

16
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EXTRUSIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE BOQUILLAS OSCILANTES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
(Área Mecánica)

P R E S E N T A N :

AVALOS	ROGEL	FRANCISCO
FRANCO	CONSUEGRA	WALFRE
SÁNCHEZ	TORAL	PEDRO

Director de Tesis: DR. BALTASAR MENA INIESTA
Asesor de Tesis: M. en C. JOSÉ RAMÓN HERRERA



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D.F.

1997



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

***A mi madre,
a mis hermanos,
y a mis amigos.***

Walfre

A mi mamá

Ma. del Carmen Rogel

Francisco

A mi madre,

a mis hermanas

y a todas aquellas personas que apoyaron mi formación.

Pedro.

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Ingeniería.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales.

A Baltasar.

A José Ramón y a José Antonio.

A Alfredo Maciel.

**EXTRUSIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS
MEDIANTE BOQUILLAS OSCILANTES**

ÍNDICE

1. Introducción

2. Antecedentes

3. Objetivo

4. Hipótesis

5. El Proceso de Extrusión

5.1. Descripción del Proceso de Extrusión

5.2. Descripción Funcional del Proceso de Extrusión

5.3. Aplicaciones del Proceso de Extrusión

5.4. Maquinaria

5.5. Calentamiento y Enfriamiento

5.6. Ventajas y Desventajas

5.7. Descripción del Sistema Boquilla Oscilante

6. Propiedades Mecánicas

7. Clasificación y Definición de Materiales Compuestos

7.1. Orientación de Fibras en el Flujo

8. Estructura de Fluidos Poliméricos

8.1. Estructura

8.2. Peso Molecular y Distribución del Peso Molecular

8.3. Polietileno

8.4. Materiales Poliméricos Orientados

9. Prueba de Tensión

9.1. Aparato

9.2. Obtención de Muestras

9.3. Condiciones

9.4. Procedimiento de Prueba

10. Desarrollo Experimental

- 10.1. Materiales**
- 10.2. Experimentos**
- 10.3. Análisis Experimental**
- 10.4. Condiciones de Extrusión**
- 10.5. Método de Prueba**
- 10.6. Preparación de Muestras**
- 10.7. Condiciones de Prueba**
- 10.8. Cálculos**
- 10.9. Efecto de las Oscilaciones sobre las Propiedades Mecánicas**
- 10.10. Influencia de las Oscilaciones sobre el Flujo Volumétrico**

11. Resultados

- 11.1. 85% LDPE - 15% Fibras de Henequén**
- 11.2. 92.5% LDPE - 7.5% Fibras de Henequén**
- 11.3. LDPE**
- 11.4. HDPE**
- 11.5. Flujo Másico**
- 11.6. Interpretación de Resultados.**

12. Comentarios

13. Discusión

14. Sugerencias

15. Conclusiones

16. Apéndice

- 16.1. Tablas de Resultados**
- 16.2. Planos de Fabricación**
- 16.3. Norma ASTM D 1708-84**
- 16.4. Influencia de las Fibras Naturales en las Propiedades Mecánicas de un Material Compuesto**

17. Referencias y Bibliografía

1. INTRODUCCIÓN

La Dinámica de Fluidos estudia el movimiento de los fluidos. Desde el punto de vista de la Dinámica de Fluidos, la materia sólo puede presentarse en dos estados: sólido y fluido. La diferencia entre ambos es perfectamente obvia para el lego y es un ejercicio interesante preguntar a alguien que explique esa diferencia en palabras. La distinción técnica radica en la reacción de ambos a un esfuerzo tangencial o cortante. Un sólido puede resistir un esfuerzo cortante con una deformación estática; un fluido no. Cualquier esfuerzo cortante aplicado a un fluido provocará el movimiento del fluido. Este se mueve y se deforma continuamente mientras se siga aplicando el esfuerzo cortante.

Dada la definición de fluido, existen dos clases de fluidos: líquidos y gases. De nuevo, la distinción es técnica y concierne al efecto de fuerzas cohesivas. Un líquido, al estar compuesto por agrupaciones de moléculas muy cercanas con enormes fuerzas cohesivas, tiende a conservar su volumen y formará una superficie libre si no está limitado por arriba. Como las moléculas de gas están muy separadas entre sí, con fuerzas cohesivas despreciables, un gas es libre de expandirse hasta que encuentre paredes que lo confinen. Un gas no tiene volumen definido y por sí mismo, sin confinamiento, forma una atmósfera esencialmente hidrostática. Los gases no forman superficies libres.

La mayor parte de los problemas ingenieriles de la Dinámica de Fluidos se refieren a casos claros, en los cuales se puede distinguir fácilmente entre sólidos, líquidos y gases. Por ejemplo: los líquidos comunes (fluidos newtonianos) como agua, aceite, mercurio, gasolina y alcohol; y los gases comunes (fluidos newtonianos) como aire, helio, hidrógeno y vapor de agua, en el rango de temperaturas y presiones normales. Sin embargo, existen muchos casos límites sobre los que se debe advertir; algunas sustancias aparentemente “sólidas” como asfalto y grafito, resisten esfuerzos cortantes durante breves periodos, pero realmente se deforman y presentan comportamiento de fluido en periodos de tiempo largos. Otras sustancias, particularmente coloides y mezclas espesas, resisten pequeñas cortaduras pero “se rompen” a elevados esfuerzos cortantes y fluyen. Del estudio de este tipo de fluidos (fluidos no newtonianos) se ocupa la disciplina conocida como *reología*.

Dentro del campo de la reología se encuentra el estudio de fenómenos de extrusión de polímeros. Como parte de estos estudios hace tiempo se inició la investigación sobre el efecto de someter un flujo polimérico a perturbaciones. Algunos investigadores se enfocaron al efecto de la superposición de oscilaciones en un flujo polimérico; concretamente a la investigación en la extrusión de polímeros bajo la superposición de oscilaciones longitudinales y transversales en la sección de una boquilla o dado de un extrusor, hallando una mejora de propiedades mecánicas, así como un aumento en el gasto [1-11]; fenómenos de vital importancia en muchos procesos industriales.

Siendo un tema muy amplio y profundo, lo que aquí se ha realizado es una investigación sobre el uso de una boquilla oscilante en el proceso de extrusión de materiales compuestos,

que representa la continuación de estudios previos [10]. No obstante se presenta un trabajo de investigación con nuevos objetivos, con nuevas perspectivas y con nuevas limitaciones.

En esta investigación se utilizó una boquilla oscilante diseñada por Mena y colaboradores [12], con algunas modificaciones y adiciones necesarias para alcanzar los objetivos perseguidos. Mediante el proceso de extrusión, con oscilaciones y sin oscilaciones, se obtuvo un material compuesto constituido por fibras de henequen en una matriz de polietileno de baja densidad (LDPE). Este material se obtuvo en dos diferentes concentraciones: *85% LDPE-15% Fibras* y *92.5% LDPE-7.5% Fibras*. De la misma forma se extruyeron dos materiales puros (sin adición de fibra alguna) por separado: polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE). Al momento de extrudir, la boquilla se osciló en tres diferentes formas: longitudinalmente, transversalmente y helicoidalmente. A partir de las extrusiones se obtuvieron muestras o probetas para determinar las propiedades mecánicas de cada caso, las probetas se cortaron en cuatro diferentes direcciones.

2. ANTECEDENTES

Los métodos tradicionales de control de la reología de los polímeros, tales como variaciones de temperatura y plastificación, han resultado en muchos casos ser insuficientes y hasta inaplicables. Por ejemplo, un incremento de temperatura puede causar degradación térmica, tal es el caso del polipropileno (PP) y del cloruro de polivinil (PVC). Para ciertos polímeros, como las poliolefinas, no se han hallado plastificantes satisfactorios. Por lo tanto, el desarrollo de nuevos métodos que impliquen influencia directa en las características del material fundido y que hagan posible mejorar extrusiones, es un problema urgente de carácter científico y tecnológico.

El flujo de líquidos poliméricos a través de tuberías oscilatorias ha sido estudiado en detalle por Mena [1-4] para el caso de oscilaciones longitudinales y por Kazakia y Rivlin [5,6] para el caso de oscilaciones transversales. La superposición de oscilaciones sobre el flujo de un líquido viscoelástico con un gradiente de presión constante produce grandes incrementos en el gasto en comparación con un flujo rectilíneo estacionario. Estos efectos mostrados por flujos oscilatorios sugirieron su aplicación inmediata al flujo de polímeros en procesos de extrusión.

Una aplicación particular de vibraciones a extrusión de polímeros fue reportada por Fridman [7] para el caso de un mandril rotante y recíprocante puesto a la salida de un extrusor. El movimiento del mandril provoca en la salida un incremento significativo en el gasto y una reducción de la presión en la cabeza del mandril. Concluyendo que para altos índices de extrusión, la salida puede ser incrementada sin incrementar el consumo de energía durante la extrusión. Una publicación relacionada con los efectos de las oscilaciones transversales a través de una boquilla ha sido realizada por Isayev [8].

Más recientemente [9], algunos autores reportaron resultados de la superposición de oscilaciones longitudinales y transversales en la sección de la boquilla o dado de un extrusor. Los efectos de tales vibraciones, particularmente en la dirección longitudinal, es producir cambios en la naturaleza de la extrusión, dando incrementos considerables en las propiedades mecánicas.

Las conclusiones obtenidas de los trabajos antes mencionados pueden ser resumidas de la siguiente forma:

1. La superposición de oscilaciones, en la sección de una boquilla a la salida de un extrusor, incrementa las propiedades mecánicas del producto extrudido.
2. La presión, a la entrada de la boquilla, se reduce por efecto de las oscilaciones; esta disminución es responsable de una reducción en la energía total consumida por unidad de peso del producto extrudido.
3. Las oscilaciones inducen orientaciones en las cadenas poliméricas. Estas orientaciones son las que originan el incremento de propiedades mecánicas en el producto final.

3. OBJETIVOS

El objetivo inicial de la investigación fue la obtención de materiales compuestos mediante el uso de una boquilla oscilante en el proceso de extrusión, determinar la resistencia a la tracción de los materiales obtenidos bajo diferentes condiciones de operación de la boquilla oscilante y compararlas con su similar no oscilado.

Se utilizaron fibras de henequén en una matriz de polietileno de baja densidad. Se emplearon fibras con el propósito de determinar si existe orientación dominante alguna de las fibras bajo diferentes condiciones de régimen oscilatorio. En caso de existir esta orientación, determinar su dirección y las condiciones que la propician.

Un objetivo paralelo consistió en realizar las pruebas mecánicas, de los materiales obtenidos, en forma normalizada o estandarizada. Para lo cual es necesario obtener tiras poliméricas que nos permitan apegarnos al código ASTM (American Society for Testing and Materials).

Además se estudiaron materiales puros; es decir, dos tipos de polietileno sin adición alguna de fibras, con el objetivo de estandarizar su estudio, para lo cual también se obtienen tiras poliméricas.

4. HIPÓTESIS

Las oscilaciones durante el proceso de extrusión modifican la orientación de las cadenas poliméricas del polietileno, así como la orientación de las fibras de henequén, teniendo como consecuencia un cambio en las propiedades mecánicas del material, concretamente en la resistencia a la tracción.

5. EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Se puede definir la extrusión como el proceso de obtención de longitudes ilimitadas con una sección transversal constante, conformando el material al obligarlo a pasar a través de una boquilla o dado bajo condiciones controladas. El proceso implica dos aspectos, el de transporte de material hacia la boquilla y el de conformado al pasar a través de ésta.

5.1. Descripción del Proceso de Extrusión

Extrusión es el proceso de forzar el paso de un material a través de una abertura o boquilla. Diversos tipos de materiales son procesados por extrusión: metales, alimentos, cerámicos y plásticos. El extrusor es indiscutiblemente la pieza de maquinaria más importante en la industria de procesamiento de polímeros. Diversos tipos de extrusores son utilizados en la extrusión de plásticos, siendo los principales: extrusores de tornillo, extrusores de disco y extrusores reciprocantes. El tipo de extrusor más comúnmente utilizado en la industria del plástico es el extrusor de un solo tornillo, también conocido como extrusor de un husillo.

En extrusores normales de un solo tornillo, éste no se mueve en dirección axial, solamente tiene movimiento giratorio. Este tipo de extrusor opera en forma continua, lo que permite la fabricación de productos de gran longitud y sección transversal constante, tales como tubos, películas, perfiles, etc.

5.2. Descripción Funcional del Proceso

En los extrusores de tornillo se realizan seis funciones principales: transporte de sólidos, fundición del polímero o plastificación, transporte del polímero fundido o bombeo, mezclado, devolatilización y conformado. La devolatilización no se realiza en todos los extrusores, sólo en aquellos diseñados para extraer volátiles del polímero.

Transporte de Sólidos. Los sólidos son transportados en dos regiones: en la tolva de alimentación y en el tornillo del extrusor. El transporte de sólidos en la tolva de alimentación es, por lo general, un flujo gravitacional de un polímero en particular; el material desciende por la tolva debido a su propio peso.

Transporte de Sólidos por Arrastre. Una vez que el polímero cae en el canal del tornillo, el mecanismo de transporte cambia de transporte de sólidos por gravedad a transporte de sólidos por arrastre. El polímero se mueve hacia adelante como resultado del giro del tornillo en el barril estacionario. Las fuerzas de fricción que actúan en las partículas del polímero son responsables del movimiento del polímero. Las partículas del polímero son compactadas rápidamente en un lecho sólido. La compactación ocurre debido a que las partículas son transportadas bajo cierta presión. La presión aumenta a lo largo de la zona

del transporte de sólidos provocando la compactación del lecho sólido. Una vez que el lecho sólido se ha compactado lo suficiente, el polímero se mueve como un flujo tipo pistón.

Fundición. La zona de transporte de sólidos termina cuando la temperatura del lecho sólido alcanza el punto de fusión del polímero y se empieza a formar una película delgada de polímero fundido. La fundición se produce debido al calor proveniente de los calentadores y por el calor generado por la fricción a lo largo de la superficie del tornillo y de la superficie del barril.

Las dos principales fuentes de calor para la fundición son la generación de calor viscoso en la película fundida y el calor por conducción de los calentadores.

Transporte del Polímero Fundido. La zona de transporte del polímero fundido o zona de bombeo, empieza donde termina la zona de fundición; en el punto en el que todas las partículas poliméricas han sido fundidas. La parte de transporte del polímero fundido actúa como una simple bomba. El movimiento hacia adelante ocurre como resultado del giro del tornillo y la configuración helicoidal del mismo.

Dado. En esta sección se da forma al polímero, por esta razón la zona del dado puede ser considerada la parte funcional más importante. Esta región es siempre una zona de consumo de presión. El crecimiento de la presión en las etapas precedentes es utilizado en la zona del dado. La presión antes del dado es la presión requerida para forzar al polímero fundido a pasar a través del dado. La presión no es determinada por el extrusor, sino por el dado de extrusión. Las variables que afectan la presión antes del dado son:

- La geometría del canal de flujo del dado.
- Las propiedades del flujo del polímero fundido.
- La distribución de temperaturas en el polímero fundido.
- El régimen de flujo en el canal.

La función principal del extrusor es proveer en forma homogénea polímero fundido al dado, a la presión adecuada y al régimen adecuado. El régimen y la presión deben de ser estables, y el polímero fundido debe de ser homogéneo en términos de temperatura y consistencia. El diseño del dado es uno de los aspectos de extrusión que ha prevalecido más como arte que como ciencia. La razón obvia es que es verdaderamente difícil determinar la geometría óptima del canal de flujo a partir de cálculos ingenieriles.

La descripción del flujo del polímero fundido a través del dado requiere de conocer el comportamiento viscoelástico del polímero fundido. El polímero fundido no puede ser considerado como un fluido puramente viscoso debido a que los efectos elásticos en la región del dado son muy importantes. Desafortunadamente, no existen ecuaciones constitutivas simples que describan adecuadamente el comportamiento del polímero fundido en un amplio rango de condiciones de flujo. Por lo tanto, un análisis simple del flujo en el dado es generalmente muy aproximado; análisis más precisos de flujo en el dado

tienden a ser demasiado complicados, análisis más precisos de flujo en dados hacen uso del método de elemento finito.

El objetivo de un dado de extrusión es distribuir el polímero fundido en el canal de flujo de forma tal que el material salga del dado con una velocidad uniforme. La distribución será determinada por las propiedades de flujo del polímero, la geometría del canal de flujo, el régimen de flujo a través del dado y el campo de temperaturas en el dado. Si la geometría del canal de flujo es optimizada para un polímero a determinadas condiciones, un simple cambio en el régimen de flujo o en la temperatura pueden hacer la geometría no óptima. Excepto para dados o boquillas circulares, es imposible obtener una geometría de canal de flujo que pueda ser usada en un amplio rango de polímeros y de condiciones de operación.

El dado por lo general esta conectado a un adaptador, éste se conecta a la salida del barril o cañón del extrusor. El propósito del dado es darle forma al producto extrudido. Esta forma puede ser la del producto final o una forma intermedia que será modificada después en un proceso de post-extrusión.

El dado es uno de los elementos más importantes en la extrusión. Desafortunadamente, el diseño del dado requiere un profundo conocimiento de las características del flujo del polímero y de los requerimientos del producto. Un buen diseñador de dados o boquillas debe de ser un buen reólogo, matemático y diseñador.

5.3. Aplicaciones del Proceso de Extrusión

Las posibilidades que ofrece una extrusora para calentar, plastificar y transportar el material plástico fundido y caliente, han situado a esta máquina en una posición de creciente importancia en el campo de la manipulación de los materiales plásticos.

Actualmente la mayor proporción de los materiales termoplásticos se procesa por extrusión. La extrusión combinada con el empleo de boquillas adecuadamente diseñadas y equipo auxiliar de enfriamiento y arrastre se utiliza para la producción de:

1. Planchas y películas.
2. Filamentos, tubos, varillas y todo tipo de perfiles.
3. Recubrimiento de cables y alambre.
4. Recubrimiento de láminas o películas.
5. Conformado continuo en vacío.
6. Moldeo por extrusión y soplado.
7. Preparación de compuestos de moldeo.
8. Alimentación de calandras y otras aplicaciones.

Se han conseguido avances muy importantes de la técnica de extrusión en todas las aplicaciones que se acaban de señalar. El avance más importante, sin embargo, ha sido la aplicación de la teoría de flujo de fluidos viscosos para obtener un conocimiento científico de lo que ocurre en el interior del cilindro de una máquina de extrusión. Se ha llegado así a alcanzar una situación en la que se pueden calcular las dimensiones del tornillo de la máquina, con razonable aproximación, si se conocen las dimensiones de la boquilla empleada y las propiedades térmicas, viscosidad, comportamiento reológico y densidad aparente del material termoplástico que ha de ser extrudido.

