



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON

"ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO DE UN REÓMETRO ELONGACIONAL Y DE CORTE"

T E S I S P R O F E S I O N A L

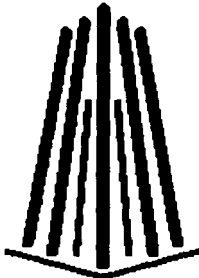
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO-ELECTRICISTA

PRESENTA:

ABRAHAM GALINDO QUEVEDO

E.N.E.P.



ARAGON

DIRECTOR DE TESIS: DRA. SARA RIOS DORDELLY

MÉXICO, D.F. 2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PAGINACION DISCONTINUA

DEDICATORIA:

A mis padres Lauro y Rosario, ya que con su apoyo e inagotable paciencia han hecho posible la conclusión de ésta etapa de mi vida y formación profesional, porque han sido y siempre serán parte de mi vida.

A. Galindo Quevedo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS:

A la Universidad Nacional Autónoma de México
A la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón
Al Instituto de Investigaciones en Materiales

A la Dra. Sara Ríos D., Jorge Díaz S., Enrique Soto, Fausto Calderas,
Cristina González y Walter Kemper

Al Dr. B. Mena I. Por el apoyo brindado en la obtención de las becas de
PROBETEL y Conacyt (Proyecto NC-204)

Y al cuerpo técnico del IIM

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una mención para todo el personal de la ENEP Aragón:

A los chacaes: C. Gutiérrez T. , J.L. Corona P., J. Peña P., M. Delgado C., J.L. Calva² , R. Torres M., J. Castañeda D., L. Benítez B., D. Hernández Coca.

A los más arrugados: J.M. Jiménez, Libo, Elio Chavez, Hugo (!!escúchame!!.)

A los Rapaces: D. Roques, Vega Aldama, Romárico

A los maestrines: Miguel (¿que pasó con los de birra?), Héctor, Salvador y el Zor

Palancares, Milton , J.C. Núñez Cuéllar, al Bombas, el Reno, Krilin, y a mi valedor Oved (que se le queda viendo bien acá a las viejas)

Macoí, Wicho ,A. Balderas, Gabriela, Riki, Mauricio , Jazmín, Doggi, Chelo, Pony, Wicho Dominguez, Ponce, Wong, Elías, chore, chak, al Panchito, Francisco (nomo), Souza, hermisillo

A los tamagochis: Mario, Miguel y Uriel

y a todos los que me faltó nombrar.....

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE

	Página
CONTENIDO	
INDICE	I
INDICE DE FIGURAS	IV
RESUMEN.	VI
INTRODUCCIÓN.	1
Objetivos.	1
<u>CAPÍTULO 1.</u>	4
REVISIÓN DE LITERATURA.	
1.1. Reología.	4
1.2. Reometría.	5
1.3 Elementos básicos de una medición reológica	6
1.4 Clasificación de flujos elongacionales.	7
1.5 Métodos para generar un flujo elongacional Uniaxial en fluidos de baja viscosidad.	8
1.5.1. Enrollado de fibra.	8
1.5.2. Mediciones de fuerza.	11
1.6. Flujos cortantes.	14
1.6.1. Flujo cortante simple.	14
1.7 Geometrías para flujos cortantes.	15
1.7.1 Cono y plato.	16
1.7.2. Discos paralelos.	16
1.7.3. Cilindros concéntricos.	17

1.8	Evaluación de equipos.	21
1.8.1	Inspección mecánica.	21
1.8.2	Diagnóstico.	21
1.8.3	Desarrollo de pruebas.	22

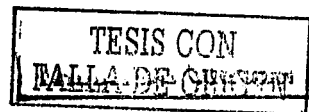
CAPÍTULO 2.

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DEL REOMETRO.		23
2.1.	Sección de elongación.	25
2.2.	Sección de corte.	26
2.3.	Sistema de alimentación.	27
2.4.	Sistema de succión.	28
2.5.	Motorreductor.	30
2.6.	Instrumentación electrónica.	30
2.6.1.	Adquisición de imágenes.	30
2.6.2.	Adquisición de datos.	32
2.6.3.	Control de flujo de agua.	34

CAPÍTULO 3.

DESARROLLO DE PRUEBAS EN EL PROTOTIPO DEL REÓMETRO ELONGACIONAL.		
3.1	Estudio de la sección de corte del reómetro.	35
3.1.1	Pruebas sin paso de fluido.	36
3.1.2	Pruebas con paso de fluido.	40
3.1.3	Determinación del esfuerzo de elongación en la sección de corte.	41
3.2	Sección de elongación.	45
3.2.1	Desalineación de los orificios de entrada y salida del fluido.	45
3.2.2	Orificio de salida.	49
3.2.3	Iluminación del filamento.	49

3.3	Sistema de alimentación.	50
3.4	Sistema de succión.	54
3.4.1	Prueba del sistema de succión.	54
3.4.2	Cámara de succión.	55
3.5	Soporte de la cámara.	58
<u>CAPÍTULO 4.</u>		
ARRANQUE DEL REÓMETRO.		60
4.1	Experimento	60
4.2	Materiales	60
4.3	Metodología	61
4.4	Cálculos.	62
<u>CAPITULO 5.</u>		
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.		64
5.1	Fluido Newtoniano (glicerina)	64
5.2	Fluido-No Newtoniano (separán AP30).	71
Conclusiones		76
REFERENCIAS.		77
GLOSARIO		79
APÉNDICE A		80
APÉNDICE B		81
APÉNDICE C		82



INDICE DE FIGURAS

FIG.	Pág.
1. Tipos de flujo elongacional.	8
2. Diagrama de la técnica de enrollado de fibra.	9
3. Esquema del arreglo de Weinberger para medir fuerza.	11
4. Diagrama esquemático del arreglo de Sridhar y Gupta.	12
5. Flujo cortante simple.	14
6. Geometrías para flujos cortantes.	15
7. Geometría de cilindros concéntricos.	17
8. Esquema del reómetro elongacional y de corte.	23
9. Sección de elongación.	25
10. Sección de corte.	26
11. Sistema de alimentación.	28
12. Diagrama del sistema de succión.	29
13. Fotografía del filamento de prueba.	31
14. Diagrama de bloques para la adquisición de datos.	32
15. Panel de control.	33
16. Panel de control de flujo de agua.	34
17. Variación de la presión cuando el cilindro interior del reómetro se hacía girar a bajas velocidades angulares (2 y 5 r.p.m.)	37
18. Variación de las señales de presión cuando el cilindro interior giraba a 12,30 y 60 r.p.m.	38
19. Influencia de burbujas sobre la cara del transductor T1.	39
20. Descenso en la presión debido al desprendimiento de burbujas de la cara del transductor T1.	40
21. Disminución de la presión en la sección de corte con la velocidad angular, flujo 40 ml/min.	41
22. Medición del esfuerzo de elongación, distancia entre orificios 1.5 cm.	42
23. Medición del esfuerzo de elongación, distancia entre orificios 2 cm.	43
24. Medición del esfuerzo de elongación a diversas velocidades angulares, distancia entre orificios 1.5 cm.	44

25. Medición del esfuerzo de elongación a diversas velocidades angulares, distancia entre orificios 2 cm.	45
26. Inclinación del filamento de prueba debido al torque generado en el cilindro exterior.	46
27. Posición de la barra de torsión	47
28. Sujetador.	48
29. Modificación del barreno de salida.	49
30. Iluminación del filamento	50
31. Gráfica de flujo vs. tiempo con control manual.	52
32. Gráfica de presión vs. Tiempo con control manual.	52
33. Gráfica de flujo vs. tiempo con control automático.	53
34. Gráfica de presión vs. Tiempo con control automático.	53
35. Vacío alcanzado con las diferentes tapas.	54
36. Diseño original de la cámara de succión	56
37. Nueva cámara de succión.	57
38. Posición original de la cámara	58
39. Soporte móvil.	59
40. Diámetro vs. Distancia axial, glicerina.	64
41. Velocidad vs. Distancia axial, glicerina	66
42. Rapidez de extensión vs. Distancia axial, glicerina	67
43. Esfuerzo vs. Distancia axial, glicerina	68
44. Relación de Trouton vs. Rapidez de extensión, glicerina.	69
45. Esfuerzo-deformación, glicerina.	70
46. Diámetro vs. Distancia axial, separán 0.5%.	71
47. Velocidad vs. Distancia axial, separán 0.5%	72
48. Rapidez de extensión vs. Distancia axial, separán 0.5%	73
49. Esfuerzo vs. distancia axial, separán 0.5% .	74
50. Viscosidad vs. Rapidez de extensión, separán 0.5%.	75

RESUMEN.

Se presenta el estudio de un aparato desarrollado en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM capaz de medir viscosidad elongacional de fluidos Newtonianos y No-Newtonianos. Se hace la descripción y un estudio de la parte mecánica del prototipo así como el análisis de los resultados obtenidos con los fluidos de prueba. También se hacen algunas recomendaciones que permitirán mejorar el desempeño del aparato y así pensar en un nuevo diseño desde el punto de vista mecánico.

INTRODUCCIÓN

Desde 1996 en el Laboratorio de Reología del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM se ha venido desarrollando el prototipo de un nuevo reómetro cuyo diseño se planteó para poder obtener viscosidades extensionales afectadas por una historia de corte en fluidos Newtonianos y No-Newtonianos. Estas propiedades son difíciles de medir, por lo que su determinación representa un reto para cualquier reólogo. Se sabe que el diseño del reómetro presentaba algunas fallas, ya que los datos que se obtenían no resultaban congruentes con la teoría. Por lo que se procedió a estudiar con profundidad su comportamiento para decidir si se debía modificar el diseño o la metodología de operación con el fin de obtener datos confiables.

Para el desarrollo de este nuevo proyecto de investigación se formó un equipo multidisciplinario que incluye ingenieros mecánicos, químicos y electrónicos. Siendo los primeros los encargados de realizar el estudio del comportamiento mecánico del reómetro y proponer las modificaciones pertinentes. Esta parte del proyecto es muy importante ya que de su resultado depende el trabajo de los otros integrantes del equipo.

Objetivos

El objetivo principal de esta tesis fue estudiar el comportamiento del prototipo del nuevo reómetro elongacional para determinar si su condición y diseño podrían proporcionar la información esperada durante los experimentos con los fluidos de prueba.

El segundo objetivo se llevará a cabo solamente en caso de encontrar fallas de diseño o de operación. De ser así, se propondrían modificaciones con el fin de hacer más eficiente el equipo tanto en su operación como en su rendimiento.

El tercer objetivo fue apoyar en el desarrollo de la implementación electrónica del equipo con los conocimientos necesarios sobre la parte mecánica del reómetro.

El último objetivo sería desarrollar la metodología experimental para la obtención de los datos reales buscados en la investigación, siempre y cuando se lograra hacer funcionar el equipo correctamente.

El uso de reómetros en la industria y en la investigación es muy amplio por lo que el personal encargado de manejarlos debe tener un conocimiento básico de la teoría en la cual se basan estos aparatos. En el capítulo 1 de esta tesis se menciona la importancia y aplicación de la reología como la ciencia que estudia el flujo y la deformación de fluidos para los cuales no se conoce una relación constitutiva. Se incluye una clasificación de los flujos extensionales y de las técnicas que se utilizan para determinar la viscosidad elongacional y se presentan algunas de las geometrías más importantes que se utilizan para generar deformaciones por corte. También se puntualizan los aspectos más importantes en la evaluación de equipos que establecen las condiciones para poder diagnosticar y corregir las fallas de diseño que pudieran impedir el buen desempeño éstos. Estos conceptos se utilizaron durante el desarrollo del proyecto de investigación que dio lugar a esta tesis.

En el capítulo 2 se hace la descripción del prototipo del reómetro elongacional y de corte. Se mencionan los sistemas que lo componen y el funcionamiento de cada uno.

En el capítulo 3 se describen las pruebas hechas a los sistemas del reómetro las cuales permitieron ver qué partes del equipo podrían ser mejorados mediante modificaciones al diseño y cuales tan solo requerían un mejor

método de operación poder obtener mediciones confiables durante los experimentos.

El capítulo 4 presenta la metodología desarrollada y utilizada durante los experimentos de la investigación.

El capítulo 5 muestra los resultados obtenidos de los experimentos realizados con los fluidos de prueba validando con éstos las mejoras realizadas al reómetro y la metodología de operación desarrollada.

CAPÍTULO 1.

REVISION DE LITERATURA

El interés de estudiar las propiedades extensionales de soluciones diluidas es de gran importancia debido a sus diversas aplicaciones ¹⁻⁵, por lo tanto hay una necesidad de desarrollar aparatos capaces de proveer mediciones de viscosidad elongacional bajo un flujo extensional cuasi-estático, ya que una deformación extensional pura es muy difícil de lograr.

Mientras que grandes avances se han hecho en el desarrollo de reómetros extensionales para soluciones concentradas, el progreso para soluciones diluidas ha sido relativamente lento. Recientemente se han propuesto algunos diseños que parecen abordar con éxito el problema ⁶⁻⁸. En cualquier caso imponer una rapidez de extensión constante en soluciones diluidas es una tarea que aun no tiene solución.

1.1. REOLOGÍA.

La reología es la ciencia que se enfoca al estudio de la respuesta interna de los materiales a esfuerzos aplicados ⁹. A principios del siglo XX, la reología incluía todo lo referente al comportamiento de los fluidos: aeronáutica, hidráulica, dinámica de fluidos y también mecánica de sólidos ¹⁰. Sin embargo debido al desarrollo de la industria química en los últimos años, este campo se ha dirigido principalmente al estudio del flujo de materiales complejos tales como polímeros, sistemas biológicos, pastas, suspensiones, emulsiones, alimentos y otros compuestos. La relación entre esfuerzos y deformación para este tipo de materiales difiere de la ley de la viscosidad de Newton la cual establece que el esfuerzo aplicado a un fluido es proporcional a la rapidez con la cual se está deformando, la constante de proporcionalidad es la viscosidad que caracteriza al fluido. Los fluidos que obedecen esta ley se les conoce como fluidos Newtonianos.

Algunos de los materiales complejos mencionados anteriormente se pueden encontrar en estado sólido y tampoco obedecen la ley de Hooke de la elasticidad, la cual establece que el esfuerzo es proporcional a la deformación, la constante de proporcionalidad se conoce como módulo de elasticidad o módulo de Young¹¹.

Hoy en día, los científicos e ingenieros que tratan con este tipo de materiales complejos conocidos como fluidos no-Newtonianos deben entender su comportamiento haciendo uso de la reología, es por ello que es tan importante el estudio de esta disciplina.

Las investigaciones reológicas pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Descripción de fenómenos macroscópicos que ocurren durante la deformación de los materiales.
2. Explicación de estos fenómenos desde un nivel molecular.
3. Determinación experimental de constantes y funciones que caracterizan estos fenómenos.
4. Aplicación práctica de estos fenómenos.

De acuerdo con esta clasificación, la reología se divide en las siguientes ramas: reología fenomenológica, reología estructural, reometría y reología aplicada⁹. En este trabajo solo se tratarán algunos aspectos de la reometría por lo que no se tocarán ninguna de las otras ramas.

1.2. REOMETRÍA.

A la utilización de diferentes instrumentos y técnicas de medición para determinar funciones materiales se le llama reometría¹², de aquí surge la palabra "reómetro".

Un reómetro es un instrumento que impone un estado de deformación y mide los esfuerzos generados en un material para el cual no se conoce una

ecuación constitutiva, esta indica como se relacionan los esfuerzos y las deformaciones. Dichas mediciones se usan para encontrar funciones materiales tales como la viscosidad, diferencias de esfuerzos normales, módulo de relajación etc., las cuales se emplean para probar los modelos que tratan de describir el comportamiento real de dicho material bajo condiciones controladas de flujo ¹⁰.

Los reómetros han sido usados por muchos años para monitorear las características de un fluido mientras está siendo procesado. Los dispositivos simples como los sensores de temperatura y los transductores de presión que son ampliamente usados para medir las condiciones del proceso, no proveen ninguna información acerca de la composición o consistencia del material que está siendo procesado. Obviamente la disponibilidad de tal información sin la necesidad de sacar una muestra y llevarla al laboratorio es muy útil para el control de calidad.

En el procesamiento de una gran variedad de materiales que va desde plásticos a alimentos, de pinturas a soluciones minerales las propiedades reológicas están frecuentemente relacionadas a las características del material de interés, como lo es la composición, el peso molecular, grado de reacción o grado de mezcla.

Algunas veces como en el caso de aceites combustibles y el moldeado de plásticos la viscosidad es la característica de interés.

1.3 Elementos básicos de una medición reológica.

Las propiedades reológicas reflejan la relación entre la deformación de un material y la fuerza asociada con tal deformación. Por ejemplo, la fuerza requerida para estirar una banda de hule está gobernada por la rigidez o el módulo elástico del hule, que es una propiedad reológica. En el caso de un motor de aceite, la fuerza cortante que se genera en el pequeño espacio entre el cilindro y la pared del pistón está gobernada por la viscosidad del aceite, la cual es otra propiedad reológica.

Muchos materiales de importancia comercial tienen propiedades reológicas más complejas que las del hule o las de un fluido newtoniano, ejemplos de estos son los plásticos fundidos los cuales son materiales viscoelásticos, las suspensiones concentradas que pueden comportarse como sólidos a bajos esfuerzos, si se incrementa el esfuerzo aplicado entonces estos fluyen.

Claramente para aprender algo acerca de las propiedades reológicas de un material es necesario deformarlo de manera controlada y medir la fuerza necesaria para generar tal deformación, alternativamente la deformación requerida para generar una cierta fuerza podría ser medida. En cualquier caso esto requiere de un instrumento más elaborado que los requeridos para medir condiciones de proceso tales como temperatura y presión. Por lo tanto no puede haber una medición reológica si no hay una deformación, por esta razón el diseño de reómetros para ser usados como sensores de las propiedades de los materiales es un campo que puede ser ampliamente desarrollado.

Las deformaciones que se aplican a los materiales son por corte y por extensión, para ello hay una gran diversidad de reómetros los cuales utilizan diferentes geometrías que se describirán posteriormente.

Con el fin de entender el objetivo para el cual está hecho un reómetro se hace un resumen de las características en las cuales se basan estos aparatos y las propiedades que se pretende medir con ellos.

1.4 CLASIFICACIÓN DE FLUJOS ELONGACIONALES

Para estudiar los flujos extensionales el material de prueba frecuentemente está libre de un contorno con el cual pueda interactuar. Para fines prácticos existen dos formas de flujo elongacional: uniaxial y biaxial .

En el *flujo uniaxial* (Fig. 1.a), el material se estira en una sola dirección y se puede observar un decremento de las dimensiones del material en las direcciones perpendiculares al flujo, por ejemplo cuando se toma una liga por sus extremos.

En el *flujo biaxial* (Fig. 2.b) el material se estira simultáneamente en dos direcciones ortogonales, por ejemplo una hoja de un material que se toma por sus cuatro extremos, en este flujo se puede observar un decremento en el espesor de la hoja, es decir en la dirección perpendicular al flujo ¹³.

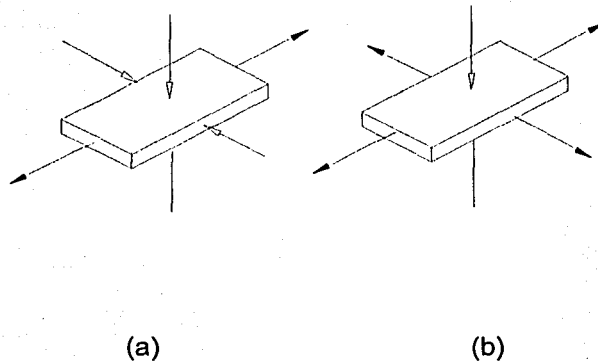


Fig. 1 Tipos de flujo elongacional. (a) uniaxial , (b) biaxial ¹³ .

1.5 MÉTODOS PARA GENERAR UN FLUJO ELONGACIONAL UNIAxIAL EN FLUIDOS DE BAJA VISCOSIDAD.

Las situaciones descritas en el punto anterior se pueden generar en materiales de muy alta viscosidad, en los cuales las deformaciones se pueden controlar, sin embargo, para fluidos de baja viscosidad esto es una tarea difícil de lograr debido a la naturaleza móvil de los fluidos, a continuación se describen algunas técnicas para generar lo mas aproximado posible un flujo elongacional uniaxial en fluidos de baja viscosidad.

1.5.1 Enrollado de fibra.

Un método muy usado para someter fluidos de baja viscosidad ($\eta < 10^3$ Pa·s) a un flujo elongacional uniaxial es la técnica de enrollado de fibra (fiber spinning). La Fig. 2 muestra las características básicas de este método.

