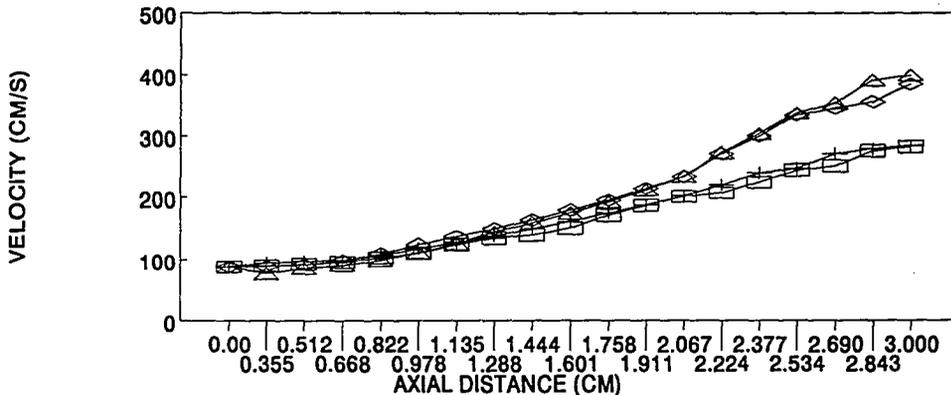
DIAMETER VS. AXIAL DISTANCE



DIAMETER (\*) VS. AXIAL DISTANCE (\*)

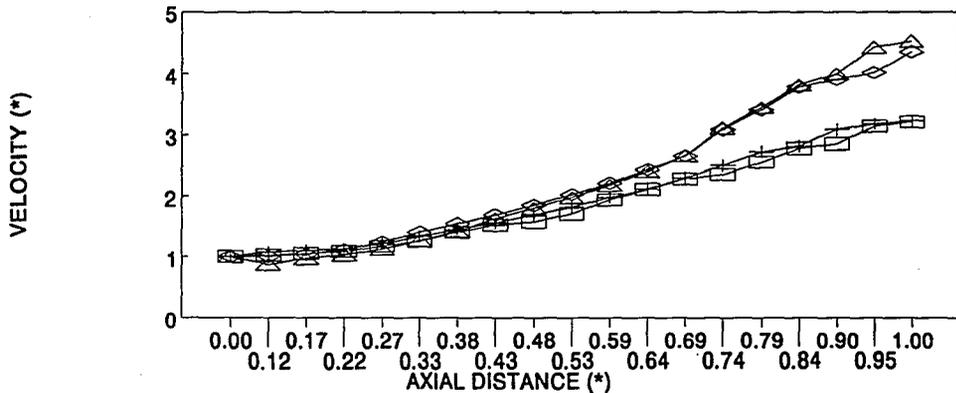


VELOCITY (CM/S) VS AXIAL DISTANCE (CM)



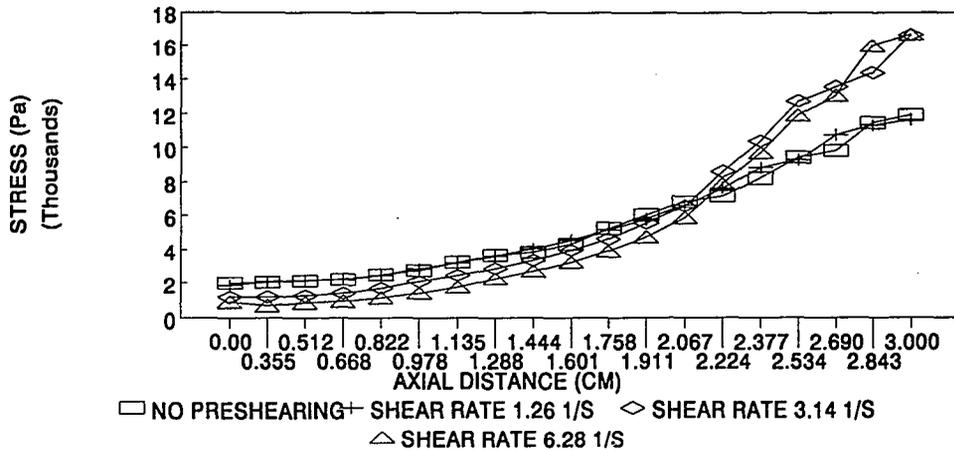
□ NO PRESHEARING + SHEAR RATE 1.26 1/S ◇ SHEAR RATE 3.14 1/S  
△ SHEAR RATE 6.28 1/S

VELOCITY (\*) VS AXIAL DISTANCE (\*)