Las modernas extrusoras de tornillo, están construidas para:

1. Extrudir a presión controlada, con presiones de trabajo hasta de 350 (kg./cm²).
2. Trabajar el material plástico de manera tan eficaz con el tornillo que sólo se necesite poco o ningún calor externo; "extrusión adiabática".
3. Obtener altas velocidades del tornillo, manejando así más cantidad de material, dando a éste menor tiempo de residencia en el cilindro de la máquina, obteniendo mayor rendimiento en la operación.
4. Tener una relación longitud/diámetro en el tornillo de, por lo menos, 20:1, 24:1, y hasta 30:1.
5. Eliminar los volátiles y aire atrapado mediante respiraderos.
6. Facilitar el control y la reproducibilidad de las condiciones de extrusión gracias al empleo de mejor instrumentación.
7. Operar a temperaturas de 325°C.

5.4. Maquinaria

Los elementos principales de un extrusor de un sólo tornillo o husillo son: el tornillo, la camisa o cilindro, el alimentador, el dado, el sistema de enfriamiento, el sistema de calentamiento, el sistema de control y el impulsor o motor. En la figura 5.1. se muestran algunos de los elementos más importantes.

5.5. Calentamiento y Enfriamiento

La camisa del extrusor esta equipada con un sistema de calentamiento y un sistema de enfriamiento para mantener un particular perfil de temperaturas a lo largo de la camisa. El sistema de calentamiento consiste, usualmente, en resistencias eléctricas alrededor y a lo largo de la camisa. Usualmente se agrupan en zonas, de tres a seis. Cada zona tiene un termopar y un control de temperatura, permitiendo un control independiente de temperatura.

El enfriamiento puede ser por aire o por agua o por ambos. El enfriamiento por aire se realiza usualmente por sopladores. El sistema de enfriamiento está dividido en zonas, de modo que cada zona puede ser enfriada independientemente. Las zonas de enfriamiento por

lo general coinciden con las zonas de calentamiento. El enfriamiento por agua es más efectivo que el enfriamiento por aire en términos de transferencia de calor. Sin embargo, un control con fluctuaciones pequeñas de temperatura puede ser más difícil de lograr mediante enfriamiento por agua.

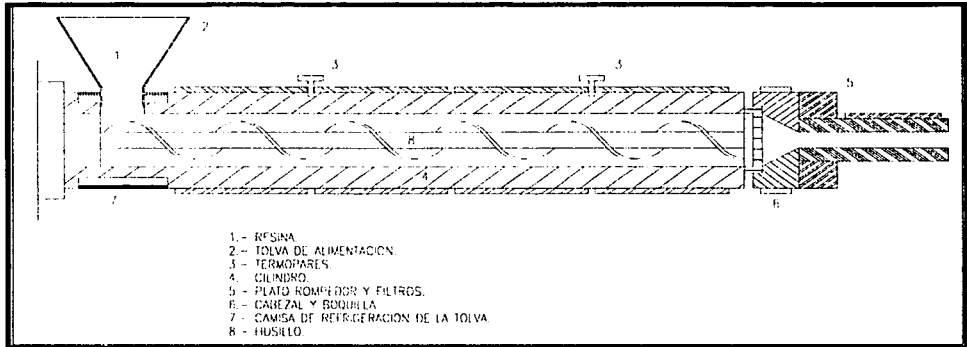


Figura 5.1

5.6. Ventajas / Desventajas

El proceso de extrusión es idealmente apropiado para fabricar productos de gran longitud y de sección transversal constante. Una vez que la máquina ha alcanzado condiciones estables de operación, el proceso requiere un mínimo de atención por parte del operador. El proceso de extrusión es muy apropiado para la automatización. En algunas plantas de extrusión automatizadas un operador se hace cargo de varias líneas de extrusión, manteniendo bajo el costo de trabajo. Existe una gran variedad de plásticos disponibles para obtener las propiedades requeridas por el producto, el gran número de aditivos y rellenos disponibles actualmente y la posibilidad de mezclar o alear diversos tipos de polímeros, hacen que el número de extrusiones compuestas sea esencialmente ilimitado.

Una desventaja del proceso de extrusión es que es, en cierta medida, una caja negra. El polímero puede ser visto entrar y salir del extrusor, pero la observación del proceso completo no es posible. Por lo tanto, cuando ocurren inestabilidades en el proceso, es difícil determinar la causa del problema y encontrar la solución. Una solución rápida y precisa requiere de una buena instrumentación y de una persona con un conocimiento detallado del proceso de extrusión. A menudo es difícil tener ambos en combinación, es por esto que el

proceso de extrusión es aún, algunas veces, considerado un arte. Sin embargo, como resultado de un gran número de estudios científicos de extrusión, el entendimiento de la teoría y práctica de la extrusión ha alcanzado niveles razonables de madurez. La extrusión es ahora más ciencia que arte, sin embargo existen aún algunos fenómenos de extrusión que no han sido completamente entendidos.

5.7. Descripción del Sistema Boquilla Oscilante

El sistema boquilla oscilante se conforma de varios subsistemas:

1. Acoplamiento extrusor-boquilla.
2. Boquilla o cuerpo.
3. Suspensión.
4. Sistema de movimiento longitudinal.
5. Sistema de movimiento angular.
6. Sistema de calentamiento.
7. Acoplamiento boquilla-dado laminador.
8. Dado laminador.

El propósito fundamental del sistema es permitir oscilar el flujo polimérico, en forma precisa y controlada. Las oscilaciones son de tres diferentes clases: longitudinales, angulares y helicoidales. Mediante el sistema de movimiento longitudinal se desplaza la boquilla en la misma dirección del flujo, originando las oscilaciones longitudinales. El sistema de movimiento angular hace girar la boquilla sobre su propio eje, originando las oscilaciones angulares. Las oscilaciones helicoidales se logran haciendo funcionar simultáneamente el sistema de movimiento longitudinal y el sistema de movimiento angular.

Las diferencias fundamentales respecto a la boquilla diseñada por Mena [12] son los acoplamientos y el dado laminador.

En el sistema anterior como acoplamiento extrusor-boquilla se tenía una inserto macho-hembra de tipo pistón, con el problema de que, debido al desgaste de los componentes, se iniciaron fugas del polímero fundido. Se cambió esta forma de acoplamiento por una manguera flexible conectada directamente al extrusor y a la boquilla, y se eliminaron por completo las fugas.

Buscando normalizar nuestros estudios se hizo necesario obtener tiras poliméricas. Por lo que se añadió un dado laminador acoplado a través de una manguera flexible a la boquilla oscilante, de forma similar al acoplamiento boquilla-extrusor.

1. Acoplamiento extrusor-boquilla.

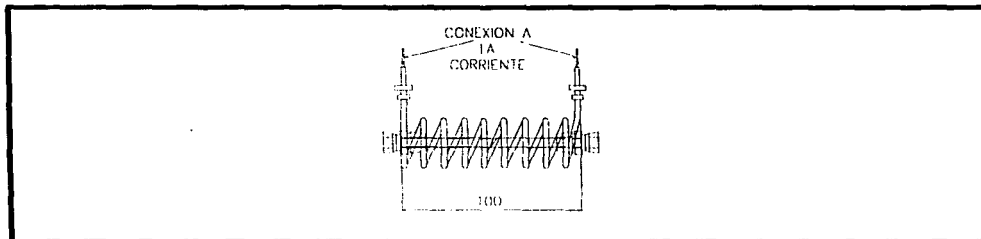


Figura 5.2.

La función de este acoplamiento es permitir que el extrusor alimente a la boquilla en forma continua, sin fugas y sin cambios de temperatura en el fluido polimérico, así como permitir el libre movimiento de la boquilla en cada caso de oscilación. El acoplamiento consiste en una manguera flexible y resistente a altas temperaturas y un conector que permite la adición de este sistema al extrusor. La manguera pasa a través de una resistencia helicoidal.

2. Boquilla o cuerpo.

La boquilla o cuerpo es el elemento donde el fluido polimérico es sujeto a oscilaciones. Consiste en un cilindro de duraluminio con insertos en sus extremos que permiten la conexión a las mangueras de los acoplamientos respectivos.

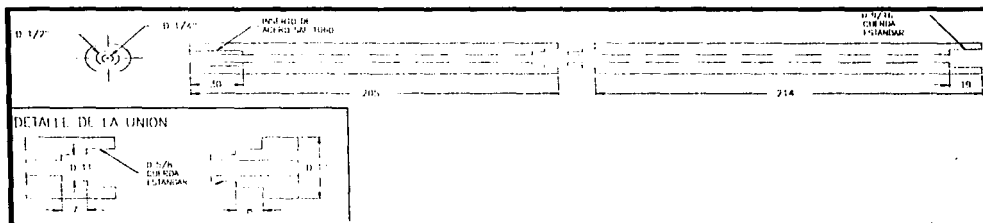


Figura 5.3.

3. Suspensión.

La suspensión permite al cuerpo moverse libremente en dirección longitudinal y/o angular. Funciona como un sistema de rieles en el movimiento longitudinal y como un sistema de rodamientos en el movimiento angular.

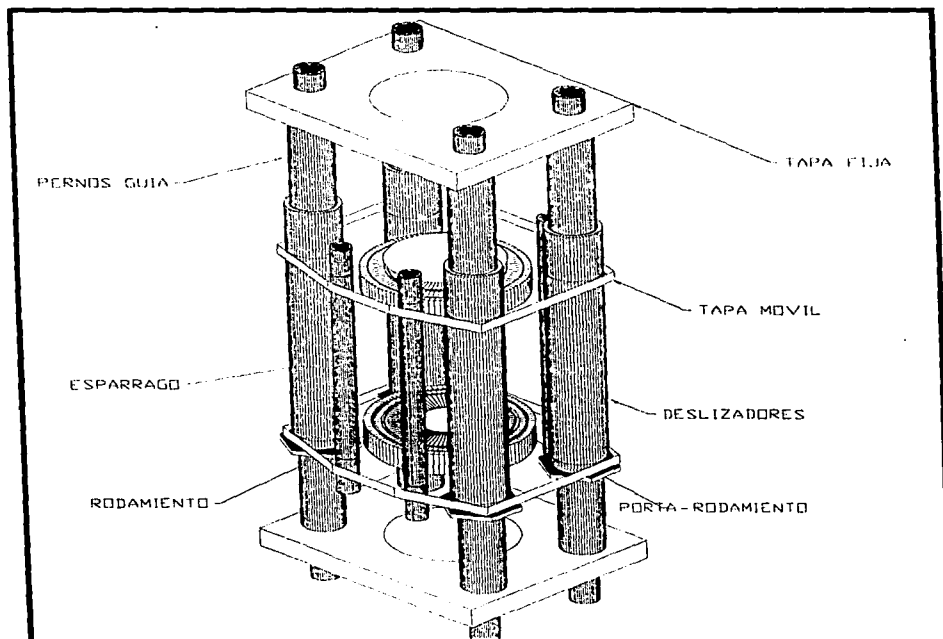


Figura 5.4.

4. Sistema de movimiento longitudinal.

La suspensión es movida longitudinalmente a través de un sistema biela-manivela. La manivela está formada por un disco ranurado acoplado al motor (a) y, por medio de un muñón (b), es acoplado a la biela (c) que está sujeta a la suspensión en el punto (d).

Por medio del giro del disco podremos tener diferentes posiciones del punto (d) el cual se desplazará a lo largo de una línea recta, encontrando su punto muerto superior como se muestra en la figura 5.6. y su punto muerto inferior haciendo girar el disco 180°. El punto (d) está unido al cuerpo de la boquilla, de esta forma la boquilla oscila longitudinalmente.

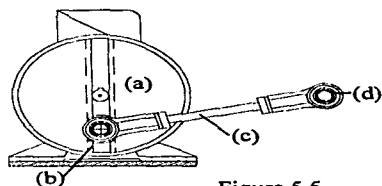


Figura 5.5.

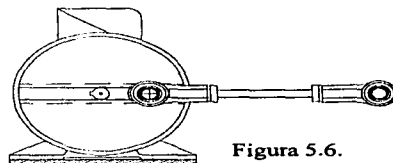


Figura 5.6.

5. Sistema de movimiento angular.

La boquilla es movida angularmente a través de un sistema biela-manivela. La manivela está formada por un disco ranurado acoplado al motor (a) y, por medio de un muñón (b), es acoplado a la biela (c) que está sujeta a una barra ranurada en el punto (d), en el orificio más grande de la barra ranurada es colocada la boquilla (e).

Por medio del giro del disco podremos tener diferentes posiciones del punto (d) el cual se desplazará angularmente respecto al centro de la boquilla, encontrando sus límites cuando la boquilla del disco se encuentre alineada con la biela.

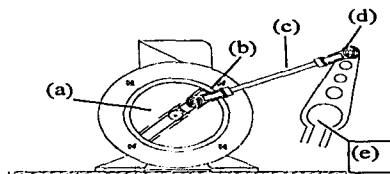


Figura 5.7.

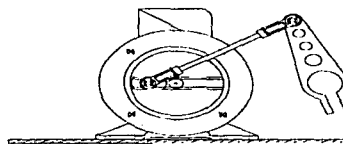


Figura 5.8.

6. Sistema de calentamiento.

El sistema de calentamiento tiene como objeto calentar todo el sistema, sensar la temperatura de todo el sistema por zonas y mantenerla en un valor predeterminado. Como calentadores se utilizan resistencias en forma de abrazadera en el cuerpo o boquilla, en forma helicoidal en los acoplamientos y en forma laminar en el dado. Como sensores se emplean termopares en forma de abrazadera para el cuerpo y de punta para los acoplamientos y el dado. Se emplean controladores analógicos de tipo PLC.

7. Acoplamiento boquilla-dado laminador.

El acoplamiento boquilla-dado laminador básicamente es igual al primer acoplamiento, con la diferencia de que éste tiene una longitud mayor.

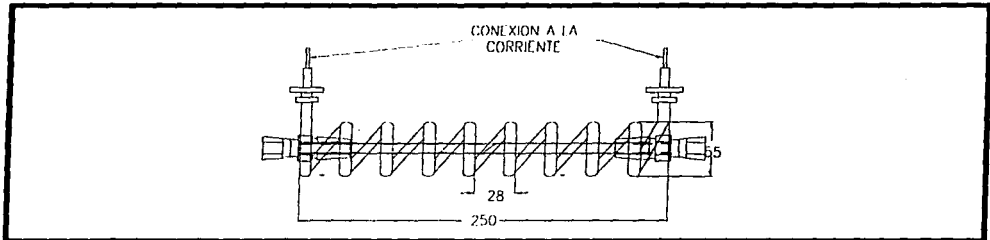


Figura 5.9.

8. Dado laminador.

En esta sección es donde el polímero es conformado como tira polimérica para así poder normalizar los estudios. Se realizó un diseño de dado laminador sencillo debido a las complicaciones ya mencionadas. El dado fue diseñado de forma tal que se pasa de una sección transversal circular a una rectangular en la forma menos brusca posible. En el apéndice de este trabajo se anexan los planos del dado.

6. PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas, entre todas las propiedades de los materiales plásticos, son las propiedades más importantes porque virtualmente todas las condiciones de servicio y la mayoría de las aplicaciones finales tienen que ver de algún modo con la carga mecánica. La selección de un material se basa a menudo en las propiedades mecánicas, tales como resistencia a la tensión, módulo elástico, elongación y resistencia al impacto. Por lo tanto es muy importante un profundo conocimiento acerca de las propiedades mecánicas, las pruebas empleadas para determinar dichas propiedades y el efecto de condiciones adversas en propiedades mecánicas.

Entender el comportamiento básico esfuerzo-deformación de los materiales plásticos es muy importante para el diseño ingenieril. Un diagrama típico esfuerzo-deformación (carga-deformación) se ilustra en la figura 6.1.

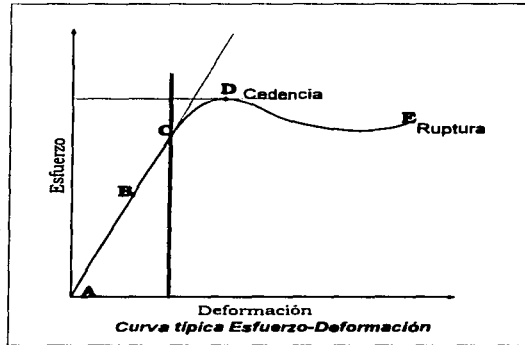


Figura 6.1.

Para una mejor comprensión de la curva esfuerzo-deformación, es necesario definir algunos términos básicos que están asociados con el diagrama esfuerzo-deformación.

Esfuerzo: Es la fuerza aplicada por unidad del área para producir una deformación. Esfuerzo es la razón de la carga aplicada al área transversal original, expresada en N/m^2 .

Deformación: Es el cambio en la longitud por unidad de la longitud original (l/l_0).

Elongación: Es el incremento en la longitud de una muestra producido por una carga de tensión.

Punto de Cedencia: Es el primer punto de la curva esfuerzo-deformación en el cual ocurre un incremento en la deformación sin que se incremente el esfuerzo.

Resistencia a la Cedencia: Es el esfuerzo en el cual el material muestra una desviación de la proporción esfuerzo-deformación. A menos de que otra cosa sea especificada, este esfuerzo coincide con el punto de cedencia.

Límite de proporcionalidad: Es el esfuerzo máximo en el cual el material es capaz de soportar una carga aplicada sin perder la proporción que existe entre esfuerzo y deformación (Ley de Hooke). Se expresa en N/m^2 .

Módulo de Elasticidad: Es la razón de esfuerzo a deformación, por debajo del límite de proporcionalidad del material. Se expresa en unidades de fuerza por área, usualmente N/m^2 . Es también conocido como el módulo de Young. El módulo es una medida de la rigidez del material.

Resistencia última: Es el esfuerzo máximo que soporta un material sujeto a una carga de compresión, tensión o corte. Se expresa en N/m^2 .

Módulo Secante: Es la razón del esfuerzo total que corresponde a la deformación en cualquier punto específico de la curva esfuerzo deformación. También se expresa en fuerza sobre área o en N/m^2 .