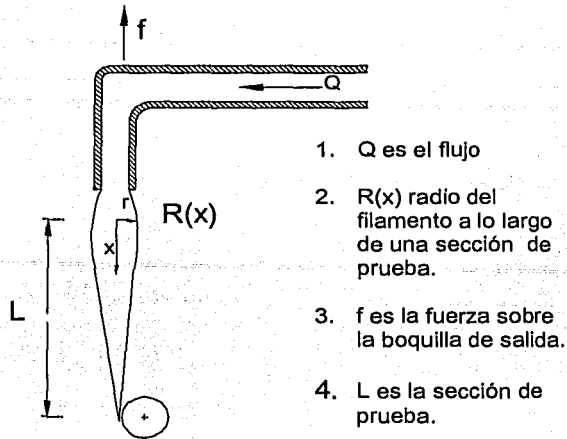


Fig. 2 Diagrama de la tecnica de enrollado de fibra ¹⁰.

El flujo en consideración es un filamento de sección transversal circular el cual varia sus dimensiones en la dirección del flujo, eje x (Fig. 2).

Para el análisis de este flujo se hacen las siguientes suposiciones:

1. El flujo es estable
2. La velocidad es uniforme a lo largo de la sección de prueba
3. El fluido es incompresible.

La muestra es extruida continuamente desde el tubo y estirada por un rodillo o por succión; la fuerza f sobre el tubo es medida frecuentemente usando una barra de torsión. El diámetro del filamento se mide como función de la distancia a lo largo de la sección de prueba, fotografiándolo o usando una cámara de video, por lo que el área de la sección transversal del filamento es también función de la distancia $A = A(x)$.

La rapidez de elongación se define como $\dot{\varepsilon} = \frac{dv}{dx}$, ésta se obtiene de las mediciones de flujo y del diámetro del filamento.

Si se asume que únicamente existe la componente de velocidad v_x y que es uniforme a lo largo de la sección de prueba, entonces el flujo está dado por $Q = V \cdot A$. El área de la sección transversal del filamento está en función del radio que varía a lo largo del filamento entonces el flujo está dado por:

$$Q = v_x \pi R^2 \quad (1)$$

Si el flujo es constante, de la definición de rapidez de elongación se tiene:

$$\dot{\varepsilon} \equiv \frac{dv_x}{dx} = \frac{Q}{\pi R^2 x} \quad (2)$$

en donde x es la distancia axial a lo largo del filamento.

La fuerza f medida en el filamento debida a la succión o al rodillo es la suma del esfuerzo elongacional y de los efectos de la gravedad, inercia y tensión superficial ¹⁴.

$$\frac{f}{\pi R^2} = (\tau_{xx} - \tau_{rr})_x + \frac{\rho g}{R^2} \int_0^x R^2 dx' - \rho v_x^2 + \frac{\Gamma}{R} \quad (3)$$

en donde, f es la fuerza medida en el filamento, Γ es la tensión superficial del fluido, ρ es la densidad del fluido, g la aceleración de la gravedad, R es el radio del filamento y v_x es la velocidad a lo largo del filamento.

Los términos de gravedad, inercia y tensión superficial pueden ser despreciados debido a que generalmente su valor es mucho menor al esfuerzo de tensión.

Entonces la ecuación (3) se reduce simplemente a:

$$\tau_{xx} - \tau_{rr} = \sigma_E = \frac{f}{\pi R_0^2} \quad (4)$$

La viscosidad elongacional se define como:

$$\eta_E = \frac{\tau_{xx} - \tau_{rr}}{\dot{\epsilon}} \quad (5)$$

Experimentalmente es bastante difícil medir el esfuerzo de tensión en el filamento, debido a que el fluido está en movimiento. A continuación se describen algunas técnicas utilizadas para medir la fuerza de tensión con la cual se obtiene el esfuerzo de extensión.

1.5.2 Medición de fuerza.

La fuerza f sobre la boquilla de salida (Fig. 2) se mide utilizando una barra de torsión, la cual permite una deflexión que se mide con ayuda de un transductor de desplazamiento, (Fig. 3)¹⁵.

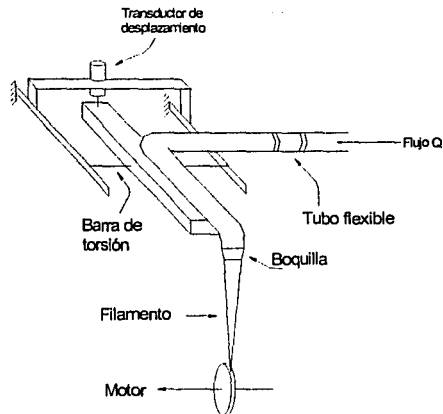


Fig. 3 Esquema del arreglo de Weinberger para medir fuerza¹⁵.

Otros investigadores han hecho algunas variantes de esta técnica de medición ¹⁶ las cuales permiten medir fuerzas tan pequeñas como 8×10^{-5} N que corresponden a un esfuerzo de tensión de aproximadamente 25 Pa. Entre estas variantes se encuentra el arreglo hecho por Sridhar y Gupta ⁶, en donde se mide directamente el esfuerzo de tensión en lugar de una fuerza. El fluido sale por un capilar (Fig. 4).

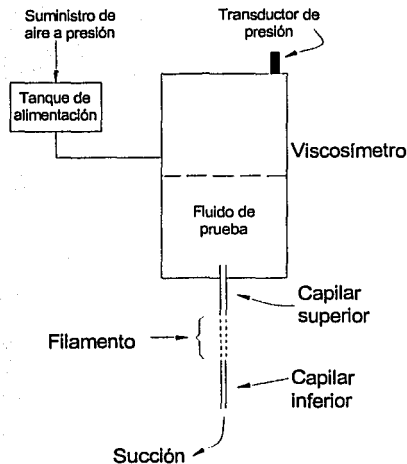


Fig. 4. Diagrama esquemático del arreglo de Sridhar y Gupta ⁶

El flujo en el sistema se controla con un tanque de alimentación el cual se presuriza con aire. El fluido de prueba va del tanque de alimentación al viscosímetro y sale de éste a través de un capilar. La variación de presión en el viscosímetro se mide usando un transductor que se ubica en la parte superior del tanque; el filamento que se forma a la salida del capilar se estira aplicando succión (generada por vacío) a través un segundo capilar de menor diámetro. La idea de Sridhar y Gupta se utilizó para medir el esfuerzo elongacional en el prototipo que se describe en esta tesis.

Para un fluido newtoniano, realizando un balance de momento lineal al rededor del capilar superior tenemos:

$$Q_0 = \frac{\pi d^4}{128\mu L} (P_0 + \rho g L) \quad (6)$$

$$Q_1 = \frac{\pi d^4}{128\mu L} (P_1 + T_1 + \rho g L) \quad (7)$$

en donde Q_0 y Q_1 es el flujo antes y después de aplicar succión al filamento, T_1 es el esfuerzo de tensión debido al estiramiento en el capilar de salida, P_0 y P_1 son las presiones en el viscosímetro antes y después de aplicar succión en el capilar inferior respectivamente, d es el diámetro del capilar, L es la longitud del capilar, μ es la viscosidad al corte del fluido y ρ es la densidad. Como Q_0 es igual a Q_1 se llega a:

$$T_1 = P_0 - P_1 \quad (8)$$

este resultado puede ser válido aún para fluidos no-Newtonianos.

La rapidez de elongación $\dot{\epsilon}$ se puede calcular con las mediciones del flujo y el diámetro del filamento:

$$\dot{\epsilon} = \frac{dv}{dx_1} \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{Q}{\pi R^2 x} \quad (10)$$

y la viscosidad elongacional se define como:

$$\eta_E = \frac{T_1}{\dot{\epsilon}} \quad (11)$$

1.6 FLUJOS CORTANTES.

1.6.1. Flujo cortante simple.

Considérese un fluido contenido entre dos placas paralelas, la placa superior se mueve con una velocidad constante v_0 , mientras que la inferior se mantiene fija, en la Fig. 5 se muestra el perfil de velocidades desarrollado para este tipo de flujo.

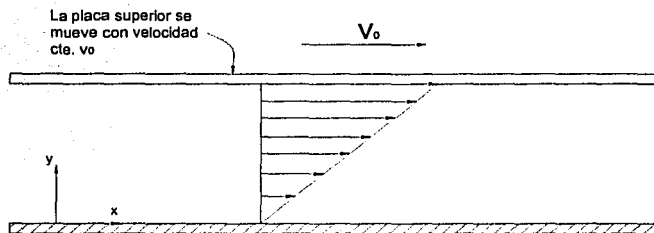


Fig. 5 Flujo cortante simple ¹⁷.

El perfil de velocidades en el espaciamento está dado por:

$$v_x = \dot{\gamma} y \quad v_y = 0 \quad v_z = 0 \quad (12)$$

Este flujo se conoce como flujo cortante simple y en donde $\dot{\gamma}$ es la rapidez de deformación, que es el cociente entre la velocidad de la placa superior y el espaciamento, por lo tanto:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_x}{y} \quad (13)$$

Cuando un fluido se somete a un flujo cortante simple son tres las propiedades que lo caracterizan completamente ¹⁷, estas dependen de la rapidez de deformación $\dot{\gamma}$

a) una función de esfuerzo σ :

$$\sigma(\dot{\gamma}) = \sigma_{xy} \quad (14)$$

b) la primera y segunda diferencia de esfuerzo, N_1 y N_2

$$N_1(\dot{\gamma}) = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \quad (15)$$

$$N_2(\dot{\gamma}) = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} \quad (15.1)$$

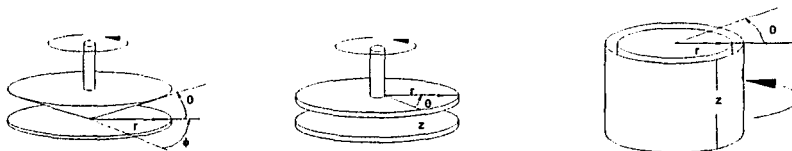
c) una función de viscosidad al corte, que se utiliza con mayor frecuencia que la función de esfuerzo:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \quad (16)$$

1.7 GEOMETRIAS PARA FLUJOS CORTANTES.

La reometría rotacional utiliza diversas geometrías para someter a fluidos complejos lo más aproximado posible a un flujo cortante simple, con el fin de medir las propiedades que se menciona en el punto anterior.

En la Fig. 6 se muestran las diferentes geometrías que se utilizan en la reometría rotacional y que sirven para generar deformaciones por corte.



(a) Cono y plato

(b) Discos paralelos

(c) Cilindros Concéntricos
(Flujo de Couette)

Fig.6 Geometrías para flujos cortantes ¹⁰.

1.7.1. Cono y plato.

En esta geometría (Fig. 6.a) la muestra se coloca entre el cono y el plato. El cono gira con una velocidad angular Ω constante mientras que el plato inferior se mantiene fijo. El ápice del cono está en contacto con el plato inferior aunque frecuentemente éste se trunca. El ángulo entre el cono y el plato inferior debe ser menor a 5 grados. La rapidez de deformación es uniforme.

Esta técnica es útil para medir las propiedades de polímeros fundidos. El esfuerzo cortante τ y la rapidez de deformación $\dot{\gamma}$ están en términos de torque y velocidad angular.

Para obtener datos confiables, la rapidez de deformación a la cual se somete el material se limita¹⁸ generalmente a 10 s^{-1} .

1.7.2. Discos paralelos.

Consiste de dos platos circulares que tienen las mismas dimensiones y que están separados una distancia h , Fig. 6(b), su funcionamiento es muy similar al de cono y plato, uno de los discos se mantiene fijo mientras que el otro gira con una velocidad angular Ω , el esfuerzo cortante τ y la rapidez de deformación $\dot{\gamma}$ están en términos de torque y velocidad angular. Para esta geometría la rapidez de deformación no es uniforme.

Las geometrías descritas anteriormente tienen la ventaja de que el volumen de la muestra requerida es pequeño (entre 0.2 y 5 ml). En ambas el material puede ser probado por un tiempo considerable. Sin embargo si la rapidez de deformación (que depende de la velocidad angular) es grande, se pueden generar variaciones de temperatura lo que puede afectar las propiedades del material¹⁹.

1.7.3. Cilindros concéntricos.

El prototipo que dio origen a este trabajo tiene una geometría de cilindros concéntricos por lo que se hace una descripción más detallada.

La geometría de cilindros concéntricos se aproxima con mayor precisión al flujo cortante simple descrito en punto 1.6.1. En este arreglo el fluido se almacena entre los dos cilindros, uno de los cuales se hace girar mientras que el segundo se mantiene fijo, Fig. 7.

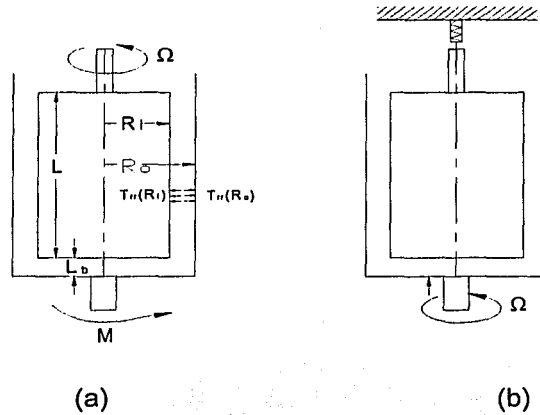


Fig. 7. Geometría de cilindros concéntricos ²⁰

En la Fig.7 (a), el cilindro interior gira a una velocidad angular definida, mientras que el cilindro exterior se mantiene estacionario. La rotación obliga al líquido a fluir en el espacio existente entre los cilindros, esto genera un torque sobre el cilindro exterior.

Este torque se puede medir con transductores colocados en una barra de torsión unida al cilindro exterior. La deflexión de la barra es una medición directa de la resistencia del fluido, es decir su viscosidad. Un sistema motor puede ser diseñado para producir diversas velocidades angulares, así se pueden hacer mediciones para diferentes velocidades angulares y por lo tanto a diferentes rapidezces de deformación ²⁰.

En el sistema de Couette, figura 7 (b), el cilindro exterior gira a una velocidad angular definida, el torque generado se transmite mediante el fluido al cilindro interior, el cual esta conectado a una barra de torsión. La deflexión en la barra puede ser medida con ayuda de un transductor electrónico.

Las ecuaciones de trabajo para esta geometría relacionan el esfuerzo cortante τ con la medición del torque, la rapidez de deformación $\dot{\gamma}$ con la velocidad angular y los coeficientes de esfuerzos normales con la diferencia de presión radial.

Considere el flujo de un fluido que está confinado entre cilindros concéntricos con una velocidad angular Ω del cilindro interior, Fig. 7 (a), si se asume:

1. Flujo laminar

1. $V_\theta = r \Omega$ únicamente y $V_r = V_z = 0$

entonces las ecuaciones de movimiento en coordenadas cilíndricas se reducen a:

$$-\rho \frac{V_\theta^2}{r} = \frac{1}{r} \frac{\partial(rT_{rr})}{\partial r} - \frac{T_{\theta\theta}}{r} \quad (17)$$

$$0 = \frac{\partial(r^2 \tau_{r\theta})}{\partial r} \quad (18)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (19)$$

La ecuación (17) proporciona el esfuerzo normal, la ecuación (18) el esfuerzo cortante y la ecuación (19) determina simplemente la presión hidrostática en el espaciamento entre los cilindros; las condiciones de contorno son:

$$V_0 = \Omega_i R_i \quad \text{en } r = R_i$$

$$V_0 = 0 \quad \text{en } r = R_o$$

La distribución del esfuerzo cortante en el espaciamento entre los cilindros se obtiene integrando la ecuación (18).

$$\tau_{\theta r} = \frac{c_1}{r^2} \quad (20)$$

donde la constante de integración c_1 puede encontrarse haciendo un balance de torque:

Si el torque se mide sobre el cilindro exterior, entonces tenemos:

$$\frac{M_o}{R_o} = \tau(2\pi R_o L), \quad \text{donde } M_o \text{ es el torque medido en el cilindro exterior} \quad (21)$$

despejando tenemos:

$$\tau = \frac{M_o}{2\pi R_o^2 L} \quad (22)$$

esta expresión nos proporciona el esfuerzo cortante aplicado al fluido.

La rapidez de deformación se define como $\dot{\gamma} = \frac{v_s}{y}$ que es el cociente entre la velocidad de la placa superior entre el espaciamento; para el caso de cilindros concéntricos se tiene:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta v}{\Delta r} = \frac{\Omega \bar{R}}{R_o - R_i} \quad (23)$$

En donde Ω es la velocidad angular \bar{R} es el punto medio entre los cilindros y $R_o - R_i$ es la distancia radial entre los cilindros:

$$\bar{R} = \frac{R_o + R_i}{2} \quad (24)$$

Conociendo el esfuerzo cortante aplicado sobre el fluido y la rapidez de deformación se puede determinar un valor de la viscosidad al corte.

Se debe señalar que para fluidos no-Newtonianos esta viscosidad es una función de la rapidez de deformación, así un material puede presentar valores distintos de viscosidad para diferentes rapidezces de deformación.

$$\eta_c(\dot{\gamma}) = \frac{\tau(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \quad (25)$$

1.8 EVALUACION DE EQUIPOS.

La importancia de la evaluación de equipos reside en poder diagnosticar y corregir a tiempo los errores o fallas de diseño que impiden el buen desempeño de éstas y que frecuentemente son causa de grandes pérdidas de tiempo y de dinero.

1.8.1 Inspección mecánica.

La inspección mecánica sirve para ver en que condiciones se encuentra el equipo al momento de comenzar con la evaluación o el diagnóstico. En la actualidad para prevenir problemas serios en sus máquinas, algunas industrias monitorean sus equipos con ayuda de nuevas tecnologías tales como computadoras industriales en líneas de producción o mediante sensores y controles, útiles para efectuar funciones simples tales como el registro de velocidad en ejes y engranes²³. Sin embargo cuando se quiere evaluar el prototipo de un equipo la situación cambia ya que en este caso lo que se debe hacer es pedir ayuda a expertos en diseño mecánico y electrónico que puedan detectar las fallas que el prototipo presente y de ser posible proponer soluciones alternativas.

1.8.2 Diagnóstico.

Los diagnósticos dentro de las industrias son de dos tipos: preventivos y correctivos. Los preventivos se llevan a cabo con el fin de alargar la vida de los equipos, son periódicos y pueden o no involucrar el cambio de partes, estos se llevan a cabo porque se sabe que alguna pieza o parte del equipo va a fallar en determinado tiempo. El correctivo se lleva a cabo en el momento en que una pieza falla.

Durante el análisis de equipos y maquinaria compleja es fácil perder de vista los verdaderos objetivos del diagnóstico. Frecuentemente las personas que están a cargo de estos estudios se ven envueltas en situaciones impredecibles que no tienen nada que ver con la evaluación real del equipo pero que deben ser atendidas ya que pueden ser las causantes de los

tiempos muertos de éstos. La primera acción que se debe llevar a cabo al analizar un equipo que involucra varias partes es elaborar un plan de trabajo donde se debe anotar las actividades a realizar durante la evaluación. Las actividades se deben jerarquizar, poniendo en primer lugar las que se consideren de mayor importancia, para que posteriormente se tomen decisiones enfocadas a acciones correctivas o preventivas.

1.8.3 Desarrollo de pruebas.

Cuando ya se ha detectado la parte del equipo que esta fallando, en el plan de trabajo se debe especificar con detalle el tipo de pruebas a que deberá someterse el equipo con el fin de determinar con exactitud el problema. De este modo se decidirá si hay que remplazar la pieza o si se puede reparar. Para el caso de los prototipos, se determinara si la falla es de diseño o de deterioro por utilización inadecuada del aparato. Los expertos que estén llevando a cabo la evaluación deben ser capaces de diseñar experimentos que servirán de pruebas para los equipos y de predecir los resultados que se obtendrán.

Las pruebas pueden incluir variaciones en las condiciones de operación, tales como presión o temperatura, variación de velocidad o cualquier otro parámetro que pueda ser alterado de manera controlada. También se pueden hacer cambios en los elementos físicos, como por ejemplo en el caso de elementos rotatorios realizando pruebas de alineación y balanceo.

En otros casos las pruebas se centran en la parte estructural de las maquinas, en soportes y carcasas de motores. Las pruebas se realizan generalmente para verificar el buen funcionamiento del equipo. Por ejemplo para probar que no existen problemas en los compresores, se pueden hacer cambios de presión para detectar fallas.

Finalmente se debe tener en cuenta que algunas pruebas ayudan a eliminar fallas potenciales y otras ayudan a identificarlas de manera precisa.

CAPÍTULO 2.

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DEL REOMETRO.

En este capítulo se hace la descripción de los elementos que componen el prototipo del reómetro elongacional y de corte con el fin de conocer su funcionamiento. La Fig. 8 muestra un esquema de todo el equipo, de ésta se observa que las partes que lo componen son: la sección de elongación, la sección de corte, el sistema de alimentación, el sistema de succión y la instrumentación electrónica.

