

125
20



**Universidad Nacional Autónoma
de México**

Facultad de Ingeniería

**Diseño y Construcción de una máquina
para un nuevo proceso de extrusión de
polímeros.**

T E S I S

**Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico Electricista**

p r e s e n t a

Carlos Alejandro Von Ziegler Guardado

Sergio I. Cuellar Díaz

Director: Dr. Baltasar Mena Iniesta



México, D. F.

1987



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

NUEVO PROCESO PARA EXTRUSION DE POLIMEROS

I.- PROLOGO.

II.- ANTECEDENTES.

II-A) REOLOGIA DE POLIMEROS.

II-B) PROCESO DE EXTRUSION.

II-C) INVESTIGACION PREVIA.

III.- DISEÑO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.

III-A) OBJETIVOS.

III-B) ESTRUCTURA INTERNA.

III-C) ESTRUCTURA INTEGRAL DEL EQUIPO.

IV.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.

IV-A) MATERIALES UTILIZADOS.

IV-B) METODOLOGIA.

IV-C) RESULTADOS.

V.- CONCLUSIONES.

VI.- BIBLIOGRAFIA.

I. PROLOGO

Una gran parte de los procesos en ingeniería tienen relación con los fluidos, es obvio que científicos e ingenieros necesitan obtener conocimientos acerca de los fluidos. Por sus diversas aplicaciones, el estudio de la mecánica de los fluidos es uno de los más vitales y fundamentales en la ingeniería y las ciencias aplicadas. De forma simple, podemos decir que un fluido es una sustancia incapaz de resistir fuerzas o esfuerzos de corte sin desplazarse. En general, los fluidos se clasifican en compresibles e incompresibles. Dentro de los fluidos incompresibles existe una clasificación muy importante, la que podemos subdividir en dos grandes grupos: fluidos Newtonianos y fluidos no Newtonianos.

Ultimamente ha cobrado gran importancia el estudio de los líquidos no Newtonianos que tienen un comportamiento viscoelástico, teniendo como ejemplo a las soluciones acuosas poliméricas, las que intervienen en numerosos procesos en plantas químicas y otras.

La parte experimental de este trabajo consistió en efectuar varias extrusiones de polímeros variando los parámetros con los que contamos, como son: frecuencia, amplitud, temperatura, gasto, etc.

Para nuestros propósitos usaremos algunos polímeros, es decir, resinas orgánicas compuestas de muchas unidades repetitivas (monómeros); a estos también se les conoce con el nombre de plásticos. Hay polímeros termofijos y termoplásticos.

Los polímeros termoplásticos son lineales, y se pueden inyectar en un molde cuando éste se calienta debido a que se ablandan a temperaturas más altas y deben de enfriarse antes de sacarlos del molde en el que fueron inyectados, pues de lo contrario perderían su forma.

Los polímeros termofijos no se ablandan cuando se calientan porque su estructura tridimensional los mantiene rígidos, por esto no se pueden moldear de igual forma que los polímeros lineales. Por lo tanto, la diferencia entre los polímeros termofijos y los termoplásticos radica principalmente en que los primeros tienen una estructura molecular tridimensional y los segundos la tienen lineal.

Los polímeros que se emplean en nuestros experimentos son:

- Polivinil butiral.
- Polietileno de baja densidad.
- Polietileno de alta densidad.

Después de obtener las muestras de nuestro equipo con los polímeros antes mencionados procederemos a realizar las pruebas de tracción en una máquina Instron (para pruebas mecánicas) y con los datos obtenidos podremos construir gráficas comparativas para cada tipo de movimiento y así poder hacer la comparación de características mecánicas entre cada tipo de movimiento y de esta forma poder concluir si se alcanzaron los resultados que se esperaban, esto es, un incremento en las propiedades mecánicas de los materiales producidos con la extrusión modificada.

II.- ANTECEDENTES

II-A) REOLOGIA DE POLIMEROS

Fluidos Newtonianos.

El comportamiento de estos es exhibido por fluidos en los cuales la disipación de energía viscosa es debida a las colisiones de especies de pequeñas moléculas, comparativamente hablando. Todos los gases, líquidos y soluciones de bajo peso molecular entran en esta categoría. Excepciones notables son las suspensiones coloidales y soluciones poliméricas donde las especies moleculares son grandes, éstas muestran marcadas desviaciones del comportamiento Newtoniano.

Fluidos No Newtonianos.

Son aquellos para los cuales la curva de flujo no es lineal, o sea, que la viscosidad de un fluido no newtoniano no es constante a una temperatura y presión dadas, sino que depende de otros factores como la velocidad de deformación en el aparato en el que el fluido está contenido, o de la historia previa de las deformaciones del fluido.

Estos fluidos reales, para los cuales la curva de flujo no es lineal, se clasifican dentro de tres grandes grupos:

- a) Fluidos para los cuales la velocidad de deformación en un punto dado es alguna función del esfuerzo cortante en ese punto y no depende de nada más, siendo éstos los fluidos stokesianos.

- b) Sistemas más complejos para los cuales la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación dependen del tiempo en el que se le ha aplicado el esfuerzo o de su historia previa.
- c) Sistemas que tienen características de fluidos y sólidos a la vez y exhiben elasticidad parcial después de la deformación llamados fluidos viscoelásticos.

Fluidos No Newtonianos independientes del tiempo.

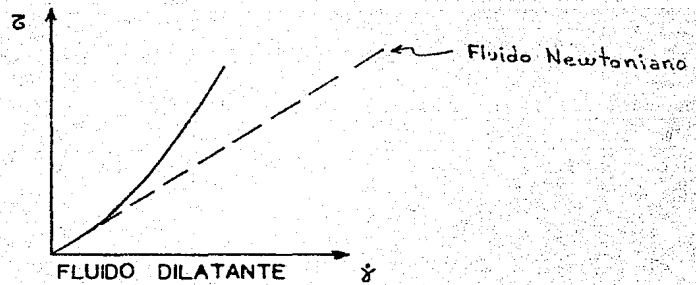
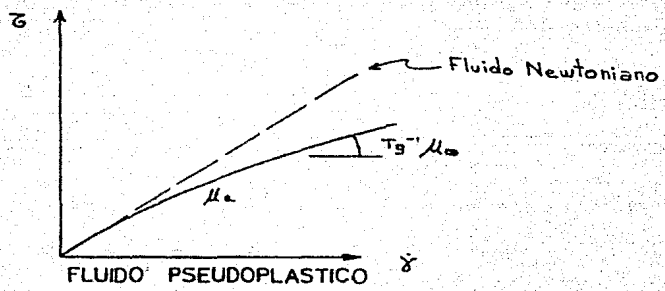
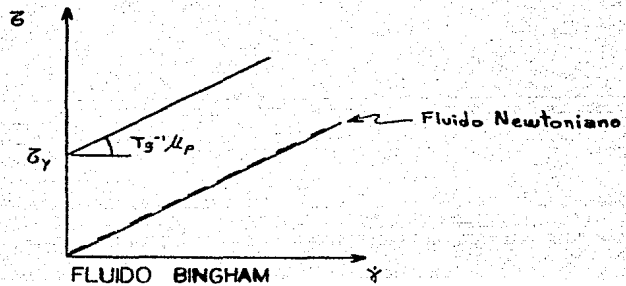
Los fluidos del primer tipo se describen por la siguiente ecuación reológica:

Esta implica que la velocidad de deformación en cualquier punto del fluido es una función simple de su esfuerzo cortante llamando a estos fluidos no Newtonianos viscosos.

Estos fluidos se pueden subdividir en tres tipos dependiendo de la naturaleza de la función en la ecuación anterior, éstos son:

- 1.- Plásticos de Bingham.
- 2.- Fluidos Pseudoplásticos.
- 3.- Fluidos Dilatantes.

Las curvas de flujo típicas de estos fluidos se muestran a continuación, comparándolas con la relación lineal de los fluidos Newtonianos:



1.- PLASTICOS DE BINGHAM.

Estos están caracterizados por una curva de flujo que es una recta, teniendo τ_y una intercepción sobre el eje de los esfuerzos excedido antes de que el flujo comience. La ecuación reológica de un plástico de Bingham es: $\tau - \tau_y = \mu_p \dot{\gamma}$ donde $\tau > \tau_y$ y μ_p es la viscosidad plástica o coeficiente de rigidez, que es la pendiente de la curva.

El concepto de plástico de Bingham idealizado es conveniente en la práctica, porque muchos fluidos siguen aproximadamente esta forma de comportamiento, ejemplos comunes son los lodos, pinturas de aceite, pasta de dientes, etc. La explicación de este comportamiento es que cuando el fluido está en reposo contiene una estructura tridimensional de suficiente rigidez para resistir cualquier esfuerzo menor que el crítico; si este esfuerzo es excedido, la estructura se desintegra completamente y el sistema llega a ser el de un fluido Newtoniano bajo un esfuerzo cortante $\tau - \tau_y$ y cuando el cortante cae abajo de τ_y , la estructura se rehace.

2.- FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS.

Estos no muestran ningún valor de ruptura y la curva de flujo típica para estos materiales indica que la relación de esfuerzo cortante a rapidéz de deformación, que es la viscosidad aparente μ_a ,

cae progresivamente con la rapidez de deformación y la curva de flujo llega a ser lineal sólo en altas velocidades de deformación. Esta pendiente límite es conocida como la viscosidad a esfuerzo infinito, μ_{∞} .

Una gráfica logarítmica de esfuerzo cortante contra rapidez de deformación para estos materiales con frecuencia es lineal con pendiente entre cero y la unidad.

3.- FLUIDOS DILATANTES.

Estos son muy similares a los pseudoplásticos al no mostrar un valor de ruptura, pero la viscosidad aparente para estos materiales se incrementa con el aumento de la rapidez de deformación. Este comportamiento se encontró originalmente en suspensiones con altas concentraciones de sólidos por Osborne Reynolds, quien sugirió que cuando estas suspensiones concentradas están en reposo, los espacios vacíos son mínimos y el líquido es suficiente para llenarlos. Cuando este material es puesto en movimiento a pequeñas velocidades, el líquido lubrica el movimiento de las partículas y por esto el esfuerzo es pequeño. A altas velocidades de deformación el empaquetamiento denso de las partículas es roto, el material se expande o dilata, incrementándose los espacios, habiendo en este caso el suficiente líquido en la nueva estructura para lubricar el flujo de las partículas y los esfuerzos aplicados tendrán que ser más grandes, causando que la viscosidad aparente se incremente rápidamente con el incremento de la rapidez de deformación.

El término dilatante se emplea para fluidos que exhiben la propiedad de incrementar la viscosidad aparente cuando se incrementa la velocidad de deformación.

FLUIDOS NO NEWTONIANOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO

Muchos fluidos reales no pueden ser descritos por una ecuación reológica sencilla como la que se aplica a fluidos para los cuales la relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación es independiente del tiempo. La viscosidad aparente de fluidos más complejos depende no solamente de la rapidez de deformación sino del tiempo en que el esfuerzo ha sido aplicado. Estos fluidos pueden ser subdivididos en dos clases:

- a) Fluidos tixotrópicos.
- b) Fluidos reopécticos.

Estos fluidos se clasifican de acuerdo a si el esfuerzo cortante decrece o se incrementa con el tiempo cuando el fluido es puesto a velocidad constante.

a) Fluidos tixotrópicos:

Estos materiales son aquellos cuya consistencia depende de la duración del esfuerzo así como de la velocidad de deformación. Si un material tixotrópico es puesto en movimiento a velocidad constante después de un periodo de reposo, la estructura progresivamente se romperá y la viscosidad aparente disminuirá con el tiempo.

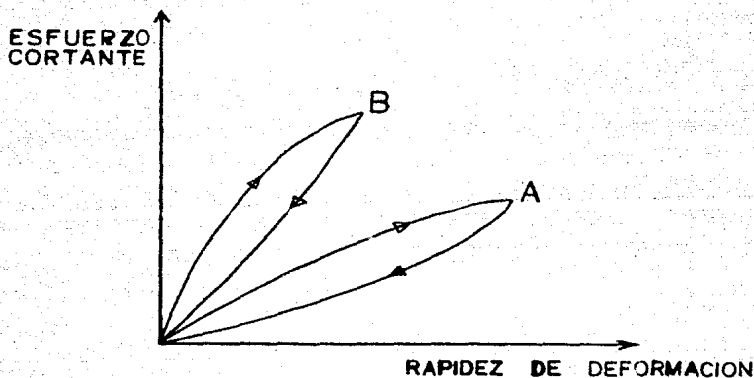
La velocidad de rompimiento de la estructura durante la aplicación del esfuerzo a una velocidad dada dependerá del número de estructuras que se puedan romper y por lo tanto decrecerá con el tiempo. La velocidad simultánea de reformación de la estructura deberá incrementarse con el tiempo al aumentar el número de ligaduras de la nueva estructura.

Eventualmente, un estado de equilibrio dinámico se alcanza cuando la velocidad de formación de la estructura se iguala a la de rompimiento de la misma estructura. Esta posición de equilibrio depende de la velocidad de deformación y el rompimiento de la estructura aumenta al incrementarse la velocidad de deformación. Como un ejemplo podemos considerar un material confinado a moverse dentro de un viscosímetro cilíndrico.

La tixotropía es a veces un proceso reversible, viéndose que la estructura del material se regenera gradualmente luego de estar en reposo.

Si graficáramos el esfuerzo cortante contra la rapidez de deformación encontraríamos una curva de histéresis, la cual se grafica primero para el incremento de rapidez de deformación a velocidad constante y después para el decremento de la rapidez de deformación a velocidad constante, como se ilustra en la siguiente figura, donde las curvas A y B se dibujan para fluidos del tipo Newtoniano y Pseudoplásticos que exhiben tixotropía.