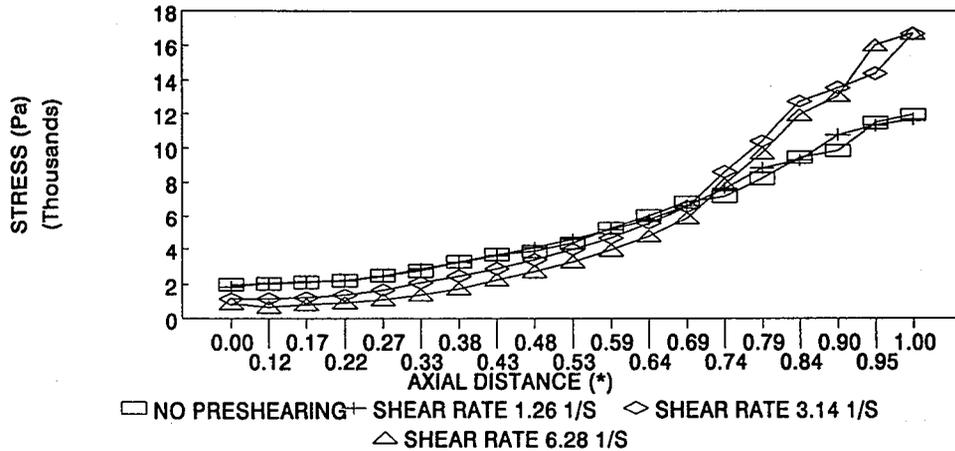


□ NO PRESHEARING + SHEAR RATE 1.26 1/S ◇ SHEAR RATE 3.14 1/S  
△ SHEAR RATE 6.28 1/S

STRESS VS. AXIAL DISTANCE

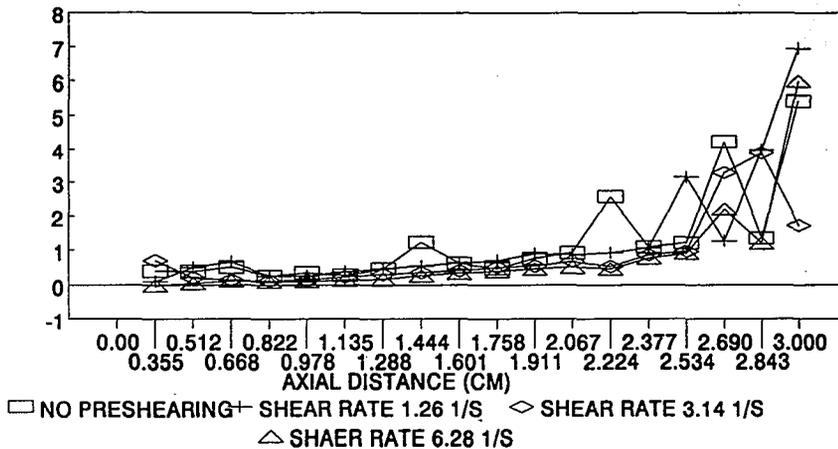


STRESS VS. AXIAL DISTANCE



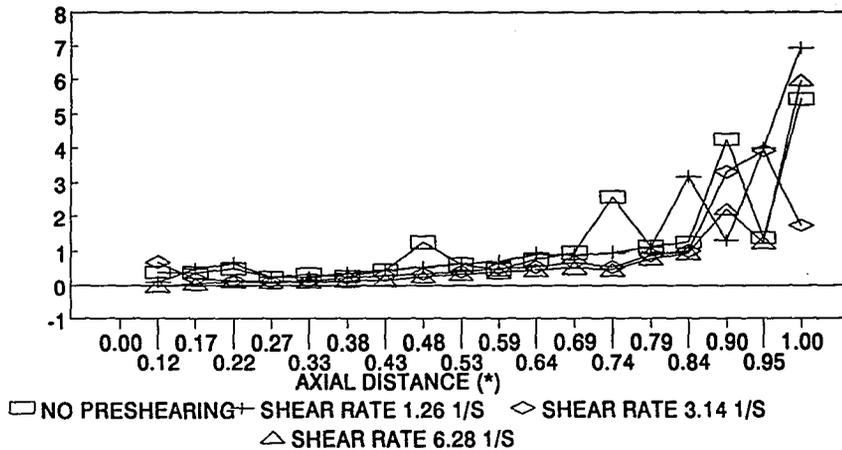
ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

ELONG. VISCOCITY VS. AXIAL DISTANCE



### ELONG. VISCOCITY VS. AXIAL DISTANCE

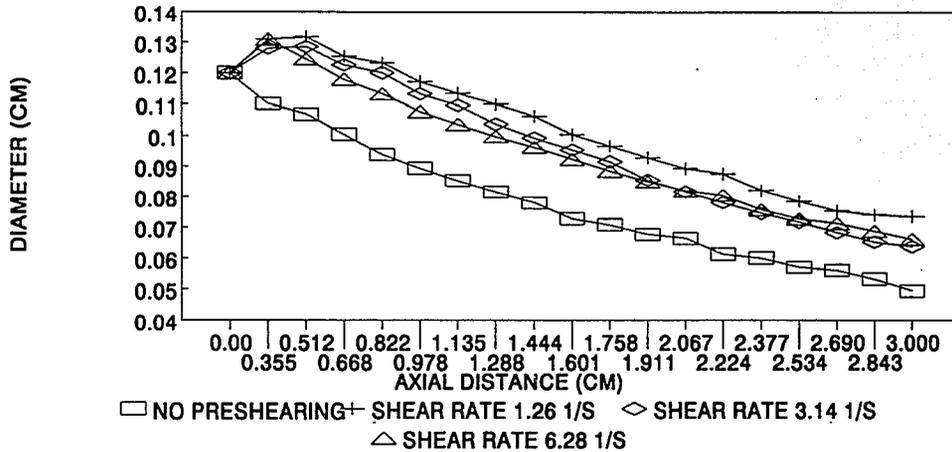
ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)