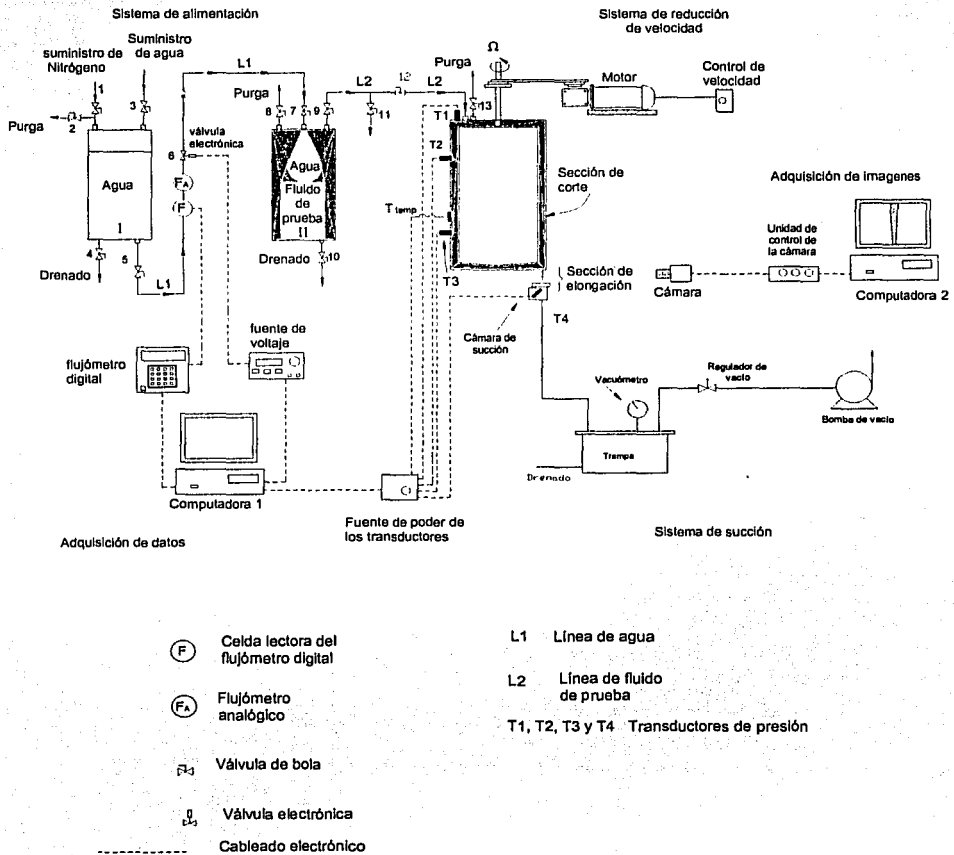


Fig. 8 Esquema del reómetro elongacional y de corte

El funcionamiento general de todo el equipo es el siguiente:

1. El agua que se encuentra en el cilindro I sale a través de la línea L1 y entra a un globo ubicado en la parte superior del cilindro II. El flujo de agua que entra al globo expulsa la misma cantidad del fluido de prueba, éste sale a través de la línea L2 y entra en la sección de corte por un orificio ubicado en su parte superior, posteriormente sale a través de un pequeño orificio que se ubica en la parte inferior.
2. La presión del fluido dentro de la sección de corte se monitorea con ayuda de tres transductores de presión que se localizan en el cilindro exterior. Las señales de los transductores son procesadas con ayuda de un programa diseñado especialmente para la adquisición de datos.
3. Una vez que el fluido sale de la sección de corte se genera una deformación extensional uniaxial con ayuda de un sistema de succión.
4. La imagen del filamento es captada con una cámara y se visualiza en el monitor de la computadora. Este sistema de adquisición de imágenes cuenta con un programa especial que mide el diámetro del filamento a lo largo de una sección de prueba.
5. Con ayuda de un sistema reductor de velocidad se hace girar el cilindro interior de la sección de corte generando una rapidez de deformación en el fluido.

A continuación se describe con mas detalle cada uno de los sistemas que componen el reómetro.

2.1. SECCIÓN DE ELONGACIÓN.

En esta sección es donde se forma el filamento del fluido de prueba. Se localiza entre la parte inferior de la sección de corte y la cámara de succión (Fig. 9).

En la tapa inferior de la sección de corte justo a la mitad del espacio que queda entre los cilindros concéntricos hay un barreno de 2.7 mm de diámetro sobre el cual se coloca una pequeña lámina redonda de acero inoxidable conocida como "pinhole", esta tiene un espesor de 0.013 mm y un orificio en el centro de 1 mm de diámetro hecho con rayo láser. Este orificio está concéntrico con respecto al barreno de salida y tiene la función de controlar el diámetro del filamento de prueba así como evitar que el fluido roce con las paredes del barreno.

El orificio de salida está alineado con un segundo orificio ubicado en la tapa superior de la cámara de succión. La deformación por extensión se forma entre estos dos orificios.

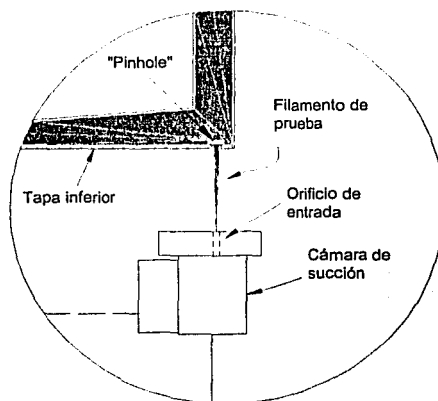


Fig. 9 Sección de elongación.

2.2. SECCIÓN DE CORTE.

En esta sección el fluido de prueba se somete a una deformación cortante de manera controlada.

La sección de corte del reómetro está compuesta de dos cilindros concéntricos de alta precisión, unidos mediante tapas de aluminio. El cilindro interior puede girar mientras que el exterior se mantiene fijo. El espacio entre estos cilindros es de 10 mm, en este se almacena el fluido de prueba.

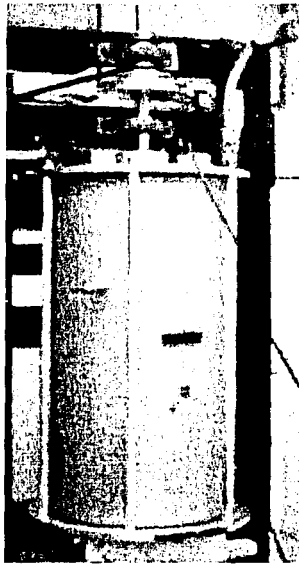


Fig. 10 Sección de corte

El cilindro interior que está fabricado en aluminio, tiene 280 mm de diámetro y 570 mm de altura, éste puede girar a diversas velocidades angulares con ayuda de un sistema reductor de velocidad (Fig. 8). El cilindro exterior que es de acrílico tiene un diámetro interior de 300 mm y una altura de 600 mm.

Las dimensiones de los cilindros se determinaron para asegurar un tiempo largo de permanencia del fluido de prueba dentro de la sección de corte, con esto se logra disminuir el flujo helicoidal en una gran proporción cuando el cilindro interior esta girando. El cilindro exterior tiene la finalidad de mantener la separación y el paralelismo entre las tapas, sirve también como referencia para mantener la concentricidad con el cilindro interior y permite la visibilidad del fluido. Esta sección se diseñó para soportar una presión interna de hasta 2.5×10^5 Pa.

La rapidez de deformación cortante $\dot{\gamma}$ en el espacio entre los cilindros se considera constante debido a que este espacio es muy pequeño en comparación con el radio del cilindro interior.

Para medir las variaciones de presión del fluido de prueba, dentro del reómetro, se instalaron tres transductores de presión marca Druck™ de 200 mbars, dos en el cilindro exterior y uno en la tapa superior.

2.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.

El sistema de alimentación fue diseñado para proveer un gasto constante del fluido de prueba al reómetro (entre 20 y 40 ml/min).

El sistema está compuesto de dos recipientes cilíndricos de acrílico cerrados en sus extremos con tapas de aluminio. Están conectados entre sí mediante válvulas de esfera y manguera, la distribución de las válvulas puede verse en la Fig.11. Estos cilindros se montan sobre una estructura metálica diseñada especialmente para éste propósito (apéndice A).

En el cilindro I se almacena agua hasta $\frac{3}{4}$ partes de su capacidad, mientras que en el espacio restante se presuriza con nitrógeno hasta 40 psi. ²

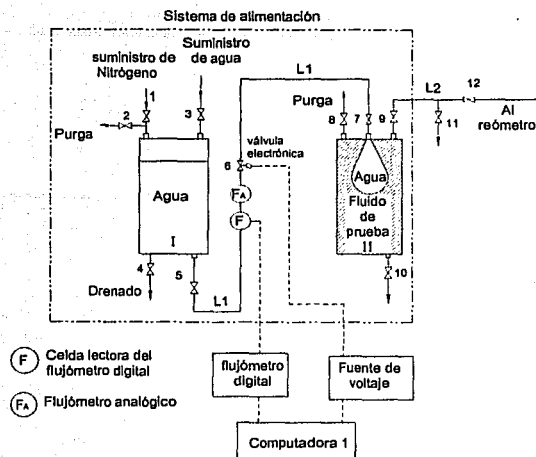


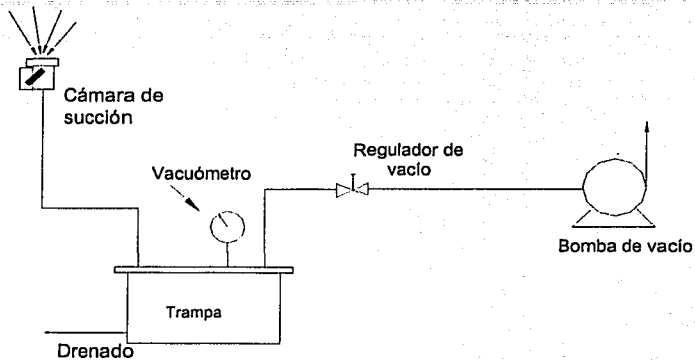
Fig. 11 Sistema de alimentación

En el cilindro II se almacena el fluido de prueba que será enviado al reómetro. La presión del nitrógeno en el cilindro I obliga al agua a pasar por la línea de alimentación L1 y entrar al globo ubicado en la tapa superior del cilindro II ; el volumen de agua que entra al globo desplaza el mismo volumen de fluido de prueba debido al principio de conservación de la masa, de esta manera el globo funciona como una bomba que desplaza el fluido de prueba del cilindro II y lo introduce en el reómetro a través de la línea de alimentación L2.

2.4. SISTEMA DE SUCCIÓN.

La finalidad de este sistema es proveer la succión necesaria para aplicar un esfuerzo de elongación al filamento del fluido de prueba.

El sistema de succión está formado por una bomba de vacío Welch modelo 1402, una trampa para recolectar el fluido, fabricada en acero inoxidable con una capacidad de 15 litros, un regulador de vacío, un vacuómetro y una cámara de succión fabricada en acrílico.



Sistema de succión

Fig. 12 Diagrama del sistema de succión.

Al encender la bomba, ésta extrae el aire que se encuentra en la trampa y en la cámara de succión, por lo tanto debido a una diferencia de presiones se provoca una entrada de aire a través de un pequeño orificio, ubicado en la tapa superior de la cámara de succión, el fluido de prueba entra por este orificio e incide sobre la cara de un transductor de presión; posteriormente pasa a una trampa en donde se almacena.

La cantidad de aire que entra al sistema se puede controlar con un regulador que se encuentra entre la bomba y la trampa. Con un vacuómetro se sabe la cantidad de vacío que se genera en la trampa.

2.5. MOTORREDUCTOR.

El motorreductor tiene como finalidad proporcionar las diferentes velocidades angulares al cilindro interior.

Este sistema consiste en un motor Electrol de CD de 1 HP a 1725 r.p.m. el cual tiene un control que permite variar la velocidad de giro del motor, un reductor de velocidad Electrol con una razón de reducción de 60:1, y un sistema de poleas con una relación de velocidad de 3:1. (Fig. 8.).

El sistema proporciona una velocidad angular al cilindro interior de 2 r.p.m. como mínimo y 78 r.p.m. como máximo. Este motorreductor se monta en una estructura diseñada especialmente para este caso (apéndice B).

2.6. INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA.

La instrumentación electrónica puede dividirse en: un sistema de adquisición de imágenes para determinar la variación en el diámetro del filamento, un módulo de medición y adquisición de datos de las variables de importancia como lo es la presión del fluido dentro de los cilindros concéntricos y un control de flujo de agua.

2.6.1 Adquisición de imágenes.

El módulo de visualización y de medición del diámetro del filamento consiste en una cámara digital Kodak™ Megaplug CCD de alta resolución compatible con una computadora IBM™.

La cámara fotografía y digitaliza la imagen del filamento, ésta se transfiere de la cámara a la memoria Ram de la computadora. Entonces un software que hace posible el procesamiento de la imagen localiza las orillas del filamento y mide la distancia entre ellas. Se pueden medir hasta noventa y nueve datos a lo largo del filamento.

Mediante un procedimiento de calibración previo, el software "image program" de OMEGATEK convierte la distancia entre las orillas de pixeles a centímetros. Los datos son almacenados automáticamente en un archivo del disco duro para posteriormente procesarlos.

La imagen del filamento se visualiza en el monitor de la computadora, con el fin de observar la calidad de la fotografía y determinar si es adecuada o es necesario realizar otra toma.

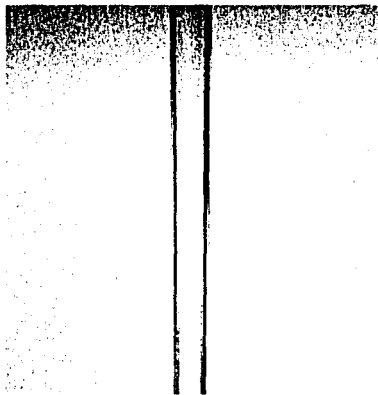


Fig.13 Fotografía del filamento de prueba

La tabla 1 muestra 20 puntos tomados de la sección de prueba. La columna "Y" proporciona la distancia entre cada punto tomado por la cámara y la columna "Width" proporciona el valor del diámetro del filamento en centímetros.

0	Y = 0.0271, Width = 0.1067
1	Y = 0.0542, Width = 0.1065
2	Y = 0.0813, Width = 0.1064
3	Y = 0.1084, Width = 0.1063
4	Y = 0.1355, Width = 0.1066
5	Y = 0.1599, Width = 0.1063
6	Y = 0.1869, Width = 0.1079
7	Y = 0.2140, Width = 0.1060
8	Y = 0.2411, Width = 0.1058
9	Y = 0.2682, Width = 0.1058
10	Y = 0.2953, Width = 0.1057
11	Y = 0.3224, Width = 0.1055
12	Y = 0.3495, Width = 0.1058
13	Y = 0.3766, Width = 0.1055
14	Y = 0.4037, Width = 0.1038
15	Y = 0.4281, Width = 0.1054
16	Y = 0.4552, Width = 0.1053
17	Y = 0.4823, Width = 0.1037
18	Y = 0.5094, Width = 0.1037
19	Y = 0.5365, Width = 0.1035

Tabla 1. Medición del diámetro del filamento

2.6.2. Adquisición de datos.

La Fig. 14 muestra un diagrama de bloques para la adquisición de datos.

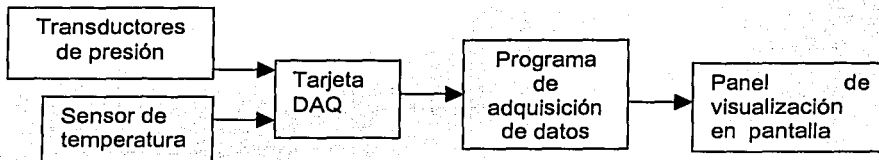


Fig. 14 Diagrama de bloques para la adquisición de datos.

La parte principal del módulo de adquisición de datos que consiste en una tarjeta DAQ, una computadora personal y un programa especialmente diseñado para este propósito.

El DAQ es una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments (Austin Texas). La tarjeta es del tipo multi-canal, uno de los canales se programó para captar la señal de los transductores de presión, otro canal se usó para captar la señal de un sensor de temperatura.

El programa de adquisición de datos es un programa desarrollado en LabVIEW que es un paquete de National Instruments (Austin Texas). El software desarrollado permite el acondicionamiento, despliegue y almacenamiento de la señal de voltaje generada por los transductores.

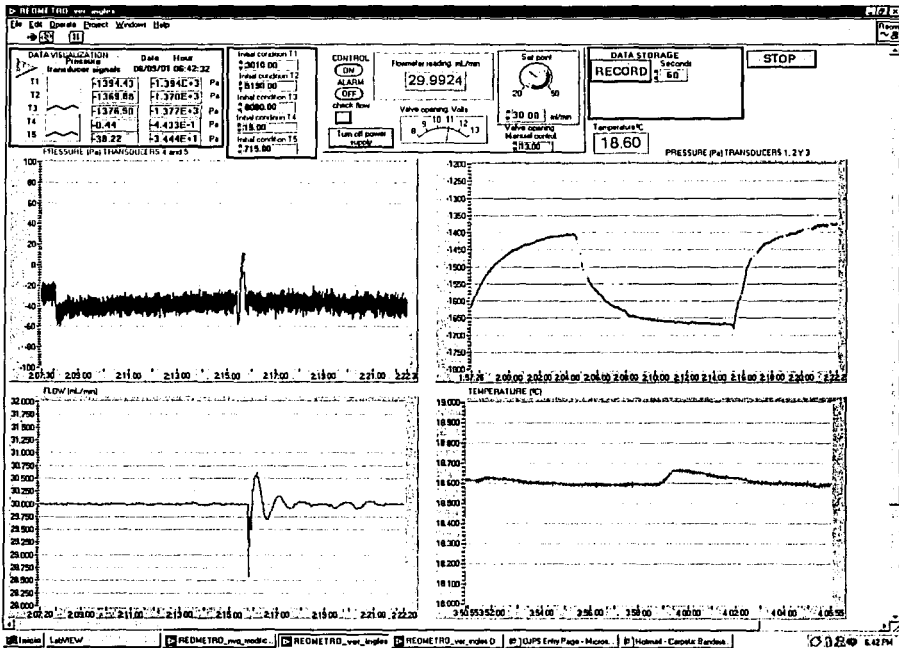


Fig. 15 Panel de control

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

La computadora personal se usa como panel frontal del modulo de adquisición de datos. Este panel (Fig. 15) despliega las gráficas en tiempo real y los valores numéricos instantáneos de los parámetros de operación.

2.6.3. Control de flujo de agua.

Para medir y controlar el gasto de agua que entra al globo, sobre la línea de alimentación L1 (Fig. 11) se instalaron dos flujómetros, uno digital y uno analógico. El gasto de agua se regula mediante un sistema de control, el cual está formado con un flujómetro digital, una válvula proporcional de solenoide, una fuente de voltaje y un programa de control que se ejecuta simultáneamente con el programa de adquisición de datos.

El flujo de agua que pasa a través de la línea L1 se mide con el flujómetro digital, la lectura que se registra se envía a la computadora y se visualizan en el panel de control del programa Fig. 16.

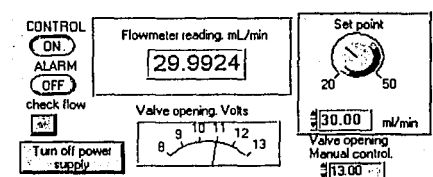


Fig. 16 Panel de control de flujo de agua.

Posteriormente se ingresa en este panel el flujo de trabajo deseado ("set point"), con ambos valores, el medido y el deseado el programa calcula una señal de error con la cual se determina el porcentaje de abertura de la válvula, la fuente de voltaje (Fig. 11) suministra el voltaje necesario para que la válvula abra o cierre hasta que el flujo registrado por el flujómetro digital es igual al flujo deseado que se ingresó en el panel de control.

CAPÍTULO 3.

DESARROLLO DE PRUEBAS EN EL PROTOTIPO DEL REÓMETRO ELONGACIONAL.

La tarea principal de esta tesis fue probar el comportamiento de los sistemas que componen el prototipo del reómetro elongacional con el fin de determinar si requerían de alguna modificación en su diseño original o simplemente un ajuste. Durante el periodo de pruebas se detectaron algunas fallas de operación y de diseño que afectaban de manera directa las mediciones de los experimentos.

Al inicio de la investigación los objetivos no se enfocaron directamente a la búsqueda de fallas del equipo sino que se buscaba determinar las principales variables de operación, tales como:

1. El valor del esfuerzo de elongación (aproximado) para el fluido de prueba
2. La velocidad a lo largo del filamento
3. El gasto óptimo que proporcione un estado estable en la sección de corte

Como los resultados obtenidos en los experimentos no fueron satisfactorios ya que no había repetitividad se decidió llevar a cabo pruebas para determinar las causas que lo originaban, para lo cual se tuvo que estudiar cada uno de los sistemas del reómetro por separado.

3.1 Estudio de la sección de corte del reómetro

La sección de corte del reómetro es la parte en donde se somete al fluido de prueba a una deformación cortante de manera controlada (capítulo 2).