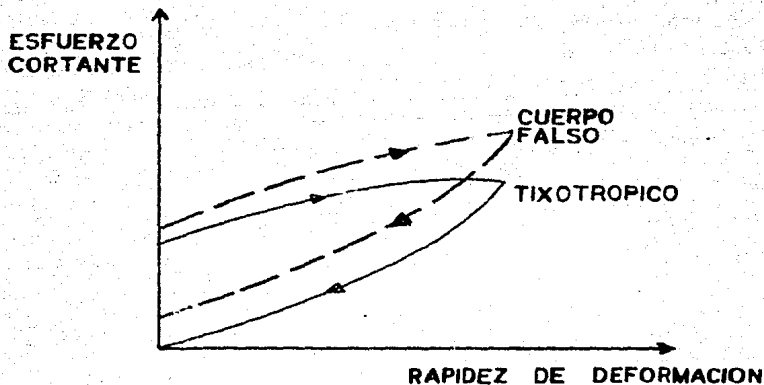
Efecto de histéresis



El término " cuerpo falso " que se encuentra frecuentemente en trabajos de tixotropía, se usa para distinguir varios tipos de comportamiento tixotrópico en plásticos de Bingham. Los materiales tixotrópicos verdaderos son en los que se rompe completamente la estructura bajo la influencia de altos esfuerzos y llegan a ser verdaderos líquidos después que el esfuerzo ha sido dejado de aplicar, hasta que después de un período de tiempo la estructura se reforma.

Los materiales de cuerpo falso no pierden sus propiedades sólidas completamente y pueden exhibir un valor de rompimiento en el esfuerzo, que solamente se aprecia después de estar en re-

poso por un periodo de tiempo grande. Las curvas de histéresis se muestran a continuación para los dos materiales anteriores:



b) Fluidos reopécticos:

Este es el caso de la formación gradual de la estructura al aplicar un esfuerzo. Existe con frecuencia un valor crítico de esfuerzo en el cual la reformatión de la estructura no ocurre, sino su rompimiento. A esto usualmente se le llama " reopexia ", pero es muy distinto su comportamiento al de algunas pastas. Aún cuando este comportamiento se realiza a moderadas velocidades de deformación, si la velocidad es grande la estructura no se formará.

Si consideramos el flujo de este material a través de un capilar con diferencias de presión moderadas, al principio el flujo es rápido y luego decrece cuando la estructura se empieza a formar. A presiones más altas el flujo es más rápido siempre y no decrece porque la estructura no se forma a altas velocidades de deformación.

II-8) PROCESO DE EXTRUSION.

Se ha visto que los polímeros se pueden dividir en dos grupos; los de moléculas biológicas y los de materiales sintéticos.

La estructura central de ambos grupos es la cadena de átomos de carbono. A medida que esta cadena es más grande, las propiedades físicas cambian. Así, una cadena con unos cuantos átomos de carbono será elemento constitutivo de un gas, una cadena con unos cientos de átomos de carbono constituirá un líquido y a partir de aproximadamente mil o más átomos de carbono tendremos un sólido. Esto es debido a que mientras mayor sea el número de átomos de carbono en la cadena, mayor será la fuerza de cohesión entre las moléculas.

El concepto esencial para producir las cadenas largas de polímeros es que tomando dos moléculas de un material como el etileno -- ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$), en que hay dos enlaces carbono-carbono, abriendo uno de los enlaces en cada una y uniendo las moléculas originales (monómeros), se obtiene una molécula grande final.

llamada polímero.

Los polímeros termoplásticos son el objeto de estudio de este trabajo. Se denominan así porque se plastifican cuando se les calienta, razón por la cual son adecuados para la extrusión.

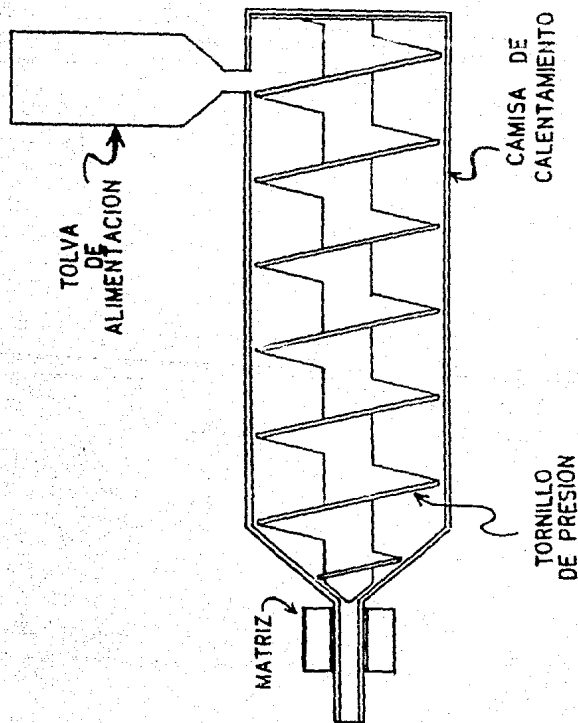
Hay otro grupo de polímeros que en lugar de constituirse por muchas moléculas lineales forman una red sencilla pero grande durante la polimerización. Debido a que esto ocurre calentando los materiales básicos juntos, este grupo se denomina " polímeros termoestables ".

También se presenta el caso de polímeros sintetizados de la unión de diversos monómeros, por ejemplo, alternando unidades de etileno y cloruro de vinilo se obtiene el copolímero etileno-cloruro de vinilo. Este es un copolímero alterno.

Otro tipo de copolímeros son aleatorios, de bloque (se inserta un cierto número de unidades de una sola clase) y de injerto (en el cual se añade un copolímero como una ramificación).

Un gran porcentaje de los plásticos se fabrica con rellenos. Estos pueden ser: aserrín, celulosa de fibra corta, mica en polvo y asbesto. Estos materiales mejoran la resistencia y la estabilidad dimensional y disminuyen el costo de los polímeros.

Los materiales termoplásticos, como los derivados de la celulosa, las resinas de vinilo, el poliestireno, el polietileno, el polipropileno y el nylon pueden extruirse por medio de dados o matrices en formas simples de cualquier longitud.



El material granulado o pulverizado se alimenta a la tolva forzándolo luego a través de una cámara de calentamiento por medio de un tornillo helicoidal. En la cámara el material se convierte en una masa densa, viscosa y elástica, forma en la cual se pasa a través de la matriz. Acto seguido el material se enfría por medio de aire agua o contacto con una superficie fría, endureciéndose gradualmente al descansar sobre el transportador. De este modo se producen fácilmente productos de sección transversal constante, como tubos largos, varillas, secciones moldeadas, etc.

Los polímeros termofraguantes no se adaptan a este tipo de extrusión porque endurecen rápidamente; por lo tanto su uso se limita a la producción de tubos de pared gruesa.

II-C) INVESTIGACION PREVIA.

Una de las investigaciones previas realizadas por otros investigadores (ref. 1), resulta particularmente interesante, a continuación incluimos un breve resumen de ésta.

En la última década se ha puesto especial atención a los flujos de líquidos no Newtonianos, estudiándolos en varios casos, en particular en análisis teóricos y experimentales para flujos viscoelásticos en tuberías de sección circular bajo un gradiente de presiones, el cual oscila sobre una posición media no nula.

Dichos análisis son perturbaciones de flujos, esperando como resultado un aumento en el gasto volumétrico que se presenta en un rango limitado de valores, pudiendo incrementar el flujo incrementando la frecuencia y amplitud de las oscilaciones, provocando un gradiente de presiones constante y así estudiando los efectos del flujo.

En los experimentos se usaron fluidos no-Newtonianos con flujos laminares y turbulentos con variantes en amplitudes y frecuencias, siendo algunas soluciones acuosas como poliacrilamida y sebarán. Las concentraciones variaron desde 0.01% en peso las muy diluidas hasta 6% en concentraciones moderadas y numerosas concentraciones intermedias. También se usaron soluciones altamente elásticas como poliacrilamida.

Al término de los experimentos se observó un ligero incremento en el gasto volumétrico, con lo que podemos confirmar que los efectos de fricción se reducen, siendo posible un incremento hasta del 10% en el gasto volumétrico, aproximadamente, con referencia al flujo rectilíneo.

Efectos y aplicaciones.

En este artículo se examinó el flujo de líquidos a través de tubos oscilantes longitudinalmente con respecto a una posición media.

El flujo fue generado por un gradiente de presión constante y se puso atención especial en la velocidad del flujo a consecuencia de las oscilaciones. Para fluidos elásticos con viscosi-

dad constante no se observó variación en el flujo, lo cual va de acuerdo con el análisis teórico. Sin embargo, para fluidos viscoelásticos la velocidad del flujo se incrementa arriba de veinte veces, esto es en comparación con fluidos puramente rectilíneos.

Tal efecto se examinó para varios fluidos viscoelásticos. La complejidad de tales fluidos se examinó con técnicas visuales para fluidos y el resultado obtenido mostró que el fluido es dominado por un efecto de corte. Si tomáramos una solución numérica, en donde se usa ley de fuerzas nos predice un incremento en la velocidad del flujo, lo que concuerda cualitativamente con los datos experimentales pero cuantitativamente difiere. Este sistema apenas se está desarrollando a nivel industrial.

ARREGLO EXPERIMENTAL:

El arreglo general experimental se muestra en la Fig. 1.

El fluido se bombea por una bomba peristáltica (P) a una botella (B) y después a una sección de prueba que consiste en un tubo circular intercambiable con diámetro variable de 0.26 cm a 0.52 cm. Este tubo está soportado por chumaceras y libre para moverse horizontalmente. Un motor (M) se usa para oscilar el tubo a frecuencias de 0 a 75 rad/s. Una flecha excéntrica provee las amplitudes de 0.65, 1 y 1.3 cm. Las frecuencias se monitorearon con una lámpara estroboscópica (S). Con dos tomas de presión conectadas a transductores de presión (T) se mide el gradiente de presión en el tubo.

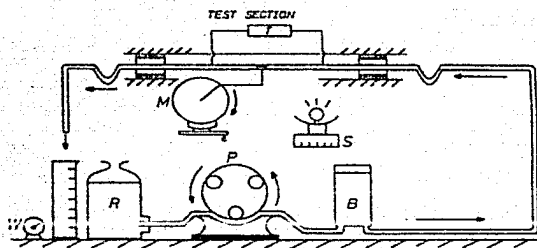


FIG. 1 DESCRIPCION ESQUEMATICA DEL APARATO EXPERIMENTAL

El fluido sale del área de prueba por una sección reguladora y cae en un recipiente (R) de donde se recircula con la bomba. Para medir la velocidad del flujo se usó un cronómetro (W).

FLUIDOS DE PRUEBA

a) Newtonianos.- Agua, glicerina y agua en soluciones de varias densidades.

b) Viscoelásticos.- Soluciones de poliacrilamida (separán AP-30) en agua destilada al 0.6 y 1.5% de peso. Una solución de 1% de separán AP-30 en 50-50% de agua-glicerina. Las características viscoelásticas de los fluidos antes mencionados se muestran en la figura # 2.

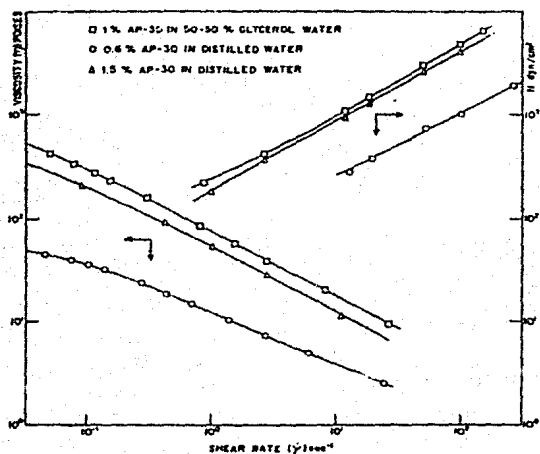


FIG. 2 PROP. VISCOELASTICAS DE FLUIDOS EXPERIMENTALES

También se usó una solución de 200 p.p.m. de separán AP-30 en miel de maíz.

Para finalizar, una solución de 0.005% de ácido toluén sulfónico y setiltrimetil amonio en agua.

Esta solución jabonosa muestra propiedades altamente elásticas en relación a otros fluidos no viscoméricos.

RESULTADOS

Tomando en cuenta que el incremento en el gasto volumétrico I de estacionario a oscilante se define como:

$$I(\%) = \frac{Q_{osc} - Q_{est}}{Q_{est}} \times 100\%$$

Donde Q_{osc} y Q_{est} son los gastos volumétricos correspondientes a oscilatorio y estacionario respectivamente; la figura 3-a muestra el porcentaje de incremento en el gasto volumétrico (I) puesta como función del número de Reynolds (Re) para la solución acuosa del 0.6% de separán AP-30. El número de Reynolds se basa en el valor calculado de la viscosidad de una curva experimental del gasto volumétrico contra un gradiente de presión bajo condiciones de flujo Poisevillle para el tubo considerado. En los resultados para una amplitud constante y un sinnúmero de frecuencias oscilantes, se pueden observar incrementos extremadamente altos en el gasto volumétrico obtenido para valores bajos del Re . Los incrementos empiezan conforme el Re se incrementa y finalmente se acerca asintóticamente a cero a mayores gastos volumétricos.

La figura 3-b muestra otra gráfica similar de I vs Re para la misma solución que en el caso anterior pero a una frecuencia dada y varias amplitudes. Vemos claramente que en el rango de valores experimentales el máximo incremento en el gasto volumétrico se obtiene a la mayor frecuencia y amplitud. Este comportamiento llegará a un valor donde deje de ser válido, pero las limitaciones experimentales no permiten llegar a este punto. El efecto cuando se incrementa el diámetro del tubo al doble se muestra en las figuras 3-c y 3-d en que se observa una disminución en el valor de I .