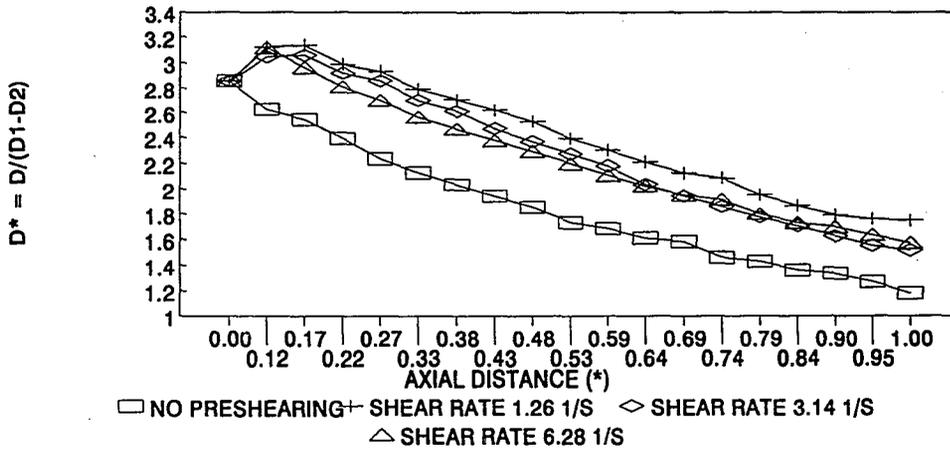
iii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 80$  ml/min.

- Gráfica 17. Diámetro vs. distancia axial.
- Gráfica 18. Diámetro adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 19. Velocidad vs. distancia axial.
- Gráfica 20. Velocidad adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 21. Esfuerzo vs. distancia axial.
- Gráfica 22. Esfuerzo vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 23. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 24. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

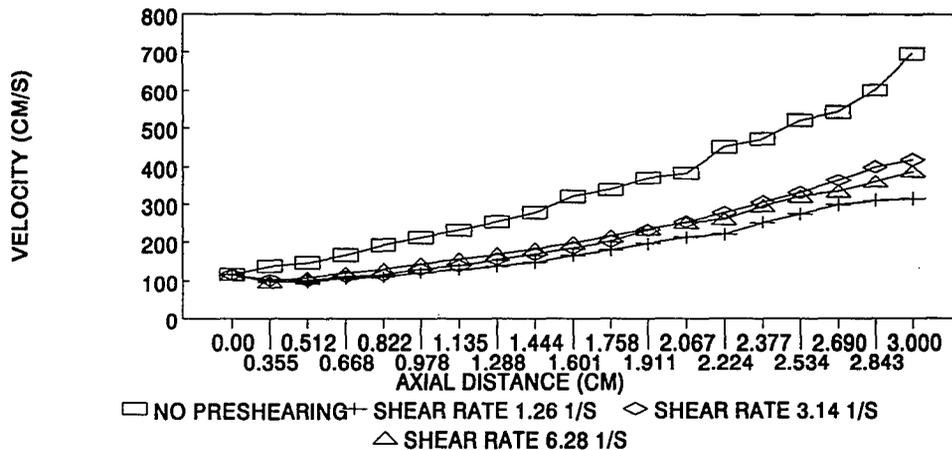
DIAMETER VS. AXIAL DISTANCE



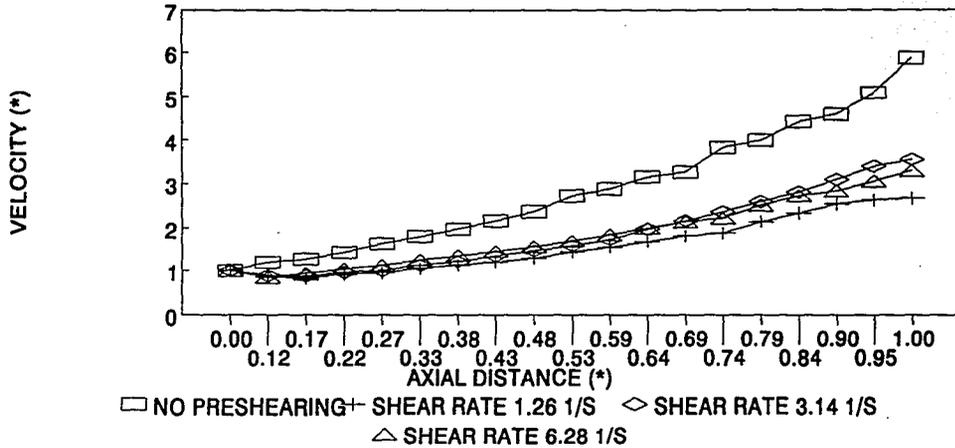
DIAMETER (\*) VS. AXIAL DISTANCE (\*)



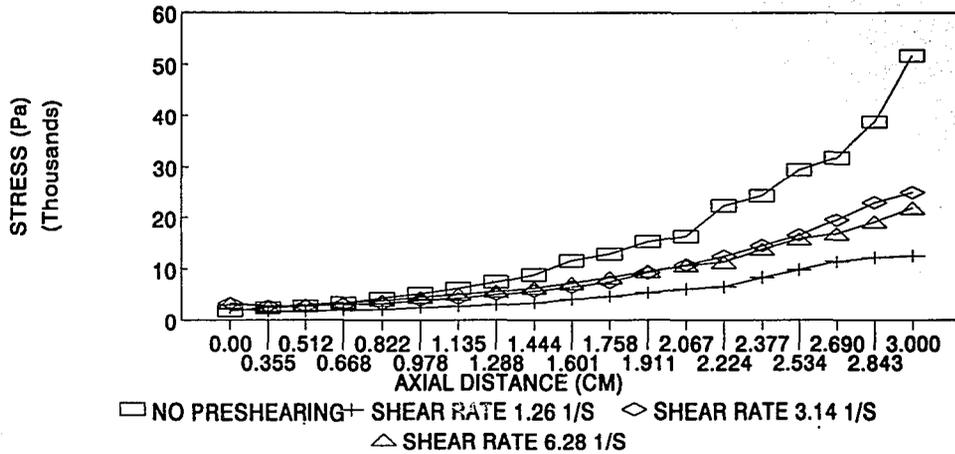
VELOCITY (CM/S) VS AXIAL DISTANCE (CM)