El objetivo del diseño de este prototipo es determinar el efecto de la influencia de una deformación cortante sobre las propiedades elongacionales de los fluidos de prueba.

La sección de corte es particularmente importante porque, además de someter al fluido a una deformación cortante, también se mide el esfuerzo de elongación como un cambio en la presión del fluido antes y después de aplicar succión al filamento.

En los experimentos que se hicieron para encontrar las propiedades reológicas, se observaron perturbaciones en las lecturas de presión. Con el fin de analizar estas perturbaciones con más cuidado se realizaron dos tipos de pruebas; una sin establecer un gasto de entrada y otra con un gasto de fluido. Las pruebas se realizaron con dos diferentes tipos de fluidos: glicerina con 99% de pureza (fluido newtoniano) y una solución acuosa al 0.5% de separán AP30 (fluido no-newtoniano).

3.1.1 Pruebas sin paso de fluido

El espacio entre los cilindros concéntricos se lleno con el fluido de prueba y con el programa de adquisición de datos se registró la presión leída por los transductores. Las señales de los transductores no mostraron cambios, el valor que se registraba únicamente era el de la presión hidrostática. Se hizo girar el cilindro interior a diferentes velocidades y se encontró que al hacerlo a muy bajas velocidades angulares (2 y 5 R.P.M.), aparecían perturbaciones en las señales de tipo oscilatorio (Fig. 17). Los resultados obtenidos son representativos tanto de la glicerina como del separán.

Analizando las posibles causas de las perturbaciones se encontró que éstas se debían a una desalineación entre los cilindros, ya que la estructura de soporte tenía un desnivel de un grado con respecto a la vertical, además el cilindro interior presentaba una irregularidad en su superficie causada por un golpe.

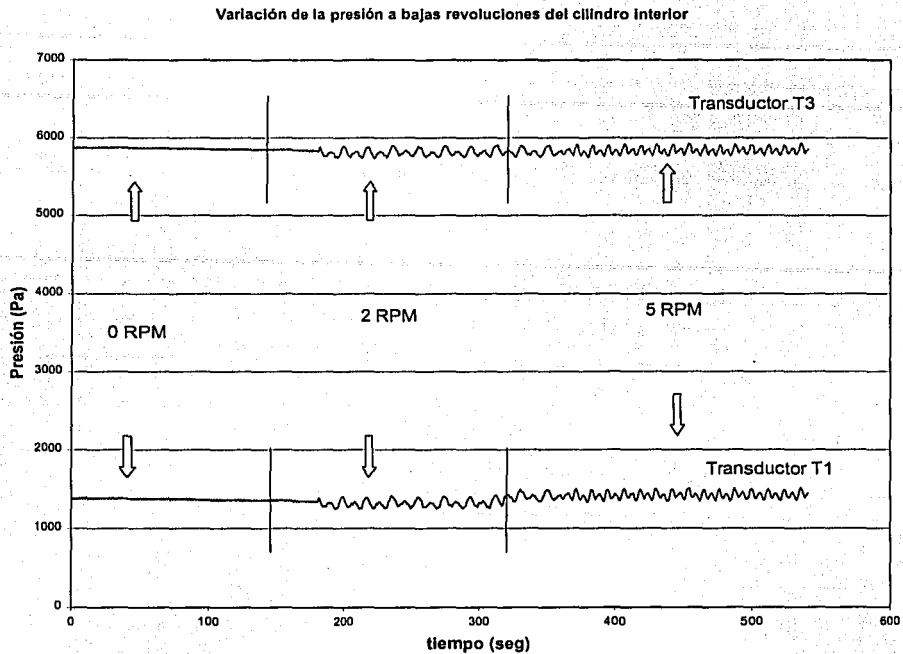


Fig. 17 Variación de la presión cuando el cilindro interior del reómetro se hacía girar a bajas velocidades angulares (2 y 5 r.p.m.)

Cuando se aumento la velocidad de giro del cilindro a las velocidades que se utilizaban en los experimentos(12, 30 y 60 R.P.M.) (Fig. 18) se observó que las variaciones aumentaban con la velocidad, como estas eran demasiado grandes se decidió filtrarlas con el fin de que las señales de los transductores no estuvieran afectadas por los defectos de los cilindros (para profundizar en el diseño de los filtros consultar la referencia 21).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Variaciones de presión con la vel. Angular
señal sin filtro y cilindro abierto

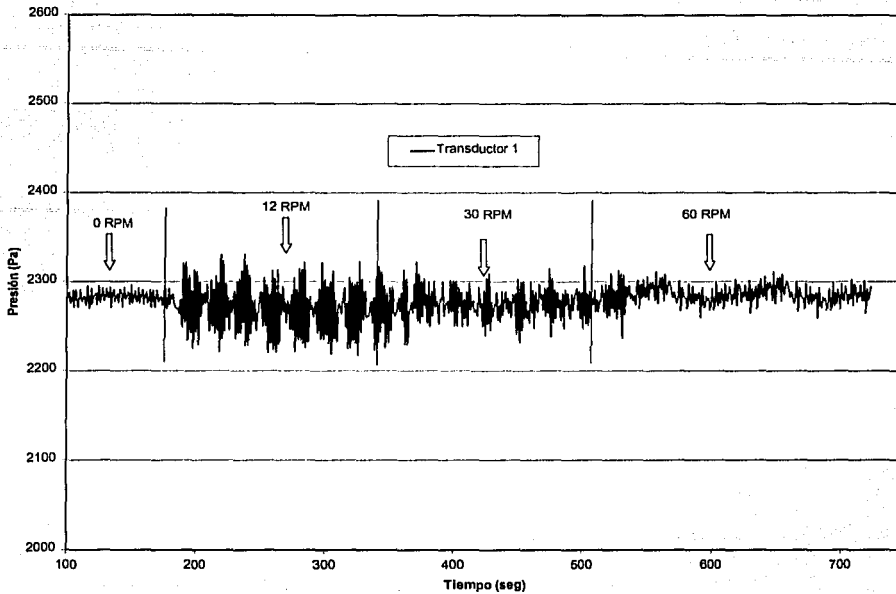


Fig. 18 Variación de las señales de presión cuando el cilindro interior giraba a 12,30 y 60 r.p.m.

Otro problema que se encontró durante el desarrollo de esta prueba, fue que la presión registrada por el transductor T1 aumentaba sin control y sin una razón aparente. Lo que pasaba era que, en la parte superior de la sección de corte o directamente sobre la cara del transductor 1 se formaban burbujas. La Fig. 19 muestra una gráfica que se generó cuando una burbuja se pegó en la cara del transductor cuando se hizo girar el cilindro interior a una velocidad de 5 r.p.m. Esta burbuja se logró desprender hasta que la velocidad se incrementó a 60 r.p.m. (Fig. 20). Es de esperarse que a velocidades altas las burbujas se desplacen, sin control, dentro de la sección de corte pegándose continuamente sobre la cara del transductor T1.

Influencia de una burbuja sobre la cara del Transductor 1

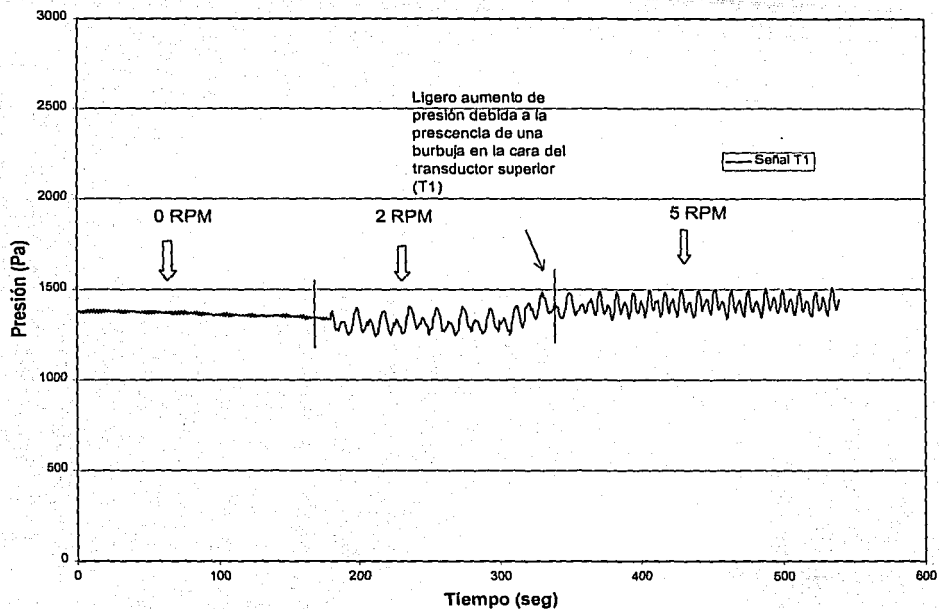


Fig. 19 Influencia de una burbuja sobre la cara del transductor T1

TESIS
FALLA DE ORIGEN

Influencia de la burbuja cuando se retira de la cara de T1 a 60rpm

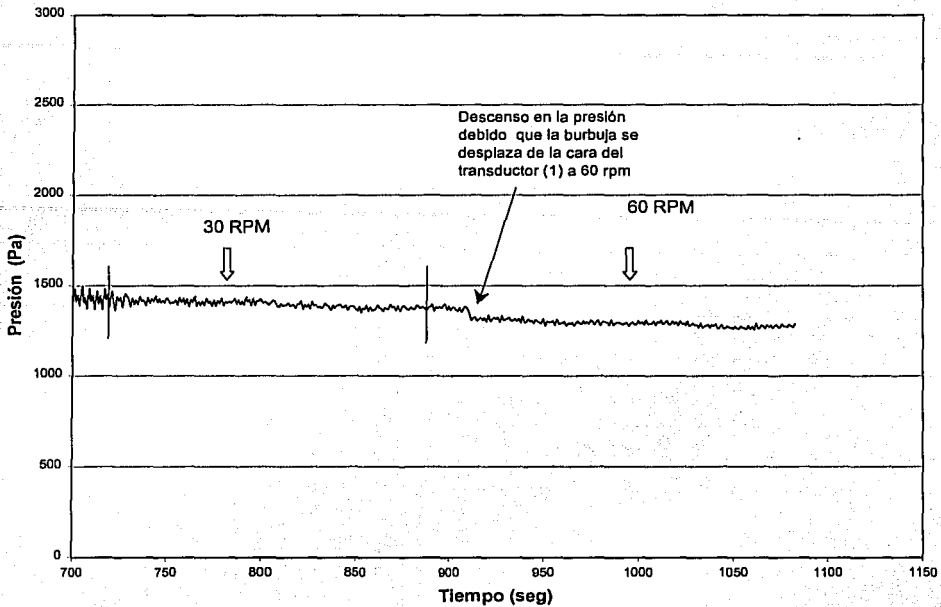


Fig. 20 Descenso en la presión debido al desprendimiento de la burbuja de la cara del transductor T1.

3.1.2 Pruebas con paso de fluido

Para estas pruebas se estableció un gasto de entrada del fluido de prueba de 40 ml/min. También se consiguió que el gasto de entrada fuera igual al de salida y que la presión registrada por los transductores se mantuviera estable, entonces se hizo girar el cilindro interior mientras el filamento caía por gravedad. Cuando se utilizó glicerina, no se observaron variaciones en las señales de los transductores, en cambio con el separán, hubo un descenso en la presión del fluido (Fig. 21). Los resultados mostraron diferentes comportamientos al cambiar de fluido de prueba.

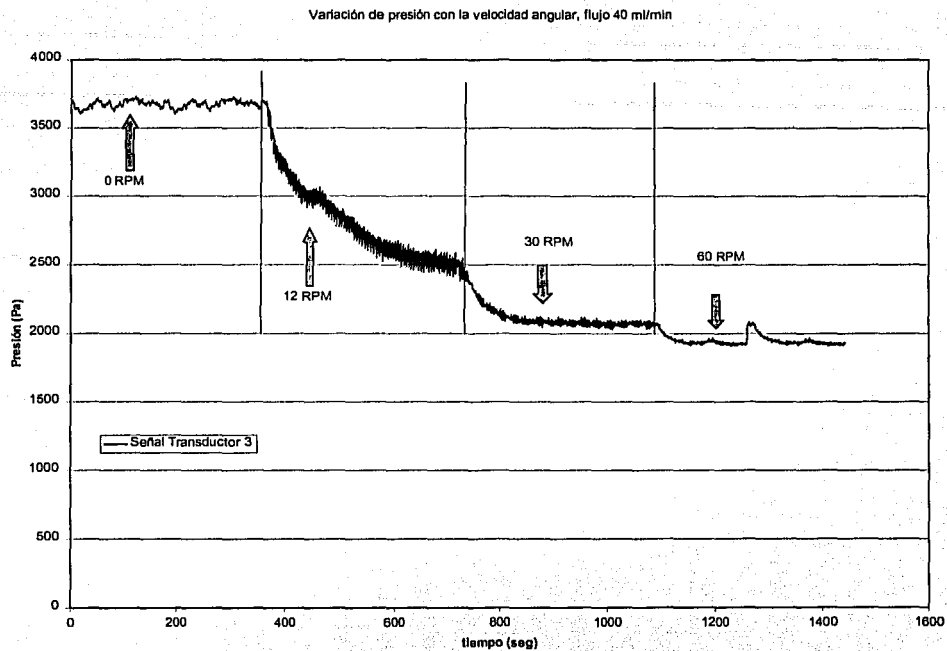


Fig. 21 Disminución de la presión en la sección de corte con la velocidad angular, flujo 40 ml/min.

3.1.3 Determinación del esfuerzo de elongación en la sección de corte.

El esfuerzo de elongación se mide como un cambio en la presión del fluido en la sección de corte antes y después de aplicar succión al filamento. La distancia entre los orificios de salida y entrada del fluido era de 50 mm. En la cámara de succión se utilizó una tapa con un orificio de entrada de 1 mm. Durante la primera con ambos fluidos de prueba se utilizó un gasto de 40 ml/min y una vez que se estableció un estado estable se aplicó succión (-30 kPa) al filamento y se midió el cambio de presión. En el caso de la glicerina, no se observó ningún cambio en la presión así que se decidió incrementar el vacío hasta -70 kPa. La cámara de succión se colocó tan cerca como fue posible (10mm aproximadamente) del orificio de salida ("pinhole"), se

observó entonces un ligero cambio en la lectura de los transductores de 25 Pa, en promedio. Este cambio en la presión se encontraba dentro del orden del ruido natural de la señal de los transductores por lo que fue muy difícil determinar el valor, exacto, de esfuerzo. En cambio con el fluido no-Newtoniano, el cambio de presión si se noto. Variando la presión de vacío aplicado al filamento así como la distancia entre los orificios, se obtuvieron diversos valores de esfuerzo (Fig. 22 y Fig. 23).

Medición del esfuerzo de elongación, distancia entre orificios de 1.5 cm

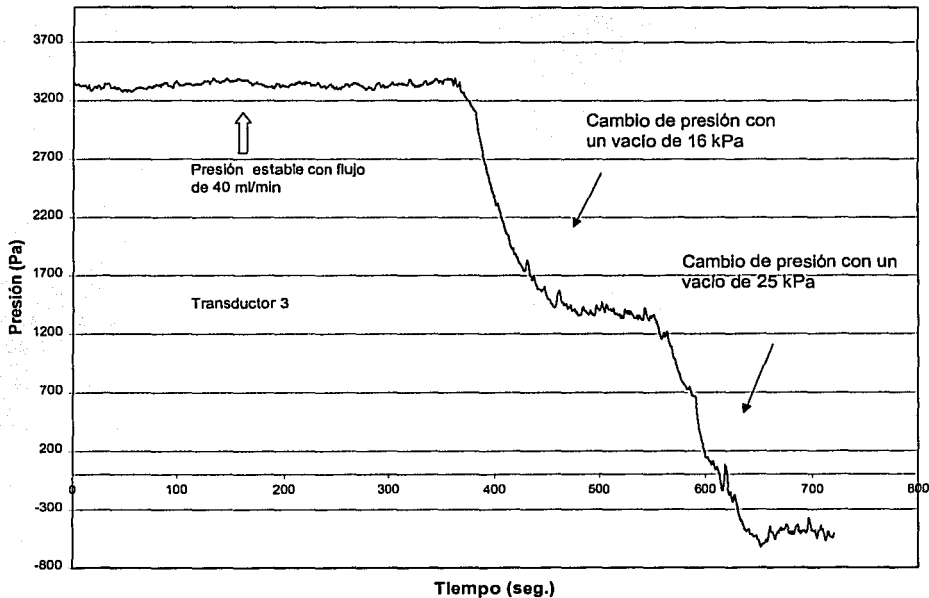


Fig. 22 Medición del esfuerzo de elongación, distancia entre orificios 1.5 cm

Medición de esfuerzo, distancia entre orificios 2 cm.

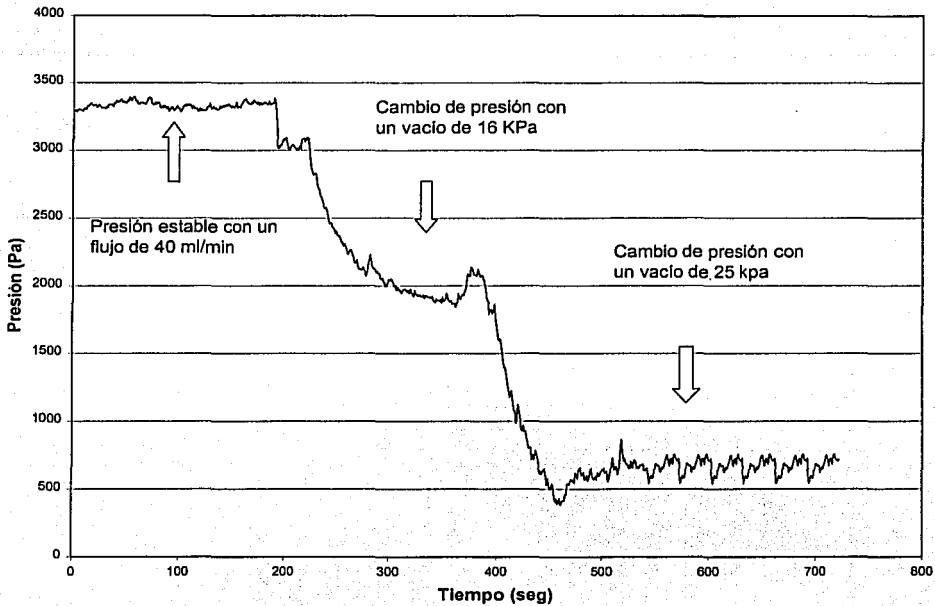


Fig. 23 Medición del esfuerzo de elongación, distancia entre orificios 2 cm.

Posteriormente se repitió esta prueba, pero esta vez se hizo girar el cilindro interior. De las Fig. 24 y Fig. 25 se aprecia que hay un descenso inicial de la presión para una velocidad de 12 r.p.m. y un vacío aplicado al filamento de -25 kPa. Sin embargo, al incrementar la velocidad angular (30 y 60 r.p.m.) manteniendo el mismo vacío, la presión en la sección de corte aumenta.

Medición de esfuerzo con diversa velocidades angulares, distancia entre orificios de 1.5 cm

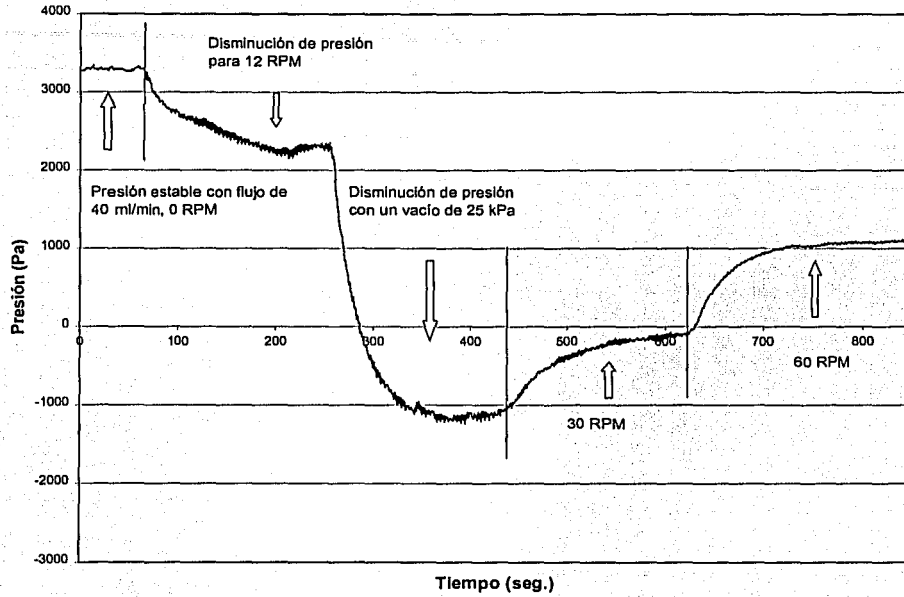


Fig. 24 Medición del esfuerzo de elongación a diversas velocidades angulares, distancia entre orificios 1.5 cm.