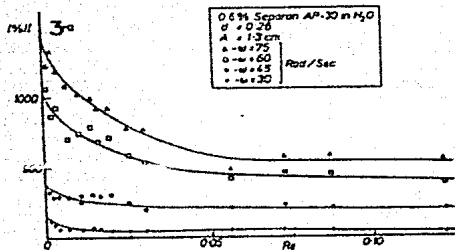


FIG. 3-a

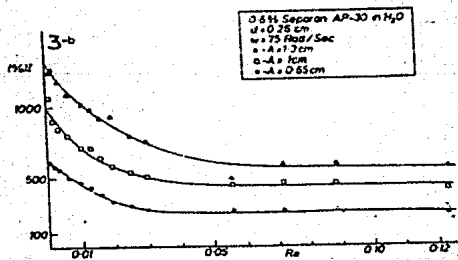


FIG. 3-b

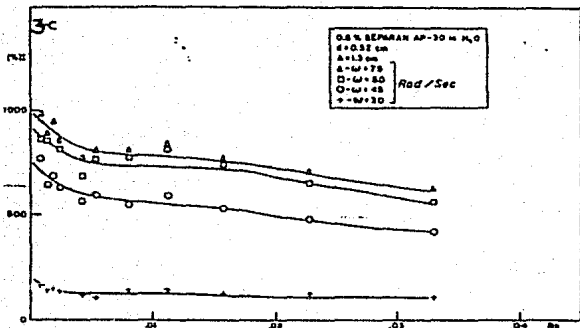


FIG. 3-c

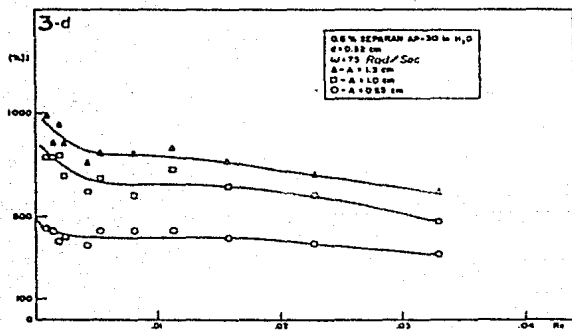


FIG. 3-d

FIGS. 3 INCREMENTO DE GASTO VOLUMETRICO VS N_{α} DE REYNOLDS PARA UNA SOLUCION DE 0.6% SEPARAN AP-30 EN AGUA DESTILADA CON VARIAS AMPLITUDES, FRECUENCIAS Y DIAMETROS.

Con referencia a los experimentos anteriores se concluye que el efecto de elasticidad en el flujo examinado de 200 p.p.m. de separán AP-30 en solución de miel de maíz, no presentó ningún incremento en el gasto volumétrico en el rango del experimento considerado.

EXPERIMENTO DE VISUALIZACION DE FLUJOS

Se examinará de cerca la naturaleza del campo de flujo dentro del tubo oscilante, visualizando una serie de flujos experimentados.

Una tintura de la misma densidad que la del flujo de prueba se inyectó aguas arriba y se fotografió, primero bajo condiciones inestables y después cuando se alcanzó el estado de oscilación estable.

El perfil de velocidades dentro del tubo para una solución viscosa de glicerina se muestra en la Fig. 4, tanto para el caso estacionario y flujo oscilatorio de 75 rad/s con una amplitud de 1.3 cm. Se puede observar que ambos perfiles son iguales, pues no hay incremento en la velocidad de flujo.

En la figura 5 se muestra el perfil de velocidades para la solución viscoelástica de 0.6% de separán A.P.-30 en agua destilada fluyendo bajo las mismas condiciones que el caso anterior.

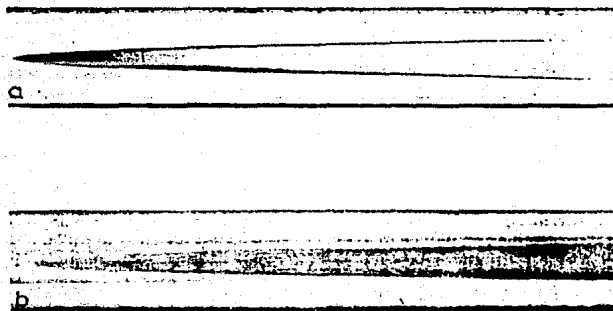


FIG. 4 PERFIL DE VELOCIDADES DENTRO DE UN TUBO PARA UNA SOLUCIÓN DE GLICEROL, $\phi=0.52$ CM, $Re=0.003$. (a) ESTACIONARIO, (b) OSCILATORIO, $A=1.3$ CM, $W=75$ RAD/SEG.

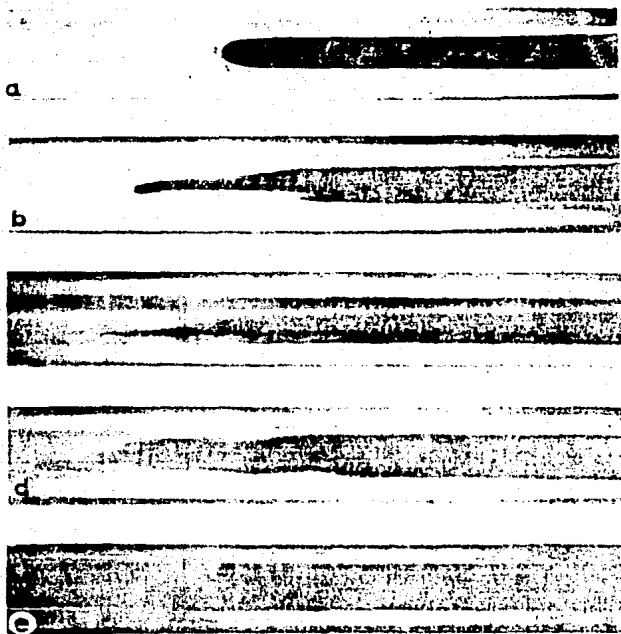


FIG. 5 PERFIL DE VELOCIDADES PARA UNA SOLUCION AL 0.6 %
 DE SEPARAN AP-30 EN AGUA DESTILADA. DIAMETRO DE TUBO = 52 CM,
 $R_e = 0.003$. (a) ESTACIONARIO; (b) OSCILATORIO, $\omega = 30$ RAD/S, $A = 1.3$ CM;
 (c) OSCILATORIO, $\omega = 45$ RAD/S, $A = 1.3$ CM;
 (d) OSCILATORIO, $\omega = 60$ RAD/S, $A = 1.3$ CM;
 (e) OSCILATORIO, $\omega = 75$ RAD/S, $A = 1.3$ CM.

Se puede observar que a 30 rad/s el perfil de velocidades ha cambiado drásticamente su elongación en su parte central. A 45 rad/s, el cambio es aún mayor y a 75 rad/s, no sigue ninguna semejanza al perfil original. Debemos notar que en este punto el incremento en el gasto volumétrico es el mayor que corresponde a los resultados de los experimentos de las figuras 3-C y 3-D.

Para separar los efectos elásticos de los viscosos, la solución de 200 p.p.m. separán AP-30 en miel de maíz se analizó bajo las mismas condiciones como en el caso de las figuras 4 y 5. Los resultados se muestran en la figura 6, en donde por superposición de negativos correspondientes a las condiciones estacionarias y oscilantes en donde no se ven efectos medibles al menos por comparación.

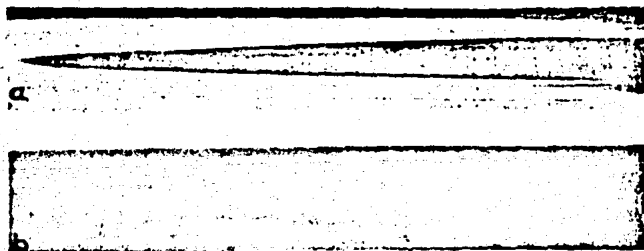


FIG. 6 PERFIL DE VELOCIDADES PARA UNA SOLUCION DE 200 P.P.M. SEPARAN AP-30 EN MIEL DE MAIZ. DIAMETRO DE TUBO=0.52 CM, $Re=0.003$, (a) ESTACIONARIO; (b) OSCILATORIO, $w=75$ RAD/S, $A=1.3$ CM.

Esta viene de la figura 5 que muestra perturbaciones radiales y axiales, para lograrlo se tomó una secuencia de fotos a 45 rad/s.

CONCLUSIONES EXPERIMENTALES

1) Los resultados experimentales confirman la reducción en el efecto de arrastre en otros fluidos no viscosos en tubos que al mismo tiempo muestran efectos viscoelásticos muy grandes cuando se les aplica oscilaciones a los tubos.

Es posible un incremento en la velocidad de flujo de veinte veces para los fluidos examinados. Los incrementos aparecen en valores moderados de amplitud y frecuencia de oscilaciones cuando el gradiente de presión se vuelve casi constante.

2) Para pequeños incrementos de velocidad de flujo, se observa dependencia cuadrática en el producto amplitud-frecuencia (WA), pero como el incremento aumenta, la dependencia llega a ser una función logarítmica de WA .

3) De los datos experimentales tomados de fluidos mas complejos junto con un examen visual del patrón de flujo en el interior del tubo, parece que el factor dominante en el flujo oscilante de fluidos viscoelásticos en tubos es la dependencia de la viscosidad. Las propiedades elásticas de líquidos son de segunda importancia en el fenómeno.

ALGUNAS APLICACIONES INTERESANTES

Los efectos mostrados que se presentan en los experimentos anteriores son interesantes en soluciones con flujos viscoelásticos a través de tubos oscilantes mismos que sugieren numerosas posibilidades para aplicaciones industriales. Actualmente, se efectúan proyectos que examinan el problema en mezclas de polímeros, con el propósito de modificar y mejorar los procesos de extrusión. Aunque el programa está en una etapa inicial se espera obtener resultados muy sustanciosos en un futuro muy próximo.

REOLOGIA DE TERMOPLASTICOS BAJO CONDICIONES
DE FLUJO ESPIRAL Y VIBRACIONES EN
EXTRUSION.

En este estudio, se publican los resultados experimentales y teóricos de la reología de polímeros sujeta a efectos mecánicos en la extrusión. El flujo espiral en sistemas no Newtonianos ha sido estudiado y cuantizado para estudios de ingeniería.

La eficiencia en la energía del ciclo de deformación de extrusión ha sido estimada.

Las investigaciones han proporcionado recomendaciones para la aplicación del esfuerzo de corte como un método de acción directa en la relajación, y así también en las características reológicas de los polímeros. Lo anterior abre nuevas posibilidades para los procesos de extrusión y para los compuestos basados en termoplásticos.

INTRODUCCION.

Investigaciones realizadas en los últimos años han demostrado que si se aplican esfuerzos de corte, deformación y amplitudes variadas al flujo, la resistencia de los polímeros al flujo puede sufrir una marcada reducción.

A pesar de su importancia, el comportamiento de los polímeros bajo condiciones de esfuerzos constantes, pueden aparecer durante la

rotación y vibraciones del extrusor.

PROBLEMA DE FLUJO DE POLÍMEROS DERRETIDOS BAJO CON- DICIONES DE CORTE EN ESPIRAL .

El flujo espiral nos muestra cuando un polímero es forzado a través de una boquilla bajo acción de una caída de presión simultánea con la rotación del cilindro y con velocidad Ω .

Estos trabajos se han realizado solo con flujos en condiciones de estado estable.

El flujo espiral se ha comparado con flujos concéntricos y axiales con respecto a cilindros coaxiales en un rango amplio de deformaciones. Los rangos de deformación se han establecido con el efecto de rotación y donde el flujo axial es insignificante. También se ha mostrado que la viscosidad aparente se incrementa aumentando la caída de presión en la zona adyacente al centro del flujo y también con ciertas combinaciones de velocidad angular y gastos de flujo axial. Los experimentos se llevaron a cabo en un extrusor con una matriz cónica y se encontró que si existe relación entre la teoría y los datos obtenidos.

En otras investigaciones se ha visto que incrementando las velocidades angulares entre ciertos límites, el promedio de flujo axial se incrementa.

En estos experimentos no se ha tomado en cuenta la dependencia de la temperatura para las propiedades de derretido. De esta mane-

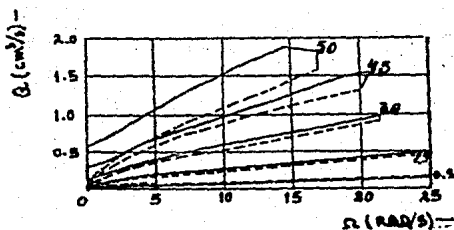
ra, el problema de extrusión con esfuerzos de corte se puede resolver tomando en cuenta fluidos no Newtonianos.

ALGO DE LA TEORIA DE FLUIDO ESPIRAL EN POLIMERO

Considerando un sistema de coordenadas cilíndricas, el flujo en estado estable entre dos cilindros de longitud infinita de radios R_1 y R_2 y uno de ellos está girando a velocidad angular Ω .

En este caso podemos observar que cada partícula del material describe una curva alrededor del eje central del cilindro con una velocidad angular $w(r)$ y una velocidad longitudinal $u(r)$.

En la figura siguiente se representa la dependencia del promedio de flujo Q con velocidad angular Ω para varios valores de f ($f = p/e$, donde p es la presión de entrada al cilindro y e la longitud del cilindro).



GRAFICA DE FLUJO VOL. (VARIOS MAT. DE POLIPROPILENO VS VEL. ANGULAR DE LA BOQUILLA A VARIOS VALORES DE f .)

Aquí la línea punteada representa la dependencia de la anlogía al asintonismo propuesto. El valor aproximado de Q se calcula especificando ciertos valores del momento M y valores de r , que son iguales a R_1 y R_2 .