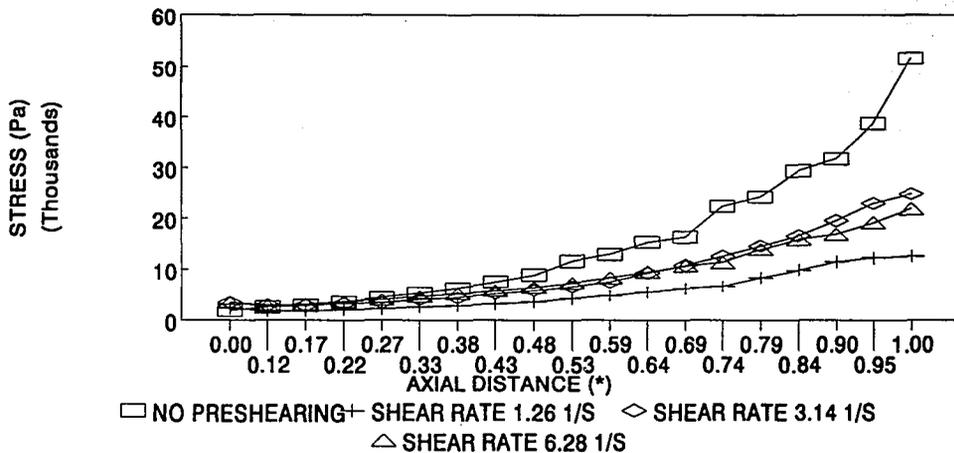
VELOCITY (\*) VS AXIAL DISTANCE (\*)



STRESS VS. AXIAL DISTANCE

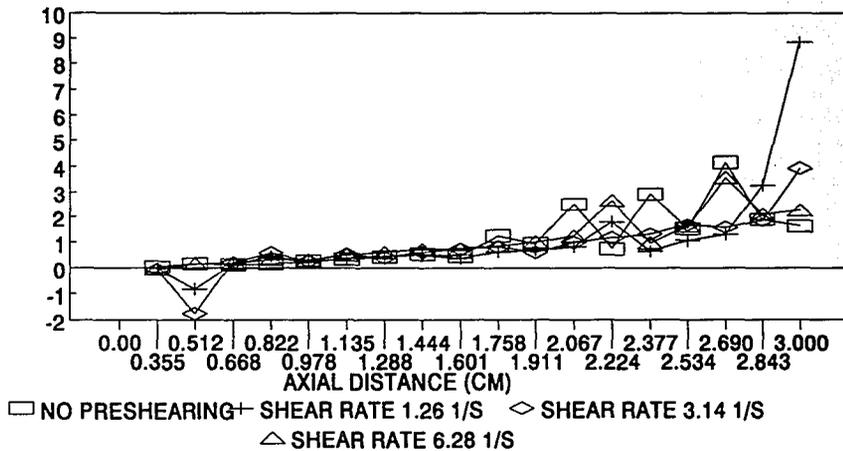


STRESS VS. AXIAL DISTANCE



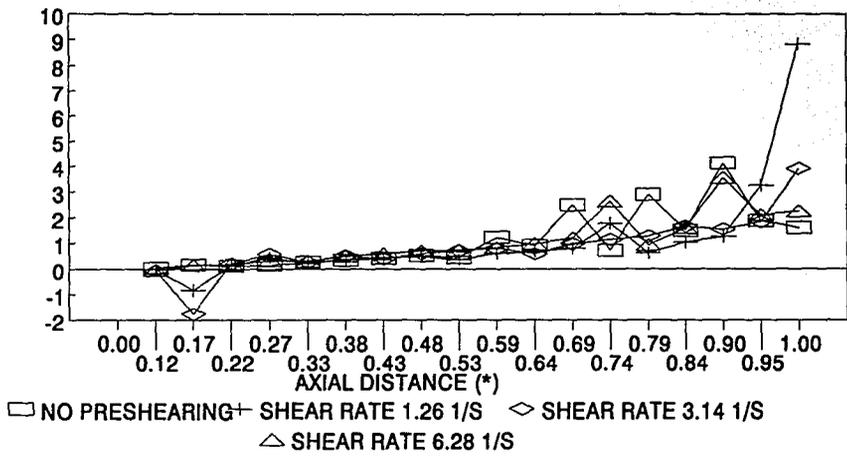
ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