Medición de esfuerzo aplicando velocidades angulares distancia entre orificios 2cm.

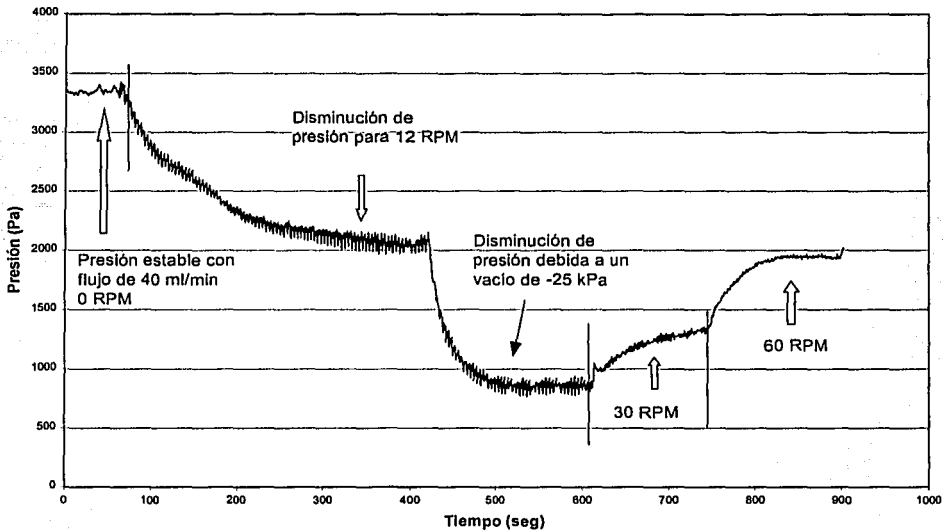


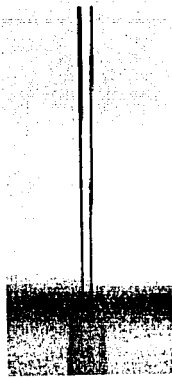
Fig. 25 Medición del esfuerzo de elongación a diversas velocidades angulares, distancia entre orificios 2 cm.

3.2 SECCIÓN DE ELONGACIÓN.

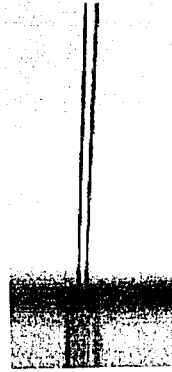
En esta área se detectaron varios problemas, que se explican a continuación.

3.2.1 Desalineación de los orificios de salida y de entrada del fluido.

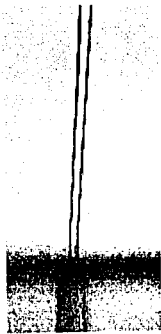
En cuanto al diseño del reómetro, se encontró que en el área de elongación, el orificio de salida del fluido ("pinhole") y el orificio de entrada en la tapa de la cámara de succión perdían su alineación cuando el cilindro interior giraba. Es decir, el filamento no caía sobre el orificio de entrada que se localiza en la tapa de la cámara de vacío, ocasionando la desalineación del filamento. La cual era causada por el torque ejercido en el cilindro exterior cuando el fluido se sometía a una deformación cortante cuando se hacía girar el cilindro interior.



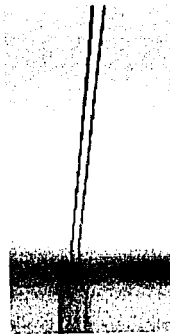
0 R.P.M.



12 R.P.M.



30 R.P.M.



60 R.P.M.

Fig. 26 Se muestra como al salir el fluido (separán AP30 0.5%), por succión, de la sección de elongación, éste se desvía debido al torque provocado por la deformación cortante (12, 30 y 60 rpm)

Cuando el reómetro se diseñó por primera vez se tenía contemplado el poder medir el torque provocado por el esfuerzo cortante generado en la sección de corte, para lo cual se colocó una barra de torsión conectada por debajo de la tapa inferior del cilindro exterior (Fig. 27)

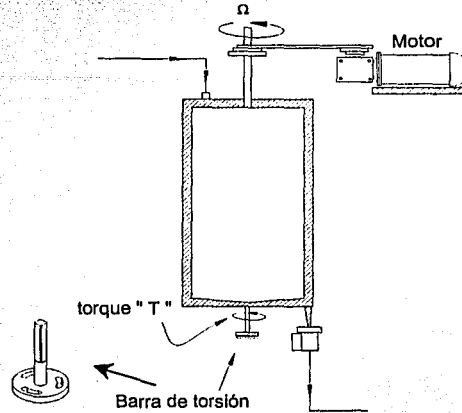


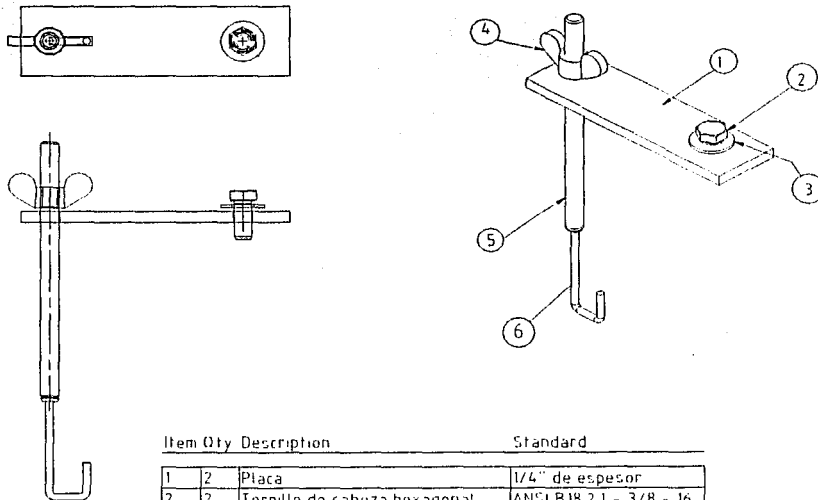
Fig. 27 Posición de la barra de torsión

En teoría el torque se mediría por medio de transductores planos o laminados pegados al cuerpo de la barra que formaban un puente de Wheatstone (strain gauge) donde la resistencia eléctrica varía en forma lineal con la deflexión de la barra. El torque medido debía incrementarse para una deflexión de la barra de torsión a diversas velocidades angulares. Sin embargo, dentro de los objetivos de este trabajo no se contempló la posibilidad de medir el torque porque se quería ir solucionando los problemas por etapas y el grado de dificultad de esa tarea requiere de una visión más profunda de la investigación de este proyecto la cual podría obtenerse en la segunda etapa del proyecto.

Aunque no se analizó detenidamente el comportamiento de la barra de torsión resultó evidente que era la causante de la desalineación ente los orificios de salida del reómetro y el de entrada de la cámara de succión. Para

solucionar este problema se diseñó y fabricó un sencillo sujetador (Fig. 28) que se montó en la estructura de soporte el cual mantiene fijo el cilindro exterior mientras el interior gira evitando así la deflexión de la barra.

A juicio del autor de esta tesis, el sistema original de medición del torque deberá ser rediseñado ya que para que la barra de torsión funcione, en la posición que actualmente está, debe existir un desplazamiento angular del cilindro exterior lo que inevitablemente provoca la desalineación de los orificios.



Item	Qty	Description	Standard
1	2	Placa	1/4" de espesor
2	2	Tornillo de cabeza hexagonal	ANSI B18 2 1 - 3/8 - 16 x 7/8
3	2	Rondana plana	ANSI B18 22 1 - 7/16 - narrow - Type A
4	2	Wingnut	ANSI B18 17 - 3/8 - 16
5	2	espárrago	3/8 UNC - 16
6	2	Gancho	

Fig. 28 Sujetador

3.2.2 Orificio de salida.

El orificio de salida del fluido de prueba, que mide 2.7mm de diámetro, tiene encima de él, concéntricamente, un "pinhole". Cuando el fluido de prueba salía por el orificio del "pinhole" se pegaba en las paredes del barreno, deformando el filamento. Como solución inmediata se le hizo una conicidad al orificio mediante una operación de abocardado buscando disminuir el área de contacto entre el metal y el fluido (Fig. 29).

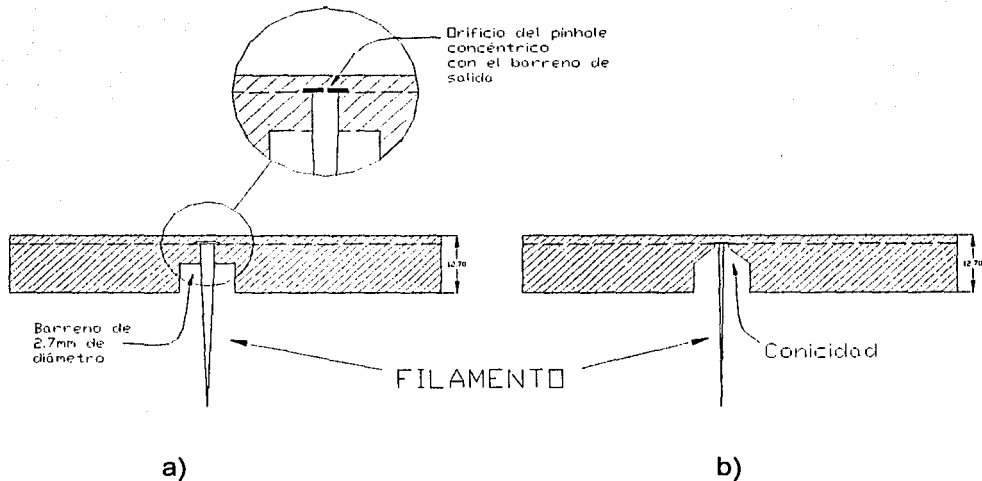


Fig. 29 a) Barreno en su diseño original, b) Modificación del barreno de salida

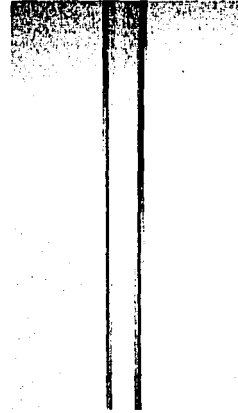
3.2.3 Iluminación del filamento

La medición del diámetro del filamento es muy importante ya que con él se determina la rapidez de extensión. Al tomar la fotografía, la iluminación del filamento es muy importante, originalmente a los lados de la sección de elongación se colocaban dos lámparas que iluminaban directamente el filamento, sin embargo, esta iluminación provocaba sombras de los tornillos de la cámara de succión original (Fig. 36).

Para resolver este problema se colocó a los lados del filamento dos barreras que evitan la luz directa de las lámparas y una pantalla de color blanco detrás del filamento. La luz se hace incidir sobre la pantalla y ésta rebota sobre el filamento, logrando tener un cambio de tono en las orillas como se muestra en la Fig. 30 b)



a)



b)

Fig. 30 a) iluminación directa , b) iluminación con fondo blanco

3.3 Sistema de alimentación.

El objetivo del sistema de alimentación es proveer un gasto constante del fluido de prueba a la sección de corte. Originalmente, este sistema tenía un control de flujo (agua) manual. Sobre la línea de alimentación L1, justo a la salida del cilindro I, se encontraba una válvula de aguja y enseguida un flujómetro analógico. El cilindro I se presurizaba con aire que venía, directamente, de la línea de abastecimiento. Se requería, entonces, que una persona se encargara de mantener el valor del flujo constante abriendo o cerrando la válvula de aguja. El método no era muy preciso provocando variaciones en la presión del fluido de la sección de corte.

Para reducir las variaciones de presión, se estudió la manera de implementar un sistema de control automático el cual mantuviera un gasto de agua constante. El diseño quedó a cargo de los Ingenieros electrónicos que también trabajaban para el proyecto (ref. 21). Se sugirió la instalación de una válvula electrónica tipo solenoide sobre la línea de alimentación L1, esta válvula abre o cierra de manera proporcional a un voltaje aplicado.

Para evitar las caídas súbitas de presión de la línea de aire que impedían que el sistema de control trabajara de manera óptima se instaló un cilindro con nitrógeno para presurizar el cilindro I de manera independiente.

En la Fig. 31 se muestra una gráfica de flujo contra tiempo con en control manual. Como la presión en la sección de corte depende del sistema de alimentación, las variaciones en el flujo se reflejan en la presión de la sección de corte. Cuando hay un aumento en el flujo de entrada la presión en la sección de corte aumenta (Fig. 32). Cuando el flujo de entrada se controla de manera automática la presión en la sección de corte se mantiene estable (Fig. 33 y 34). Con esto se hace una comparación con el control manual y con en control automático con el fin de evaluar las mejoras obtenidas.

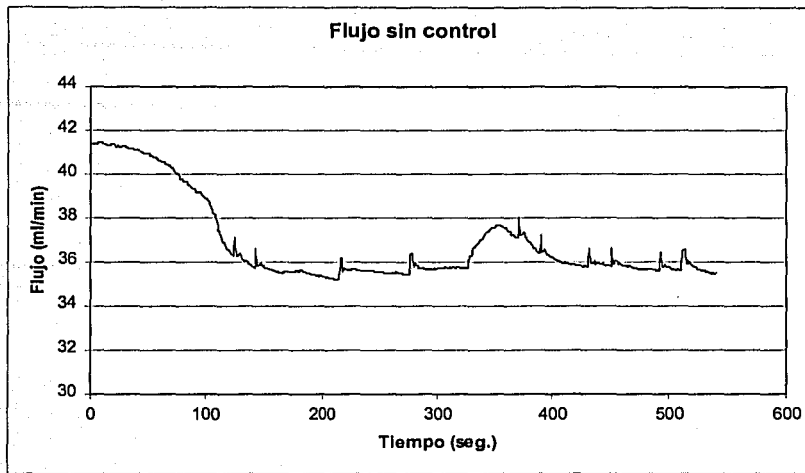


Fig. 31 Gráfica de flujo vs. Tiempo con control manual.

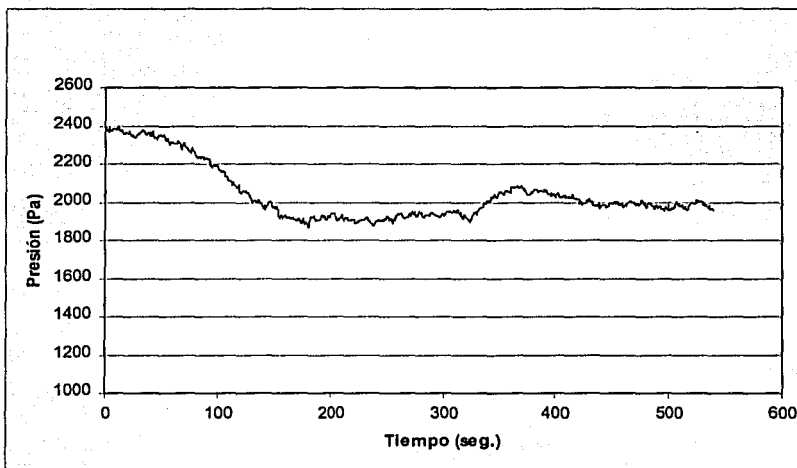


Fig. 32 Gráfica de presión vs. Tiempo con el control manual.

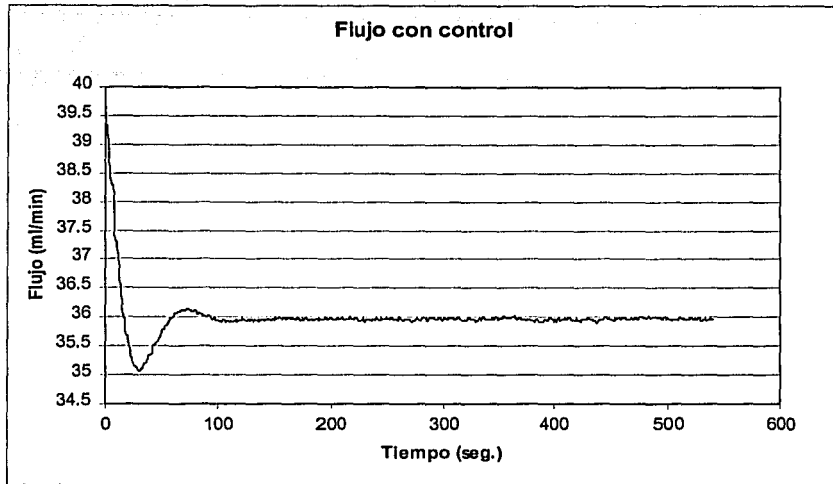


Fig. 33. Gráfica de flujo vs. tiempo con el control automático

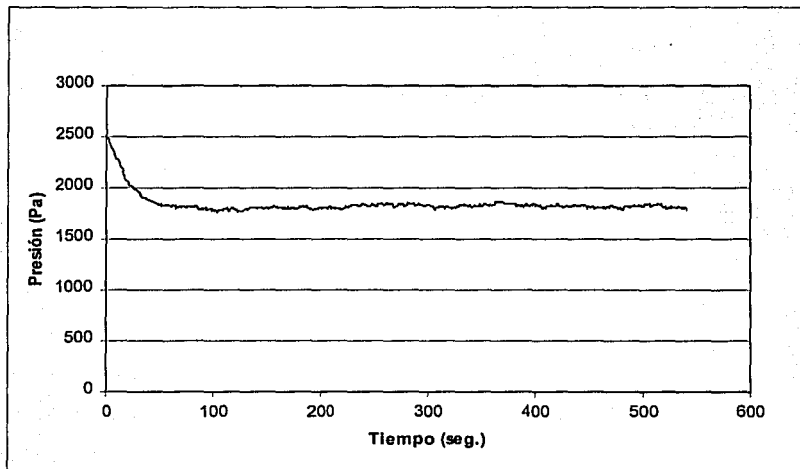


Fig. 34 Gráfica de presión vs. Tiempo con el control automático.

3.4 SISTEMA DE SUCCIÓN

3.4.1 Prueba del sistema de succión

La prueba de este sistema consistió en medir la presión de vacío alcanzada con la nueva cámara de succión utilizando las tapas que tienen orificios de entrada de diferentes diámetros, desde 0.7mm hasta 5 mm. Esto con el fin de establecer la presión de vacío adecuada aplicada al filamento para los experimentos.

Se utilizó una bomba de vacío (marca Welch) del tipo "paletas", ésta extrae el aire que se encuentra en la trampa de vacío y en la cámara de succión provocando una entrada de aire por el orificio ubicado en la tapa de la cámara de succión (Fig.12).

El objetivo de probar tapas con orificios de entrada mayores a 1 mm fue ver qué diámetro permitía el paso del filamento cayendo por gravedad de modo que incidiera sobre la cara del transductor antes de aplicar la succión.

La Fig. 35 muestra una gráfica de vacío contra tiempo para las tapas que se probaron.

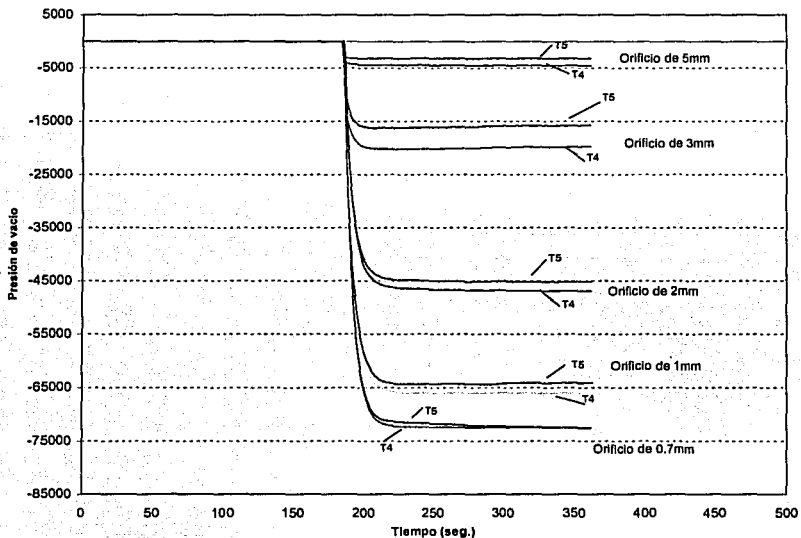


Fig. 35 Vacío alcanzado con las diferentes tapas.

Se puede observar que el vacío máximo se alcanzó con la tapa que tiene el orificio más pequeño (0.7 mm), sin embargo el fluido no lograba pasar por éste ya que se acumulaba a la entrada. Con las tapas que tienen orificios de 3 y 5 mm se logró que el filamento entrara libremente sin embargo la succión alcanzada con ellas no fue suficiente para lograr un cambio de presión en la sección de corte.

Los mejores resultados se obtuvieron con las tapas que tienen orificios de entrada de 1 y 2 mm, la succión generada con ellas fue de entre -45 y -65 kPa respectivamente. Esta presión de vacío se puede modificar con ayuda de un regulador de vacío (Fig. 12).