El diagrama esfuerzo-deformación ilustrado en la figura 6.1, es el diagrama típico que se obtiene en una prueba de tensión. La parte inicial de la curva entre los puntos A y C es lineal y cumple la ley de Hooke, la cual establece que para un material elástico el esfuerzo es proporcional a la deformación. El punto C, en el cual la curva difiere de la línea recta, es llamado el límite de proporcionalidad implicando que sólo por debajo de este punto el esfuerzo es proporcional a la deformación. El comportamiento del material plástico por debajo del límite de proporcionalidad es elástico por naturaleza y por lo tanto las deformaciones son recuperables. Las deformaciones por encima del punto B en la figura 6.1, son relativamente pequeñas y se han asociado con la flexión y el estiramiento de los vínculos interatómicos de átomos de moléculas plásticas, como se muestra en la figura 6.2. Este tipo de deformación es instantánea y recuperable. No hay desplazamiento permanente de las moléculas relativas unas a otras. La deformación que ocurre más allá del punto C en la figura 6.1, es similar al estiramiento de un resorte de cadenas moleculares. No hay resbalamiento intermolecular y las deformaciones serán recuperables finalmente pero no instantáneamente. Las deformaciones que ocurren más allá del punto de cedencia o del límite elástico del material no son recuperables (figura 6.2.), estas deformaciones ocurren debido al desplazamiento de las moléculas respecto unas a otras. Las moléculas desplazadas no pueden regresar a su posición original, y por lo tanto, tiene lugar una deformación permanente. Estos tres tipos de deformación como se muestra en la figura 6.2, no ocurren

por separado sino que se sobreponen unas a otras. La flexión y el estiramiento de las uniones interatómicas son casi instantáneas. Sin embargo el desenrollamiento molecular es relativamente lento. Los efectos de deslizamiento molecular son los más pequeños de los tres tipos de deformación.

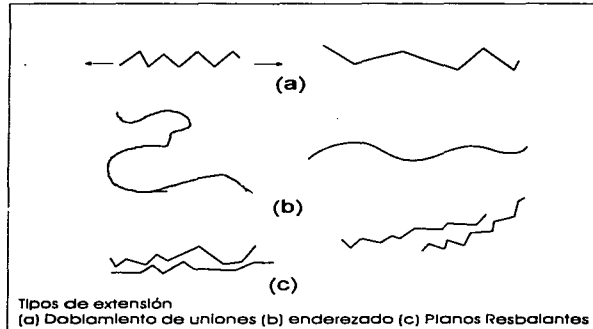


Figura 6.2.

Los materiales poliméricos pueden ser ampliamente clasificados en función de su dureza, suavidad, fragilidad y tenacidad. Los diagramas de tensión esfuerzo-deformación sirven como base para dicha clasificación. El área por debajo de la curva esfuerzo-deformación es considerada como la tenacidad del polímero. La figura 6.3. ilustra curvas de tensión esfuerzo-deformación típicas para diversos tipos de materiales poliméricos.

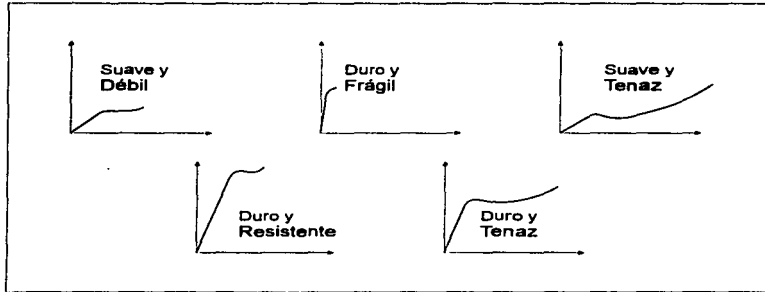


Figura 6.3.

Un material suave y débil se caracteriza por un valor bajo del módulo y del esfuerzo a la cedencia y un valor moderado de elongación en el punto de ruptura. El politetrafluoroetileno (PTFE) es un buen ejemplo de este tipo de materiales plásticos.

Un material suave pero resistente muestra un módulo bajo, un esfuerzo a la cedencia bajo, una elongación alta y un esfuerzo al rompimiento alto. El polietileno es un ejemplo clásico de este tipo de plásticos.

Un material duro y frágil se caracteriza por un módulo alto y una elongación baja. Puede ceder o no antes del rompimiento, un tipo de este polímero es generalmente de tipo fenólico.

Un material duro y fuerte tiene un módulo alto, un esfuerzo alto a la cedencia y por lo general un esfuerzo a la ruptura alto y elongación baja. El acetál es un buen ejemplo de esta clase de materiales.

Un material duro y tenaz se caracteriza por un módulo alto, un esfuerzo a la cedencia alto, una elongación al rompimiento alta y un esfuerzo a la ruptura alto. El policarbonato es un ejemplo de este tipo de material. La figura 6.4. ilustra la relación entre ductilidad y resistencia.

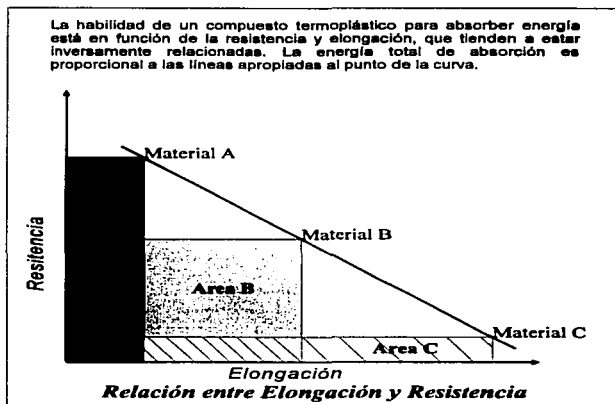


Figura 6.4.

La tabla 6.1 lista las características de la curva esfuerzo-deformación en relación a las propiedades del polímero. En algunas aplicaciones es importante para el diseñador conocer el comportamiento esfuerzo-deformación de un plástico, en particular tanto a tensión como a compresión a deformaciones relativamente bajas, las curvas esfuerzo deformación a tensión y a compresión son casi idénticas. Por lo tanto, a bajas deformaciones, el módulo de compresión es igual al módulo de tensión. Sin embargo a niveles altos de deformación, el esfuerzo a compresión es significativamente más alto que el correspondiente esfuerzo a tensión. Este efecto se ilustra en la figura 6.5.

Descripción del polímero	Módulo	Esfuerzo a la cedencia	Resistencia última	Elongación al rompimiento
Suave, débil	Bajo	Bajo	Bajo	Moderado
Suave, tenaz	Bajo	Bajo	Esfuerzo a la cedencia	Alto
Duro, frágil	Alto	Ninguno	Moderado	Bajo
Duro, resistente	Alto	Alto	Alto	Moderado
Duro, tenaz	Alto	Alto	Alto	Alto

Tabla 6.1.

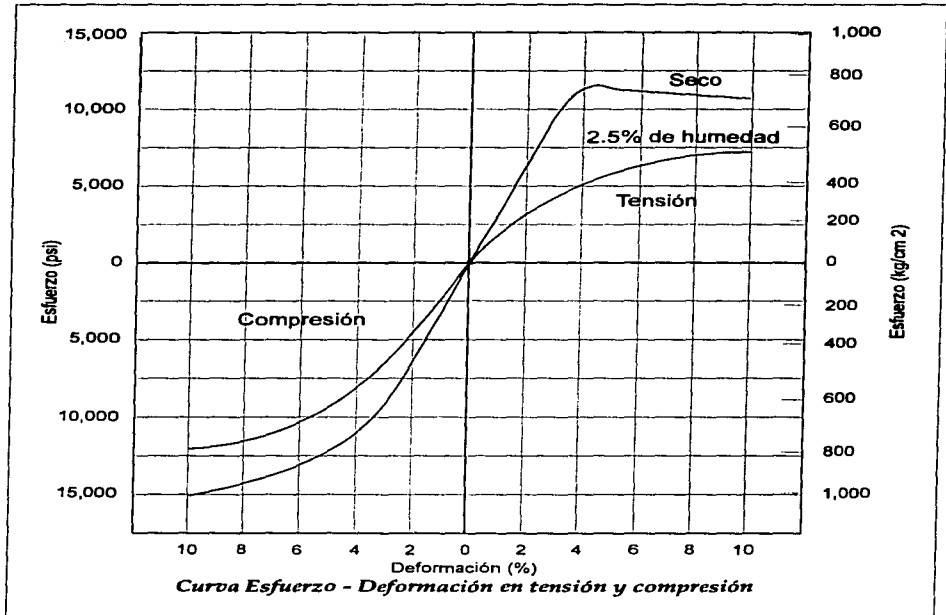


Figura 6.5.

7. CLASIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos han sido clasificados en muchas formas, dependiendo de las ideas y conceptos que se necesiten identificar. Una clasificación útil y general es la que se muestra en la tabla 7.1. con algunos ejemplos. Muchos materiales naturales deben sus excelentes propiedades a la combinación de dos o mas componentes que pueden ser distinguidos fácilmente cuando se examinan en un microscopio óptico o electrónico. Por ejemplo, muchos tejidos en el cuerpo, que poseen alta resistencia en combinación con una enorme flexibilidad, están hechos de fibras rígidas, tales como colágeno, implantadas en una matriz de baja rigidez. Las fibras están alineadas de tal forma que proveen la máxima rigidez en la dirección de las cargas altas y también pueden deslizar unas respecto a otras de modo que el tejido es muy flexible.

	Ejemplos
Materiales compuestos naturales	Madera Hueso Bambú Músculo y otros tejidos
Materiales microcompuestos	Aleaciones metálicas: aceros Termoplásticos endurecidos: poliestireno de impacto Termoplásticos reforzados
Macrocompuestos	Acero galvanizado Concreto reforzado Aspas de helicóptero Skies

Tabla 7.1.

En la figura 7.1. se muestra otra clasificación, ésta se basa en el tipo de refuerzos y su geometría.

Muchos de los materiales ingenieriles son también combinaciones de dos o más fases dispersas en una escala microscópica para obtener propiedades óptimas. La dureza y resistencia de las aleaciones metálicas y de los plásticos ingenieriles se logran combinando fases de alta resistencia con fases de dureza y ductilidad. Cuando esta aleación se enfría lentamente desde 800°C la microestructura se conforma de capas alternadas de una fase suave y dúctil, que es casi hierro puro, y un compuesto duro y frágil, Fe₃C, llamado cementita.

Los materiales naturales y los materiales ingenieriles son microcompuestos puesto que sus propiedades se deben a una fina dispersión de fases. La estructura es a veces tan fina que se requiere de un microscopio electrónico de alta resolución para resolver las fases separadas.

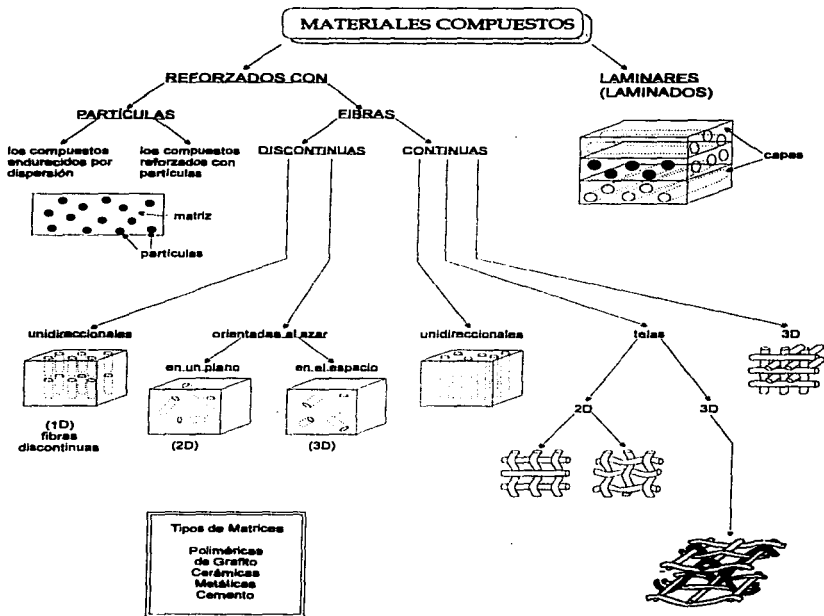


Figura 7.1.

La "idea" de compuesto también puede ser relacionada en macroescala. Esto es particularmente relevante en componentes ingenieriles que consisten de dos o más materiales combinados para dar un rendimiento en servicio superior a los materiales por separado. Por ejemplo, al acero galvanizado, que es acero cubierto con una capa de zinc, combina la resistencia a la corrosión del zinc con la resistencia del acero. En forma similar, a las vigas de concreto que tienen una excelente resistencia a la compresión se les da alguna resistencia a la tensión reforzando el concreto con barras de acero.

En realidad no existe una definición adecuada de un material compuesto pero la discusión precedente da una indicación del campo de este tema. En términos de aproximación, se presentan tres puntos importantes que deben ser incluidos en una definición aceptable de un material compuesto:

1. Consiste de dos o más materiales distintos físicamente y mecánicamente separables.
2. Puede ser hecho mezclando los materiales separados de tal forma que la dispersión de un material en el otro pueda ser hecha en forma controlada para alcanzar propiedades óptimas.
3. Las propiedades son superiores, y posiblemente únicas en algunos aspectos específicos, a las de los componentes por separado.

El último punto provee la principal razón de desarrollo de los materiales compuestos. En plásticos reforzados con fibras, fibras y plásticos con algunas excelentes propiedades físicas y mecánicas, son combinados para formar un material con propiedades nuevas y superiores. Las fibras poseen muy alta resistencia y módulo pero esto sólo en fibras muy finas, con diámetros en el rango de 7-15µm, y son usualmente muy frágiles. Los plásticos pueden ser dúctiles o frágiles pero usualmente son resistentes a ambientes químicos. Combinando fibras y resina se forma un material con una resistencia y dureza cercanas a las de la fibra y con la resistencia química del plástico. Además, es posible lograr alguna resistencia a la propagación de grietas y capacidad de absorber energía durante la deformación.

Potencialmente, cualquier material puede ser empleado como matriz para fibras y el campo en términos de propiedades es casi ilimitado. En la práctica, solo un número limitado de materiales es empleado y su selección se determina por factores tales como facilidad de fabricación, compatibilidad con las fibras, propiedades finales deseadas y costo.

Tipos de Matrices	Tipos de Fibras
Poliméricas:	Vidrio
termoestables,	Carbón (grafito)
termoplásticas	Aramid (kevlar)
Carbón	Boro
Cerámicas	Otras - naturales,
Metálicas	metálicas, cerámicas,
De cemento	etc.

Tabla 7.2.

A continuación se presentan, en forma resumida, algunos aspectos interesantes de los materiales compuestos.

Ventajas generales

En general proporcionan alta resistencia, alta dureza, larga vida bajo fatiga, baja densidad.

Mejoras adicionales: resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, conductividad térmica.

Micromecánica

Ventajas: Capacidad de la matriz de transmitir esfuerzos a las fibras que son frágiles. Matriz dúctil.

Macromecánica

Ventajas: Anisotropía; el comportamiento promedio del material puede ser predecido a partir de las propiedades de los constituyentes.

Limitaciones: El análisis de materiales convencionales es mucho más simple debido a su isotropía.

Caracterización Mecánica

Limitaciones: Se necesitan un gran número de parámetros básicos del material. Los materiales convencionales requieren dos constantes elásticas y dos de resistencia

Duración y Mantenimiento

Ventaja: Larga vida bajo fatiga.

Limitaciones: Sensibilidad a ambientes higrotérmicos. Problemas de reparación y reciclaje.

Eficiencia de costo

Ventaja: Ahorro en peso.

Desventaja: Alto costo de materias primas.

Estado Actual

Rápido desarrollo en las dos últimas décadas:

Progreso significativo en ciencia y tecnología de materiales en el área de fibras, polímeros y cerámicos.

Necesidad de materiales de alto desempeño en estructuras aéreas y aeroespaciales.

Desarrollo de poderosos métodos numéricos para análisis estructural.

7.1. Orientación de fibras en el flujo

Durante el procesamiento de materiales compuestos de fibras cortas ocurren cambios en la orientación de las fibras. Estos cambios se relacionan en forma compleja con las propiedades geométricas de las fibras, las propiedades viscoelásticas de la matriz y el cambio de forma del material producido por determinado proceso. En el proceso el polímero fundido experimenta un flujo elongacional y un flujo de corte. Un indicio del efecto de este proceso de flujo en la orientación de la fibra se ilustra en la figura 7.2. para una deformación simple bidimensional. Durante el flujo elongacional las fibras giran hacia la dirección de la elongación. Con largas elongaciones se puede producir un alto nivel de alineamiento. En el flujo cortante algunas fibras rotan hacia la dirección de corte y otras giran en dirección opuesta de modo que no hay un cambio neto en la orientación. La aplicación de un flujo cortante a un material parcialmente alineado resulta en la rotación de algunas fibras en dirección opuesta de la dirección principal de orientación. Por tanto, el grado de orientación preferencial de fibras depende del campo de flujo. La viscosidad de la matriz afecta la distribución de la orientación final principalmente al momento de llenar el molde. Esto determina la distribución de los campos elongacionales y de corte. Un ejemplo bastará.

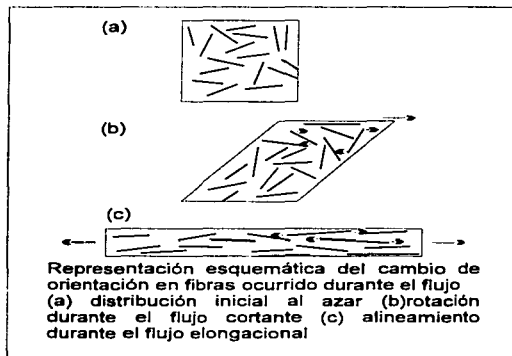


Figura 7.2.

La figura 7.3. ilustra el proceso típico de llenado de un molde en la inyección de fibra de vidrio y un termoplástico. Cuando el material es inyectado o extrudido a través de la boquilla del barril o cañón de la máquina dentro de la cavidad del molde, experimenta largos campos elongacionales y de compresión. El material se solidifica en la superficie del molde formando una piel o cáscara y el molde es entonces llenado por material que fluye a través de la región

central hacia el frente. Se establece un perfil de velocidades en la región central. El campo de deformación en la región de la cáscara solidificada comprende una gran cantidad de flujo elongacional como indica el cambio en la forma del elemento cuadrado inicial. Después de llenarse por completo el molde ocurre la solidificación de la región central bajo campos de flujo completamente diferentes a los de la cáscara.