ELONG. VISCOSITY VS. AXIAL DISTANCE



ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

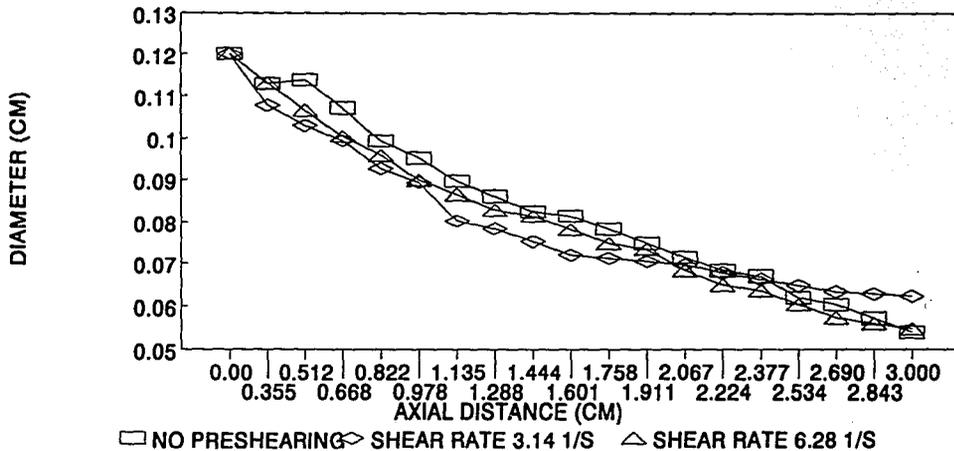
ELONG. VISCOSITY VS. AXIAL DISTANCE



**iv. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 100$  ml/min.**

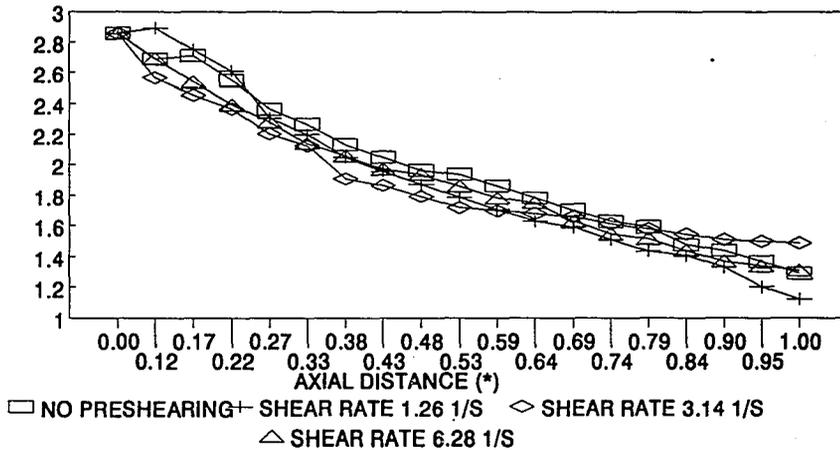
- Gráfica 25. Diámetro vs. distancia axial.
- Gráfica 26. Diámetro adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 27. Velocidad vs. distancia axial.
- Gráfica 28. Velocidad adimensional vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 29. Esfuerzo vs. distancia axial.
- Gráfica 30. Esfuerzo vs. distancia axial adimensional.
- Gráfica 31. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 32. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

DIAMETER VS. AXIAL DISTANCE

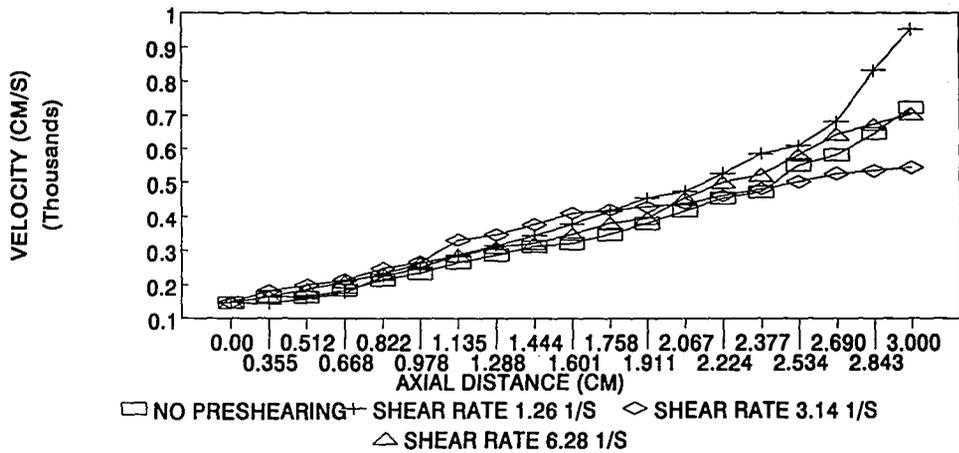


$D^* = D/(D1-D2)$

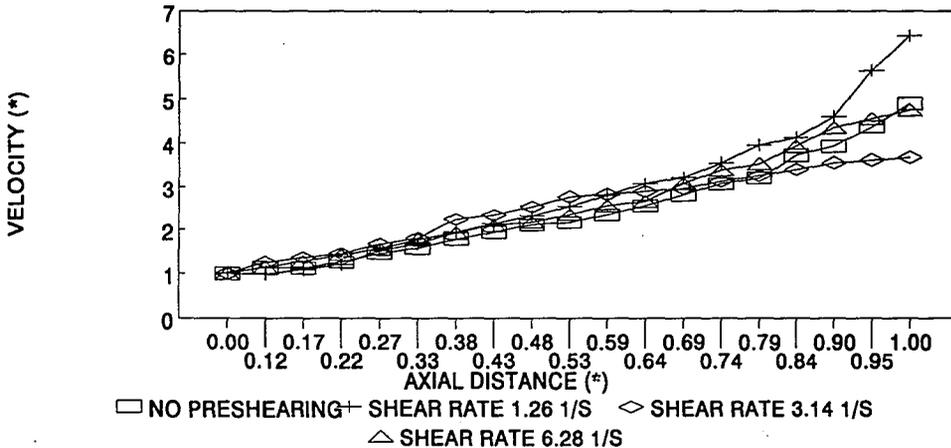
DIAMETER (\*) VS. AXIAL DISTANCE (\*)