El error de la aproximación de Q , comparado con el valor numérico calculado, fue menor al 20%.

También se observó que la potencia del extrusor (cuando se extruye a Q constante) disminuye cuando se incrementa la caída de presión.

EFFECTO DE VIBRACIONES DE BAJA FRECUENCIA EN PROCESOS DE EXTRUSIÓN.

Aquí se discutieron los resultados de la aplicación de vibraciones de baja frecuencia en la cabeza extrusora.

Aquí a la matriz se le aplicó un movimiento recíprocante-rotacional a una frecuencia de 25 Hz.

Las amplitudes de las vibraciones fueron: 0, 4, 11.5, y 22.3°. En estas condiciones las vibraciones causan deformaciones cíclicas de 0, 75, 180 y 335% respectivamente.

Como se ha visto, las vibraciones de baja frecuencia nos dan un significativo incremento a la salida y reducción de presión en la extrusión.

Es importante hacer notar que esta tendencia es más pronunciada para polímeros compuestos que para polímeros puros; con una vibración de amplitud 22.3° el gasto se incrementa (a temperatura y presión constantes) de 1.4-1.5 veces con polímeros base; de 1.6-1.8 veces con propileno-cal y no menos de 1.9-2.0 veces con asbesto. Por otro lado, a un gasto constante de extrusión, la presión se puede reducir hasta un 20-30%.

El efecto de aceleración en la extrusión está ligado con el consumo de energía. El consumo de energía específica por vibración es mayor que en extrusión normal, pero el gasto también aumenta; así, en un rango alto de extrusión, la salida se puede incrementar prácticamente sin aumentar el consumo de energía.

También es importante hacer notar que el consumo de energía se reduce incrementando la amplitud de las vibraciones.

Esta situación es análoga a la de rotación de la matriz a altas frecuencias; el consumo de energía específica a altos rangos de proceso es prácticamente independiente de si la cabeza del extrusor está en reposo o con vibraciones. Las vibraciones o movimientos en la cabeza del extrusor se pueden aplicar a varios polímeros no sólo en plano perpendicular al flujo sino también coaxialmente a éste.

En este trabajo nos interesamos en aspectos técnicos de extrusión de termoplásticos con vibraciones aplicadas en dirección longitudinal.

Se pudo observar que la dependencia del gasto con respecto al ducto es diferente para cada sección transversal.

La imposición de un movimiento rotacional-reciprocante al flujo viscoso antes de entrar, en todos los casos nos da un incremento en peso del gasto durante la extrusión; como cuando se aplican vibraciones de cero a 31.3° en secciones transversales de varios tipos la salida se incrementa de 70 a 80%.

Podemos observar que en este caso, el polímero (polietileno de baja densidad) recuerda el efecto de vibraciones impuesto en la zona de pre-entrada.

Un estudio de dureza para poliolefinas ha mostrado que la fuerza de las articulaciones aumenta cuando se incrementa la amplitud de las vibraciones en el tornillo sin fin en la zona de pre-entrada - hasta un cierto límite. Esto se debe al incremento en el efecto de orientación, reduciendo la viscosidad bajo condiciones de corte.

Así, como se ha mostrado por una estimación cuantitativa de orientación de polipropileno en extrusores con espectros copia infrarroja, la orientación axial de segmentos macromoleculares se incrementa del 33 al 36%, en el caso de extrusión libre de vibraciones y de 47 a 51% para la aplicación de vibraciones longitudinales.

En virtud de esto, el esfuerzo último cuando se extruye en dirección longitudinal aumenta apreciablemente.

Esto ocurre, cuando el ducto extrusor no es muy largo.

En ductos con longitud relativamente alta se puede desarrollar un proceso de relajación y la desorientación de las macromoléculas trae como consecuencia una disminución en la dureza, esto comparado con ductos más cortos.

Por último, en todos los casos las vibraciones longitudinales impuestas al material hace posible la producción de muestras con mayor dureza, comparadas con muestras obtenidas en extrusores convencionales.

III.-DISEÑO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

III-A) OBJETIVOS

En el capítulo anterior se ha explicado que los polímeros son susceptibles de cambios en sus propiedades mecánicas si se extruyen por boquillas oscilatorias, de modo que el primer y más importante objetivo del equipo ha sido proveer de oscilaciones axiales y angulares (con respecto a la dirección del flujo) a la tubería de extrusión. Esto se hizo con el fin de experimentar con ambos movimientos en forma separada o simultánea. También fueron objetivos del diseño lograr las mayores amplitudes y frecuencias posibles en ambos movimientos.

Otro de los objetivos primarios del equipo ha sido controlar la temperatura mediante un sistema calefactor que actúa en cuatro (4) áreas con el objeto de lograr condiciones de extrusión óptimas.

También se presentaron otros objetivos " secundarios " pertinentes a la boquilla para lograr un balance adecuado de las siguientes características: la resistencia a la corrosión, la conductividad térmica, la capacitancia térmica, la uniformidad de la temperatura en la longitud total, la relación longitud-diámetro, el acabado superficial interno, la ligereza, la ausencia de fugas, etc; pero que por evitar una explicación muy larga y no muy relacionada con el tema, no se profundiza en una justificación.

III-B) ESTRUCTURA INTERNA

Para facilitar la descripción de la estructura interna del equipo, éste se ha dividido en varios subsistemas según la función que éstos realizan, a saber:

- 1.- CUERPO.
- 2.- ACOPLAMIENTO.
- 3.- CALEFACCION.
- 4.- SUSPENSION.
- 5.- TREN DE MANDO AXIAL.
- 6.- TREN DE MANDO ANGULAR.
- 7.- CONTROL.
- 8.- INSTRUMENTACION.

1.- CUERPO:

El cuerpo constituye el elemento más importante del equipo, cumple con la función primaria de pared móvil en contacto con el polímero y con la mayor parte de las funciones secundarias: resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica, adecuada capacitancia térmica, uniformidad de la temperatura en la longitud, la más alta relación longitud-diámetro ($\frac{L}{D} \approx 42$) posible, baja rugosidad interna y bajo peso. Esto se logró mediante la aplicación de un cilindro de duraluminio con un inserto de acero (para el acoplamiento) en uno de sus extremos, como se observa en la figura 7.

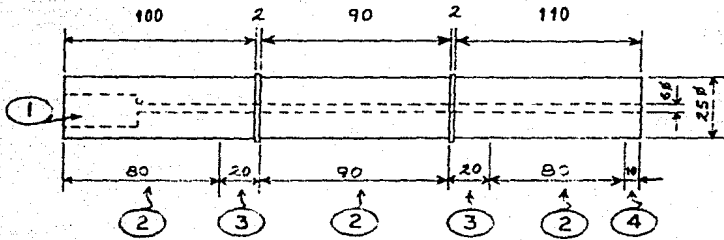


FIG. 7

ACOT.: mm

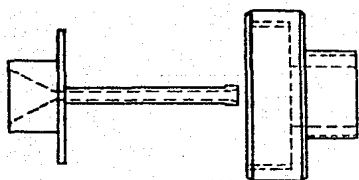
- ① Espacio para inserto de acero.
- ② Zona de calefacción.
- ③ Zona de suspensión.
- ④ Zona para mando angular.

2.- ACOPLAMIENTO:

Este subsistema cumple la función primaria de permitir el movimiento del cuerpo y simultáneamente evitar las fugas del acoplamiento al cuerpo. El subsistema consta de cuatro piezas:

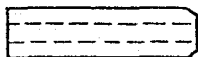
- Una tuerca de sujeción de acero cold rolled.
- Una salida del extrusor de acero inoxidable.
- Un inserto macho de acero SAE 1060 tratado térmicamente.
- Un inserto hembra de acero SAE 1060 tratado térmicamente.

En la figura 8 se muestran estas piezas.



BOQUILLA DE SALIDA DEL EXTRUSOR CON INSERTO MACHO DE ACERO.

TUERCA.



INSERTO HEMBRA DE ACERO PARA EL CUERPO.

ACOT.: MM

FIG. 8

3.- CALEFACCION:

El calentamiento se logra mediante cuatro (4) unidades calefactoras eléctricas de 300 watts cada una de tipo banda, es decir, forma de cilindro hueco con 8 cm de longitud y 2.5 cm de diámetro interior, dos de ellas, otra con 9 cm de longitud y 2.5 cm de diámetro interno y la cuarta de 2 cm de longitud y 9 cm de diámetro interno como se muestra en la figura 9.

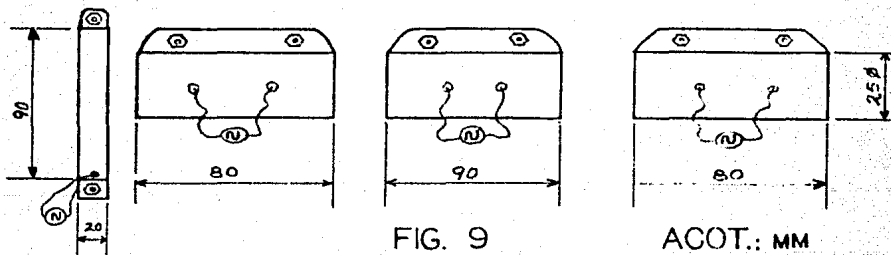


FIG. 9

ACOT.: MM

4.- SUSPENSION:

La suspensión cumple con las funciones de permitir un libre movimiento axial y angular del cuerpo, facilitar el alineamiento con el acoplamiento y sostener el cuerpo; las piezas que la constituyen son dos placas móviles, cuatro deslizadores, cuatro pernos guía, dos placas fijas, dos rodamientos de rodillos cónicos y dos soportes de rodamientos.

Se usó acero cold rolled para todas las piezas, excepto para los cuatro pernos guía que son de acero SAE 1060, tratados térmicamente.

La disposición de la suspensión se ilustra en la figura 10.

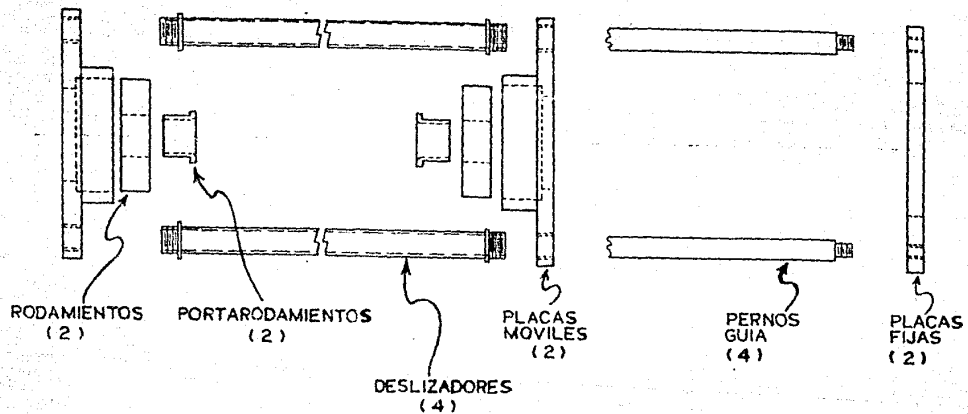


FIG. 10

5.- TREN DE MANDO AXIAL:

Este sistema provee un movimiento recíprocante al cuerpo, se usó acero cold rolled para la fabricación de las siguientes piezas: un muñón de placa móvil, dos mitades de biela (para lograr una longitud ajustable), dos muñones de balancín, dos bielas de balancín, una masa para balanceo, una flecha de balancín, una biela acopladora, un muñón de cigüeñal, dos bridas y un volante de inercia.

También se usaron dos rodamientos para el balancín y cuatro rodamientos para las bielas, todos de bolas.

El arreglo general se muestra en la figura 11.

MS.B.= MASA BALANCEADORA
M.B.= MEDIAS BIELAS
MS.= MUÑONES
M.= MOTOR
R.= RODAMIENTO
S.= SOPORTE
V.= VOLANTE
B.= BIELA

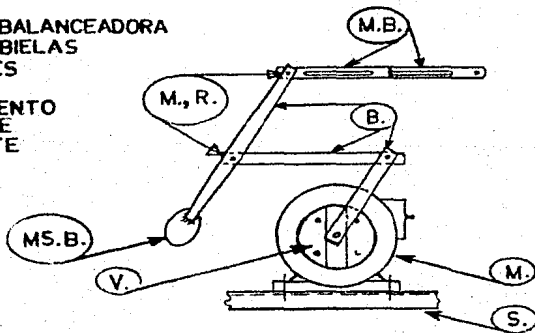


FIG. 11

6.- TREN DE MANDO ANGULAR:

Este subsistema se fabricó con acero cold rolled, excepto la biela primaria que es de acero SAE 1060 con tratamiento térmico, las piezas son: dos rótulas, una biela primaria, una biela secundaria, un muñon de cigueñal, dos bridas de cigueñal y un volante de inercia.

La disposición de los elementos se puede observar en la figura 12.

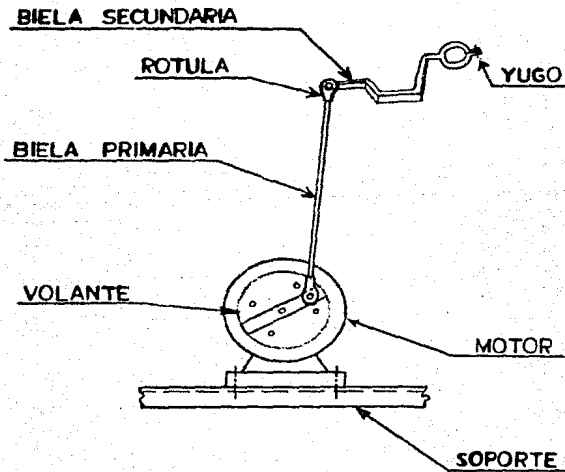


FIG. 12

7.- CONTROL:

Este subsistema consta de tres (3) partes: control de frecuencia, control de amplitud y control de temperatura. La función de éstos es lograr la capacidad para repetir un experimento y para tener pleno control de las variables que afectan al mismo.