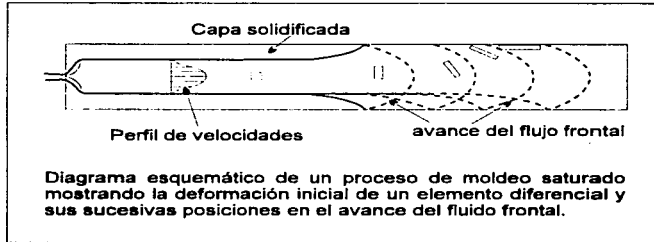


Figura 7.3.

Existe una pronunciada orientación preferencial de fibras paralelas al flujo en las capas exteriores del molde y una distribución más aleatoria en la región central. El grado de orientación y el tipo de estructura de capa que se desarrolla depende de las condiciones del proceso tales como temperatura, presión, temperatura del molde y también de factores como la longitud de la fibra, fracción volumétrica y las dimensiones y forma del molde y la entrada a éste.

8. ESTRUCTURA DE FLUIDOS POLIMÉRICOS

A nivel molecular existen varias diferencias importantes entre fluidos poliméricos (o “macromoleculares”) y fluidos de “moléculas pequeñas”. Debido a estas diferencias el comportamiento del flujo de los fluidos poliméricos difiere del de los fluidos de “moléculas pequeñas”, los cuales son descritos satisfactoriamente por la dinámica de flujos Newtonianos. Existen varias características sobresalientes de la arquitectura macromolecular que influyen el comportamiento del flujo. Primero, los pesos moleculares de las moléculas constituyentes son muy altos. Segundo, raras veces encontramos polímeros en el cual todas las moléculas tienen exactamente el mismo peso molecular, sino mezclas en las cuales hay una distribución de pesos moleculares, y se sabe que las propiedades son muy sensibles a la distribución del peso molecular. Tercero, las moléculas poliméricas pueden asumir un número tremendo de configuraciones, aun en el equilibrio; entonces, en el flujo, la distribución y configuraciones pueden ser alteradas enormemente teniendo como consecuencia que el estiramiento y alineación de moléculas pueden alterar las propiedades del flujo. Cuarto, en soluciones concentradas o polímeros no diluidos (a menudo llamadas “fundiciones”; materia en estado fundido) las moléculas pueden formar una red enmarañada temporal con uniones enredadas cuyo número puede cambiar con el tiempo en varias situaciones de flujo.

8.1. Estructura

Químicamente una *macromolécula*¹ (o *polímero*) es una molécula larga compuesta de muchas unidades químicas simples pequeñas, generalmente llamadas *unidades estructurales*. En algunos polímeros cada unidad estructural está unida a otras dos, y la cadena estructural resultante es llamada *macromolécula lineal*. En otros polímeros muchas de las unidades estructurales están unidas a otras dos, sin embargo unen a tres o más, entonces estamos hablando de moléculas *ramificadas*. Donde terminan las cadenas se encuentran unidades especiales llamadas *grupos terminales*. La figura 8.1. muestra representaciones simbólicas de macromoléculas lineales (a) y ramificadas (b).

Para completar mencionamos que en algunos materiales macromoleculares todas las unidades estructurales están interconectadas, resultando una red tridimensional interconectada en lugar de moléculas separadas. Sin embargo, dichos materiales generalmente no poseen una fase fluida.

¹ Algunos autores tienen especial cuidado en distinguir entre *macromoléculas* (moléculas muy largas) y *polímeros* (macromoléculas formadas por unidades estructurales repetidas). Esta fina distinción parece ser, en general, ignorada. En este trabajo empleamos ambos términos como sinónimos.

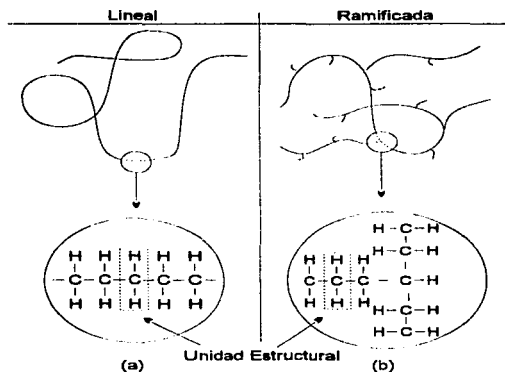


Figura 8.1.

Algunas veces es útil distinguir entre macromoléculas naturales (biológicas) y sintéticas. Muchos polímeros sintéticos son formados a partir de unidades estructurales sencillas, y se conocen estos polímeros como *homopolímeros*. Ejemplos típicos de homopolímeros sintéticos son el polietileno y el poliestireno. En contraste los *copolímeros* se forman a partir de dos o más unidades estructurales diferentes. De acuerdo a la manera en que se combinan las unidades estructurales, los copolímeros son clasificados como copolímeros aleatorios, copolímeros en bloque, o copolímeros insertados (empalmados) como se ilustra en la figura 8.2. La razón para producir copolímeros es obtener materiales con un rango más amplio de propiedades del que es posible tener con los homopolímeros solos.

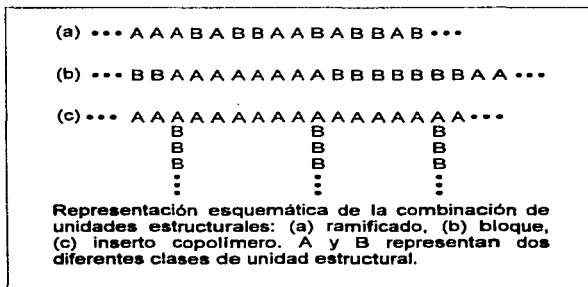


Figura 8.2.

Las macromoléculas biológicas, en contraste con las macromoléculas sintéticas, generalmente contienen un gran número de unidades estructurales diferentes.

Los polímeros se forman a partir de monómeros en una reacción química llamada polimerización. El monómero es generalmente de composición química bastante simple y se asemeja a las unidades estructurales. Durante la reacción de polimerización, las moléculas de monómeros se unen para formar cadenas poliméricas. Las reacciones poliméricas suelen clasificarse de acuerdo a su mecanismo de reacción: reacción en cadena y reacción en pasos.

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas pequeñas son sus propiedades mecánicas. En general los polímeros tienen excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

Todos los materiales sólidos pueden clasificarse de acuerdo a su estructura molecular en cristalinos y amorfos. En los sólidos cristalinos, las moléculas se encuentran ordenadas en las tres dimensiones. Esto se llama ordenamiento periódico y lo pueden tener los sólidos cristalinos constituidos por moléculas pequeñas. En el caso de los polímeros, las cadenas son muy largas y fácilmente se enmarañan y, además, en el estado fundido se mueven en un medio muy viscoso, así que no puede esperarse en ellos un orden tan perfecto, algunos polímeros exhiben ordenamiento parcial en regiones llamadas *cristalitos*.

Una sola macromolécula no cabría en uno de estos cristalitos, así que se dobla sobre ella misma y además puede extenderse a través de varios cristalitos como se muestra en la figura 8.3.

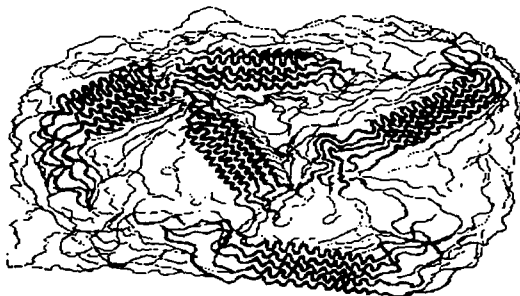


Figura 8.3.

En esta se distinguen regiones de dos clases: las cristalinas, en las que las cadenas dobladas varias veces en zigzag están alineadas formando agrupaciones llamadas cristalitas; y otras regiones amorfas, en las que las cadenas se enmarañan en un completo desorden. La proporción o porcentaje de zonas cristalinas puede ser muy alto, como en el polietileno. En estos casos puede considerarse que el material contiene una sola fase, que es cristalina, aunque con muchos defectos.

El grado de cristalinidad de los polímeros, que en su estructura regular y por la flexibilidad de sus cadenas tienen mayor tendencia a cristalizar, depende de las condiciones de cristalización. Si el polímero cristaliza a partir del material fundido, habrá más imperfecciones porque las cadenas se enredan y el medio es muy viscoso, lo cual dificulta el ordenamiento de ellas. También es frecuente que los cristalitas mismos se agrupen rápidamente a partir de un punto de nucleación y crezcan en él en forma radial, formando esferulitos. El número y tamaño de los esferulitos puede controlarse mediante la velocidad del enfriamiento; si es rápido produce muchos esferulitos pequeños y puede reducir considerablemente el grado de cristalinidad.

Existen dos factores estructurales que favorecen la cristalización en los polímeros:

- 1.- La regularidad de la estructura molecular hace posible que las moléculas se acomoden en una red cristalina.
- 2.- La polaridad de las moléculas aumenta la atracción entre cadenas adyacentes, y en consecuencia, la atracción que tiende a colocarlas ordenadamente en el cristal y a mantenerlas firmemente en él.

8.2. Peso molecular y distribuciones del peso molecular

El peso molecular de una macromolécula es el producto del peso molecular de una unidad estructural y el número de unidades estructurales en la molécula. Moléculas de polímeros sintéticos típicos tienen un peso molecular entre 10,000 y 1,000,000 g/mol.

Naturalmente se puede concebir una muestra de un polímero en la cual el peso molecular de todas las macromoléculas es el mismo. Dicha muestra es llamada *monodispersa*. De hecho, algunos polímeros biológicos son monodispersos. Polímeros sintéticos monodispersos o “casi monodispersos” pueden ser producidos por técnicas especiales, pero son raramente utilizados comercialmente. En contraste la mayoría de los polímeros comerciales son *polidispersos*, esto es, contienen moléculas de diferentes pesos moleculares.

La distribución del peso molecular no es una característica permanente del fluido macromolecular, ya que las macromoléculas están sujetas a la degradación. Existen diversas clases de degradación: térmica, radiactiva, química, biológica y mecánica. De particular importancia es la ruptura de las cadenas poliméricas cuando los fluidos poliméricos son sometidos a altos índices de corte. Esto altera la distribución del peso molecular del

polímero y causa un reducción permanente en la viscosidad. La reducción de la longitud de las cadenas puede tener un profundo efecto en la utilización de macromoléculas en diversas aplicaciones. Actualmente no existe una teoría confiable de estabilidad mecánica para fluidos macromoleculares, por lo que los casos particulares deben ser investigados experimentalmente. El esfuerzo cortante y la diferencia del esfuerzo normal primario son ambos funciones del peso molecular. La diferencia del esfuerzo normal primario es más sensible a la degradación del polímero; es decir, a los cambios en la distribución del peso molecular de lo que es el esfuerzo cortante.

8.3. Polietileno

Fórmula	$C_{2000}H_{4002}$
Peso molecular	28 000
Densidad	0.91-0.97 g/cm ³
Temperatura de fusión	hasta 135°C
Estructura	-CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -

El polietileno -(CH₂-CH₂)- es el polímero de mayor importancia comercial y esto puede atribuirse a:

- Su bajo costo, por lo barato de la materia prima y el alto nivel de producción.
- Su baja polaridad, que le hace tener excelentes propiedades eléctricas .
- La facilidad de su procesamiento por técnicas muy variadas.
- Sus aceptables propiedades mecánicas.
- Su baja absorción de humedad.

A estas cualidades, se añade su gran versatilidad, lo cual puede sorprender si se considera que es el polímero más sencillo y sin embargo debemos recordar que puede haber en él gran variabilidad estructural debido al número, distribución y clase de las ramificaciones en sus cadenas.

Existen tres clases de polietilenos:

- El de alta densidad
- El de baja densidad
- El lineal de baja densidad

Los dos primeros son homopolímeros y el último es un copolímero del etileno con otros monómeros.

La diferencia entre ellos es la cantidad de ramificaciones:

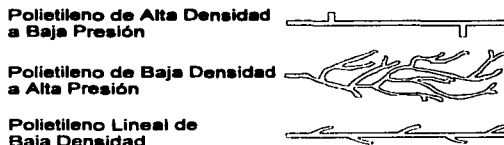


Figura 8.4.

Polietileno de Alta Densidad

El polietileno de Alta Densidad (0.94 a 0.97 g/cm^3) es un material de muy alta cristalinidad (85 a 97%) y temperatura de fusión 135°C . De las tres propiedades mencionadas, la cristalinidad es fundamental, y las restantes, son consecuencia de ella. A su vez, la alta cristalinidad de este tipo de polietileno se debe a que sus cadenas tienen muy pocas ramificaciones, por lo que pueden acomodarse bien en la red cristalina, a lo cual contribuye también la flexibilidad de las cadenas.

La gran aceptación que este material ha tenido se debe a sus buenas propiedades físicas, químicas y eléctricas, combinadas con su bajo costo en comparación con otras resinas. Además como se funde con precisión a temperaturas moderadas puede procesarse fácilmente por muchos métodos y formularse para que cumpla con los requerimientos exactos de aplicaciones específicas.

Su resistencia a la oxidación, durante el procesamiento, y a la acción de los rayos solares, durante el uso, pueden incrementarse fácilmente empleando antioxidantes, absorbedores de luz ultravioleta y otros aditivos.

La resistencia tensil del polietileno no es tan alta como la de muchos otros plásticos, pero es una propiedad que rara vez limita su aplicación.

Una de las grandes cualidades del polietileno de alta densidad es su tenacidad, que se mantiene hasta temperaturas muy bajas.

La resistencia al deslizamiento (creep), es una propiedad que depende del grado de cristalinidad y del peso molecular. Los polietilenos de alta densidad y de alto peso molecular sufren menor deslizamiento que los de baja densidad aunque sean también de bajo peso molecular. Pero esto no significa que si se desea bajo deslizamiento debe elegirse el polietileno con la mayor densidad disponible, de hecho los mejores en este sentido están entre 0.945 y 0.950 g/cm^3 , y peso molecular muy alto: $M_w = 250\ 000$ a $300\ 000$ con índice

de fluidez de 0.06 a 0.04. Son los que se usan para hacer monofilamentos para cuerdas y tejidos, así como tubería de alta precisión.

Los polietilenos de alta densidad tienen muy buena resistencia a los ácidos no oxidantes, a los álcalis y a los disolventes en general. Sin embargo, para cada aplicación hay que hacer pruebas en las piezas terminadas para seleccionar la resina más adecuada.

La permeabilidad a los gases, vapores y líquidos es menor en los polietilenos altamente cristalinos que en los otros.

El polietileno de alta densidad se procesa por todas las técnicas usuales para termoplásticos; moldeo por inyección, extrusión, termoformado y soplado. Un factor muy importante en todos los casos es que la resina debe calentarse y enfriarse uniformemente. La velocidad de procesamiento depende de qué tan rápidamente se pueda calentar y enfriar la resina. La primera vez que alguien procesa polietileno de alta densidad se sorprende por la cantidad de calor requerida para fundirlo y procesarlo.

Los extrusores, por ejemplo, deberán ser capaces de trabajar a temperaturas altas y suministrar grandes cantidades de calor.

Tratándose de termoformado las cualidades especiales del polietileno de alta densidad lo hacen particularmente útil. Las láminas para termoformado hechas con polietilenos de baja densidad tienden a colgarse, lo que no ocurre con el de alta densidad, del cual se recomienda el índice de fluidez² 0.3 o menor, que además produce láminas de gran tenacidad y muy buena resistencia al agrietamiento ambiental.

Para hacer filamentos de cuerdas y tejidos el mejor polietileno es el de alta densidad, por su mayor grado de cristalinidad que le imparte alta resistencia tensil.

Cuando se trata de hacer artículos moldeados por inyección, el polietileno de alta densidad se prefiere sobre los otros, al igual que cuando la aplicación requiere mayor temperatura de flexión y en general mayor resistencia mecánica.

Una desventaja de los polietilenos de alta densidad es que las piezas moldeadas con ellos se contraen más que las hechas con polietilenos de menor densidad y la posibilidad de orientación residual también es mayor, lo cual puede conducir a distorsiones de las piezas. No son transparentes debido a su alto grado de cristalinidad. Otra de sus desventajas es que las variedades de bajo peso molecular tienden a ser frágiles.

² El índice de fluidez es una prueba realizada para estudiar el comportamiento del flujo de los termoplásticos, haciéndolos pasar bajo una carga prescrita a través de una boquilla de dimensiones estandarizadas. La cantidad de polímero, en gramos, que emerge en un tiempo de 10 minutos a 190°C, se llama índice de fluidez.

Algunas aplicaciones de los polietilenos de alta densidad son:

- La fabricación de recipientes de gran capacidad.
- La fabricación de rodamientos, rodillos, bombas y válvulas para la industria química, sellos y empaques, engranes, chumaceras.
- La fabricación de películas de empaque con muy baja permeabilidad y menor absorción de grasas, así como la fabricación de películas para bolsas con alta resistencia al desgarre.

Polietileno de Baja Densidad

Este término incluye a los polietilenos ramificados con densidades de 0.91 a 0.93, grados de cristalinidad de 50 a 70 y temperaturas de fusión entre 100 y 110 °C.

Son ramificados porque se fabrican en condiciones muy drásticas: presiones de 1500 a 3000 atm, temperaturas de 200 a 250 °C y peróxidos como iniciadores. Los peróxidos generan radicales libres que por su enorme reactividad producen ramificaciones.

A pesar de que al ser comparados con las otras dos grandes clases de polietilenos, los de baja densidad son inferiores en algunas de sus propiedades, de todos modos superan al resto en ventas por un amplio margen y no sólo a los otros polietilenos, sino a los demás polímeros considerados individualmente.

Las aplicaciones más importantes de los polietilenos de baja densidad son:

- 55% de ellos se procesa en forma de películas principalmente para bolsas y para usos agrícolas como el acolchado, cubiertas para invernaderos y túneles, así como para impermeabilizar canales y depósitos de agua. Las películas también se emplean en muchos tipos de empaques para alimentos.
- 10 a 15 % se ocupa para hacer gran variedad de artículos moldeados.
- 15 a 20% se usa para aislar cables y alambres eléctricos.
- El resto se ocupa para laminarlo con papel, cartón, hojas metálicas o se co-extruye con otros plásticos. También se moldea por soplado para hacer botellas o se extruye para fabricar tuberías de varios tipos incluyendo la que se usa en el riego por goteo.