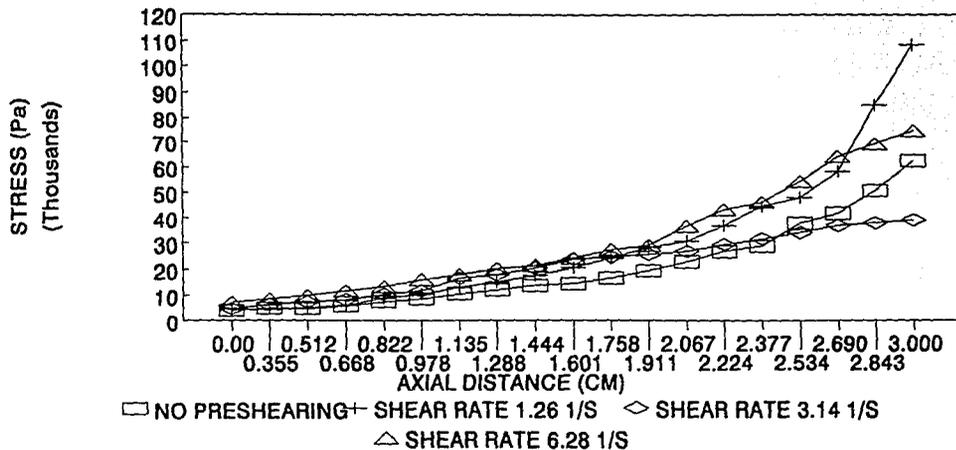
VELOCITY (CM/S) VS AXIAL DISTANCE (CM)



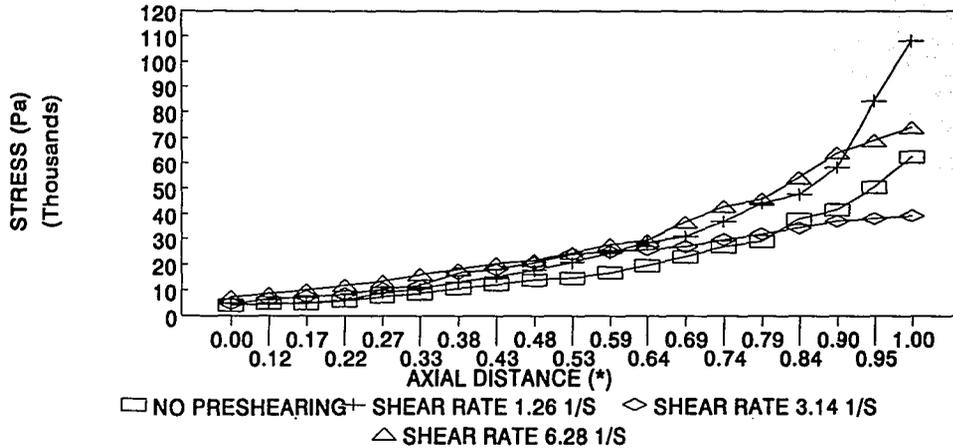
VELOCITY (\*) VS AXIAL DISTANCE (\*)



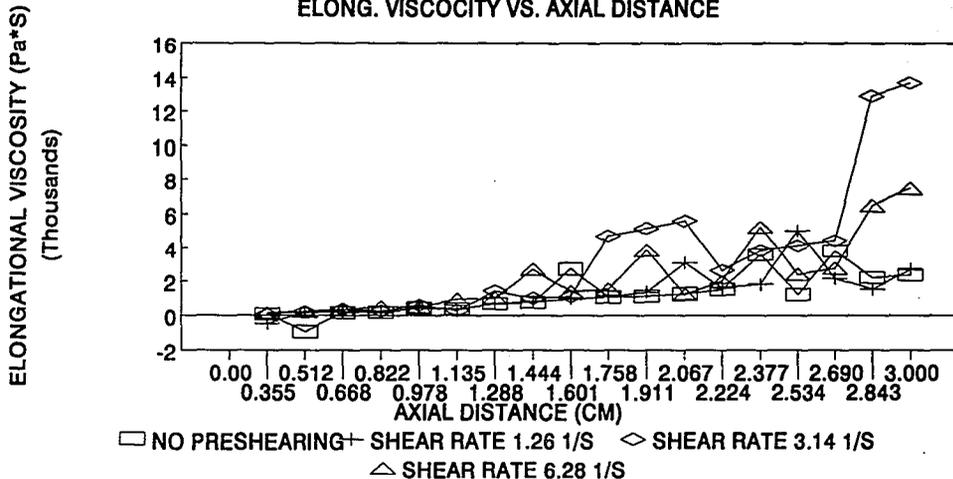
STRESS VS. AXIAL DISTANCE



STRESS VS. AXIAL DISTANCE

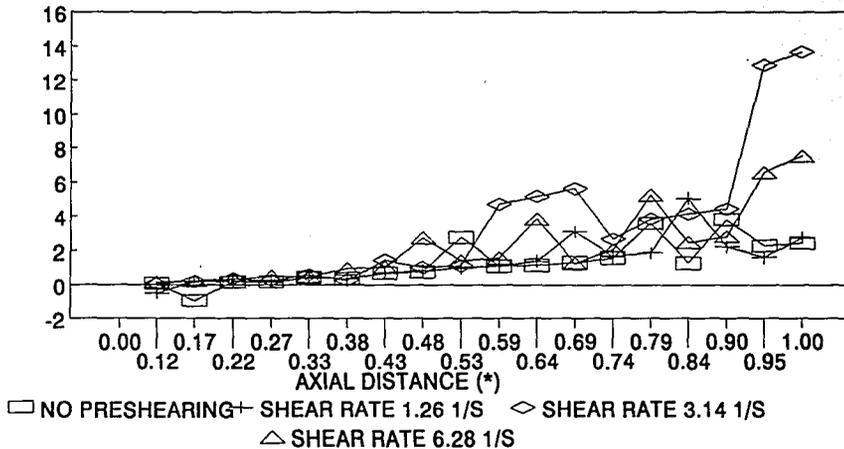


ELONG. VISCOCITY VS. AXIAL DISTANCE



ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa·S)  
(Thousands)