3.4.2 Cámara de succión

El diseño original de la cámara de succión presentaba algunos inconvenientes que hacían difícil su manipulación. La tapa que tenía el orificio de entrada del fluido a la cámara se sujetaba a ésta mediante tornillos y tuercas que sobresalían demasiado de la cámara de succión (Fig. 36), provocando sombras indeseables durante la toma de las fotografías para determinar la velocidad promedio del filamento de prueba. Este modo de sujeción tampoco permitían quitar o mover la cámara con facilidad cuando era necesario, lo cual ocasionaba pérdidas de tiempo de hasta 1hr.

Otro problema en esta sección era que el orificio de salida de la cámara de succión que se comunica con la trampa de vacío había sido diseñado con un diámetro demasiado pequeño (niple 1/4" NPT) causando acumulación del fluido en la cámara impidiendo trabajar con gastos mayores a 20mL/min.

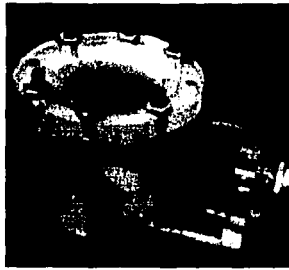


Fig. 36 Diseño original de la cámara de succión en donde se aprecia como se sujetaba la tapa que contiene el orificio de entrada a ella.

Para dar solución a los problemas mencionados, la cámara se rediseñó nuevamente (Fig. 37). Ahora el método de sujeción entre las tapas y la cámara de succión está compuesto de un sello O-ring y una abrazadera que permite intercambiar las tapas de la cámara fácilmente en cuestión de minutos. Con esta acción se puede modificar el diámetro del orificio que se encuentra en la tapa de la cámara. Esta nueva cámara está fabricada completamente en acrílico, lo que permite visualizar al filamento a la entrada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

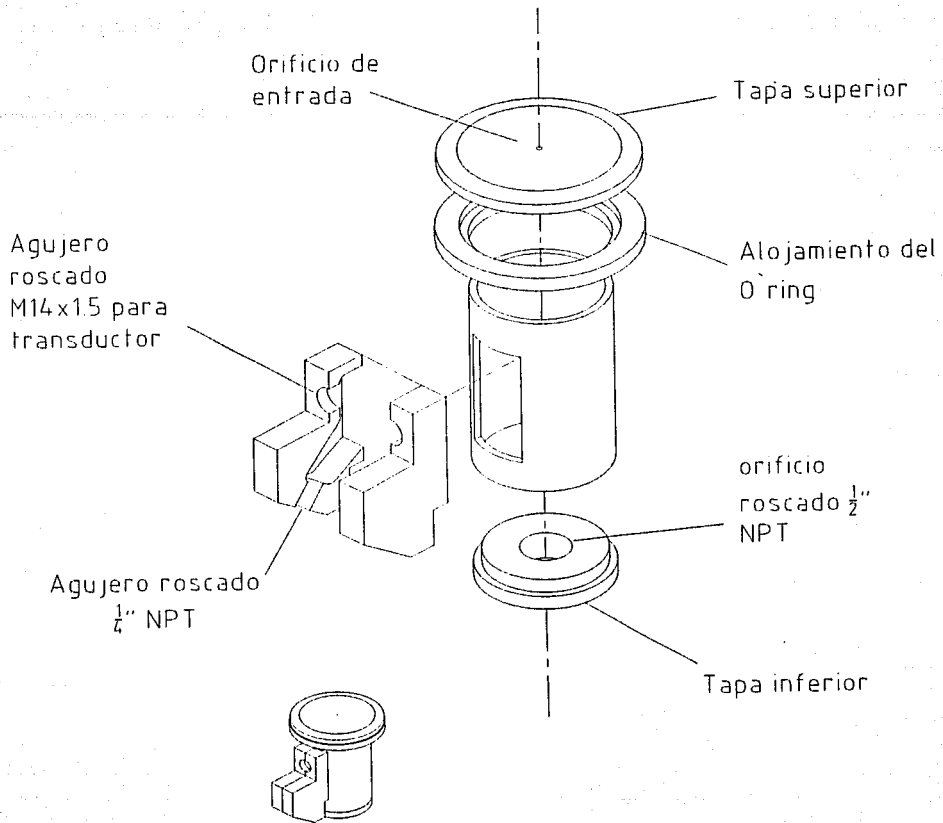


Fig. 37 Nueva cámara de succión.

Se fabricaron varias tapas con orificios de entrada de diferentes diámetros desde 0.7 hasta 5 mm. Este nuevo diseño permite también el tener dos transductores. Uno que registra la presión de vacío que se genera dentro de la cámara succión (apéndice C) y otro que mide el esfuerzo con el que llega el fluido a la cámara.

3.5 Soporte de la cámara.

Para fotografiar el filamento, la cámara se encontraba fija inicialmente a una estructura metálica (Fig. 38) a una distancia de 700 mm de la sección de elongación. A esta distancia la cámara tomaba una sección de aproximadamente 4 cm a lo largo del filamento. La resolución obtenida en las imágenes era baja. Con el fin de mejorar la resolución y poder determinar la velocidad de manera más precisa a lo largo del filamento, se requería que el soporte de la cámara fuera móvil para desplazarla horizontalmente (acercarla al filamento) y verticalmente (para tomar diferentes secciones del filamento). Se diseñó un soporte (Fig. 39), el cual permite fotografiar el filamento a diferentes distancias y alturas, la versatilidad de este aparato proporciona información muy valiosa para el análisis de los resultados de los experimentos. Con el soporte original solo se tomaba una sola sección de prueba.

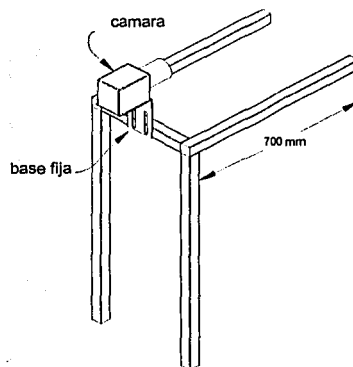
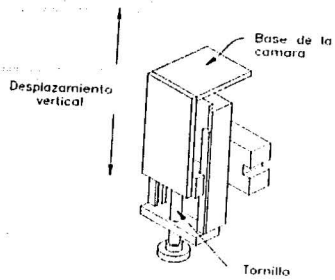
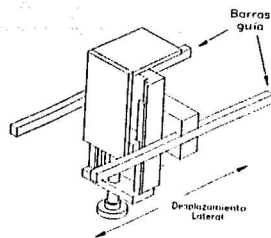


Fig. 38 Posición original de la cámara.

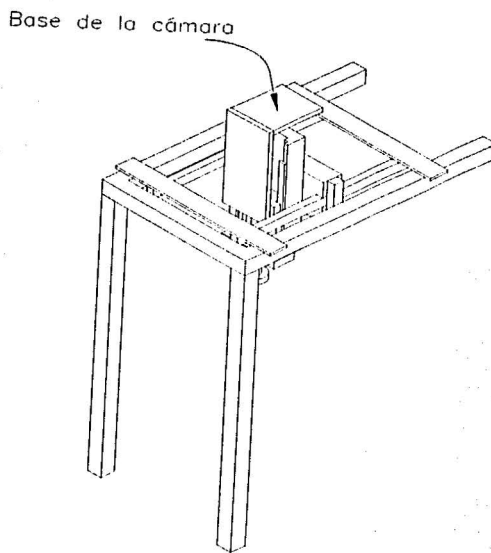
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



a)



b)



c)

Fig. 39 Soporte móvil, a) desplazamiento vertical, b) desplazamiento lateral y c) vista completa

CAPÍTULO 4.

ARRANQUE DEL REOMETRO.

Una vez que se concluyó con el estudio del reómetro se desarrolló una metodología para realizar las pruebas con los fluidos de trabajo y tratar de obtener resultados experimentales.

4.1 Experimento.

La temperatura del laboratorio en donde se llevaron a cabo los experimentos se mantuvo a 20° C con variaciones de +/- 1° C.

Durante el desarrollo de los experimentos las variables a controlar fueron:

1. El flujo Q (ml/min)
2. La presión de vacío generada (kPa)
3. La velocidad angular del cilindro interior (r.p.m.)
4. La distancia entre los orificios (cm)

El gasto en todos los experimentos fue de 40 ml/min ya que este probó ser el mejor para evitar que el flujo de salida fuese mayor al de entrada. Se obtuvieron distintos valores de rapidez de extensión variando la distancia entre los orificios y la presión de vacío aplicada al filamento.

4.2 Materiales.

Los materiales de prueba fueron, un fluido Newtoniano, glicerina con 99% de pureza y un fluido No-Newtoniano, una solución acuosa de poliacrilamida (separán AP30) al 0.5 % en peso. Este último fue escogido debido a que es comúnmente usado en procesos de recuperación de petróleo además de que se tenía información de su caracterización en corte²⁴. La viscosidad al corte de ambos fluidos se midió independientemente usando un reómetro AR1000-N de TA Instruments con una geometría de cono plato. La viscosidad al corte de la glicerina fue de 1.01 Pa-s y 2.45 Pa-s para el separán.

4.3 Metodología.

Al cilindro (I) se introduce agua hasta $\frac{3}{4}$ partes de su capacidad, el cilindro (II) y el espacio entre los cilindros concéntricos (sección de corte) se llenan con el fluido de prueba. En el espacio restante del cilindro (I) se agrega nitrógeno hasta una presión de 40 psi. Se verifica que no se formen burbujas en la parte superior de la sección de corte. Las líneas L1 y L2 (Fig. 11) también deben estar libres de aire. Se hace correr el programa de adquisición de datos, en el cual se pueden visualizar las lecturas de presión y temperatura dentro de la sección de corte.

Para que la válvula electrónica se abra a un cierto porcentaje se le aplica un voltaje de entre 10 y 11 V con la fuente HP (Fig. 11). Se enciende el flujómetro digital, éste registra el valor del flujo que está pasando a través de la línea L1, este valor también se visualiza en el panel principal del programa de adquisición de datos.

El fluido de prueba ingresa con un gasto constante Q a la sección de corte por un orificio ubicado en la tapa superior del cilindro exterior (sección de corte) y se aloja en el espaciamento que queda entre los cilindros, después sale a través del orificio del "pinhole" ubicado en la tapa inferior formando un filamento.

Una vez que se logra un estado estacionario (el gasto de salida es igual al de entrada), se aplica succión al filamento y se espera a que la presión en la sección de corte se estabilice nuevamente, el filamento está siendo estirado por un esfuerzo de tensión el cual se mide como un cambio en la presión interna registrada por los transductores. Con el programa de adquisición de datos se graba la presión que hay en la sección de corte antes y después de aplicar succión al filamento.

En ese momento, la imagen del filamento es captada con la cámara y se visualiza en el monitor de la computadora, con esto se obtiene una medición instantánea del diámetro del filamento a lo largo de una sección de prueba.

Es importante mencionar que el filamento es fotografiado a una distancia de 5 diámetros a partir del orificio de salida en donde los efectos de hinchamiento han desaparecido. Este punto se tomó como el punto inicial para evaluar el esfuerzo a lo largo del filamento.

Realizado lo anterior se quita el vacío y se dejan estabilizar las lecturas de presión, entonces se hace girar el cilindro interior, inicialmente a 12 r.p.m., con esto se aplica una rapidez de deformación por corte al fluido antes de salir y ser estirado, cuando las lecturas de los transductores se mantienen estables se aplica succión y se graba el cambio de presión dentro de la sección de corte; estos pasos se realizan para todas las velocidades angulares.

4.4 Cálculos.

Con las mediciones de flujo (Q) y del diámetro (D) del filamento se calcula la velocidad (v) usando la siguiente ecuación:

$$v_i = \frac{4Q}{\pi D_i^2} \quad (26)$$

La rapidez de elongación ($\dot{\epsilon}$) se calcula a lo largo de la sección de prueba con la siguiente ecuación:

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{v_{i+1} - v_i}{z_{i+1} - z_i} \quad (27)$$

El esfuerzo de tensión a lo largo del filamento se calcula con la ecuación (28). El primer término es la diferencia de presión dentro de la sección de corte antes y después de aplicar succión al filamento. Los términos de gravedad y tensión superficial se desprecian.
ecuación (28)

$$(\tau_{11} - \tau_{22})_{n+1} = \left[\frac{(\tau_{11} - \tau_{22})_n}{V_n} + \frac{\sigma\pi}{2Q} (W_{n+1} - W_n) - \rho(V_{n+1} - V_n) + \frac{\rho g}{2} \left(\frac{1}{V_n} + \frac{1}{V_{n+1}} \right) (x_{n+1} - x_n) \right]$$

El primer término del lado derecho de la ecuación es la diferencia de presión en la sección de corte, el segundo término corresponde a la tensión superficial, el tercer término corresponde al efecto de inercia y el último es el término de gravedad.

La viscosidad elongacional aparente se calcula con la siguiente ecuación:

$$(\eta_e)_n = \frac{(\tau_{11} - \tau_{22})_n}{\dot{\epsilon}_n} \quad (29)$$

CAPÍTULO 5.

RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Fluido Newtoniano (glicerina)

Con las modificaciones realizadas al prototipo del reómetro, finalmente se logro obtener resultados confiables, los cuales se presentan en las siguientes graficas. El mejor resultado obtenido fue la confirmación de la relación de Trouton (Fig. 44) con lo que se demuestra que el objetivo principal de la tesis se cumplió.

La Fig. 40 muestra una comparación del perfil del filamento con y sin vacío. Entre ambos perfiles hay una diferencia que indica que la succión no tiene influencia sobre todo el filamento.

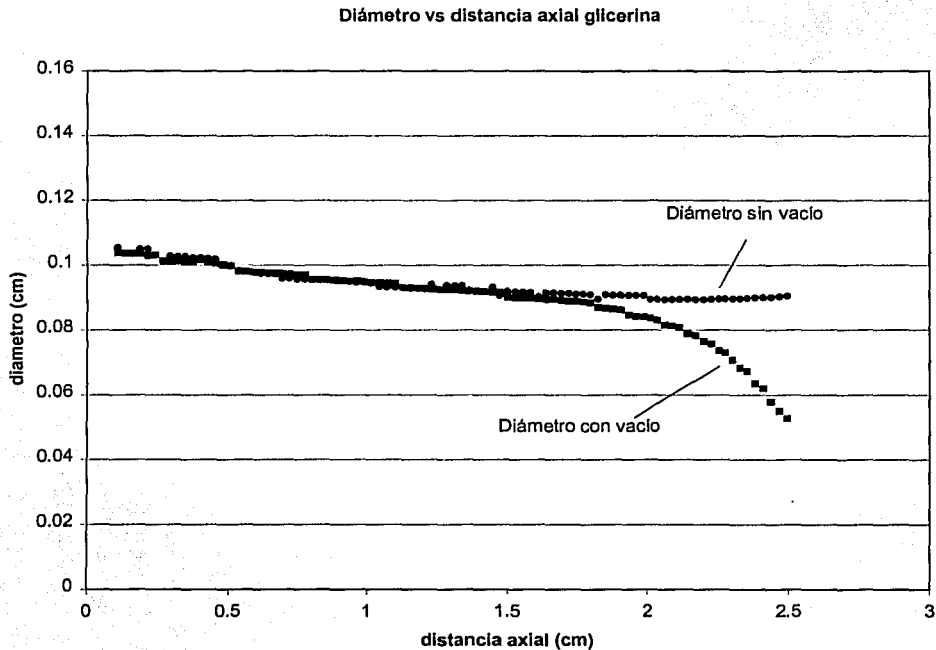


Fig. 40 Diámetro vs. Distancia axial, glicerina

La obtención de esta gráfica fue sumamente importante ya que con estos datos se pudo generar los resultados mostrados en la Fig. 41 y la Fig. 42.

Como la velocidad se calcula a partir de las mediciones de flujo y diámetro del filamento, la resolución de las imágenes fue muy importante. Las mejoras hechas a la estructura de soporte de la cámara permitieron acercarla a la sección de elongación, además de tomar un mayor número de puntos (99) a lo largo de la sección de prueba, con esto se pudo determinar el perfil del filamento de manera mas precisa. La alineación entre los orificios de salida del reómetro y de entrada de la cámara de succión se logró mantener aun cuando se utilizaron diferentes velocidades angulares del cilindro interior que generaban un torque sobre el cilindro exterior gracias al sujetador que se diseñó y construyó especialmente para el caso.

Para obtener el perfil de diámetros adecuado se cuidó la iluminación y el foco de la cámara fotográfica. Para lo cual se construyó una pantalla cuyas características permitieron que la luz se reflejara por la parte trasera del filamento. También se colocaron unas placas en ambos lados del filamento para evitar que la luz incidiera directamente sobre el filamento.

FELIS CON
FALLA DE ORIGEN

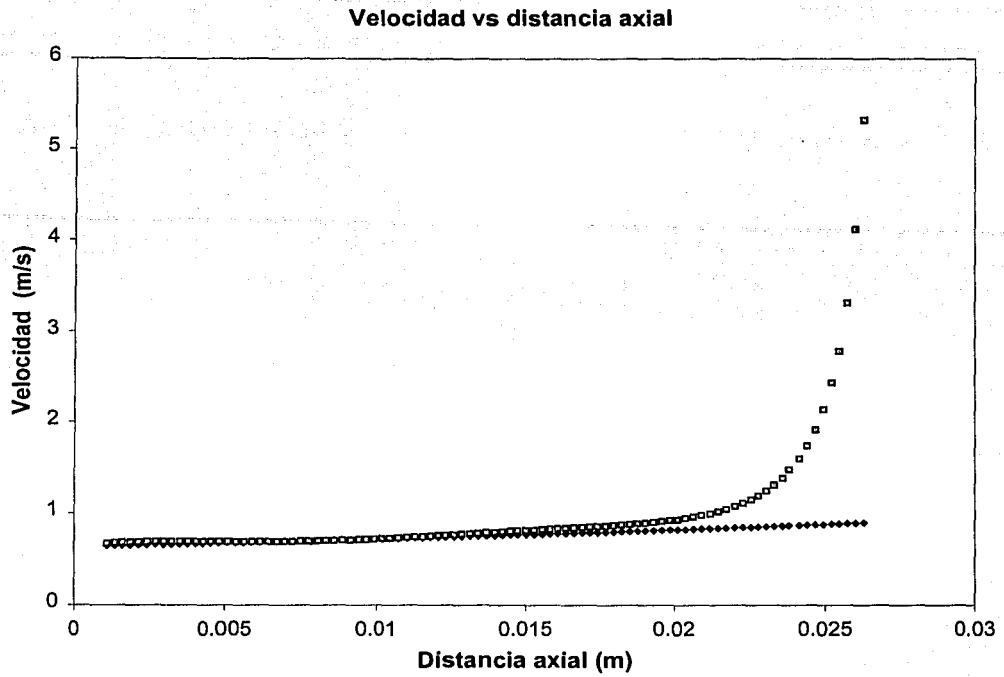


Fig. 41 Velocidad vs. Distancia axial, glicerina

La Fig. 41 muestra una comparación de la velocidad a lo largo del filamento para los casos con y sin succión. La velocidad aumenta en la última parte del filamento para el caso con succión debido a la disminución del diámetro.