Entre las cualidades de los polietilenos de baja densidad destacan su precio y su facilidad de procesamiento, así como su flexibilidad, su alta resistencia al impacto y particularmente, la retención de esas propiedades a temperaturas muy bajas, debido a que su temperatura de transición vítrea es -120°C. Su baja polaridad le confiere excelentes propiedades eléctricas

8.4. Materiales Poliméricos Orientados

Cuando un material fundido formado de largas cadenas moleculares entrelazadas fluya, existirá una diferencia de velocidades entre las capas exteriores cerca de la superficie estacionaria y la parte central como resultado de la viscosidad (igual a la fricción interna) de la materia fundida. Esta fuerza de corte alineará al menos parte de las cadenas en dirección del flujo. Una molécula tipo esfera esparcida aleatoriamente tomará la forma de una elipsoide (8.5.).

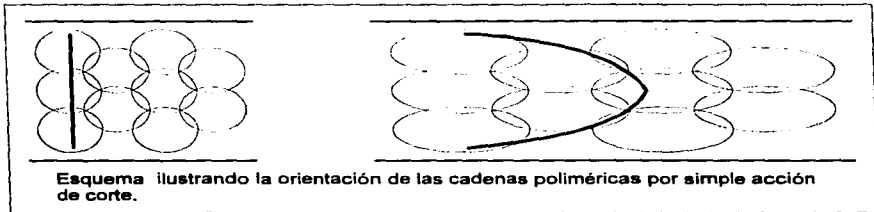


Figura 8.5.

Todas las piezas moldeadas por inyección y las obtenidas por extrusión mostrarán este fenómeno en cierto grado. En términos prácticos esta ligera orientación no afectará ni tampoco incrementará las propiedades mecánicas o la eficiencia de uso de las partes moldeadas. Sin embargo, bajo condiciones extremas (como calentar la pieza más allá de la temperatura del calor de deflexión), la pieza puede mostrar contracción (arrugamiento) o distorsión excesiva.

Particularmente durante el proceso de extrusión, ocurre un estiramiento adicional del plástico. Debido a que esta orientación también ocurre a temperaturas relativamente altas, la fuerza de tracción es normalmente baja por la baja viscosidad del plástico que sale, permitiendo a secciones de moléculas adyacentes deslizarse fácilmente unas contra otras. Para evitar la posibilidad de experimentar distorsiones por contracción, especialmente cuando se trabaja a altas temperaturas (termoformado), el grado de orientación puede ser monitoreado y mantenido bajo ciertos límites.

Algunos autores proponen que se pueden alcanzar orientaciones significantes de cadenas poliméricas aplicando grandes fuerzas de corte a bajas temperaturas, cercanas a la temperatura de transición vítrea. Bajo estas circunstancias, segmentos adicionales de cadenas poliméricas, de las originalmente enrolladas y desordenadas, serán alineadas en la dirección de la fuerza de tracción, dejando que algunos segmentos permanezcan en

dirección transversal. Debido a que las cadenas poliméricas no son estructuras lisas tubulares, sino secciones estrechándose y ensanchándose constantemente, debe asumirse que alineaciones paralelas de largas longitudes serán favorecidas por movimientos perturbatorios ejerciendo fuerzas adicionales sobre las secciones no alineadas. Una posición esquemática de los segmentos de cadenas se muestra en la figura 8.6.

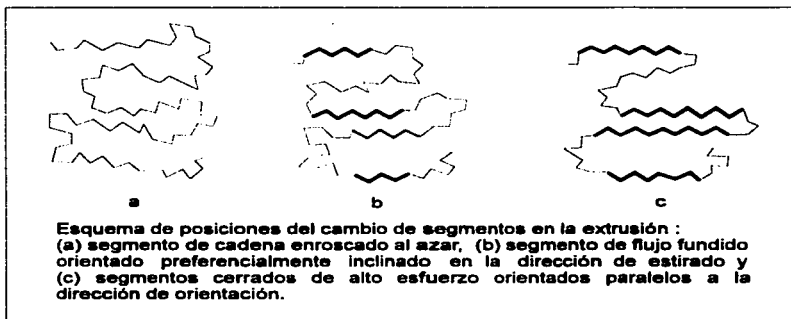


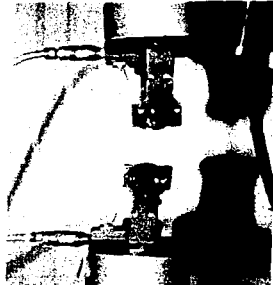
Figura 8.6.

9. PRUEBA DE TENSIÓN

La medida de la elongación a la tensión y el módulo a la tensión están entre los indicadores más importantes de la resistencia de un material y son las propiedades del material más ampliamente especificadas. La prueba de tensión, en un sentido amplio, es una medida de la habilidad del material para soportar fuerzas que intentan separarlo, y para determinar en qué medida el material se estira antes de romperse. El módulo de tensión es un indicador de la rigidez relativa de un material y se puede determinar a partir de un diagrama esfuerzo-deformación. Diferentes tipos de materiales plásticos son a menudo comparados en base a datos de resistencia a la tensión, a la elongación y al módulo de tensión. Muchos plásticos son muy sensibles a la razón de deformación y a las condiciones ambientales; por lo tanto, los datos obtenidos por este método no pueden ser considerados válidos para aplicaciones relacionadas con carga-tiempo o en condiciones ambientales muy diferentes a las de este método. Los datos de propiedades a la tensión son más útiles en la selección de un tipo particular de plástico de un gran grupo de materiales plásticos y dichos datos son de uso limitado en el diseño del producto. Esto es porque la prueba no tomó en cuenta el comportamiento dependiente del tiempo de los materiales plásticos.

9.1. Aparato

Se utiliza una máquina de pruebas de tensión con una relación constante del movimiento de mordazas. Esencialmente cuenta con un miembro estacionario con una mordaza, y un miembro móvil con una segunda mordaza. Utiliza un mecanismo de control de velocidad. Algunas de las máquinas comerciales disponibles, utilizan un mecanismo servocontrolado para proveer un alto grado de precisión en la velocidad. Utiliza un mecanismo indicador de carga capaz de indicar la carga total de tensión con una precisión de $\pm 1\%$ del valor indicado. Actualmente, se utilizan indicadores de carga de tipo digital que son mucho más fáciles de leer que los indicadores de tipo analógico. Se utiliza un indicador de extensión comúnmente conocido como extensómetro para determinar la distancia entre dos puntos determinados, localizados en la muestra conforme ésta se estira.



La imagen muestra una máquina de pruebas de tensión disponible en el mercado. La tecnología de los microprocesadores ha eliminado virtualmente el consumo de tiempo en cálculos manuales. Se realizan automáticamente el cálculo del esfuerzo, la elongación, el módulo, la energía, y cálculos estadísticos; son presentados en una pantalla, grabados o impresos al final de la prueba.

9.2. Obtención de Muestras

Las muestras pueden obtenerse en formas diversas. A menudo se obtienen mediante moldeo por inyección o moldeo por compresión. También pueden obtenerse mediante operaciones de maquinado a partir de láminas, hojas, placas o formas similares. Las dimensiones de las muestras varían considerablemente dependiendo de los requerimientos de la norma utilizada.

9.3. Condiciones

Debido a que las propiedades de tensión de algunos plásticos cambian rápidamente con las variaciones pequeñas de temperatura, se recomienda que las pruebas sean realizadas bajo condiciones atmosféricas normalizadas; a una temperatura de 23 ± 2 °C y con una humedad relativa de 50 ± 5 %.

9.4. Procedimiento de prueba

Resistencia a la tensión

Se sujeta firmemente la muestra a las mordazas. Se determina la velocidad de prueba de acuerdo a la norma empleada y se inicia la prueba. Conforme la muestra se estira la resistencia de la misma muestra aumenta, lo cual es detectado por una celda de carga. Este valor de carga (fuerza) es registrado por el aparato en todo momento. La elongación de la muestra continua hasta que se rompe la muestra, con lo que termina la prueba. Ahora se calculan la resistencia a la tensión en el punto de cedencia y la resistencia a la tensión en el punto de ruptura (resistencia última a la tensión).

$$\text{Esfuerzo a la Tensión} = \frac{\text{Fuerza (carga)(N)}}{\text{Área sección transversal inicial (m}^2\text{)}}$$

$$\text{Esfuerzo a la Tensión en el Punto de Cedencia} = \frac{\text{Carga máxima registrada (N)}}{\text{Área sección transversal (m}^2\text{)}}$$

$$\text{Esfuerzo de Tensión en el Punto de Ruptura} = \frac{\text{Carga registrada en el punto de ruptura (N)}}{\text{Área sección transversal (m}^2\text{)}}$$

Los valores del módulo de elasticidad y de elongación se derivan de la curva esfuerzo-deformación. En la máquina que se realiza la prueba, al colocar el espécimen con las mordazas, se registra en ese momento el origen en el sistema de referencia; la máquina cuenta con un extensómetro integrado al programa en el que registra el estiramiento de dicho espécimen durante la prueba (elongación). Simultáneamente es trazada la gráfica esfuerzo-deformación sobre papel y en la pantalla de una computadora y son elaboradas como sigue:

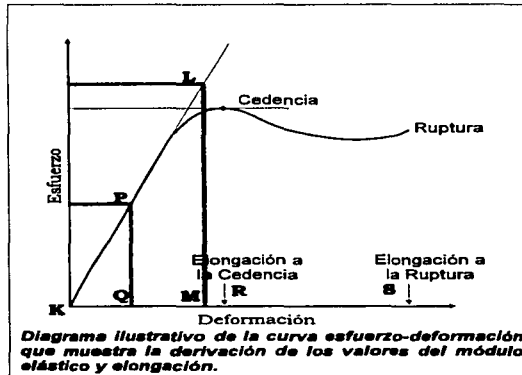


Figura 9.1.

1. Se marcan las unidades del esfuerzo en N/m^2 en el eje de las Y. Esto se hace dividiendo el registro de la fuerza sobre el área de la sección transversal de la probeta.
2. Se marcan las unidades de la deformación en mm/mm en el eje de las X. Estos valores son obtenidos dividiendo el valor cambio en la longitud por unidad de la longitud original.
3. Cuidadosamente se traza una línea tangente KL a la porción recta inicial de la curva esfuerzo-deformación.

4. Se seleccionan dos puntos convenientes cualesquiera en la tangente (en este caso se han seleccionado los puntos P y L).
5. Se trazan las líneas PQ y LM que conectan los puntos P y L al eje de las X.
6. Se valúa el esfuerzo en L y la deformación correspondiente en M.
Se valúa el esfuerzo en P y la deformación correspondiente en Q .
Por lo que:

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{\text{Diferencia de esfuerzos}}{\text{Diferencia de deformaciones}}$$

7. Elongación en el punto de cedencia

$$\text{Deformación} = \frac{\text{Cambio en la longituda (elongación)}}{\text{Longitud original}}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

ó

$$\Delta l = \varepsilon \times l \quad \text{Elongación en el punto de cedencia}$$

$$\text{Porcentaje de elongación en el punto de cedencia} = \Delta l \times 100$$

8. Elongación en el punto de ruptura

$$\text{Elongación} = \varepsilon \times l \text{ en el punto de ruptura}$$

Por precisión, los valores del módulo no deben ser determinados a partir de los resultados de una sola curva esfuerzo-deformación. Se deben realizar varias pruebas en el material y debe de calcularse el promedio de el módulo de elasticidad.

10. DESARROLLO EXPERIMENTAL

10.1. Materiales

Los materiales utilizados en los experimentos fueron:

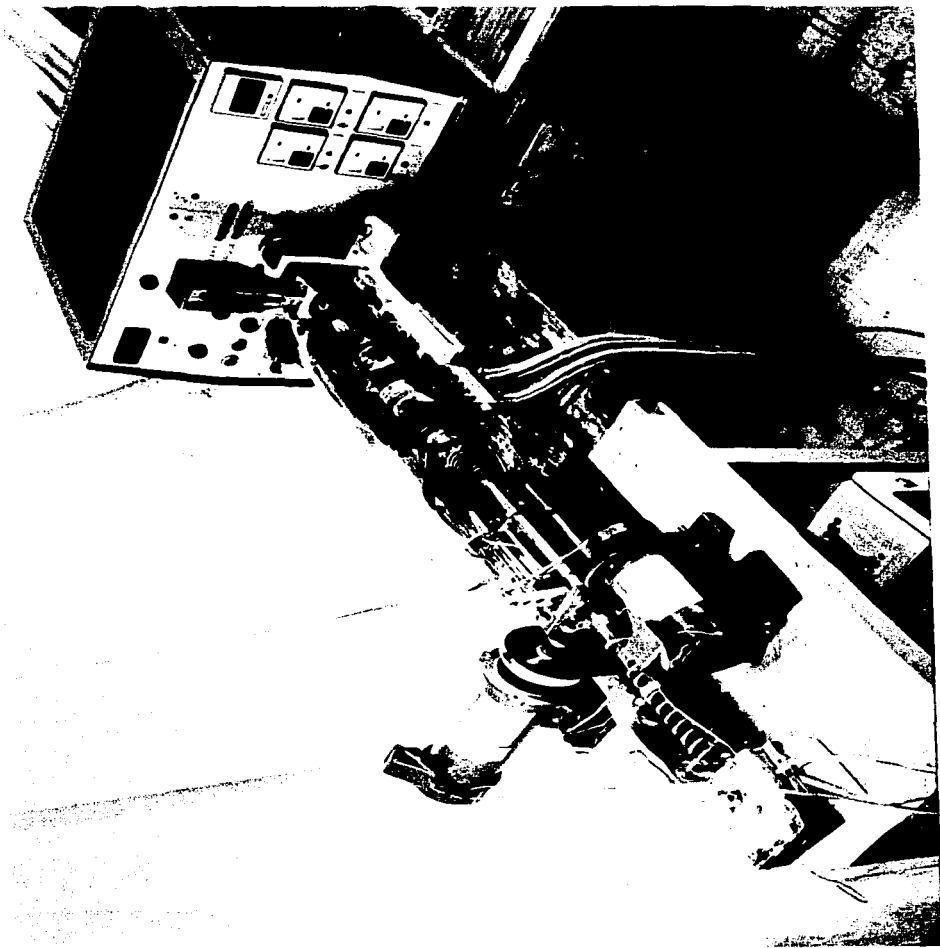
- **Fibras de henequén.**
Suministradas por el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).
- **Polietileno de baja densidad.**
Dow LDPE 9591
- **Polietileno de alta densidad.**
PEMEX

10.2. Experimentos

Los experimentos fueron realizados en un extrusor horizontal Haake Rheocord EU-3V de un solo husillo. A la salida del extrusor se ha acoplado una boquilla de sección transversal circular de 6 mm de diámetro interno y 400 mm de longitud. Una representación esquemática de la boquilla se muestra en la figura 10.1. Al final de la boquilla, por medio de una manguera, se ha adicionado un dado.

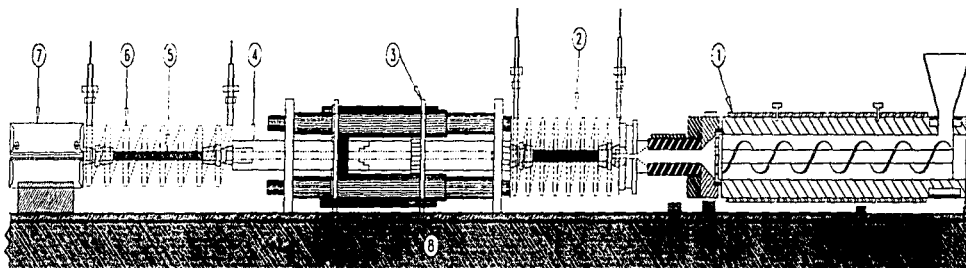
El husillo del extrusor alimenta el polímero fundido a través de una manguera a la boquilla oscilante. La manguera pasa por el centro de una resistencia de forma helicoidal, con el objeto de regular y mantener la temperatura deseada.

La boquilla puede oscilar en dirección longitudinal y transversal mediante un sistema adecuado de rodamientos. La boquilla está conectada por medio de mecanismos de biela y manivela a dos motores de corriente directa, uno para cada forma de oscilación. Ambos motores controlan la velocidad al 0.1 por 100 de precisión. La sección oscilante de la boquilla se encuentra rodeada de resistencias eléctricas de calentamiento controladas independientemente en tres zonas, y en cada zona un termopar.



CORTE LONGITUDINAL DEL ARREGLO

- | | | | |
|--|----------------|--------------------------------|------------------------|
| 1.- EXTRUSOR | 3.- SUSPENSIÓN | 5.- MANGUERA | 7.- DADO LAMINADOR |
| 2.- ACOPLAMIENTO
MANGUERA - RESISTENCIA | 4.- BOQUILLA | 6.- ELEMENTO DE
CALEFACCIÓN | 8.- SOPORTE DEL EQUIPO |



CORTE LONGITUDINAL DEL ARREGLO.

Figura 10.1.

A la salida de la boquilla se encuentra una manguera que a su vez alimenta un dado laminador. Al igual que la primera manguera, ésta también pasa a través de una resistencia helicoidal. El objeto del dado es permitir obtener laminas de sección transversal constante y de gran longitud; es decir, tiras poliméricas. A la salida del dado se hace pasar el polímero a través de unos rodillos con el fin de enfriarlo, de controlar su espesor y ancho.

El sistema completo regula la temperatura del polímero desde la entrada en el extrusor hasta la salida en el dado, mediante nueve zonas de control completamente independientes entre sí. El sistema completo está fijo a base de tornillos y pernos a una estructura de soporte sólidamente construida y apoyada sobre gomas amortiguadoras para reducir vibraciones.

10.3. Análisis Experimental

Se efectuaron pruebas para cuatro diferentes tipos de concentración.

1. 100 % Polietileno de Alta Densidad
2. 100 % Polietileno de Baja Densidad
3. 92.5 % Polietileno de Baja Densidad - 7.5% Fibras de Henequén.
4. 85 % Polietileno de Baja Densidad - 15% Fibras de Henequén.

Para cada una de las cuatro concentraciones se realizaron las siguientes extrusiones:

1. Sin oscilaciones
2. Oscilaciones longitudinales
3. Oscilaciones transversales
4. Oscilaciones helicoidales

Para cada modo de oscilación se obtuvieron cuatro diferentes tipos de muestras o probetas.

1. Perpendiculares a la dirección del flujo (0°).

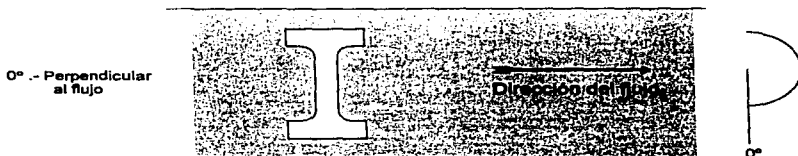


Figura 10.2.