ELONG. VISCOCITY VS. AXIAL DISTANCE

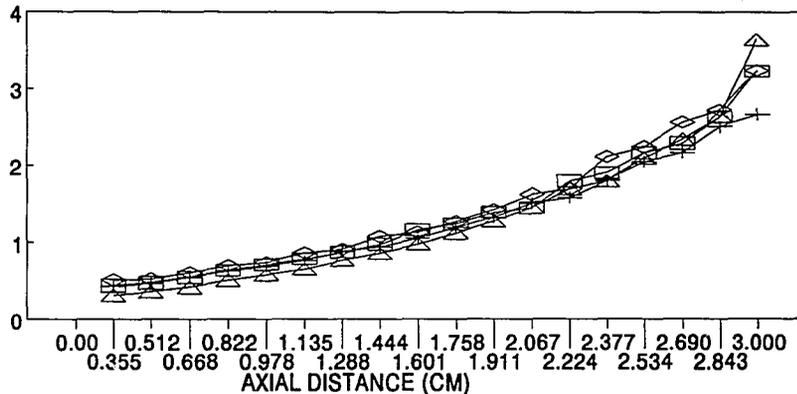


v. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 40$  ml/min, y rapidez de elongación promedio.

- Gráfica 33. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 34. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

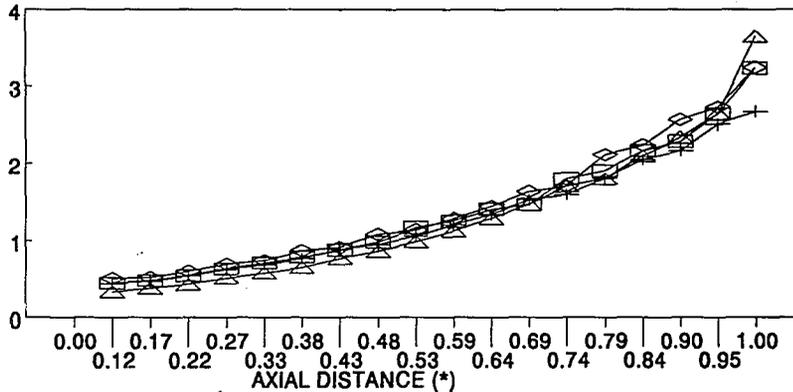
ELONG. VISCOSITY VS. AXIAL DISTANCE



□ NO PRESHEARING + SHEAR RATE 1.26 1/S    ◇ SHEAR RATE 3.14 1/S  
△ SHEAR RATE 6.28 1/S

ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

ELONG. VISCOSITY VS. AXIAL DISTANCE



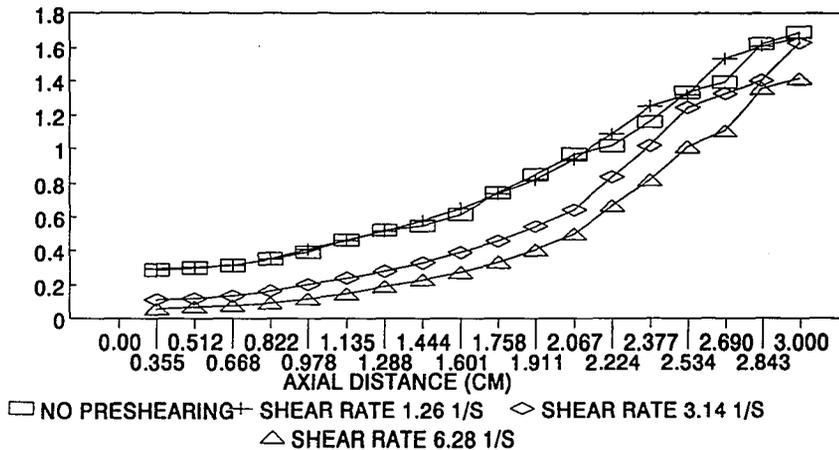
□ NO PRESHEARING + SHEAR RATE 1.26 1/S    ◇ SHEAR RATE 3.14 1/S  
△ SHEAR RATE 6.28 1/S

vi. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 60$  ml/min, y rapidex de elongación promedio.