CONTROL DE FRECUENCIA.

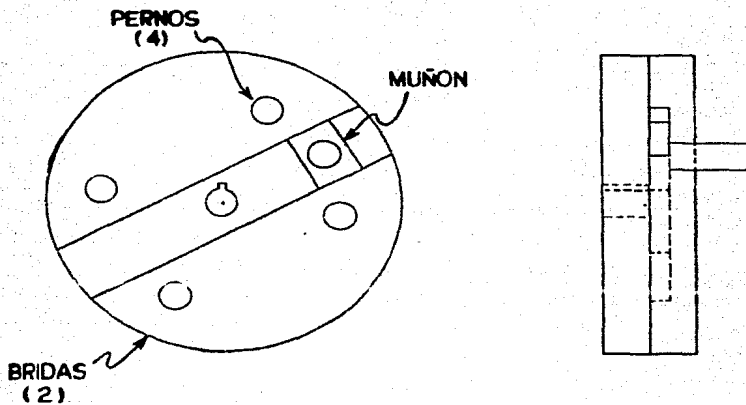
La frecuencia se controló mediante la aplicación de dos (2) motores de corriente directa. Las oscilaciones longitudinales las produce un motor con control de velocidad integrado y las oscilaciones angulares las produce un motor con control de velocidad externo.

Los rangos de frecuencia son de cero a 185 rad/s aproximadamente para cada uno, siendo el número de frecuencias ilimitado, ya que los controles así lo permiten. La frecuencia de oscilación puede variarse con el equipo en operación.

CONTROL DE AMPLITUD.

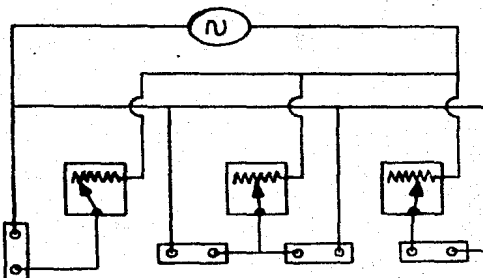
Este se implantó dentro de los mismos trenes de mando como parte integral de los mismos y cuenta con un volante de inercia, dos bridas de cigüeñal, un muñón de cigüeñal y cuatro pernos fijadores.

Su finalidad es lograr rangos de variación de cero a 40 mm de amplitud axial y de cero a 35° de amplitud angular.



CONTROL DE TEMPERATURA.

En este caso los elementos de control son tres resistencias variables (como se ilustra en la figura siguiente) dispuestas en tal forma que se logra el mejor control de la temperatura posible.



8.- INSTRUMENTACION:

La instrumentación permite medir los parámetros más importantes con precisión. Las amplitudes se midieron con vernier (la axial) y con transportador (la angular), las frecuencias de oscilación se midieron con una lámpara estroboscópica y finalmente la temperatura fué controlada mediante un termómetro.

III-C) ESTRUCTURA INTEGRAL DEL EQUIPO.

En el subtítulo anterior se explicaron a grandes rasgos los subsistemas que conforman el equipo. Estos subsistemas trabajaron conjuntamente durante la operación del equipo con el objeto de satisfacer los requerimientos de cada experimento individualmente.

Una visión general de la operación conjunta de dichos subsistemas se presenta en el siguiente diagrama de bloques (Diagrama A).

Así mismo, el esquema y fotografías que a continuación se presentan contribuyen a proporcionar una imagen mas clara del equipo usado en la investigación.

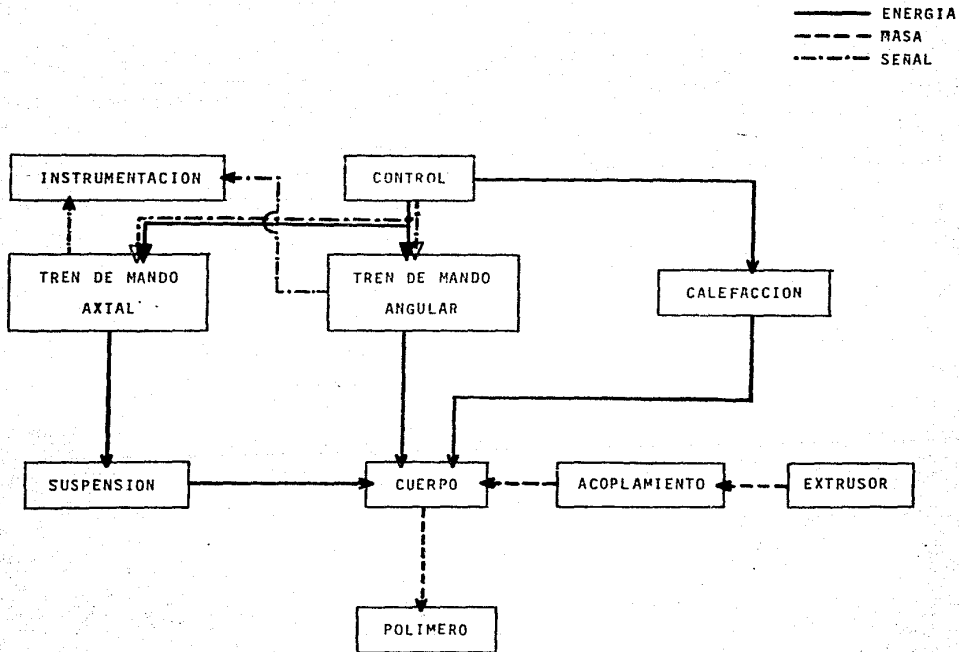
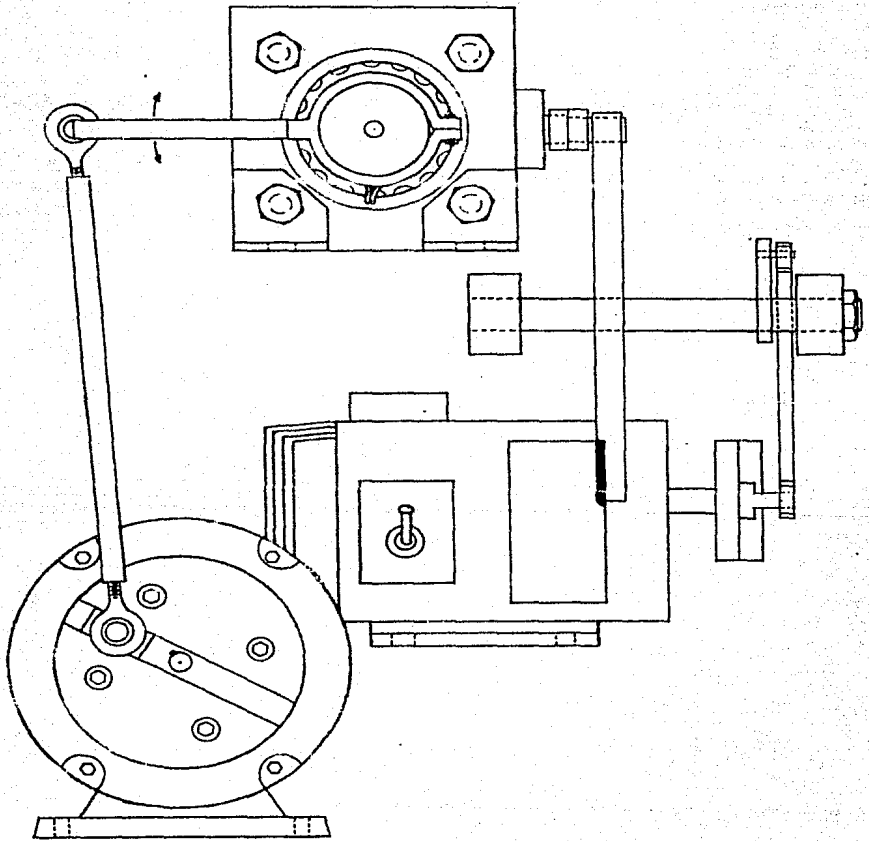
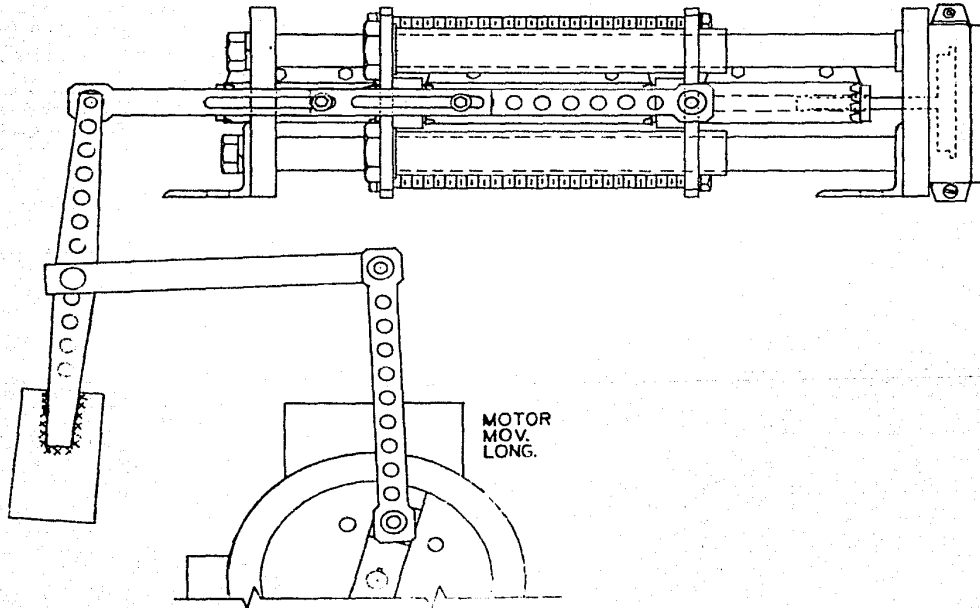


DIAGRAMA "A"

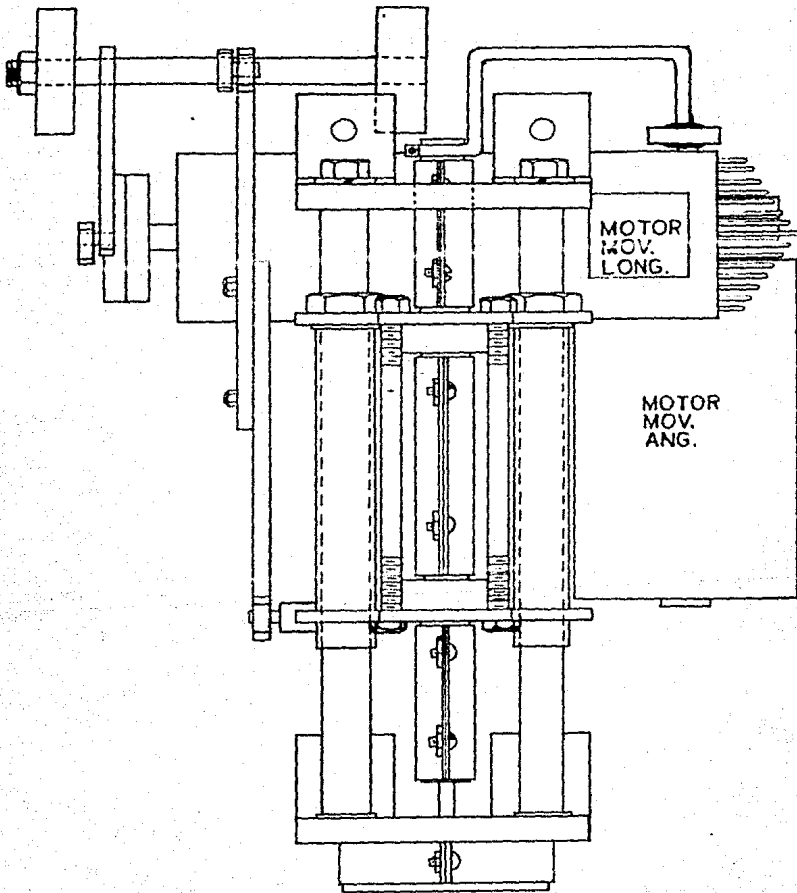
VISTA FRONTAL

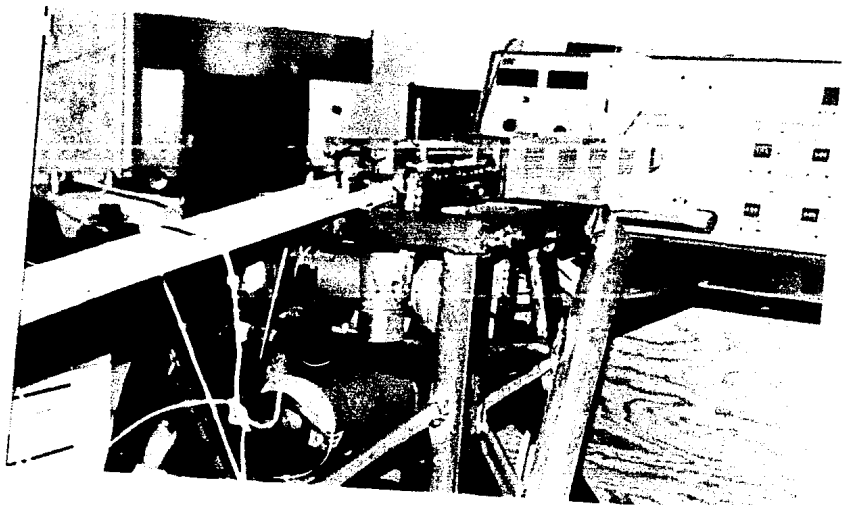
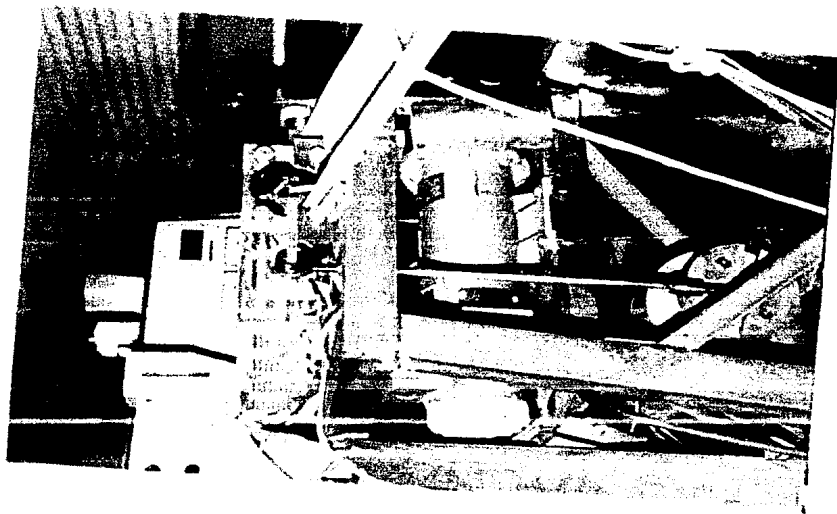