2. 45° a la dirección del flujo

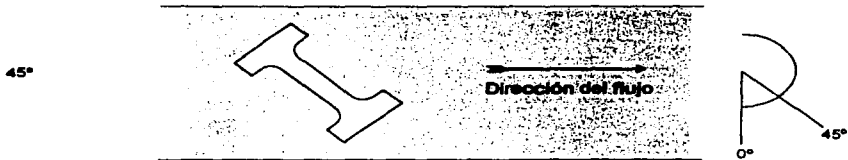


Figura 10.3.

3. Paralelas a la dirección del flujo (90°).

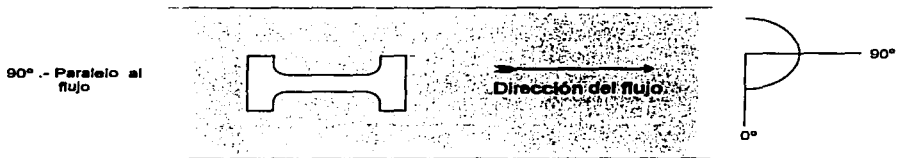


Figura 10.4.

4. 135° a la dirección del flujo

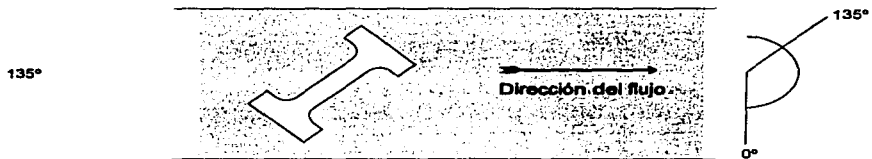


Figura 10.5.

Los parámetros de oscilación se eligieron de acuerdo a los resultados obtenidos en investigaciones previas [1]. En el caso de las oscilaciones longitudinales reportan los mejores resultados oscilando a una frecuencia de 20 Hz con un desplazamiento longitudinal de 6 mm. Para las oscilaciones transversales la mejor respuesta se reporta oscilando a una frecuencia de 20 Hz con un desplazamiento transversal de 0.26 rad. Y para las oscilaciones helicoidales, la combinación de los parámetros anteriores, produjo la mejor respuesta.

La temperatura de extrusión se seleccionó a partir de datos del fabricante y de las investigaciones ya mencionadas.

Las mezclas se hicieron de la siguiente forma: se mezclaron en un cilindro rotatorio fibras y polímero durante 20 minutos, para la concentración con *15% de Fibras* se mezclaron el 15% en peso de fibras de henequén y el 85% en peso de polietileno de baja densidad. Análogamente se realizó la concentración *92.5% LDPE - 7.5% Fibras*.

10.4. Condiciones de Extrusión.

Los experimento se realizaron bajo las siguientes condiciones:

Extrusor.

Velocidad de extrusión = 100 r.p.m.
Temperatura Zona 1 = $180 \pm 7^{\circ}\text{C}$
Temperatura Zona 2 = $180 \pm 7^{\circ}\text{C}$
Temperatura Zona 3 = $180 \pm 7^{\circ}\text{C}$

Manguera 1

Temperatura Zona 4 = $180 \pm 7^{\circ}\text{C}$

Boquilla

Temperatura Zona 5 = $180 \pm 7^{\circ}\text{C}$
Temperatura Zona 6 = $180 \pm 7^{\circ}\text{C}$
Temperatura Zona 7 = $180 \pm 7^{\circ}\text{C}$

Manguera 2

Temperatura Zona 8 = $180 \pm 7^{\circ}\text{C}$

Dado

Temperatura Zona 9 = $180 \pm 7^{\circ}\text{C}$

El tipo de oscilaciones realizadas fueron las siguientes:

longitudinales

Frecuencia de oscilación = 20 Hz
Longitud de oscilación = 6.5 mm

transversales

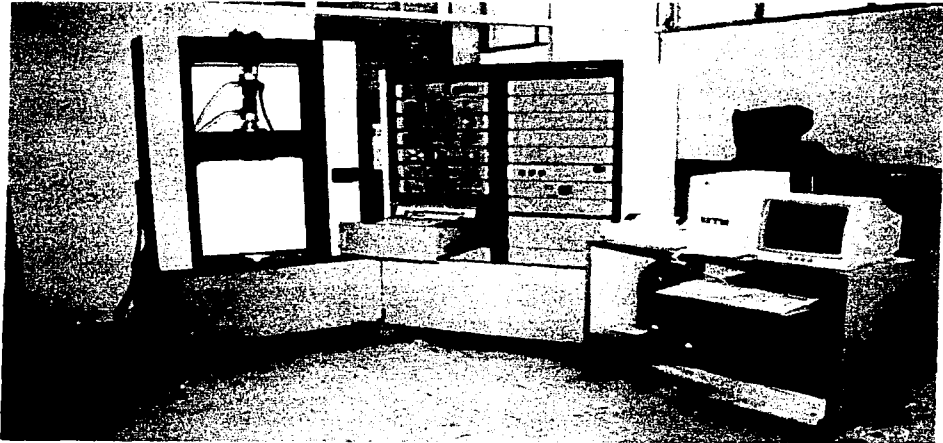
Frecuencia de oscilación = 20 Hz
Ángulo de oscilación = 0.26 rad

helicoidales

Frecuencia de oscilación longitudinal = 20 Hz
Frecuencia de oscilación transversal = 20 Hz
Longitud de oscilación = 6.5 mm
Ángulo de oscilación = 0.26 rad

10.5. Método de Prueba

La determinación de las propiedades mecánicas se efectuó en una máquina Instron conforme a lo especificado en la norma ASTM D 1708 - 84, que corresponde a el *método de prueba normalizado para propiedades de tensión de plásticos mediante el uso de probetas de microtensión* [Apéndice 16.3]. Este método de prueba proporciona datos para el control de calidad y su aceptación o rechazo en función del tipo de especificaciones.



10.6. Preparación de Muestras

De acuerdo a la norma empleada las muestras o probetas deberán tener las dimensiones mostradas en la figura 10.6.

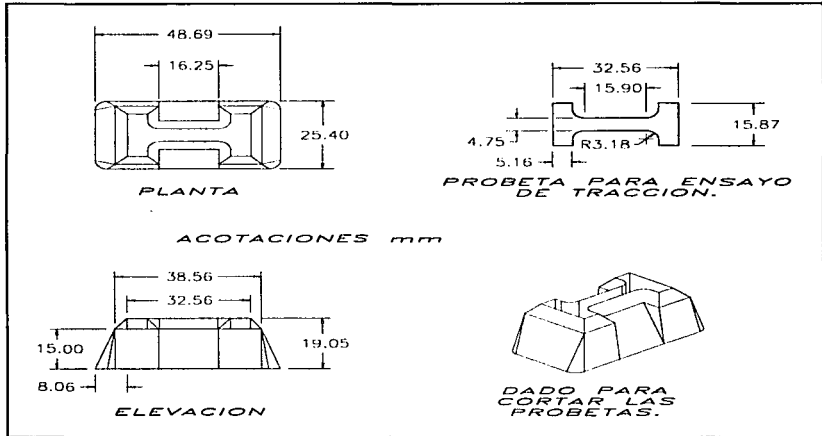
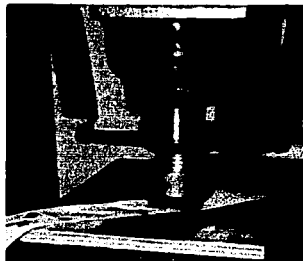


Figura 10.6.

Las probetas se obtuvieron cortando con un dado en una prensa hidráulica. Las dimensiones del dado apropiado para esta labor se muestran en la figura 10.6.



Se cortaron diez probetas en cada dirección para cada tipo de movimiento en cada concentración. Esto es:

Concentración: 100% LDPE

movimiento	muestras a 0°	muestras a 45°	muestras a 90°	muestras a 135°
sin oscilaciones	10	10	10	10
osc. long.	10	10	10	10
osc. trans.	10	10	10	10
osc. helic.	10	10	10	10

Concentración: 92.5% LDPE - 7.5% Fibras de Henequén

movimiento	muestras a 0°	muestras a 45°	muestras a 90°	muestras a 135°
sin oscilaciones	10	10	10	10
osc. long.	10	10	10	10
osc. trans.	10	10	10	10
osc. helic.	10	10	10	10

Concentración: 85% LDPE - 15% Fibras de Henequén

movimiento	muestras a 0°	muestras a 45°	muestras a 90°	muestras a 135°
sin oscilaciones	10	10	10	10
osc. long.	10	10	10	10
osc. trans.	10	10	10	10
osc. helic.	10	10	10	10

Concentración: 100% HDPE

movimiento	muestras a 0°	muestras a 45°	muestras a 90°	muestras a 135°
sin oscilaciones	10	10	10	10
osc. long.	10	10	10	10
osc. trans.	10	10	10	10
osc. helic.	10	10	10	10

De acuerdo a la norma empleada, el método de prueba es para películas delgadas de hasta 3.2 mm de espesor. Las tiras poliméricas obtenidas en el caso de materiales puros son de 1.3 mm de espesor, en promedio. En el caso de materiales compuestos para la concentración 85% LDPE - 15% Fibras el espesor es de 1.5 mm en promedio, para la concentración 92.5% LDPE - 7.5% Fibras el espesor es de 2.3 mm en promedio.

10.7. Condiciones de prueba

Tipo de prueba: tensión
Velocidad de mordazas: 100 (mm/in)
Humedad: 50 (%)
Temperatura: 23 (°C)

Las propiedades mecánicas determinadas son *esfuerzo máximo* y *deformación al pico*. En los resultados se muestra el valor promedio del esfuerzo máximo y el valor promedio de la deformación al pico de 10 probetas.

10.8. Cálculos

Esfuerzo a la tensión. El esfuerzo se obtiene dividiendo la carga en newtons entre el área mínima original de la sección transversal de la muestra en metros cuadrados. Los resultados se expresan en megapascales (Mpa). Se calcula en el punto máximo de la curva esfuerzo-deformación, que corresponde al esfuerzo máximo que soporta el material.

Porcentaje de elongación. El porcentaje de elongación se obtiene mediante dividir la longitud original entre la longitud en un punto determinado y multiplicarla por cien. Siendo la longitud original la distancia entre lengüetas al inicio. Análogamente al esfuerzo, el porcentaje de elongación, se calcula en el mismo punto de la curva esfuerzo-deformación; es decir, es la elongación porcentual correspondiente al esfuerzo máximo o la elongación porcentual al pico.

Flujo Másico. El flujo volumétrico se determinó de la siguiente forma: para cada evento se extruyó una tira polimérica durante cinco minutos, posteriormente se pesó. Obteniendo de esta forma gramos por cada 5 minutos. Haciendo las conversiones correspondientes, en los resultados se presenta el gasto o flujo másico en gramos por minuto. Es a partir de esta tira de donde se obtienen las probetas de ensayo, respectivamente.

10.9. Efecto de las oscilaciones sobre las propiedades mecánicas.

Los resultados para cada modo de oscilación (longitudinal, transversal y helicoidal) se muestran como porcentaje de aumento de resistencia a la tracción (%I_R) en función de la frecuencia de oscilación para valores fijos de amplitud. Es decir:

$$\%I_R = \frac{R_{osc} - R_{stat}}{R_{stat}} \times 100$$

Donde R_{osc} representa la resistencia (en el punto máximo) a la tracción media para cada muestra oscilada y R_{stat} es la medida correspondiente a la muestra no oscilada (estacionaria).

De manera similar se define un porcentaje de aumento de alargamiento total anterior a la ruptura $\%I_E$ como:

$$\%I_E = \frac{E_{osc} - E_{stat}}{E_{stat}} \times 100$$

Donde E_{osc} y E_{stat} representan respectivamente el alargamiento total a la ruptura para la muestra oscilada y estacionaria.

10.10. Influencia de las oscilaciones sobre el flujo másico

Debido a las condiciones experimentales, el extrusor fija la velocidad del husillo, la razón por la cual no se pueden esperar aumentos considerables en el flujo másico total, a menos que se añada un servomecanismo de retroalimentación al sistema, sin embargo las vibraciones teóricamente dan lugar a una reducción de presión a la salida del extrusor, debida al efecto de deslizamiento en las paredes de la boquilla oscilante. Como consecuencia a dicha reducción de presión, el polímero fundido fluye con mayor facilidad; ésto se traduce parcialmente en un aumento de flujo másico, así el porcentaje de aumento de flujo ($\%I_Q$) puede definirse como:

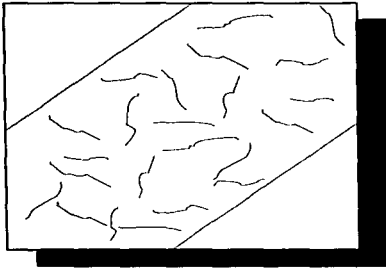
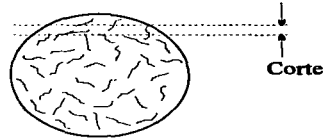
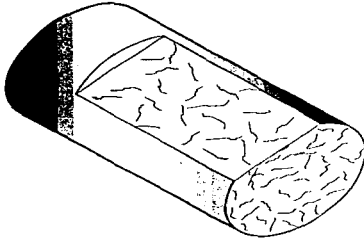
$$\%I_Q = \frac{Q_{osc} - Q_{stat}}{Q_{stat}} \times 100$$

Donde Q_{osc} y Q_{stat} representan respectivamente el flujo másico en el caso oscilatorio y estacionario.

El aumento de flujo másico puede representarse por ejemplo, en función del flujo másico estacionario y para valores fijos de amplitud y frecuencia de oscilación.

11. RESULTADOS

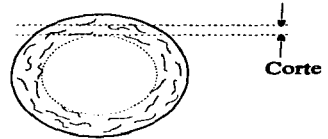
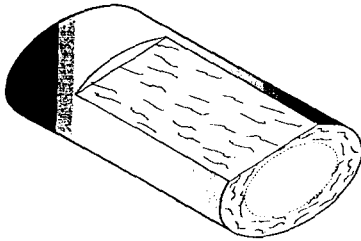
Sin Oscilaciones



Características:

- Composición : 15 % Fibras de Henequén
85 % LDPE.**
- Sin orientación**
- No existe concentración alguna de las fibras
en una región determinada.**

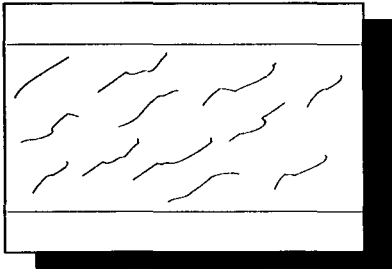
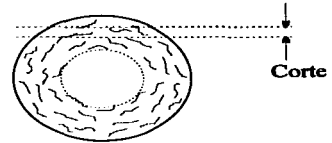
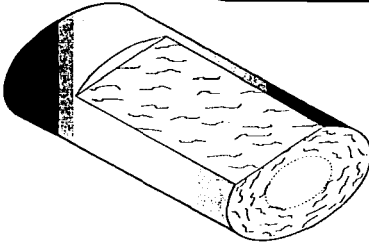
Oscilacion Helicoidal (15° ~mm)



Características:

- Composición : 15 % Fibras de Henequén
85 % LDPE.
- Orientación en la dirección del flujo
- Las fibras tienden a concentrarse en la superficie del cilindro extrudido..

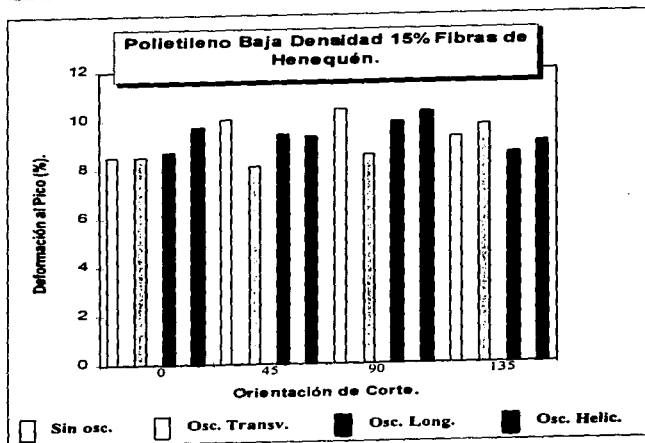
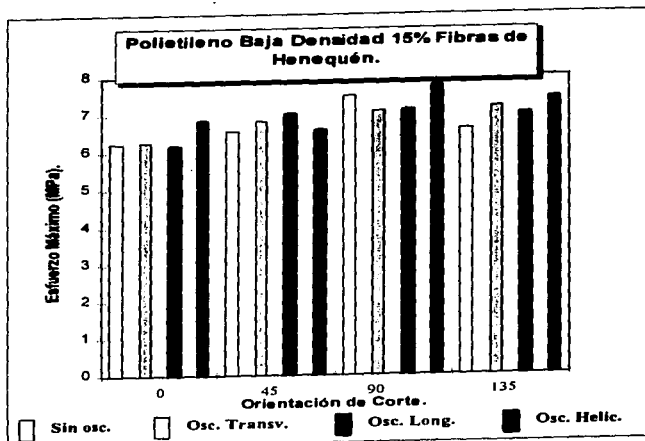
Oscilacion Transversal (15°)



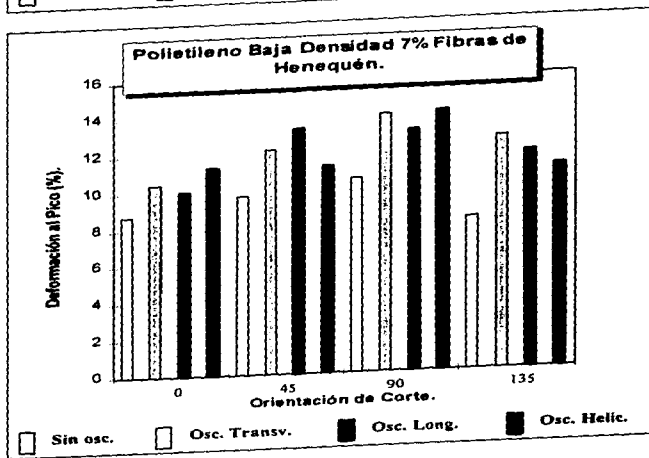
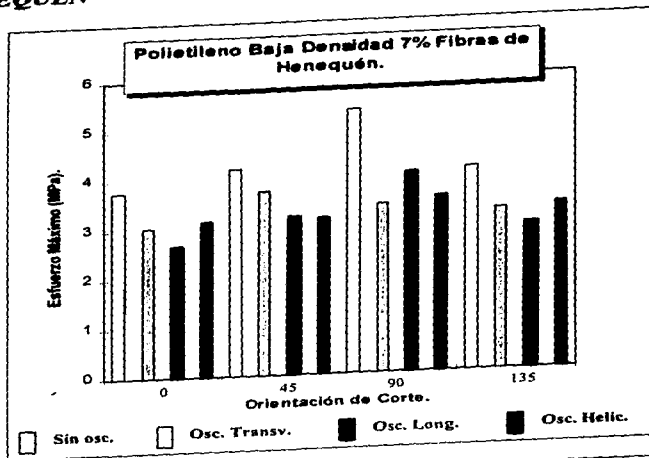
Características:

- ❑ **Composición :** 15 % Fibras de Henequén
85 % LDPE.
- ❑ **Orientación aproximada con respecto a la dirección del flujo:** 45°
- ❑ **Las fibras tienden a concentrarse en la superficie del cilindro extrudido.**

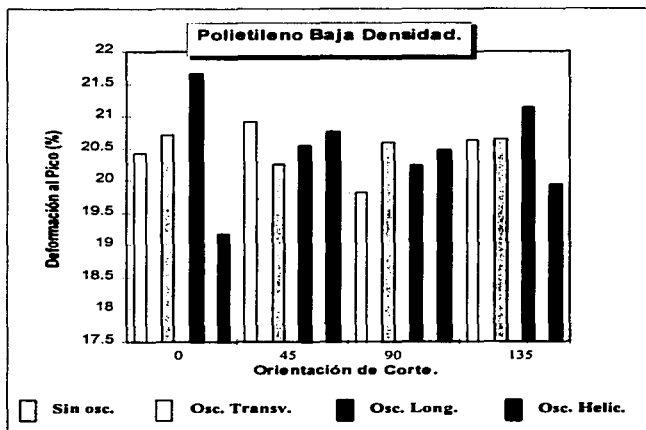
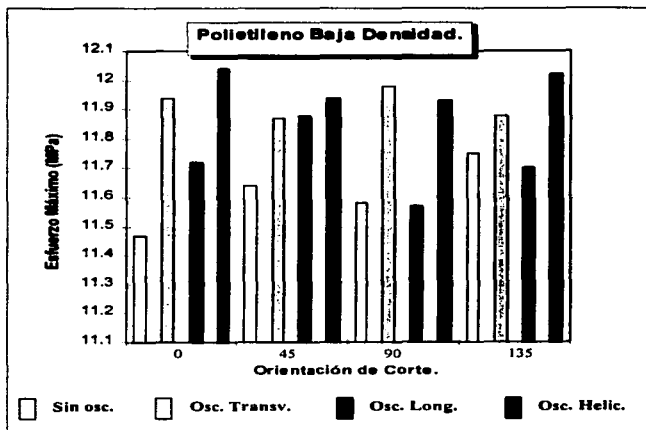
11.1. 85% POLIETILENO BAJA DENSIDAD - 15% FIBRAS DE HENEQUÉN



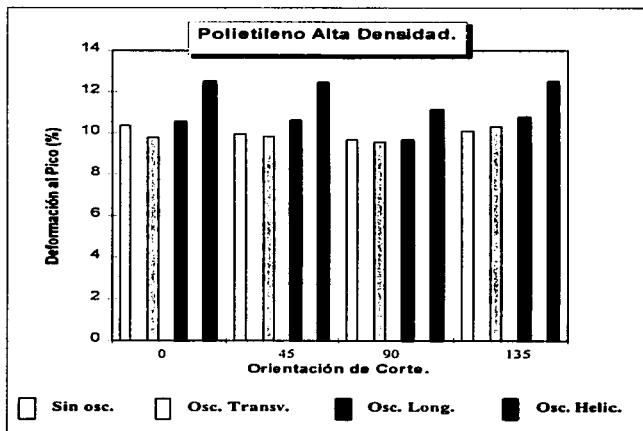
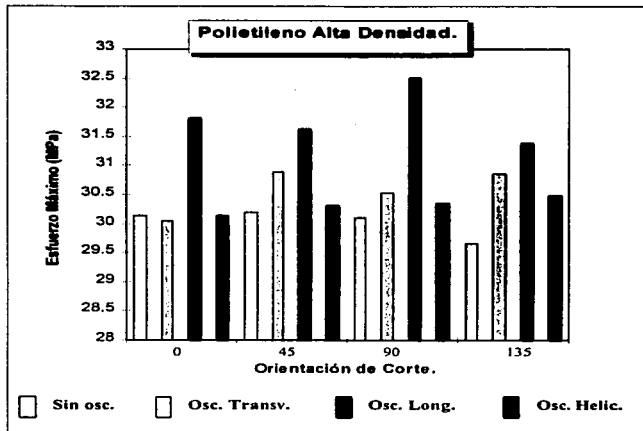
11.2. 92.5% POLIETILENO BAJA DENSIDAD - 7.5% FIBRAS DE HENEQUÉN



11.3. POLIETILENO BAJA DENSIDAD



11.4. POLIETILENO ALTA DENSIDAD



11.5. FLUJO MÁSSICO

92.5% Polietileno Baja Densidad 7.5% de Fibras de Henequén

	<i>Gasto(g/min)</i>	<i>% de comparación.</i>
<i>Sin Oscilación</i>	28.091	
Oscilación transversal	30.62	9.00%
Oscilación longitudinal	29.37	4.55%
Oscilación helicoidal	30.65	9.10%

85% Polietileno Baja Densidad 15% de Fibras de Henequén

	<i>Gasto(g/min)</i>	<i>% de comparación.</i>
<i>Sin Oscilación</i>	32.05	
Oscilación transversal	33.84	5.58%
Oscilación longitudinal	34.44	7.45%
Oscilación helicoidal	35.05	9.36%

100% Polietileno Baja Densidad

	<i>Gasto(g/min)</i>	<i>% de comparación.</i>
<i>Sin Oscilación</i>	27.8	
Oscilación transversal	28	0.71%
Oscilación longitudinal	25.18	-9.42%
Oscilación helicoidal	28.84	3.74%

100% Polietileno Alta Densidad

	<i>Gasto(g/min)</i>	<i>% de comparación.</i>
<i>Sin Oscilación</i>	22.38	
Oscilación transversal	22.62	1.07%
Oscilación longitudinal	22.74	1.608%
Oscilación helicoidal	22.7	1.42%

11.6. Interpretación de Resultados

El orden en el que se presentan los resultados es el orden en el cual fueron obtenidos.

Inicialmente se extruyeron fibras de henequén y polietileno de baja densidad directamente de la boquilla, prescindiendo del segundo acoplamiento y del dado. Se obtuvieron tiras cilíndricas con el fin de elucidar, de acuerdo a la hipótesis, que pasa con las orientaciones. En estas tiras se hicieron cortes muy delgados para obtener muestras que fueron estudiadas en el microscopio electrónico. Los resultados son los mostrados gráficamente en la sección correspondiente (páginas 55, 56 y 57).

A continuación se empleó el sistema completo y los resultados son los siguientes.

1. Para la primera serie de resultados, concentración 85% LDPE - 15% Fibras:

Esfuerzo

El valor más alto de esfuerzo lo registraron las muestras osciladas helicoidalmente cortadas a 0°; es decir, perpendiculares a la dirección del flujo. Comparativamente, las muestras osciladas helicoidalmente cortadas a 135° muestran el mayor porcentaje; esto es, mejoran en un 13% su resistencia a la tensión respecto a su similar no oscilado.

Deformación

En la mayoría de los casos la deformación sin oscilaciones es mayor respecto a la deformación con oscilaciones. Las probetas sin oscilar cortadas a 0° registran el valor más alto. En comparación, sólo las probetas osciladas helicoidalmente cortadas a 90° muestran un aumento del 14% respecto a las no osciladas.

Gasto

En los tres casos de régimen oscilatorio existe un claro aumento de gasto respecto al régimen sin oscilaciones. Las oscilaciones helicoidales muestran el mayor de los aumentos, incrementando el gasto en un 9% respecto al caso sin oscilaciones.

2. Para la segunda serie de resultados, concentración 92.5% LDPE - 7.5% Fibras:

Esfuerzo

Para los tres tipos de oscilación y para cada una de las cuatro orientaciones, el esfuerzo máximo es notablemente menor al esfuerzo máximo sin oscilaciones. Para todos los casos, los valores más altos de esfuerzo se obtuvieron en orientaciones de 90° y de 45°.

Deformación

Para los tres tipos de oscilación y para cada una de las cuatro orientaciones, la deformación porcentual al pico es mucho mayor a la deformación porcentual al pico sin oscilaciones.

Gasto

El gasto para los tres tipos de oscilaciones aumenta con respecto al gasto sin oscilaciones. Aumentando en un 9% en el caso de las oscilaciones longitudinales y helicoidales.

3. Para la tercera serie de resultados, concentración 100% LDPE:

Esfuerzo

El esfuerzo máximo para los tres casos de oscilación es mayor respecto al caso sin oscilaciones, excepto en el caso de oscilaciones longitudinales a 90° y a 135° , para los cuales el esfuerzo es el mismo a su símil sin oscilaciones. Los valores más altos de esfuerzo a la tensión se registran para el caso de oscilaciones transversales en una orientación de 0° y 90° , y para el de oscilaciones helicoidales en una orientación de 0° y de 135° .

Deformación

Para esta prueba los valores de deformación fueron muy similares, tanto para los casos oscilados como para el caso no oscilado, siendo mínimas las diferencias en comparación.

Gasto

El gasto es prácticamente el mismo para todos los casos. El régimen oscilatorio muestra un gasto mayor, sin embargo el aumento es mínimo, a lo más un 4% bajo régimen helicoidal.

4. Para la cuarta serie de resultados, 100% HDPE:

Esfuerzo

El esfuerzo máximo bajo régimen oscilatorio es mayor respecto al esfuerzo máximo bajo régimen estático, solo en algunos casos no existe diferencia alguna. El mayor incremento se obtuvo bajo oscilaciones longitudinales en una orientación de 90° . Bajo este mismo régimen, a 0° , a 45° y a 135° se registraron los mejores incrementos.

Deformación

Las oscilaciones helicoidales, en todas direcciones de corte, muestran los mejores incrementos respecto al caso no oscilado. Siendo de hasta un 25% el incremento a 45° y a 135°.

Gasto

El gasto se mantiene prácticamente igual para los cuatro casos. Aumentando a lo más en un 1.6%.

12. Comentarios

El control de temperatura varía en un rango de $\pm 7^{\circ}\text{C}$, esta incertidumbre se debe a las limitaciones del equipo, en concreto a los controladores de temperatura. La respuesta de los controladores a los cambios de temperatura es instantánea. Sin embargo el efecto de inercia térmica es el causante de tal incertidumbre.

El espesor de la tira polimérica lo determinan, en principio, el dado laminador y los rodillos. Sin embargo la naturaleza del material y las condiciones ambientales alteran el espesor. En el caso particular del polietileno de baja, el control del espesor de la tira polimérica es difícil. En una misma tira puede haber variaciones de espesor de hasta 0.3 mm aproximadamente; con tiras de 1.3 mm esta variación es considerable. En el caso del polietileno de alta también existen variaciones de espesor. Sin embargo es un material de más fácil manejo que su símil de baja. En los materiales compuestos se presenta la misma dificultad que en el polietileno puro de baja densidad.

El ancho de la tira polimérica al igual que el espesor se controla mediante el dado y los rodillos. De la misma forma es difícil controlar el ancho, de forma tal que se puedan repetir experimentos bajo las mismas condiciones y obtener espesores y anchos diferentes.

13. Discusión

Para este punto de la investigación se ha obtenido un material compuesto (LDPE - Fibras de Henequén) en dos concentraciones y dos materiales puros.

No existe una orientación clara de las fibras. Esto se debe a que las fibras no se incorporaron por completo a la matriz. Las propiedades mecánicas del material compuesto no mejoran con respecto a las del material puro, como se muestra en la figura 13.1. Se observa claramente como la curva esfuerzo-deformación del polietileno puro indica las mejores propiedades. Las curvas a concentraciones de 85%LDPE y 92.5%LDPE están, en propiedades mecánicas, muy por debajo del material puro.

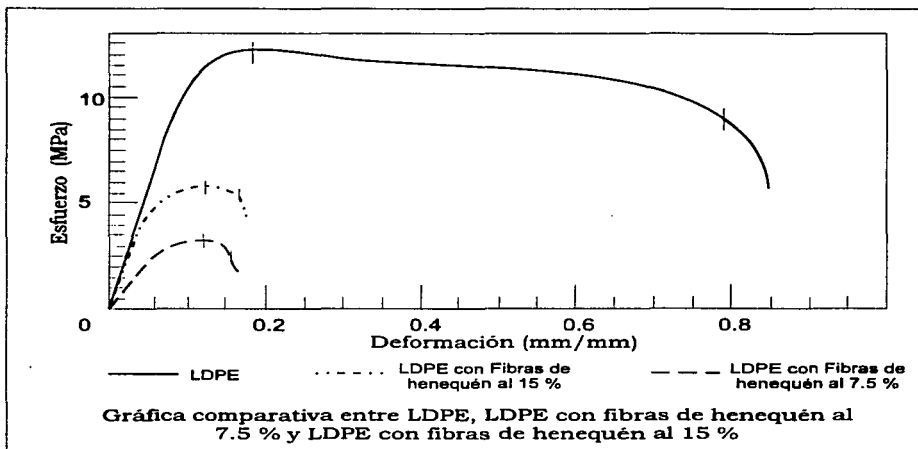


Figura 13.1.

Lo anterior indica que la adhesión entre fibras de henequen y polietileno (LDPE) no es óptima. De ser así la resistencia del material compuesto sería mayor a la del polietileno puro, como lo reportan varios investigadores [13, 14], esto debido a que las fibras empleadas tienen una resistencia mayor que la matriz [15, 16, 17]. En consecuencia, seguramente se están creando fisuras en la interfase entre ambos componentes, provocando la ruptura del material a esfuerzos menores que el correspondiente a la matriz pura.

Empleando tres concentraciones diferentes de fibras en una misma matriz es de esperarse que la concentración intermedia tenga propiedades intermedias. Sin embargo, como se muestra en la gráfica, la curva mayor esfuerzo-deformación corresponde a 100% LDPE, la curva intermedia a la concentración 85% LDPE y la curva menor a la concentración 92.5% LDPE. De acuerdo a la figura, es claro que la adición de fibras disminuye la resistencia a la tracción del polietileno de baja densidad.

Existen estudios, de fibras naturales en matrices poliméricas, en los que se ha hallado una disminución en la resistencia a la tracción y en otras propiedades mecánicas conforme aumenta el contenido de fibras en el material compuesto. Sin embargo, el valor del módulo de elasticidad mejora conforme aumenta la fracción volumétrica de fibras naturales [Apéndice 16.3]. Cabe aclarar que en este trabajo no se determinó el módulo de elasticidad

de los materiales obtenidos, debido a que el fin de emplear fibras era averiguar la influencia de la superposición de oscilaciones en su orientación. Para determinar el módulo es necesario el empleo de una norma diferente (ASTM D-638) a la usada (ASTM D 1708 - 84).

En lo que a materiales puros respecta existe, sin duda alguna, un incremento en las propiedades mecánicas de los materiales extrudidos bajo un régimen de oscilaciones con respecto a los materiales extrudidos sin oscilaciones. Sin embargo no es del orden esperado. Se sabe de investigaciones previas [9,10] que existe un orden de magnitud en el incremento de las propiedades mecánicas. Este resultado hace necesaria una revisión exhaustiva de los métodos de experimentación, de las condiciones de experimentación, del equipo empleado y de la boquilla oscilante.

El método de experimentación se realizó conforme a la norma ASTM 1708 - 84. Las condiciones de operación como la temperatura de extrusión y los parámetros de oscilación, tales como frecuencia de oscilación, desplazamiento longitudinal y desplazamiento transversal, se fijaron de acuerdo a investigaciones previas utilizándose los parámetros para los cuales se reportan los mejores resultados. Se hizo una revisión del equipo sin encontrar falla alguna. Pensando en que puede ser el material el que no responde a los efectos de oscilación, se utilizó otro polímero; polietileno de alta densidad. Sin embargo los resultados fueron similares; se obtuvieron incrementos en las propiedades mecánicas respecto al caso estático, pero no del orden esperado.

Por lo tanto el problema se centra en la boquilla oscilante. La boquilla utilizada en esta investigación cuenta con diferencias significativas respecto a la boquilla empleada por Mena [10], en la cual se obtuvieron incrementos notables. En la boquilla anterior se extruye en dirección vertical, la longitud de la boquilla es menor y además las muestras se obtienen directamente de la boquilla; es decir, no son conformadas por un dado ni pasa el polímero a través de acoplamiento alguno. En la boquilla actual se extruye en dirección horizontal, la longitud de la boquilla es mayor, y al final de la boquilla el material pasa a través de una manguera y posteriormente a través de un dado. Puede ser que después de abandonar la boquilla las cadenas vuelvan a desordenarse, no del todo, pero si lo suficiente como para disminuir los incrementos. Esto debido a que el polímero fundido sigue fluyendo un gran tramo después de abandonar el régimen oscilatorio y antes de salir del sistema. Probablemente la manguera y el dado laminador reducen considerablemente el efecto de las oscilaciones.

En otros trabajos de investigación sobre extrusión con oscilaciones [1-11], se emplean diversos dispositivos. En todas las investigaciones las muestras se obtienen directamente del dispositivo oscilante. En nuestro caso el material, después de abandonar la boquilla oscilante, pasa a través de una manguera semiestática y finalmente por un dado estático. El polímero recorre una longitud de 85 mm después de abandonar el régimen oscilatorio y antes de ser conformado.

Una variable a considerar es la longitud de la boquilla oscilante. Algunos trabajos de investigación [11] muestran variación en las propiedades mecánicas conforme varía la longitud del ducto. Conforme la longitud del ducto aumenta, el incremento en las propiedades mecánicas de las muestras osciladas, respecto a las no osciladas, disminuye. Siendo más notable el incremento en las propiedades mecánicas en ductos cortos. Sin embargo, en todos los casos las oscilaciones impuestas sobre el polímero fundido hacen posible obtener muestras más resistentes, en comparación con las extrusiones obtenidas por tecnología convencional.