- Gráfica 35. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 36. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

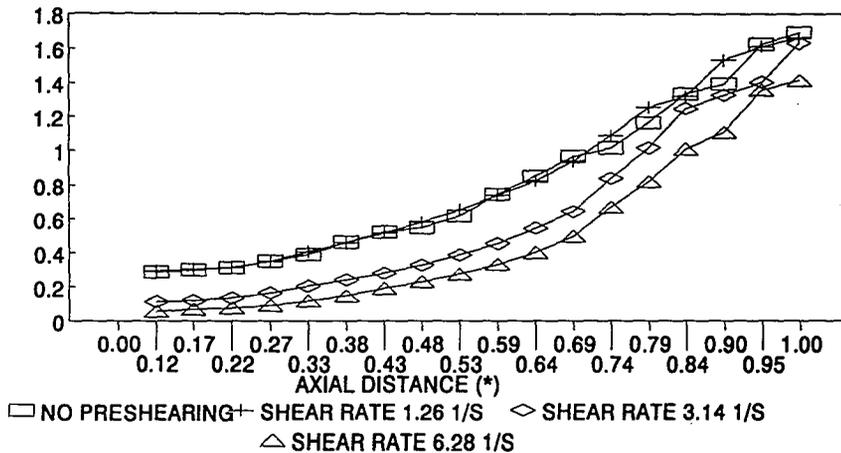
ELONG. VISCOSITY VS. AXIAL DISTANCE

ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)



ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

ELONG. VISCOCITY VS. AXIAL DISTANCE

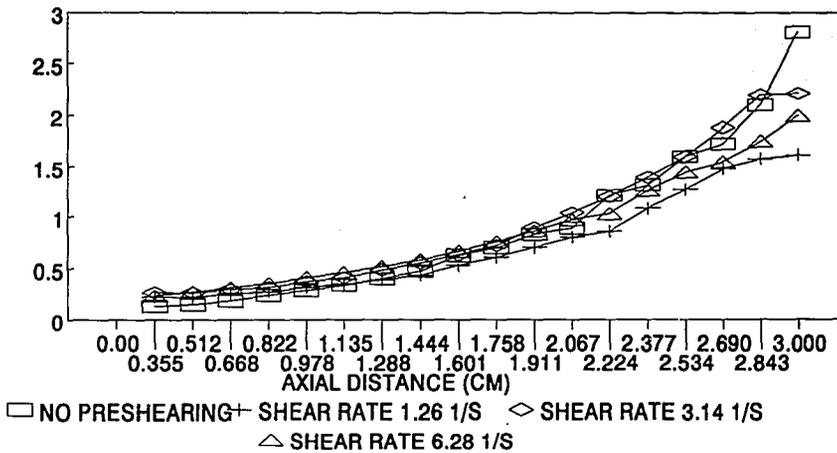


**vii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 80$  ml/min, y rapidez de elongación promedio.**

- Gráfica 37. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 38. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

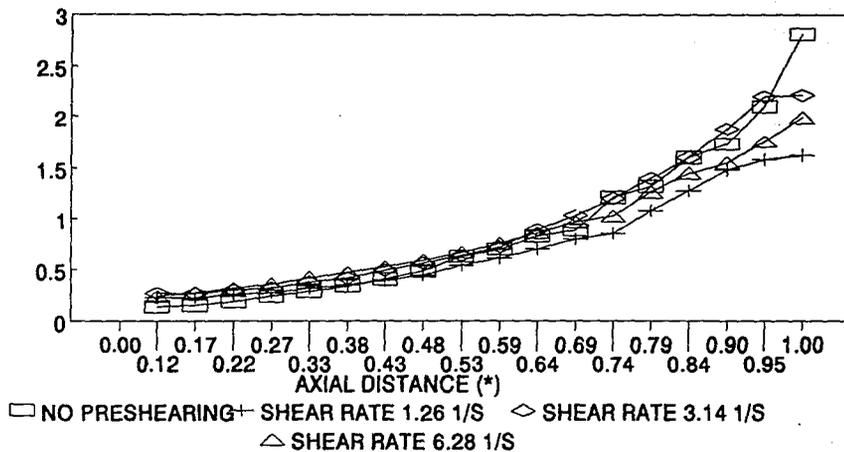
ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa·S)  
(Thousands)

ELONG. VISCOCITY VS. AXIAL DISTANCE



ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

ELONG. VISCOSITY VS. AXIAL DISTANCE

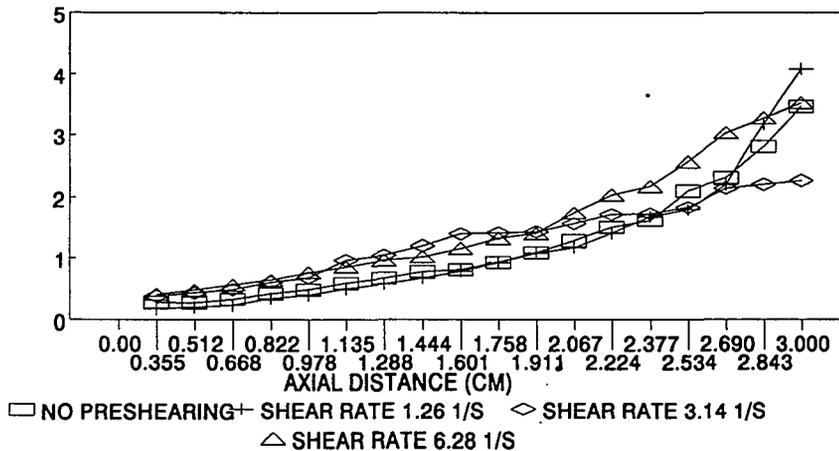


viii. Resultados para poliacrilamida al 0.5 % con gasto  $Q = 100$  ml/min, y rapidez de elongación promedio.

- Gráfica 39. Viscosidad elongacional vs. distancia axial.
- Gráfica 40. Viscosidad elongacional vs. distancia axial adimensional.

ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

### ELONG. VISCOSITY VS. AXIAL DISTANCE



ELONGATIONAL VISCOSITY (Pa\*s)  
(Thousands)

ELONG. VISCOSITY VS. AXIAL DISTANCE