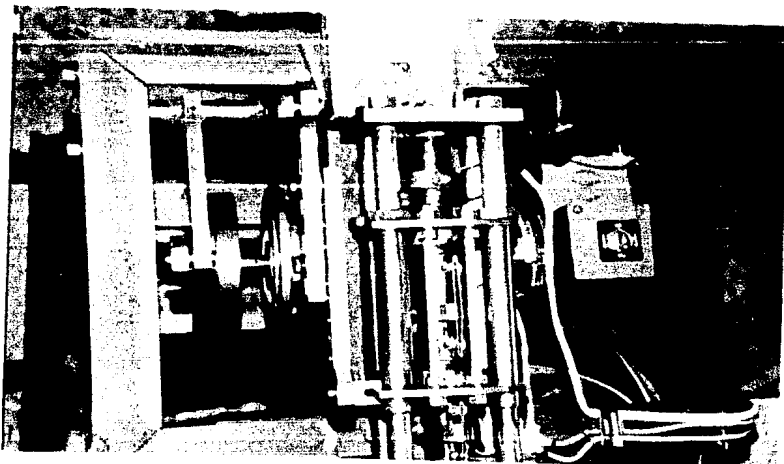
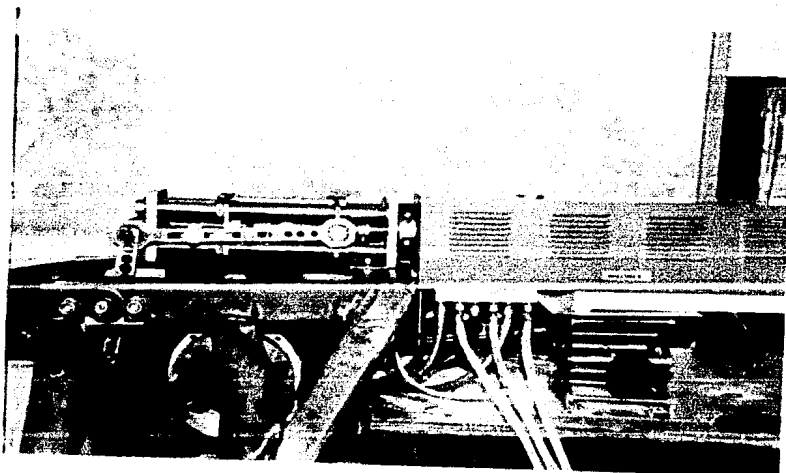
VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR







IV.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.

IV-A) MATERIALES UTILIZADOS:

Los materiales (polímeros) que se usaron en nuestros experimentos son:

- 1) Polivinil butural.
- 2) Polietileno de baja densidad.
- 3) Polietileno de alta densidad.

IV-B) METODOLOGIA:

El proceso experimental se dividió en cuatro fases:

- Planeación.
- Producción de muestras.
- Ensayos de tracción.
- Análisis.

Para la planeación fue necesario definir varios parámetros de experimentación con el fin de reducir el número de experimentos y optimizar la eficiencia de los mismos. Estos parámetros fueron: el gasto de extrusión, las amplitudes y frecuencias de los movimientos angular y axial y las temperaturas a lo largo de la boquilla.

Mediante investigaciones previas (artículos) se sabe que el mayor efecto se presenta para números de Reynolds bajos lo cual implica gastos muy bajos y, por lo tanto baja frecuencia del extrusor. Así mismo, sabemos que se tienen efectos importantes con amplitudes desde los 6 mm para el movimiento longitudinal y desde los 10°

para el movimiento angular. De la misma forma sabemos que el incremento en el gasto es proporcional a la frecuencia de oscilación hasta llegar a un máximo y después decrece. En resumen, el gasto del extrusor se fijó (lo más bajo posible) con las rpm, que fueron 20, se utilizaron amplitudes similares o mayores a 6 mm en el movimiento axial y en el movimiento angular similares o mayores a 10°.

Para el caso de polivinil butural, las pruebas fueron las siguientes: extrusión sin oscilaciones, extrusión con oscilaciones axiales de 6 mm, extrusión con oscilaciones angulares de 10°, extrusión con oscilaciones axiales de 12 mm, extrusión con oscilaciones angulares de 20° y una combinación de las anteriores.

Para la producción de muestras se realizaron las pruebas antes mencionadas, dejando la amplitud de oscilación fija en un valor preestablecido. En las pruebas con la frecuencia de oscilación para los dos movimientos, la frecuencia de oscilación se hizo variar desde cero Hz hasta la máxima permitida por nuestro equipo y después se fijo en el punto donde se observaría el mayor efecto sobre el polímero, equivalente al incremento máximo en el gasto.

Por otra parte, el proceso de fabricación de muestras es exactamente el mismo que se usa en la extrusión normal pero con la variante de la boquilla oscilatoria.

En el caso de otros polímeros como el polietileno de baja densidad y la mezcla de polietileno utilizamos un método más complejo que para el otro material, pues ya sabíamos que ese método no

permite obtener curvas (de incremento de gasto, de resistencia a la tracción, ni alargamiento, etc.) contra frecuencia o amplitud, o el producto de las dos anteriores según sea el caso, sino solamente los puntos máximos de tales curvas. Tampoco permite mucha precisión, porque depende de la visión del investigador la detección de ligeros incrementos en el gasto lo que nos ocasiona cierta imprecisión con respecto al punto máximo.

El otro método consiste en la distribución del espectro de operación del equipo en un número (adecuado) de puntos dentro de las curvas antes mencionadas. Por ejemplo, para una sesión de obtención de muestras con movimiento angular de amplitud constante, la amplitud se fijo en 24° y la frecuencia máxima de operación de 1720 rpm se dividió en el número de puntos que se requerían (en nuestro caso 4), en este caso fueron 430, 860, 1290 y 1720 rpm; siendo la planeación del experimento la siguiente:

Muestras con movimiento angular de amplitud constante:

- 1) Amplitud = 24° y frecuencia = 1720 rpm
- 2) Amplitud = 24° y frecuencia = 1290 rpm
- 3) Amplitud = 24° y frecuencia = 860 rpm
- 4) Amplitud = 24° y frecuencia = 430 rpm

Posteriormente las pruebas de tracción se llevaron a cabo en una máquina " Instron " en el Instituto de Investigaciones en Materiales (I.I.M.). El número de ensayos de tracción por muestra fue de tres y en la elaboración de los resultados obtenidos se trabajaron con el promedio de éstos.

IV-C) RESULTADOS

Con frecuencia, durante la elaboración de algun experimento se presentan resultados parciales en algun punto del avance del mismo que permiten al investigador darse cuenta del buen o mal desarrollo del experimento.

Dentro de la investigación que se realizó existieron varios aspectos que corroboran lo anterior. Por ejemplo, el acabado superficial de la muestra en cuestión y el gasto de extrusión principalmente. El acabado superficial de la muestra fue un indicador efectivo de las temperaturas involucradas en el proceso. Este indicador fue necesario ya que algunos materiales probados presentaban dificultad para conocer su correspondiente temperatura de extrusión antes de llevar a cabo la producción de las muestras. Esto se debió a que en su preparación se usaron diversos ingredientes de antigüedad desconocida y como se sabe, algunos son susceptibles de envejecimiento, de modo que la forma más eficaz para obtener buenos resultados fue optimizar mediante el control empírico de la temperatura. El hinchamiento del material en la salida de la boquilla fue un indicador de la eficiencia de los movimientos recíprocos de la boquilla en el material. Esto se sabe gracias a investigaciones previas en las cuales se demostró que al incrementar la rapidéz de deformación mediante oscilaciones de la tubería por la cual fluye el material también desaparecen los esfuerzos internos que generan el hinchamiento que se produce en los fluidos viscoelásticos a la salida del ducto.

Finalmente, el gasto de extrusión a la salida de la boquilla (aún cuando éste no fue determinante durante los experimentos), ya que se sabe por medio de la bibliografía que un fluido viscoelástico fluye con más velocidad, para un mismo gradiente de presiones, cuando se trata de una pared recíprocante que cuando se trata de una pared fija. Así, cuando se barría el rango de frecuencias de trabajo del equipo para una amplitud y un movimiento dados, era factible determinar la frecuencia óptima para obtener el máximo aumento de gasto. Esto fue aplicable solamente para el polivinil butural; para otros polímeros se usó otro método.

La presente investigación se limitó a la obtención de tres (3) propiedades mecánicas de los materiales bajo análisis, todas ellas resultado de los ensayos de tracción. Para la caracterización de una muestra se efectuaron tres ensayos de tracción y los valores obtenidos promediados en resultados finales.

Las propiedades mecánicas en estudio son:

1) Resistencia a la tracción:

Esta es una propiedad mecánica que en ingeniería se usa como indicador de la calidad de un material. Sin embargo, no es muy usada para materiales dúctiles, ya que éstos sufren una deformación plástica considerable al alcanzar la capacidad máxima de carga. La siguiente fórmula es frecuentemente utilizada en el cálculo de la resistencia a la tracción:

$$R = \frac{C_m}{A_0} \quad \text{kg/cm}^2$$

en donde: C_m = Carga máxima en la curva esfuerzo-deformación (kg)
 A_0 = Área original (cm²)

2) Alargamiento porcentual en la fractura:

Este tiene varios propósitos. Es posiblemente mejor índice de la calidad que la resistencia a la tracción, porque si hay inclusiones o porosidades el alargamiento disminuye drásticamente. En segundo lugar, el alargamiento multiplicado por la resistencia a la tracción nos da un índice de tenacidad a bajas tasas de deformación. El alargamiento se calcula en la forma siguiente:

$$A_1 = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (\%)$$

en donde: $L_f - L_0$ = Extensión (cm)
 L_0 = Longitud inicial (cm)

3) Estricción:

El porcentaje de reducción de área o estricción se obtiene calculando el área de la sección de prueba después del ensayo aplicando la siguiente fórmula:

$$E_s = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (\%)$$

en donde: A_0 = Área original (cm²)

$A_f = \text{Area final (cm}^2 \text{)}$

En el presente estudio se utilizó la siguiente nomenclatura:

- $W = \text{Frecuencia de oscilación (s}^{-1} \text{)}$
- $A = \text{Amplitud de oscilación (mm, }^\circ \text{)}$
- $R = \text{Resistencia a la tracción (kg/cm}^2 \text{)}$
- $A_i = \text{Alargamiento porcentual en la fractura (\%)}$
- $E_s = \text{Estricción porcentual en la fractura (\%)}$
- $Q = \text{Gasto (gr/min)}$
- $I_R = \text{Incremento de la resistencia a la tracción (\%)}$
- $I_A = \text{Incremento del alargamiento (\%)}$
- $I_{E_s} = \text{Incremento de la estricción (\%)}$
- $I_Q = \text{Incremento del gasto (\%)}$

Designación de movimientos:

L = Longitudinal

A = Angular

Por ejemplo:

L 15 - 68

frecuencia de 68 s⁻¹
amplitud de 15 mm
longitudinal

A 12 - 168

frecuencia de 168 s^{-1}
amplitud de 12°
angular

En las siguientes tablas se dan a conocer los promedios obtenidos de los ensayos de tracción para los polímeros estudiados y las propiedades analizadas, además del gasto para el caso de la mezcla de polietileno y polietileno de alta densidad.

TABLA 1 Polivinil butural, propiedades.

<u>Movimiento</u>	<u>R (kg/cm²)</u>	<u>A₁ (%)</u>
Estático	224.16	943.67
L 6 - 74.4	201.35	997.00
L12 - 62.8	182.61	713.89
A10 -127.8	228.45	970.00
A20 -129.9	140.32	921.00
COMB.	119.62	428.33

TABLA 2 Polietileno de baja densidad, propiedades.

Movimiento	Q (gr/min)	R (kg/cm ²)	A ₁ (%)	E _s (%)
A24 -133	8.10	93.6	436.8	87.4
A24 - 90	8.20	121.3	205.3	83.1
A24 - 45	7.94	116.5	251.0	87.3
A18 -133	8.27	123.9	188.1	84.4
A12 -133	8.11	121.3	574.5	84.0
A 6 -133	8.12	121.4	394.4	83.7
L 6 -115	9.05	118.8	445.5	77.6
L 6 - 90	8.99	122.8	327.0	82.7
L 6 - 45	14.07	129.4	517.0	84.5
L 6 - 84	9.2	124.5	366.8	73.0
L10 - 84	8.23	122.7	489.3	83.1
L15 - 84	7.94	118.4	311.5	83.8
L20 - 84	7.38	120.6	354.8	83.7
L20 - 84	7.75	116.4	230.1	85.0
A18 -133				
L15 - 84	8.08	119.2	168.8	82.5
A12 -133				
Estatico A	10.71	123.4	221.0	84.3

TABLA 3 Mezcla de polietileno al 50%, propiedades.