Rapidez de extensión vs distancia axial

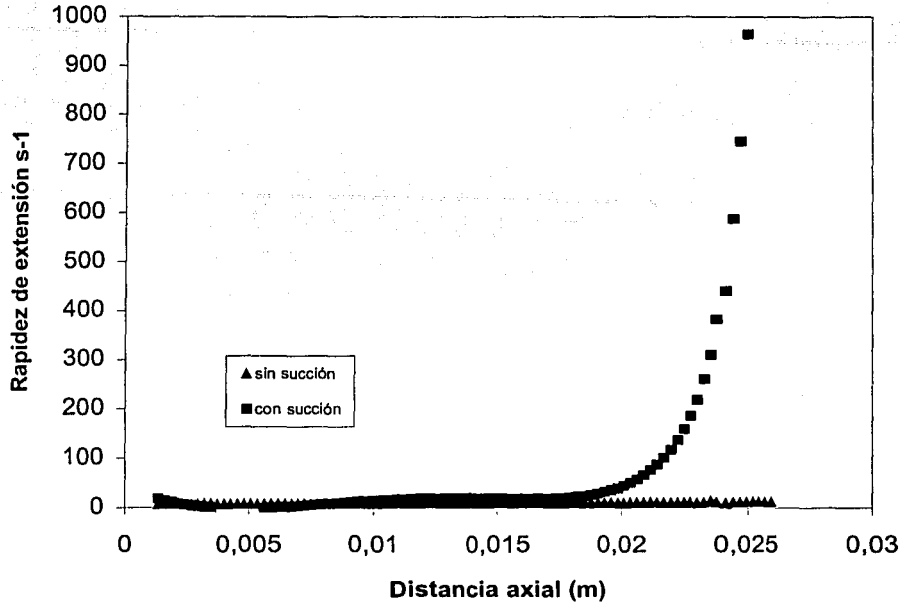


Fig. 42 Rapidez de extensión vs. Distancia axial, glicerina

La rapidez de extensión a lo largo del filamento para una corrida típica se muestra en la Fig. 42.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Esfuerzo vs distancia axial

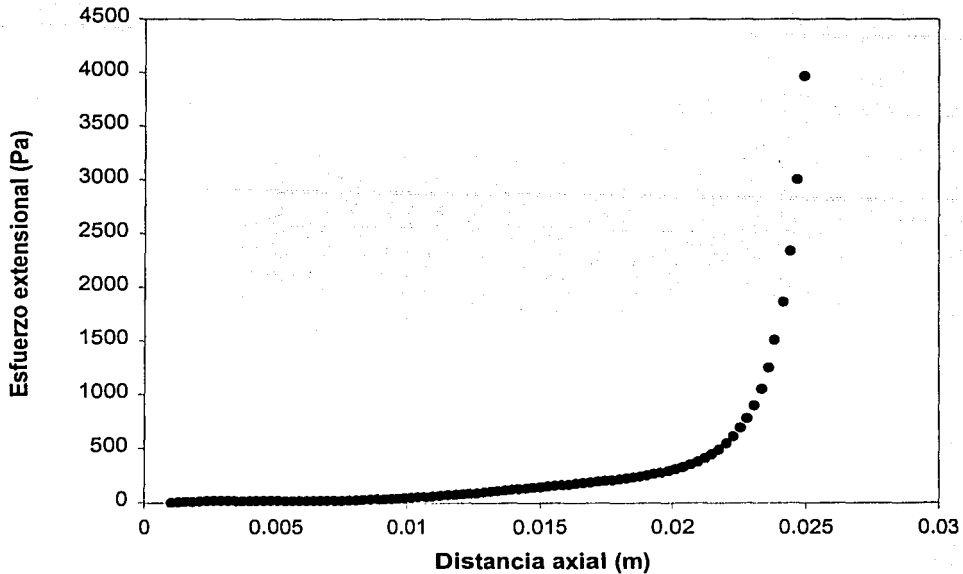


Fig. 43 Esfuerzo vs. Distancia axial utilizando glicerina

La Fig. 43 muestra la variación del esfuerzo a lo largo del filamento. Los mayores valores de esfuerzo se obtienen en la última parte del filamento que es en donde la succión tiene mayor influencia.

La diferencia de presión en la sección de corte antes y después de aplicar succión al filamento se toma como el esfuerzo en el primer punto tomado en la fotografía. El primer punto de esfuerzo de la gráfica se calcula con la ecuación (28). Los términos de inercia y tensión superficial se pueden despreciar.

Las pruebas realizadas con la glicerina para determinar el cambio de presión en la sección de corte proporcionaron una diferencia de entre 25 y 30 Pa, esto fue aplicando la máxima presión de vacío (-70 kPa) y utilizando la tapa de la cámara de vacío que tiene un orificio de 1 mm de diámetro. Esto

permitió que el fluido entrara libremente a la cámara sin que hubiese acumulación a la entrada como solía ocurrir anteriormente.

La poca diferencia obtenida entre las presiones se debe a que la glicerina no es un material elástico.

En este experimento se comprobó que las modificaciones realizadas a la cámara de vacío fueron acertadas.

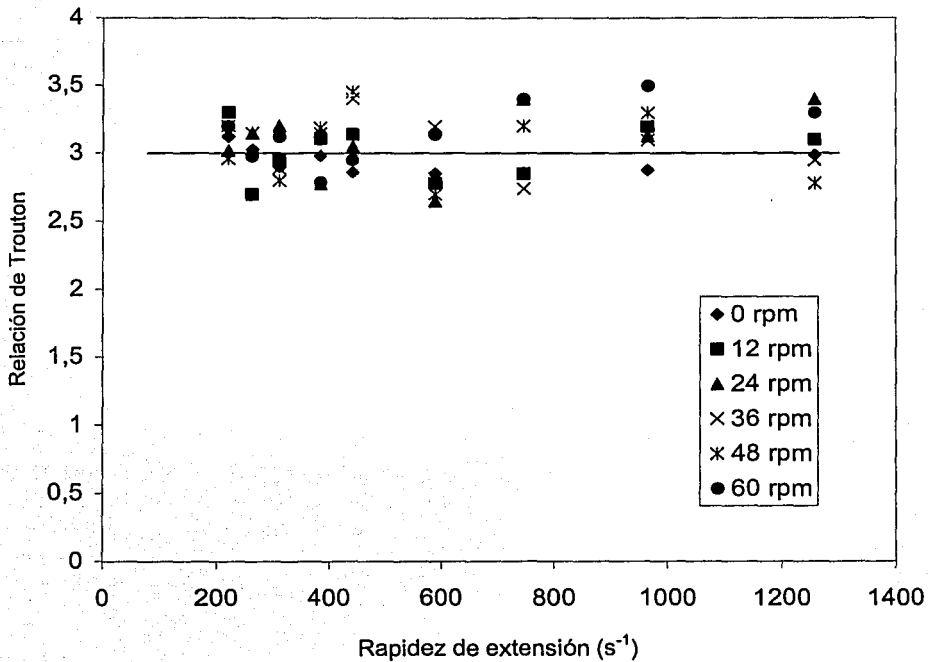


Fig. 44 Relación de Trouton vs. Rapidez de extensión, glicerina

La Fig. 44 muestra los resultados obtenidos al comparar las viscosidades cortantes y extensional cayendo en un rango de entre 2.6 y 3.6. Lo cual demuestra que se cumple la relación de Trouton. Se puede ver que la

deformación por corte aplicada al fluido no modifica la viscosidad extensional. La relación de Trouton se mantiene constante únicamente en la parte final del filamento. El valor teórico de la relación de Trouton para los fluidos newtonianos es 3. Este resultado confirma que las modificaciones mecánicas realizadas en el reómetro fueron acertadas con lo que se demuestra que el objetivo principal de la tesis se cumplió.

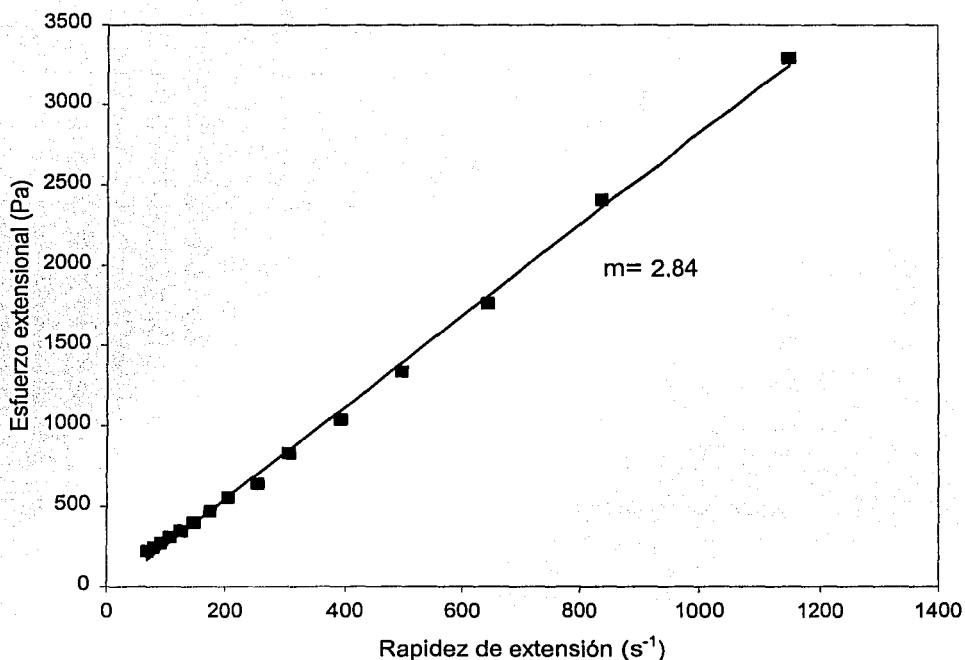


Fig. 45 Esfuerzo-Deformación utilizando glicerina

La Fig. 45 muestra la relación esfuerzo-deformación utilizando glicerina. Esta gráfica se hizo para verificar el valor de la viscosidad extensional obtenido en la grafica de la Fig. 44. La pendiente de esta gráfica se toma como el valor de viscosidad extensional.

5.2 Fluido No-Newtoniano. (SEPARÁN AP30)

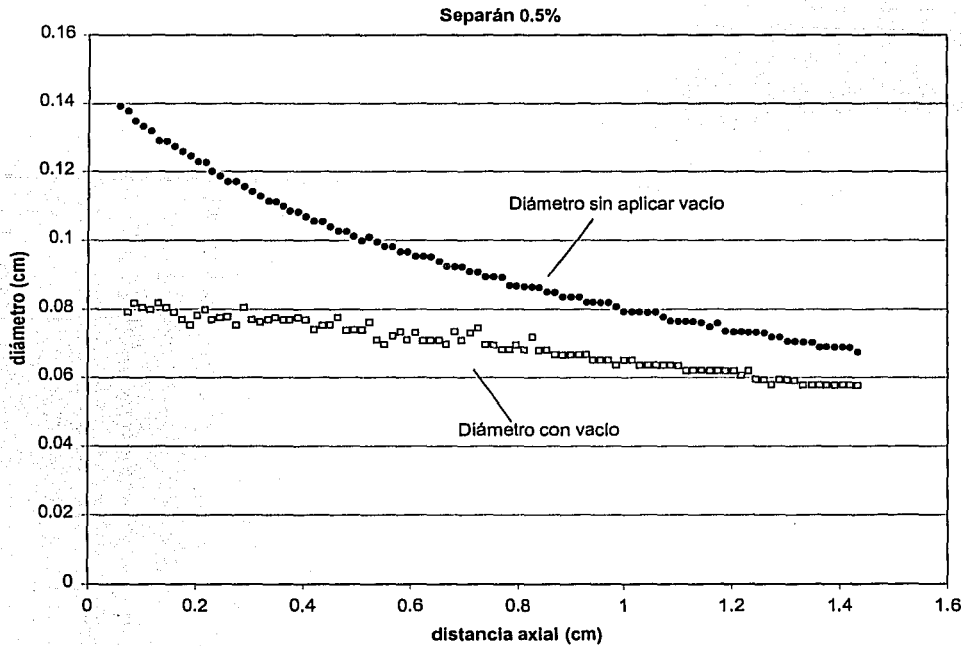


Fig. 46 Diámetro vs. Distancia axial utilizando separán 0.5%

La Fig. 46 muestra una comparación del perfil del filamento con y sin vacío utilizando separán al 0.5%. Se aprecia claramente una diferencia para los casos con y sin succión. Si se hace una comparación entre la Fig. 40 y la Fig. 46 se nota que para el fluido Newtoniano la succión actúa solo sobre una sección del filamento muy cercana a la entrada de la cámara de succión, en cambio para el fluido No-Newtoniano la succión actúa a lo largo de todo el filamento. Las pruebas evidenciaron que al aplicar una presión de vacío superior a 50 kPa se producía un rompimiento del filamento.

Al igual que en el experimento con la glicerina, para obtener el perfil de diámetros adecuado se cuidó la iluminación y el foco de la cámara

fotográfica. Para lo cual se construyó una pantalla cuyas características permitieron que la luz se reflejara por la parte trasera del filamento. También se colocaron unas placas en ambos lados del filamento para evitar que la luz incidiera directamente sobre el filamento. La alineación entre los orificios de salida del reómetro y de entrada de la cámara de succión se logró mantener aun cuando se utilizaron diferentes velocidades angulares del cilindro interior gracias al sujetador que se diseñó y construyó especialmente para el caso. Como sucedió con la glicerina una correcta determinación del perfil del diámetro del filamento es esencial para calcular la velocidad (Fig. 47) y la rapidez de extensión (Fig. 48) a lo largo del filamento.

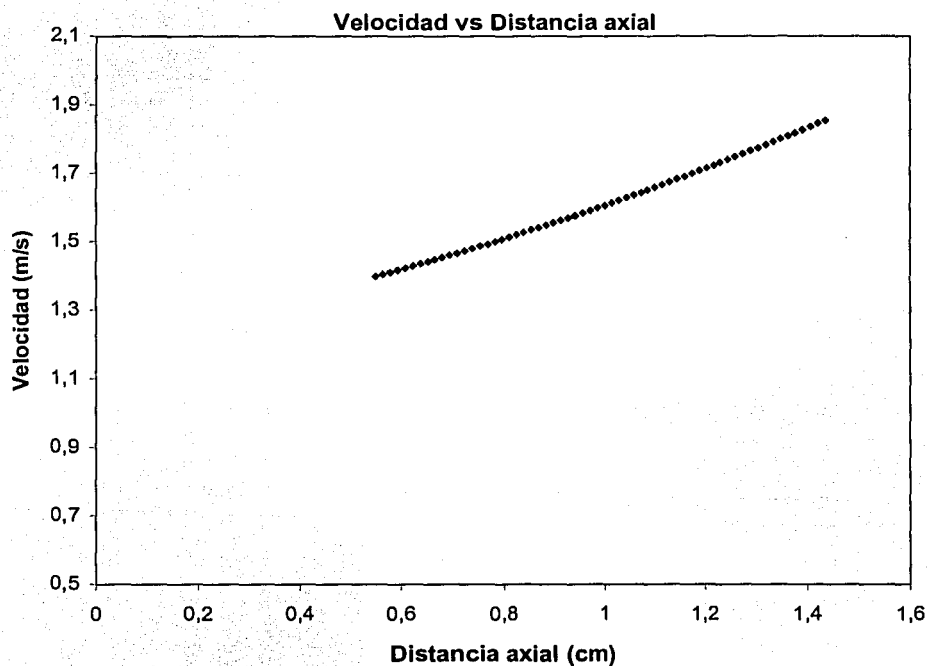


Fig. 47 Velocidad vs. Distancia axial, separán 0.5%

La Fig. 47 muestra una gráfica típica de velocidad obtenida durante los experimentos utilizando separán.

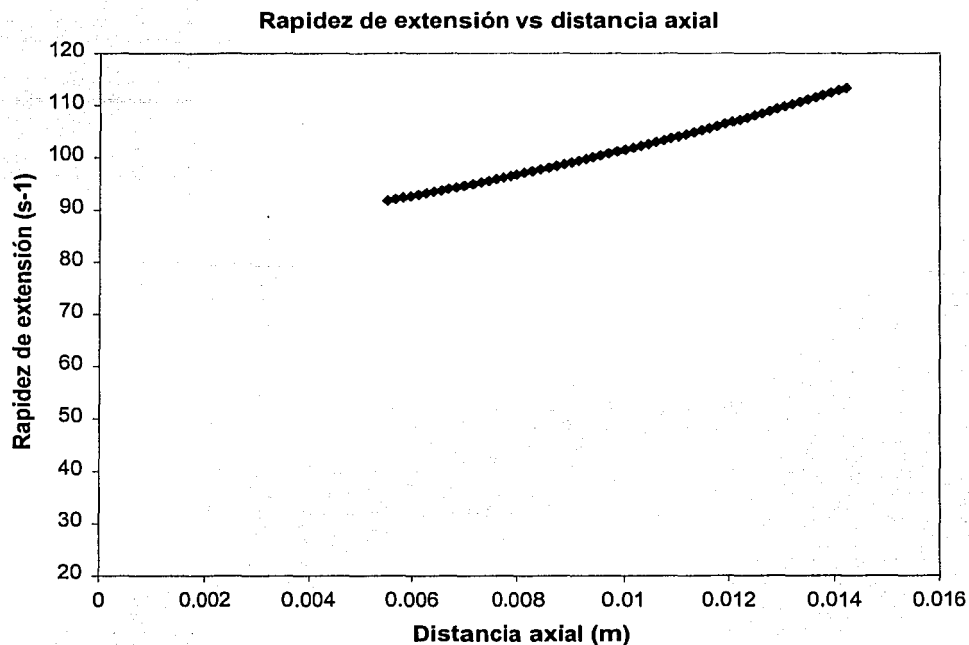


Fig. 48 Rapidez de extensión vs. Distancia axial, separán 0.5%

La rapidez de extensión se muestra en la Fig. 48. Para el fluido No-Newtoniano la rapidez de extensión obtenida estuvo en el rango de 90 a 250 s⁻¹. De esta se aprecia que la rapidez de extensión no es tan alta como en el fluido newtoniano.

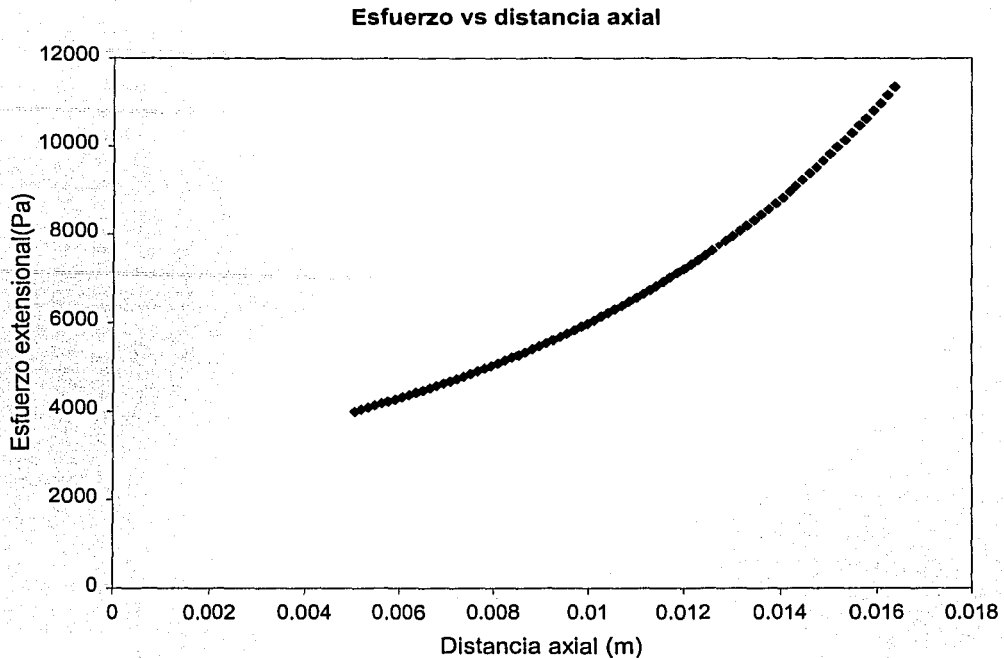


Fig. 49 Esfuerzo vs. distancia axial, separán 0.5%

La Fig. 49 muestra la variación del esfuerzo a lo largo del filamento utilizando separán. El primer valor de esfuerzo de esta gráfica corresponde a la diferencia de presión en la sección de corte con y sin succión aplicada al filamento. Las pruebas hechas para determinar este cambio proporcionaron una diferencia de entre 2000 y 6000 Pa variando la cantidad de succión aplicada al filamento y la distancia entre los orificios. Esta diferencia se debe a que el separán es un material elástico. Para conseguir la diferencia de presión en la sección de corte se requirió de un conocimiento profundo de las bombas de vacío. Ahora se sabe que lo importante no es contar con una bomba que genere alto vacío sino mas bien contar con un aparato que pueda succionar un mayor volumen de aire. Se probaron diferentes bombas de vacío con diferentes capacidades e incluso se utilizó una aspiradora.

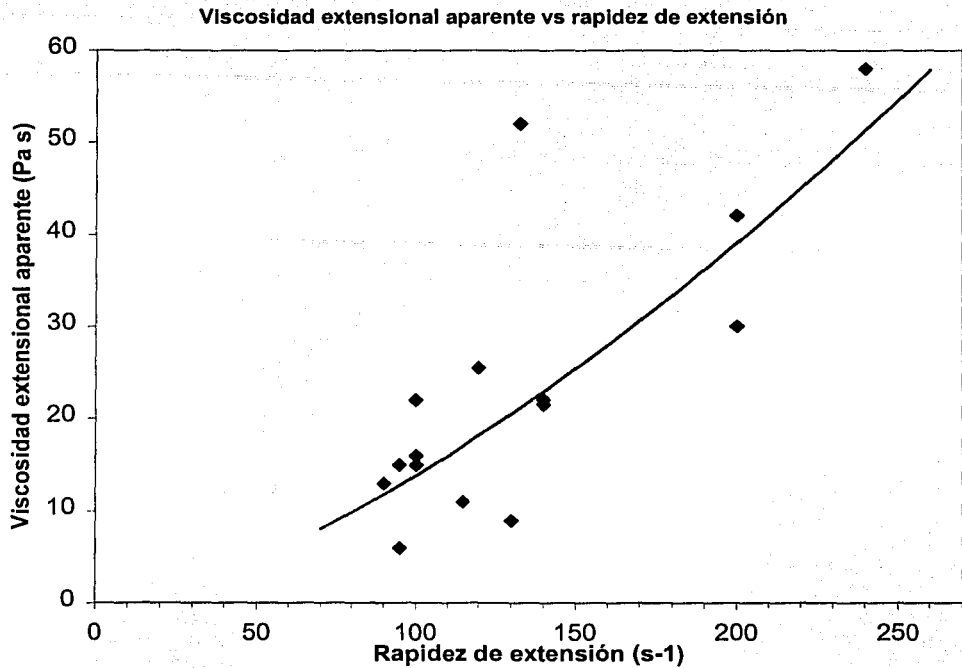


Fig. 50 Viscosidad vs. Rapidez de extensión, separán 0.5%

La Fig. 50 Se muestra una gráfica de viscosidad elongacional aparente contra rapidez de extensión. Se puede apreciar que la viscosidad extensional se incrementa conforme aumenta la rapidez de extensión.