Movimiento	Q (gr/min)	R (kg/cm ²)	A ₁ (%)	E _s (%)
A24 - 133	11.20	197.5	193.2	89.7
A24 - 90	10.95	223.1	169.6	88.5
A24 - 45	10.87	206.7	108.7	87.5
A18 - 133	11.07	159.2	71.0	86.9
A12 - 133	11.65	152.1	24.7	22.6
A 6 - 133	11.23	165.8	112.0	89.6
L 6 - 63	12.50	191.9	97.2	90.0
L 6 - 73	20.10	184.8	107.9	88.3
L 6 - 126	13.10	196.8	110.1	91.5
L 6 - 147	13.10	203.2	108.6	92.2
L 5 - 68	12.80	181.4	83.2	89.7
L10 - 68	12.40	190.7	102.0	90.4
L15 - 68	12.50	181.3	66.7	79.0
L20 - 68	13.70	223.8	78.6	77.1
L20 - 83.8 } A18 - 133 }	10.10	189.2	72.0	81.1
Estático	11.20	165.5	85.8	87.9

En el polivinil butural no se trabajo con la estricción dada la rápida recuperación elástica del material después de la ruptura durante el ensayo de tracción.

También se calcularon los incrementos de las propiedades mecánicas así como los incrementos de gasto. Estos incrementos se calcularon con la siguiente fórmula:

$$I = \frac{V_{pco} - V_{pso}}{V_{pso}} \times 100 (\%)$$

en donde:

V_{pco} = Valor promedio con oscilaciones

V_{pso} = Valor promedio sin oscilaciones

Como se aprecia en la fórmula anterior, todos los valores de incrementos son referidos a los valores de las propiedades mecánicas de las muestras sin oscilaciones; es decir, se trata de establecer un indicador del aumento o decremento del valor numérico de las propiedades mecánicas del material cuando éste se ha extruido con oscilaciones en la boquilla, con respecto al mismo material cuando éste se ha extruido sin oscilaciones. En este resumen, se comparan todos los valores de extrusión con la boquilla estática.

En las siguientes tablas 4, 5 y 6 podemos observar los resultados obtenidos:

TABLA 4 Polivinil butural, incrementos.

Movimiento	I_R (%)	I_A (%)
L 6 -74.4	-10.18	5.65
L12 -62.8	-18.54	-24.35
A10 -127.8	1.91	2.79
A20 -129.9	-37.40	- 2.40
Combinado	-46.64	-54.61

TABLA 5 Polietileno de baja densidad, incrementos.

Movimiento	I_Q	I_R	I_A	I_{Es}
A24 -133	-24.4	-24.1	97.6	3.7
A24 - 90	-23.4	- 1.7	- 7.1	-1.4
A24 - 45	-25.9	- 5.6	13.6	3.6
A18 -133	-22.8	0.4	-14.9	0.1
A12 -133	-24.3	- 1.7	160.0	-0.4
A 6 -133	-24.2	- 1.6	75.8	-0.7
L 6 -115	-15.5	- 3.7	101.6	-7.9
L 6 - 90	-16.1	- 0.5	48.0	-1.9
L 6 - 45	31.4	4.9	134.0	-0.2
L 6 - 84	-14.1	0.9	66.0	-13.4
L10 - 84	-23.2	-0.6	121.4	-1.4
L15 - 84	-25.9	-4.1	41.0	-0.6
L20 - 84	-31.1	-2.3	60.5	-0.7
L20 - 84	-27.6	-5.7	4.1	0.8
A18 -133				
L15 - 84	-24.6	-3.4	-23.6	-2.1
A12 -133				

TABLA 6 Mezcla de polietileno al 50%, incrementos.

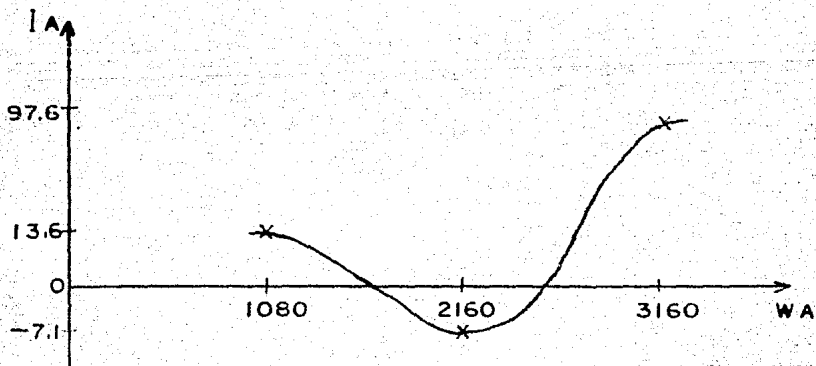
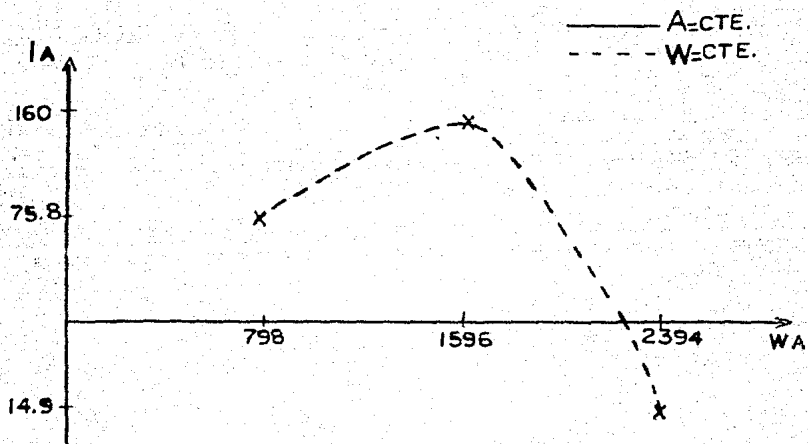
Movimiento	I _Q	I _R	I _A	I _{Es}
A24 -133	-0.7	19.3	125.2	2.0
A24 - 90	-2.2	34.8	97.7	0.7
A24 - 45	-2.9	24.9	26.7	-0.5
A18 -133	-1.2	- 3.8	-17.2	-1.1
A12 -133	4.0	1.6	- 1.3	0.8
A 6 -133	2.7	0.2	30.5	1.9
L 6 - 63	11.6	16.0	13.3	2.4
L 6 - 73	79.5	11.7	25.8	0.5
L 6 -126	17.0	18.9	28.3	4.1
L 6 -147	17.0	22.8	26.6	4.9
L 5 - 68	14.3	9.6	- 3.0	2.0
L10 - 68	10.7	15.2	18.9	2.9
L15 - 68	11.6	9.5	-22.3	-10.1
L20 - 68	22.3	35.2	- 8.4	-12.3
[20 -83.8 } A18 -133 }	- 9.8	14.3	-16.1	- 7.85

También se elaboraron gráficas con el fin de exhibir más claramente el comportamiento del material dentro de los rangos estudiados.

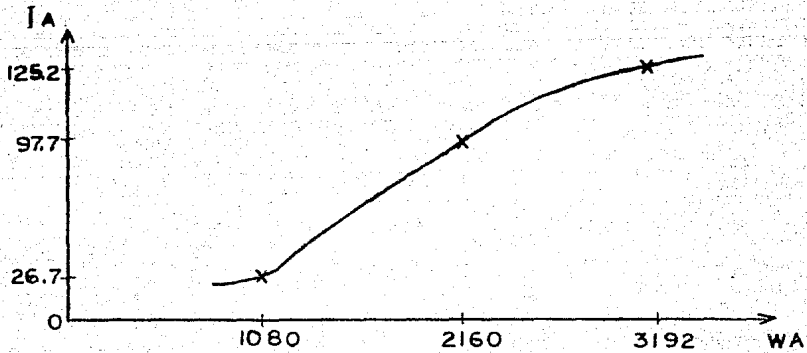
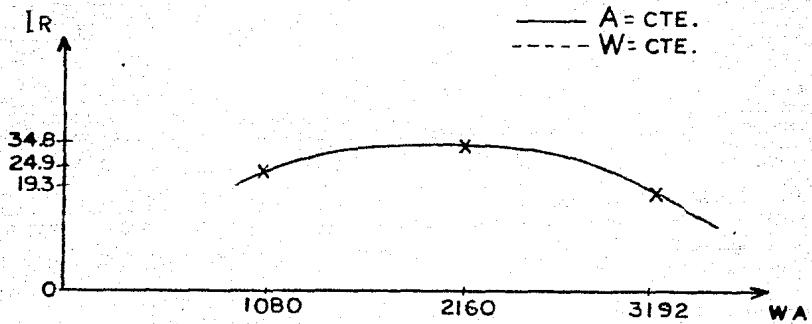
Las gráficas se han dividido según el tipo de movimiento (angular o axial) y según el incremento porcentual que se maneje (incremento de gasto, de estricción, etc.), de modo que se obtuvieron varias gráficas por material.

A continuación se muestran las gráficas de las que se habla en el párrafo anterior.

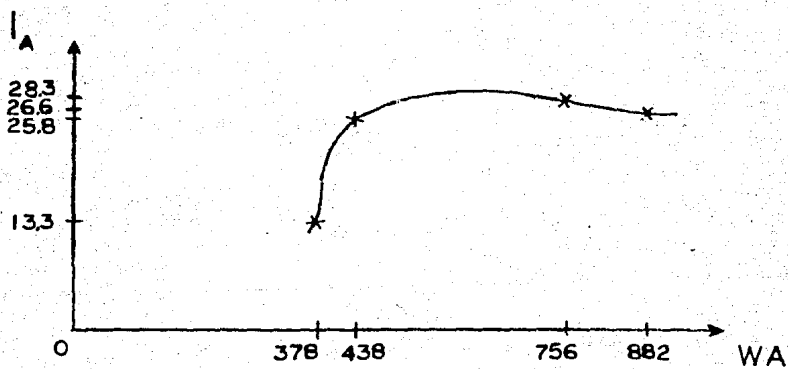
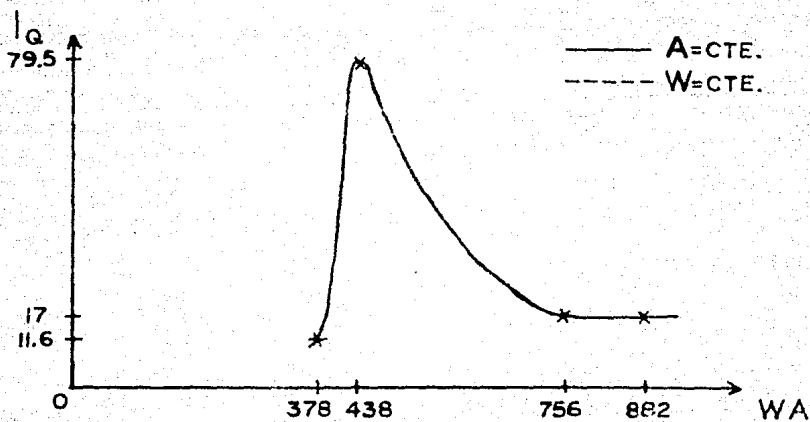
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
MOVIMIENTO ANGULAR.

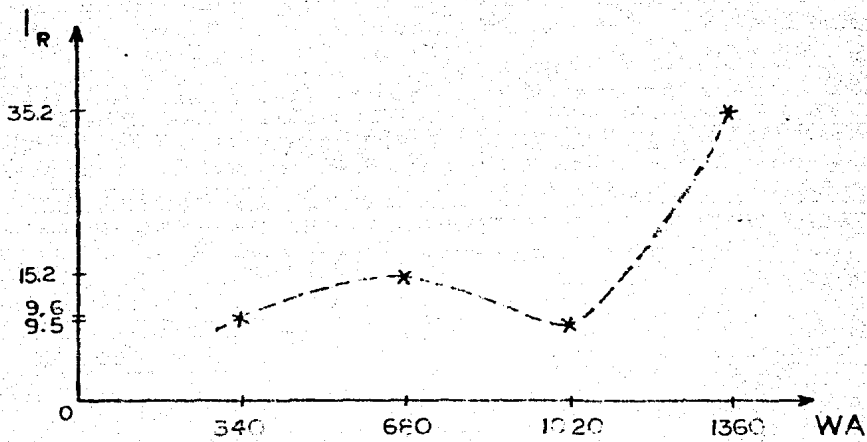


MEZCLA DE POLIETILENO 50%
MOVIMIENTO ANGULAR.

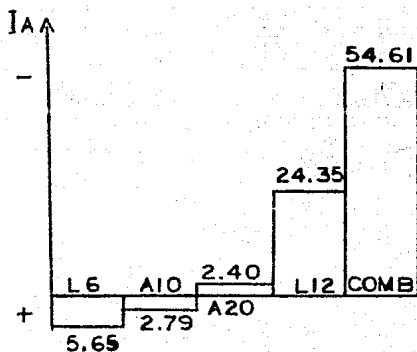
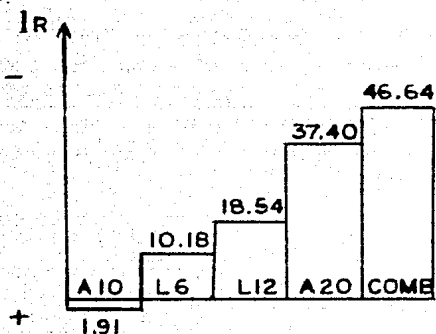


MEZCLA DE POLIETILENO 50%
MOVIMIENTO LONGITUDINAL.