CONCLUSIONES.

Los objetivos planteados al inicio de esta tesis se cumplieron satisfactoriamente. Los resultados obtenidos brindaron la posibilidad de alcanzar metas importantes del proyecto de investigación, que se lleva a cabo en el Laboratorio de Reología del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Gracias a las modificaciones mecánicas, al desarrollo de la metodología experimental y al apoyo brindado a los ingenieros en electrónica que participaron en el proyecto se lograron obtener resultados confiables que pudieron ser reportados a dos revistas internacionales en los artículos titulados "Instrumentation and Start-up of a new elongational rheometer with a pre-shearing history" y "A new elongational rheometer with a pre-shearing section with some preliminary results" en donde el autor de esta tesis es co-autor. Estos resultados, también validan las mejoras realizadas al reómetro.

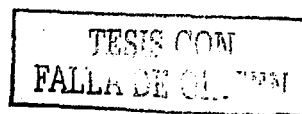
Dentro de los resultados experimentales más importantes, hasta ahora obtenidos, se confirmó la relación de Touton para el fluido Newtoniano y se obtuvieron valores confiables de viscosidad extensional.

El prototipo, que se encuentra todavía en periodo de pruebas, podría aún ser mejorado considerablemente en su diseño mecánico con el fin de reducir el tiempo de preparación de los experimentos y facilitar su operación.

REFERENCIAS

1. Hinch E.J. Phys. Fluids, 20(1977)S22.
2. Doremus P y Piau J.M, 1981. Journal of Non-Newtonian Fluid Mech, 9, 389
3. Shah D.O y Schechter R.S, "Improved oil recovery by surfactant and polymer flooding. Academic Press, New York, 1977.
4. Mewis J and Cleyn G. "Shear history effects in spinning of polymers" AIChE Journal vol. 28.No. 6 pp 900-908, 1982.
5. Mannheimer, R.j, Chem Eng. Commun, 48, 57, 1986.
6. Sridhar T and Gupta R. K. A simple elongational viscometer. Rheologica Acta, 24: 207-209 (1985).
7. Khagram M, Gupta R K, and Sridhar T. Extensional flow of Xantham gum solutions. Journal of Rheology, 29(2): 191-207(1985).
8. Chan R. C. and Gupta R K. Fiber spinning of very dilute solutions of polyacrilamide in water. Journal of Non-Newt. Fluid Mech. 30:267-283(1988).
9. Ferguson J. and Kemblousky, Applied fluid rheology, London: Elsevier Applied science 1991.
10. Macosko C. W. Rheology:principles, measurements and aplications New York: VCH ,1994.
11. Morrison F. A Understanding rheology; New York.Oxfor university , 2001.
12. Cogswell F.N. Polymer Melt Rheology, a guide for industrial practice. John Wiley & Sons New York 1981.
13. Barnes H. A., Hulton J. F. and Walters K. ;An introduction to rheology Amsterdam:Elsevier 1989.
14. Secor R.B., Schunk P. R., Hunter T.B., Stitt T.F., Macosko C. W., Scriven L.E.; J. Rheol., **33**,1329, 1989.
15. Weinberger C.B. and Goddard J.D., Int. J. Multiphase flow, **1**, 465, 1974.

16. Khagram M., Gupta R. K. and Sridhar T., J Rheol., **29**, 191, 1985.
17. Collyer A.. and Clegg., Rheological measurements Elsevier applied Science. 1988.
18. Birley A.W., Haworth B., Batchelor J. PHYSICS OF PLASTICS, Processing properties and materials engineering. Hanser Publishers 1991.
19. Whorlow -R. W. Rheological techniques. John Wiley & Sons. 1980.
20. Laba D. Rheological properties of cosmetics and toiletries. Cosmetics science and technology series volume 13 Marcel Dekker, 1993.
21. Díaz S. Jorge. "Sistema virtual para el control automático, la adquisición y el procesamiento de datos de un reómetro elongacional", UNAM Facultad de Ingeniería, México 2002.
22. Collyer A. A., Techniques in rheological measurement, Chapman & Hall London 1993.
23. Eisenmann. R. C. Machinery, malfunction diagnosis and correction. Prentice Hall 1998.
24. Manero O. and Mena B., On the slow flow of viscoelastic liquids past a circular cylinder. Journal of Non-Newtonian fluids mechanics, Vol. 9 No 3-4 p 379-387.
25. Ballman R. L.. Rheologica Acta **4**, 137, 1965.
26. Agrawl P. K.. Trans. Soc. Rheol. **21**, 355, 1977.
27. Cogswell F. N., Plast. And Polym. **36**, 109, 1968.
28. Vinogradov, Fikhman. and Radushkevich, Rheologica Acta, **11**, 286, 1972.
29. Munsdet H., Rheologica Acta, **23**, 421, 1979.
30. Meissner, J. Rheologica Acta, **8**, 78, 1969.



GLOSARIO.

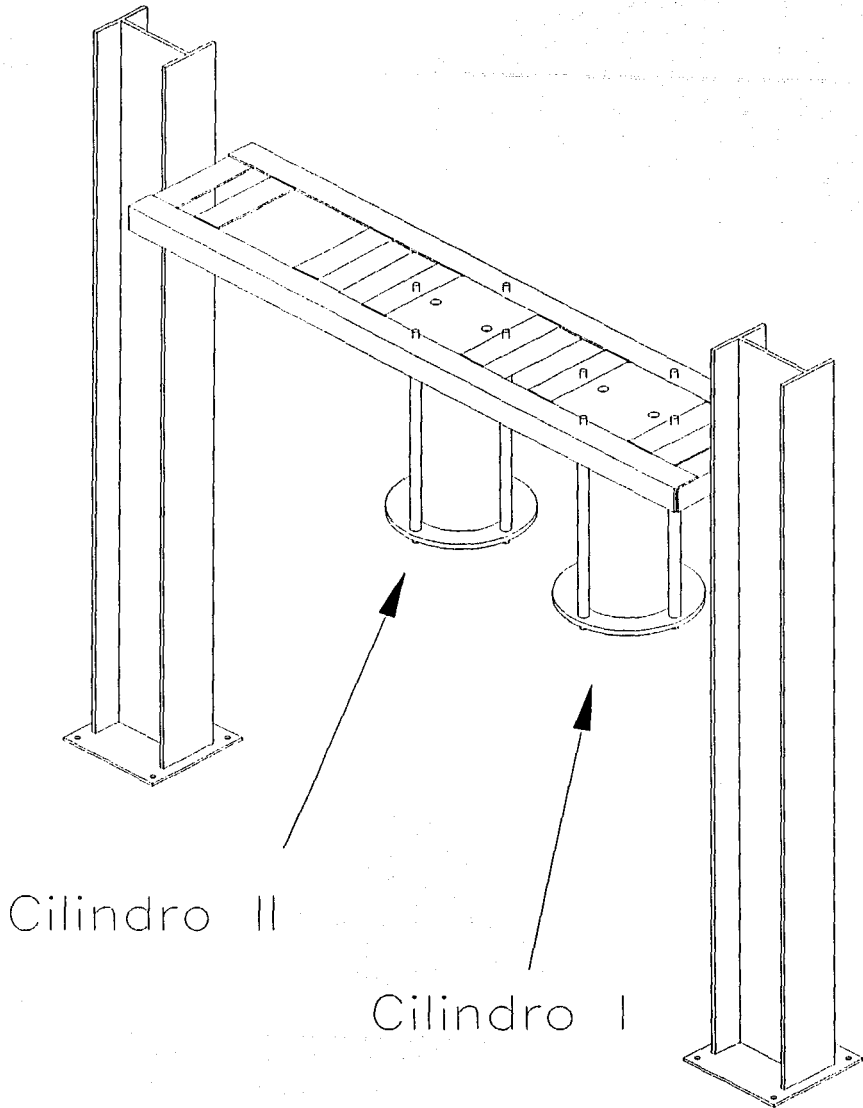
1. Ecuación constitutiva: ecuación que relaciona *esfuerzo, deformación, tiempo* y algunas veces otras variables como temperatura. También llamada ecuación reológica de estado.
2. Rapidez de extensión $\dot{\epsilon}$: Cambio de deformación relativa por unidad de tiempo s^{-1} .
3. Viscosidad elongacional η_E : El cociente entre un esfuerzo de tensión y rapidez de extensión.
4. Cociente de Trouton Tr : Cociente entre viscosidad elongacional y viscosidad cortante.
5. Ecuaciones de movimiento: Describen el balance entre fuerzas de inercia, fuerzas de presión, fuerzas viscosas y fuerzas de cuerpo.
6. Pascal-segundo (Pa s): Unidad de viscosidad dinámica en el SI.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTECA

APÉNDICE A

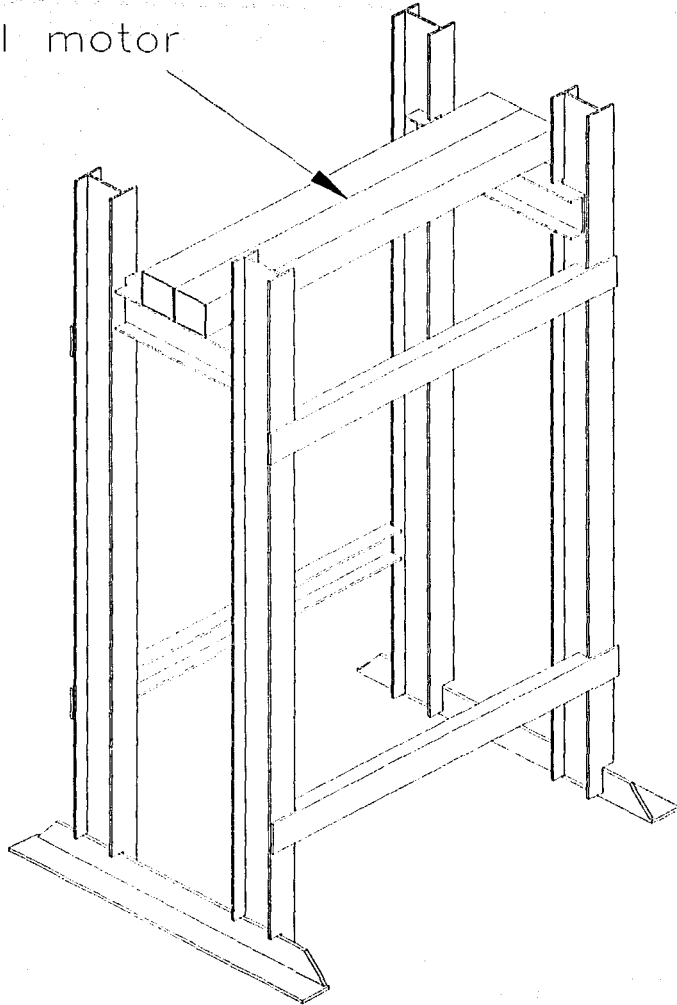
ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA CILINDROS DE ALIMENTACIÓN



APÉNDICE B

ESTRUCTURA PARA MOTOR

Base del motor



APÉNDICE C

THE PDCR 800 SERIES

Every PDCR 800 transducer is based on a high performance pressure sensor (core) which has subsequently been completed for a specific application by the addition of an electron beam welded pressure connector and an electrical connector assembly. The core itself is an accurate pressure transducer incorporating a high integrity silicon diaphragm and titanium module, a pcb assembly and advanced compensation techniques which give excellent performance over extended temperature ranges. The final assembly is electron beam welded and encapsulated. These cores are produced in large quantities and following automatic calibration over the whole temperature range and to three times the nominal pressure range all the data is stored in the computer data base.

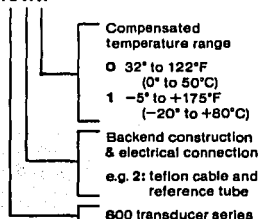
The benefits are a high performance to cost ratio series of the transducers listed below, including the core which can be selected and adapted in many different ways and supplied on short delivery.

Type number and specification

PDCR 800/801 — Basic core
 PDCR 810/811 — General purpose
 PDCR 820/821 — General purpose
 PDCR 830/831 — Depth
 PDCR 860/861 — Integral connector

The type numbering system denotes the following details:

PDCR 8 X X



Please refer to temperature effects, ordering information, assembly diagram and installation drawings to fulfil your requirements.

STANDARD SPECIFICATION

Operating pressure ranges

1, 2.5, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200, 300, 500 and 900 psi gauge.

Other pressure units may be specified e.g., ins. H₂O, kPa, etc.
 Absolute, differential and sealed gauge transducers are available.
 For higher ranges refer to PDCR 610/9000 data sheets.

Negative pressure

All transducers will accurately respond to pressures below gauge (negative pressures) and will operate with a vacuum applied. The reference side of the PDCR 82X is suitable for pressures up to 30 psig.

Overpressure

The rated pressure can be exceeded by the following multiples causing negligible calibration change:

10 X for 1 and 2.5 ranges
 6 X for 5-psi range
 4 X for 10 psi range and above.

Reference slide: 3D psi maximum

For higher differential pressures refer to PDCR 10/L/900 data sheets.

Burst pressure

In excess of 10 X rated pressure.

Positive pressure media

Fluids compatible with quartz and titanium.

Reference pressure media

Dry, non-corrosive, non-conducting gases.
 For liquid pressure media on reference, refer to PDCR 12Q/WL data sheet.

Conducting pressure media

When operating with a conducting pressure media use a fully floating system or ground the +Ve supply.

If this method is not practicable please refer to PDCR 900 data sheet.

Transduction principle

Integrated silicon strain gauge bridge.

Excitation voltage

10 Volts @ 5mA nominal.

Output voltage

17mV for 1 psi range
 25mV for 2.5 psi range
 50mV for 5 psi range
 100mV for 10 psi range and above.

The above outputs are for 10 Volts and are proportional to excitation voltage.

For amplified outputs please refer to PDCR 130/135 data sheets.

Common mode voltage

Typically +6.5 Volts with respect to the -Ve supply at 10 Volts excitation.

Output impedance

2000 ohms nominal.

Load impedance

Greater than 100K ohms for quoted performance.

Resolution

Infinite.

Combined non-linearity, hysteresis and repeatability

±0.1% B.S.L. for all ranges.

Zero offset

±3mV maximum.

Span setting

±10mV maximum. Units of the same range are matched to closer than ±3mV.

Operating temperature range

-5° to +175°F (-20° to +80°C) standard.
 This temperature range can be extended from -65°F (-54°C) to 250°F (120°C) for PDCR 82X and PDCR 86X.

Temperature effects

PDCR 8X0

±0.5% total error band 32° to 122°F (0° to 50°C) for 2.5 psi ranges and above.
 ±0.7% total error band 32° to 122°F (0° to 50°C) for 1 psi range.

N.B. PDCR 830 ±0.3%, 30° to 86°F (-2° to +30°C)

PDCR 8X1

±1.5% total error band -5° to +175°F (-20° to +80°C) for 2.5 ranges and above.

For -65° to +250°F (-54° to +125°C) temperature range please refer to manufacturer. Typical thermal zero and span coefficients of ±0.008%/°F (±0.015%/°C)

Natural frequency

28 kHz for 5 psi increasing to 360 kHz for 500 psi.

For more detailed information please refer to manufacturer.

Acceleration sensitivity

0.006% F.S./g for 5 psi decreasing to 0.0002% F.S./g for 500 psi.

Mechanical shock

100G for 1 ms half sine pulse in each of 3 mutually perpendicular axis will not affect calibration.

Vibration

Response less than 0.05% F.S./g at 30g peak 10Hz-2kHz, limited by 0.5 in. double amplitude (MIL-STD Proc 514.2-2 Curve L)

Weight

3.5oz. nominal.

Electrical connection

PDCR 81X, 82X

3 ft. integral cable supplied

PDCR 83X

3 ft. vented cable supplied as standard. Continuous lengths up to 500 ft. are available. Please refer to manufacturer for larger lengths.

PDCR 86X

6 pin Bayonet receptacle, PTH-10-6P or equivalent (Hermetic stainless) to MIL-C-26482.

Mating connector type PTO8A-10-6S or equivalent not supplied.

Pressure connection

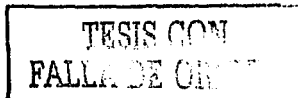
¼" NPT Flat end
 7/16" UNF (¼ A.N.) as MS33856-4
 ½" NPT with bulkhead mount (as shown on drawing PDCR 82X)

Flush fitting (M14 x 1.5 thread) - see example installation drawing on back page.

Depth cone (fitted as standard on PDCR 83X)

Others available on request.

Continuing development sometimes necessitates specification changes without notice.

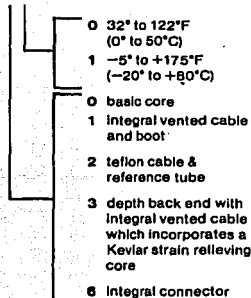


Ordering Information

Please state the following:

(1) Type number

PDCR 8 X X



- (2) Operating pressure range
 (3) Pressure connection
 (4) Pressure media

For non-standard requirements please specify in detail.

SPECIFICATION OPTIONS

The following summarizes the possibilities and for further details and ordering information please contact our Sales Office.

1. Parameter selection

Every PDCR 800 series transducer is calibrated not only to its nominal full range pressures, but to two times and three times this pressure and also the temperature effects of zero and span are monitored at five temperatures between -5° to +175°F (-20° to +80°C). All this information is stored in a computer and enables us, where it is important, to optimize the performance parameters to suit specific applications. Selection can either be for improved performance in accuracy or temperature drift from standard transducers or to optimize certain parameters by using the transducers in the overrange condition.

2. Improved accuracy

The standard linearity and hysteresis is $\pm 0.1\%$ B.S.L., but this can be improved to $\pm 0.05\%$ B.S.L., or even better by selection. In some cases this may result in a reduction of the full scale output.

3. Higher overload pressure

The lowest overload pressure for standard devices is 400% but this can be increased up to 1000% where necessary. This will reduce the full scale output and increase the zero drift with temperature unless this is maintained by selection.

4. Higher output

All cores can be overranged by three times nominal full scale, giving outputs of up to 300mV for most ranges. This will improve the zero stability, reduce the overload, and the linearity will be slightly degraded.

N.B. The calibration data available for transducers operating in overload condition is limited to 1000 psi maximum.

5. Excitation voltage

The transducers can be operated from any d.c. excitation up to 12 Volts maximum. The output is proportional to excitation, but the exact offset and span should be measured at the desired excitation.

6. Improved temperature effects

Improved thermal error bands can be selected from the data base.
 e.g. $\pm 0.3\%$ 32° to 122°F (0° to 50°C)
 $\pm 1.0\%$ -5° to 175°F (-20° to 80°C)
 Other error bands over different temperature ranges can also be selected.

7. Improved zero stability

Thermal zero shift and long term zero stability are improved proportionally with overload.

8. Long term stability

The standard PDCR 800 series offers typically 0.2% F.S. per year stability at 10 volt operation, but this can be improved considerably by operating in the overrange condition at a reduced supply voltage.

9. Thermal hysteresis

The calibration of a standard transducer at room temperature will repeat within 0.2% F.S. after cycling through the full temperature range.

10. Rationalization

The transducers can be selected such that both the zero offset and the full scale output are matched to better than 1% F.S. where interchangeability is important.

11. Extended temperature range

Transducers are available which will operate between -65° to +250°F (-54° to +125°C).

Please refer to PDCR 8X2 data sheet.

12. Shunt cal.

This facility is available by connecting an external resistor across the appropriate connection. The thermal coefficient of this Shunt cal. signal is typically 0.0025%/°F.

13. Calibration print out

Available on request relating to selected parameters above.

Examples of alternative specifications based upon a standard 150 psig transducer

Operating pressure range psi	Overload X F.S.	Accuracy B.S.L. % F.S.	Output with 10 Volt excitation
100	X6	$\pm 0.06\%$	70mV
150	X4(800 psi)	$\pm 0.1\%$	100mV
300	X2	$\pm 0.15\%$	200mV
450	X1.3	$\pm 0.2\%$	300mV

The above example illustrates the various specification performances when using the standard 150 psig core, e.g. used at 300 psi continuously, the overload is X2, accuracy is $\pm 0.15\%$ B.S.L. and output 200mV.

The above example can be selected if $\pm 0.06\%$ is required with 100mV output for ranges up to 300 psi.