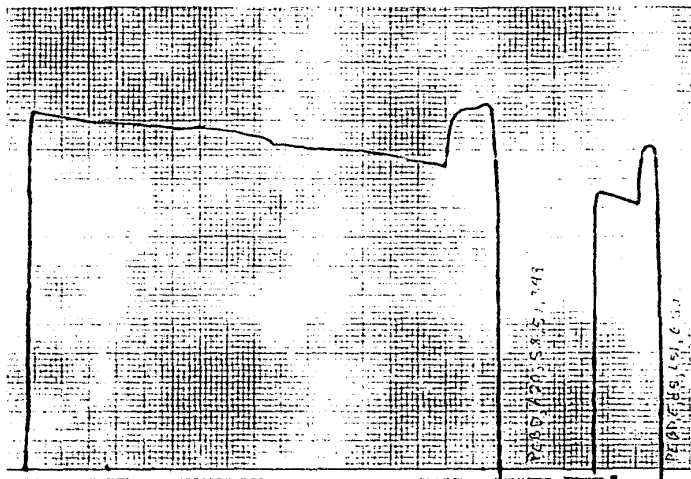




Para el caso del polivinil butural a continuación se muestra una gráfica comparativa con los puntos obtenidos.



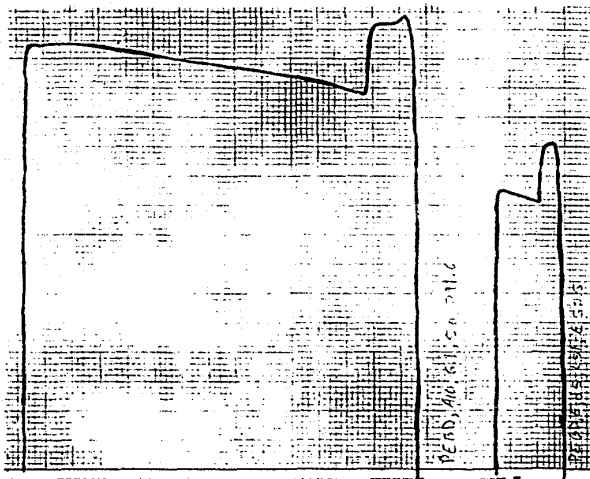
Finalmente, anexamos las siguientes curvas de esfuerzo contra deformación típicas que obtuvimos, esto con el fin de ofrecer al lector una idea de la configuración que éstas presentan.



POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
 MOVIMIENTO ANGULAR 20° , FREQ. = 116.2 s^{-1}

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
 MOVIMIENTO ESTATICO

EJEMPLO DE PRUEBA DE TRACCION MOSTRANDO UN NOTABLE INCREMENTO DE ALARGAMIENTO.



POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
 MOVIMIENTO ANGULAR 10° FREC.=146.6 s⁻¹

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
 MOVIMIENTO ESTATICO

EJEMPLO DE PRUEBA DE TRACCION MOSTRANDO UN NOTABLE INCREMENTO DE RESISTENCIA A LA TRACCION.

V) CONCLUSIONES

Los polímeros son un grupo interesante de materiales debido no solamente por la importancia de los mismos para la ingeniería, sino también a que las estructuras pueden alterarse y hacerse a medida para dar un amplio espectro de color, transparencia y formabilidad. Ahora, mediante una nueva aplicación del proceso de extrusión se pueden lograr diferentes orientaciones moleculares del material, modificando las propiedades mecánicas.

Se presentan conclusiones conducentes a características de aplicación práctica del sistema de boquilla oscilatoria. El incremento en el gasto de extrusión al usar los movimientos recíprocos es un aspecto importante de los resultados, ya que es un indicador de las pérdidas por fricción entre la pared de la tubería y el fluido viscoelástico. Así, se puede decir que mientras más se acerque uno u otro movimiento o ambos al punto óptimo de la combinación " frecuencia-amplitud ", cuando el gasto sea máximo, menor será la energía requerida por el material para ser extruido, tomando en cuenta solamente la energía absorbida por el extrusor, sin considerar aquí un balance de energía que incluya la energía consumida por el sistema mecánico que oscila a la boquilla. Esto se puede analizar de dos maneras desde el punto de vista de aplicación práctica; se puede trabajar en un extrusor con gasto constante o bien con potencia constante.

En el primer caso, se trata de un extrusor normal sin modificaciones, el cual trabaja con un gasto fijo, es decir, proporcionando una cantidad constante de material. De este modo, el consumo de energía del extrusor disminuirá proporcionalmente con respecto a la disminución de pérdidas por fricción. Esto se debe a que los motores eléctricos que accionan estas máquinas consumen menos potencia - (menor corriente cuando disminuye su carga). En el segundo caso; es decir, a potencia constante, el ahorro se obtiene debido a que para una potencia dada se tiene un incremento en el gasto. Así, la potencia específica de extrusión es menor. Para lograr este propósito se requeriría de un extrusor dotado de una alimentación de potencia de velocidad variable (un motor eléctrico de C.A. no es adecuado dada su característica de velocidad constante), como por ejemplo un motor de C.D. que aumente su velocidad al disminuir la carga. El incremento en las propiedades mecánicas del material es otro aspecto importante y también se puede enfocar en dos formas de aplicación práctica. La primera es la fabricación de perfiles, usando este método con dimensiones normalizadas pero con resistencias mayores; la segunda es la fabricación de perfiles con áreas seccionales menores pero de igual resistencia, aprovechando en este caso la disminución del peso.

En este punto desarrollaremos conclusiones específicas con respecto a las propiedades mecánicas.

Debido a limitaciones de tiempo y presupuesto la investigación se ha centrado en dos materiales: polietileno de baja densidad (p.b.d.) y una mezcla de polietilenos de baja y alta densidad al 50% (p.b.a.d.) respectivamente.

El p.b.d. se mostró particularmente sensible al incremento en una de sus propiedades; el alargamiento porcentual en la fractura. Las otras propiedades se mantienen prácticamente constantes. El resultado anterior es particularmente benéfico en el caso de la resistencia a la tracción, ya que tratándose de la propiedad mecánica más importante es sumamente conveniente que al no mostrar marcados incrementos tampoco registre decrementos.

En la tabla que sigue se resumen los movimientos que dieron los mayores incrementos al alargamiento:

Movimiento angular de $A=12^\circ$, $W=133 \text{ s}^{-1}$: 160% I_{A1}

Movimiento Longitudinal de $A=6\text{mm}$, $W=115 \text{ s}^{-1}$: 101.6% I_{A1}

Movimiento longitudinal de $A=6\text{mm}$, $W=455 \text{ s}^{-1}$: 134% I_{A1}

Movimiento longitudinal de $A=10\text{mm}$, $W=845 \text{ s}^{-1}$: 121.4% I_{A1}

donde:

A = Amplitud en grados o mm

W = Frecuencia en rad/s

Se puede observar que existe una amplia variedad de movimientos para los cuales este material presenta importantes incrementos de alargamiento sin un decremento apreciable en sus otras propiedades mecánicas.

En el caso de la mezcla de polietileno se apreciaron varios fenómenos interesantes.

Primero, podemos concluir que dentro de ciertos rangos de - frecuencias y amplitudes es posible lograr incrementos de resistencia, de alargamiento, o bien, un balance entre ambas propiedades. La siguiente tabla ilustra estas conclusiones.

a) Incrementos al gasto:

Movimiento longitudinal $A = 6\text{mm}$, $W = 73 \text{ s}^{-1}$: 79.5% I_Q

Movimiento longitudinal $A = 20\text{mm}$, $W = 68 \text{ s}^{-1}$: 22.3% I_Q

b) Incrementos de la resistencia a la atracción:

Movimiento angular $A = 24^\circ$, $W = 90 \text{ s}^{-1}$: 34.8% I_R

Movimiento longitudinal $A = 20\text{mm}$, $W = 68 \text{ s}^{-1}$: 35.2% I_R

c) Incremento al alargamiento:

Movimiento angular $A = 24^\circ$, $W = 133 \text{ s}^{-1}$: 125.2% I_{A1}

Movimiento angular $A = 24^\circ$, $W = 90 \text{ s}^{-1}$: 97.7% I_{A1}

Una conclusión inmediata de la tabla anterior es:

- Si se busca incrementar el gasto o la resistencia con pequeños incrementos de alargamiento, se recurrirá a oscilaciones longitudinales.
- Si se desea lograr grandes incrementos de alargamiento o resistencia pero con gastos constantes, entonces se tratará con oscilaciones angulares.

Este material responde básicamente incrementando tres propiedades: gasto, resistencia y alargamiento.

Como hemos visto anteriormente, se pueden lograr varias opciones: incrementos máximos de una de las tres, (160%), grandes incrementos de dos de ellas (30%), o bien, medianos incrementos de las tres (18%). Esto presenta una gran versatilidad en la modificación del material con respecto a nuestras necesidades sin afectar demasiado a las demás propiedades.

Otra conclusión de interés relativa a este material, es que las dos propiedades mecánicas en oposición, resistencia y alargamiento, parecen encontrarse asentadas en los movimientos longitudinal y angular respectivamente. Esto permite formular una hipótesis sobre la siguiente base:

Bajo extrusión normal, suponemos que el patrón de orientación molecular es helicoidal.

Al oscilar la boquilla se destruye esa orientación molecular, y cabe suponer que la nueva orientación seguirá la dirección del movimiento de la pared, longitudinal o transversal a la dirección del flujo según el caso.

Así, suponiendo que el movimiento angular favorece una orientación transversal al flujo, esto concuerda con los resultados experimentales ya que se obtiene un marcado incremento al alargamiento y un mediano incremento a la resistencia.

Suponemos que el alargamiento es un indicador del grado de orientación longitudinal sufrido por las moléculas durante la deformación derivada de la prueba de tracción. Es decir, al irse deformando un material sus moléculas van tomando una orientación en dirección de la deformación. Así, si un material presenta orienta-

ción transversal sufrirá una deformación mucho mayor antes de la ruptura que un material con una orientación longitudinal previa a la prueba de tracción.

Por otro lado, suponiendo que el movimiento longitudinal implica una orientación axial a la dirección de la extrusión, los resultados experimentales están de acuerdo a nuestra hipótesis, un marcado incremento a la resistencia y un mediano incremento al alargamiento. Suponemos que la resistencia es un indicador de la cohesión molecular de un material, o sea, de la fuerza necesaria para separar las moléculas. Así, un material con una orientación longitudinal previa al ensayo de tracción sería más resistente, ya que sus moléculas presentan una gran oposición al deslizamiento y soportan la fuerza alineadas en el sentido de aplicación de ésta. En cambio, un material con otra orientación se deformará más fácilmente; cuando finalmente sus moléculas estén --alineadas en el sentido de aplicación de la fuerza, la deformación habrá sido tanta que demasiados enlaces moleculares se habrán --roto y el material será menos resistente.

Adicionalmente, la observación de los resultados experimentales conducen a la hipótesis de que el mayor efecto de las oscilaciones sucederan en materiales con cadenas moleculares grandes. Estos últimos presentan mayor sensibilidad al cambio en sus propiedades cuando se somete a variaciones en su orientación molecular. Esta hipótesis, sin embargo, habrá que convertirla en tesis mediante posteriores trabajos de otros investigadores.

Respecto a los resultados obtenidos de la extrusión con oscilaciones angulares y axiales simultáneas, aún no se pueden formular conclusiones firmes ya que en verdad se trata de investigaciones mucho más profundas que se llevarán a cabo en un futuro -- próximo.

Este trabajo se ha concentrado en los siguientes aspectos - fundamentales: el diseño y construcción del equipo experimental y un avance preliminar de las investigaciones por seguir.

VI) BIBLIOGRAFIA

Boletín; Algunos descubrimientos de fluidos no-Newtonianos en tuberías oscilantes.

B. Mena y O. Manero (Abril 24, 1978).

Centro de Investigaciones en Materiales y la Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.

Acta Reológica # 17, 693-697.

Boletín; Efectos interesantes de fluidos no-Newtonianos en tuberías oscilantes.

B. Mena y O. Manero (Junio 10, 1977).

Centro de Investigaciones en Materiales y la Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.

Acta Reológica # 16, 573-576.

Ref. 1 Boletín; Fluidos viscoelásticos complejos a través de tuberías oscilantes. Efectos interesantes y aplicaciones.

O. Manero, B. Mena y D. M. Binding (Agosto 10, 1978).

Centro de Investigaciones en Materiales y la Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.

Jornada de Fluidos Mecánicos no-Newtonianos.

Boletín; Flujo no-Newtoniano en tuberías oscilantes.

B. Mena y O. Manero.

Centro de Investigaciones en Materiales, U.N.A.M.

Boletín ruso; Extrusión con vibración de polímeros.

N. I. Basov; A. I. Leonov; S. A. Lyubartovich e I. I. Felipchuk (Octubre 22, 1973).

Ciencia y Tecnología Internacional de Polímeros.

Ref. 2 Boletín ruso; La reología de termoplásticos bajo condiciones de flujo espiral y extrusión con vibraciones.

M. L. Fridman y S. L. Peshkovsky: Unión de Institutos de Procesos Plásticos, Moscú, URSS; y G. V. Vinogradov: Instituto de Síntesis de Petroquímica; Academia de Ciencias de la URSS; Moscú, URSS.

K. Walters. "Progress in heat and mass transfer".
Vol. 5, Ed. W.R. Schowalter, Pergamon Press (1972).

B. A. Coleman; H. Markowitz and W. J. Noll "Viscometric flow of
non-Newtonian fluids".
Springer Tracts of Natural Philosophy, N. Y. (1966).