14. Sugerencias

Para estudios posteriores se sugiere eliminar toda sección estática o semiestática. Obtener el producto directamente a la salida del régimen oscilatorio. Si se desea normalizar el estudio se sugiere se incorpore el dado laminador al sistema oscilante; es decir, que el dado oscile junto con la boquilla.

Bajo la hipótesis de que las cadenas poliméricas en un flujo polimérico se orientan al someter el flujo a un campo oscilatorio, sería conveniente mantener este efecto al máximo. Esto se puede lograr evitando secciones estáticas, como ya se mencionó, y enfriando el polímero lo más rápido posible para disminuir los efectos de memoria del fluido.

En lo que a orientaciones concierne, suponiendo que la resistencia a la tracción esté relacionada con el ordenamiento de cadenas poliméricas y de fibras, habrá una mayor resistencia si el ordenamiento es en la misma dirección de la tracción. Entonces, parece ser que al oscilar helicoidalmente se da el mejor ordenamiento tanto de fibras como de cadenas. Existen métodos muy precisos para determinar orientaciones de fibras y orientaciones de cadenas poliméricas, como la difracción de rayos X. En investigaciones posteriores es aconsejable se investiguen y apliquen los métodos convenientes para este fin.

Debido a todos los problemas y limitaciones inherentes a este tipo de estudios es de gran ayuda el estudio analítico de estos fenómenos, con el propósito de desarrollar modelos matemáticos que permitan predecir qué sucederá o que al menos arrojen una idea de qué pasa.

En el manejo de fibras naturales es recomendable buscar mejorar la interfase entre matriz y refuerzo, para lo cual existen tratamientos químicos que mejoran dicha unión.

15. Conclusiones

Los materiales sujetos a oscilaciones muestran, en general, un incremento de propiedades mecánicas en comparación con los materiales puros no oscilados.

Las conclusiones en lo que a resistencia a la tracción refieren, son vistas bajo dos perspectivas. La primera hace referencia a las orientaciones moleculares; se busca el mayor incremento porcentual entre el régimen estático y el régimen oscilado, con el fin de tratar de elucidar qué pasa con las orientaciones. La segunda se refiere a la resistencia a la tracción en si misma; bajo qué condiciones se obtuvo la probeta más resistente de todo el evento.

El esfuerzo máximo en el caso *85% LDPE - 15% Fibras de Henequén* es mayor en las probetas extrudidas bajo oscilaciones helicoidales. Son las probetas osciladas helicoidalmente y cortadas a 135° las que muestran el mayor incremento porcentual; aumentan en un 13% su resistencia a la tracción respecto a la resistencia mostrada por las extrudidas en régimen estático y cortadas a 135°. Las que muestran mayor resistencia a la tracción, en todo el evento, son las probetas osciladas helicoidalmente y cortadas a 90°.

Para *85% LDPE - 15% Fibras de Henequén* el flujo másico es mayor, en todos los casos oscilados, respecto al flujo bajo régimen estático. Siendo mayor el incremento en el caso de oscilaciones helicoidales en un 9.1%.

El esfuerzo máximo en el caso *92.5% LDPE - 7.5 Fibras de Henequén* es mayor en las probetas extrudidas sin oscilaciones en todos los casos. Al parecer no existe ordenamiento de cadenas poliméricas ni de fibras, debido a que probablemente la concentración de fibras no es óptima. Existen estudios que demuestran que a ciertas concentraciones de fibras no existe mejora alguna de propiedades e incluso pueden deteriorar las propiedades.

En lo que al flujo másico respecta para *92.5% LDPE - 7.5 Fibras de Henequén*, hubo un incremento de gasto bajo condiciones de oscilación. El mayor incremento fue de 9.36% y se registró al someter el flujo polimérico a oscilaciones helicoidales.

En el estudio del *Polietileno de Baja Densidad puro* los esfuerzos mayores los muestran las probetas sometidas a oscilaciones helicoidales. Comparativamente, las probetas osciladas helicoidalmente y cortadas a 0° incrementan en un 5% su resistencia a la tracción respecto a las extrudidas en condiciones estáticas y cortadas a 0°. La mayor resistencia a la tracción, en todo el evento, la ofrecieron estas misma muestras.

En el *Polietileno de Baja Densidad puro*, al igual que en los materiales compuestos, se registró un incremento de gasto bajo condiciones de oscilación. El mayor incremento respecto al caso estático se registró bajo un régimen de oscilaciones helicoidales en un 3.74%.

En el estudio del *Polietileno de Alta Densidad puro* la mayor resistencia a la tracción la muestran las probetas sometidas a oscilaciones longitudinales. El mayor incremento

respecto a su símil no oscilado y cortado en la misma dirección, se dio en las muestras extrudidas helicoidalmente y cortadas a 90°, aumentando en 8% su resistencia. Y bajo estas mismas condiciones se obtuvo la mayor resistencia a la tracción de todo el evento.

El flujo másico en el *Polietileno de Alta Densidad puro* se incrementó al someter el material a oscilaciones. El aumento de gasto es de 1.6% bajo oscilaciones longitudinales.

El incremento de gasto en condiciones de oscilación respecto a condiciones estáticas, fue mayor en el caso de los materiales compuestos que en el caso de los materiales puros. Aumentando en 9.1% y 9.36% al extrudir con fibras, y aumentando 3.74% y 1.6% al extrudir materiales sin fibras. El incremento de gasto confirma la existencia de resbalamiento en las paredes debido a las oscilaciones.

En resumen:

- Comparativamente los casos que mostraron el mayor aumento porcentual en resistencia a la tracción respecto a su símil no oscilado son los siguientes:
 1. Concentración 85% LDPE - 15% Fibras de Henequén: las probetas osciladas helicoidalmente cortadas a 135° incrementaron 13% el esfuerzo máximo.
 2. Concentración 92.5% LDPE - 7.5% Fibras de Henequén: en ningún caso se registraron incrementos.
 3. Concentración 100% LDPE: las probetas osciladas helicoidalmente cortadas a 0° (perpendiculares a la dirección del flujo) incrementaron 5% el esfuerzo máximo.
 4. Concentración 100% HDPE: las probetas osciladas helicoidalmente y cortadas a 90° (paralelas a la dirección del flujo) incrementaron 8% el esfuerzo máximo.

- Comparativamente los casos que mostraron el mayor aumento porcentual en el flujo másico respecto a su símil no oscilado son los siguientes:
 1. Concentración 85% LDPE - 15% Fibras de Henequén: oscilando en forma helicoidal el flujo aumenta 9.1%
 2. Concentración 92.5% LDPE - 7.5% Fibras de Henequén: oscilando en forma helicoidal el flujo aumenta 9.36%.
 3. Concentración 100% LDPE: oscilando en forma helicoidal el flujo aumenta 3.74%.
 4. Concentración 100% HDPE: oscilando en forma longitudinal el flujo aumenta 1.6%.

- **Las muestras que registraron el mejor esfuerzo a la tracción de todo el evento son:**
 - 1. Concentración 85% LDPE - 15% Fibras de Henequén: probetas extrudidas oscilando helicoidalmente.**
 - 2. Concentración 92.5% LDPE - 7.5% Fibras de Henequén: probetas extrudidas sin oscilar.**
 - 3. Concentración 100% LDPE: probetas extrudidas oscilando helicoidalmente.**
 - 4. Concentración 100% HDPE: probetas extrudidas oscilando longitudinalmente.**
- **Es importante remarcar que la adición de fibras naturales, sin tratamiento alguno, produce una disminución en la resistencia a la tracción conforme crece la fracción volumétrica de fibras en el compuesto. Puede mejorarse esta propiedad mecánica si se mejora la adhesión interfacial entre las fibras y la matriz. La modificación química de la superficie de las fibras o el empleo de agentes de acoplamiento permitirán seguramente aumentar las propiedades mecánicas del material compuesto.**

16. APÉNDICE

16.1. Tablas de Resultados

85% Polietileno Baja Densidad - 15% Fibras de Henequén

Esfuerzo Máximo (MPa)				
	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coefficiente de Variación</i>	<i>% de Comparación</i>
<i>Sin Oscilación</i>				
0	6.255	0.43	6.87	
45	6.573	0.412	6.27	
90	7.516	0.409	5.44	
135	6.599	0.521	7.89	
<i>Oscilación Transversal</i>				
0	6.26	0.397	6.35	0 %
45	6.839	0.541	7.91	4 %
90	7.093	0.841	11.85	-5 %
135	7.187	0.33	4.59	9 %
<i>Oscilación Longitudinal</i>				
0	6.19	0.417	6.75	-1 %
45	7.038	0.854	12.14	7 %
90	7.108	0.954	13.42	-5 %
135	6.992	0.675	0.966	6 %
<i>Oscilación Helicoidal</i>				
0	6.864	0.471	6.87	10 %
45	6.607	0.495	7.49	1 %
90	7.753	0.7878	10.16	3 %
135	7.424	0.448	6.03	13 %

85% Polietileno Baja Densidad - 15% Fibras de Henequén

Deformación al Pico				
	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coefficiente de Variación</i>	<i>% de Comparación</i>
<i>Sin Oscilación</i>				
0	8.514	1.197	14.06	
45	10.03	1.132	11.29	
90	10.44	1.135	10.87	
135	9.291	1.093	11.77	
<i>Oscilación Transversal</i>				
0	8.516	1.22	14.34	0 %
45	8.117	1.717	21.16	-19 %
90	8.585	1.48	17.24	-18 %
135	9.786	0.797	8.15	5 %
<i>Oscilación Longitudinal</i>				
0	8.725	1.918	21.98	3 %
45	9.439	1.343	14.22	-6 %
90	9.891	1.165	11.78	-5 %
135	8.61	1.683	19.54	-7 %
<i>Oscilación Helicoideal</i>				
0	9.718	1.164	11.98	14 %
45	9.339	0.655	7.02	-7 %
90	10.29	1.408	13.68	-1 %
135	9.07	1.808	20.07	-2 %

92.5% Polietileno Baja Densidad - 7.5% Fibras de Henequén

Esfuerzo Máximo (MPa)				
	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coficiente de Variación</i>	<i>% de Comparación</i>
<i>Sin Oscilación</i>				
0	3.768	0.262	6.96	
45	4.216	0.407	9.65	
90	5.347	0.92	5.99	
135	4.128	0.389	9.41	
<i>Oscilación Transversal</i>				
0	3.035	0.091	3.02	-19 %
45	3.741	0.107	2.87	-11 %
90	3.41	0.246	7.2	-36 %
135	3.244	0.091	2.8101	-21 %
<i>Oscilación Longitudinal</i>				
0	2.66	0.389	14.64	-30 %
45	3.22	0.1059	3.29	-23 %
90	4.053	0.206	5.08	-24 %
135	2.94	0.3432	11.76	-28 %
<i>Oscilación Helicoidal</i>				
0	3.151	0.235	7.47	-16 %
45	3.175	0.2096	6.6	-25 %
90	3.54	0.223	6.3	-33 %
135	3.335	0.333	9.99	-19 %

92.5% Polietileno Baja Densidad - 7.5% Fibras de Henequén

Deformación al Pico				
	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coefficiente de Variación</i>	<i>% de Comparación</i>
Sin Oscilación				
0	8.718	0.875	10.04	
45	9.72	1.5067	16.12	
90	10.57	1.536	14.53	
135	8.268	1.153	13.94	
Oscilación Transversal				
0	10.47	0.915	8.74	20 %
45	12.23	1.381	11.3	26 %
90	13.97	12.55	18.21	32 %
135	12.64	1.48	11.63	53 %
Oscilación Longitudinal				
0	10.01	1.375	13.74	15 %
45	13.37	1.233	9.23	38 %
90	13.12	2.598	19.8	24 %
135	11.7929	1.4914	12.5241	43 %
Oscilación Helicoidal				
0	11.35	1.412	12.44	31 %
45	11.26	0.978	8.69	15 %
90	14.1	2.02	14.33	34 %
135	11.02	0.425	3.86	33 %

100% Polietileno Baja Densidad

Esfuerzo Máximo (MPa)				
	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coefficiente de Variación</i>	<i>% de Comparación</i>
<i>Sin Oscilación</i>				
0	11.47	0.23	2.01	
45	11.64	0.2	1.75	
90	11.58	0.391	3.38	
135	11.75	0.29	2.43	
<i>Oscilación Transversal</i>				
0	11.94	0.42	3.52	4 %
45	11.87	0.2	1.64	2 %
90	11.98	0.19	1.56	4 %
135	11.88	0.08	0.66	1 %
<i>Oscilación Longitudinal</i>				
0	11.72	0.26	2.2	2 %
45	11.88	0.14	1.16	2 %
90	11.571	0.285	2.485	0 %
135	11.7	0.26	2.19	0 %
<i>Oscilación Helicoidal</i>				
0	12.04	0.18	1.49	5 %
45	11.94	0.41	3.42	3 %
90	11.93	0.188	1.57	3 %
135	12.02	0.15	1.24	3 %

100% Polietileno Baja Densidad

Deformación al Pico				
	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coficiente de Variación</i>	<i>% de Comparación</i>
<i>Sin Oscilación</i>				
0	20.42	0.63	3.11	
45	20.92	0.58	2.77	
90	19.81	0.922	4.65	
135	20.63	1.04	5.04	
<i>Oscilación Transversal</i>				
0	20.71	0.33	1.59	2 %
45	20.25	1.24	6.11	-3 %
90	20.59	0.7	3.41	4 %
135	20.64	1.27	6.15	0 %
<i>Oscilación Longitudinal</i>				
0	21.66	1.3	5.99	6 %
45	20.54	1.2	5.86	-2 %
90	20.24	1.115	5.495	2 %
135	21.14	0.5	2.36	3 %
<i>Oscilación Helicoidal</i>				
0	19.18	0.43	2.23	-6 %
45	20.77	0.68	3.27	-1 %
90	20.48	1.17	5.73	3 %
135	19.94	0.8	4.03	-3 %

100% Polietileno Alta Densidad

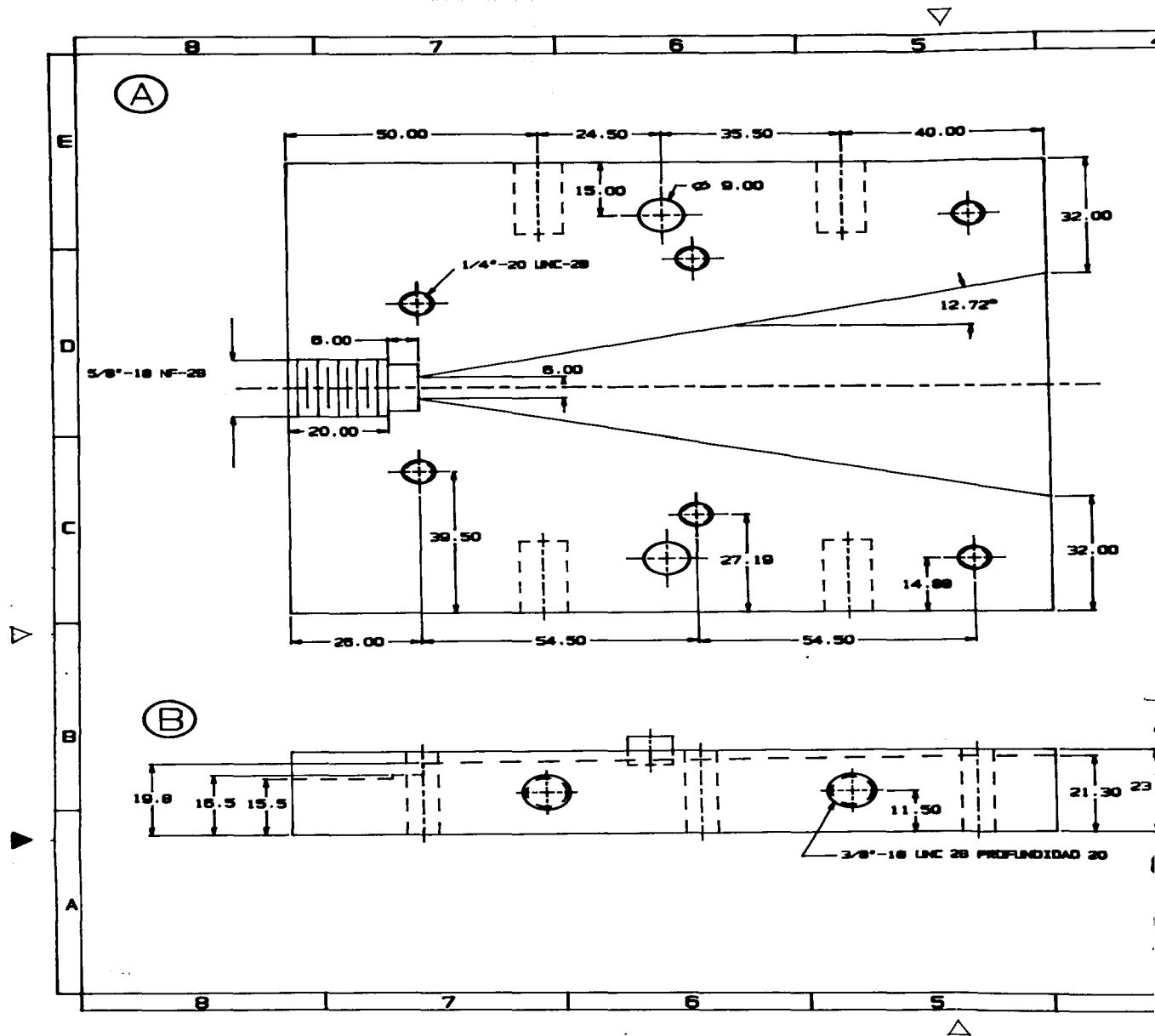
Esfuerzo Máximo (MPa)				
	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	% de Comparación
Sin Oscilación				
0	30.14	0.52	1.73	
45	30.2	0.43	1.42	
90	30.1	0.4	1.33	
135	29.65	0.42	1.42	
Oscilación Transversal				
0	30.04	0.52	1.73	0 %
45	30.9	1.3	4.21	2 %
90	30.53	1.34	4.37	1 %
135	30.86	0.93	3.01	4 %
Oscilación Longitudinal				
0	31.82	0.826	2.6	6 %
45	31.63	0.81	2.55	5 %
90	32.51	0.32	0.99	8 %
135	31.38	0.42	1.34	6 %
Oscilación Helicoidal				
0	30.15	0.47	1.12	0 %
45	30.31	0.52	29.79	0 %
90	30.35	0.54	1.78	1 %
135	30.49	0.34	1.12	3 %

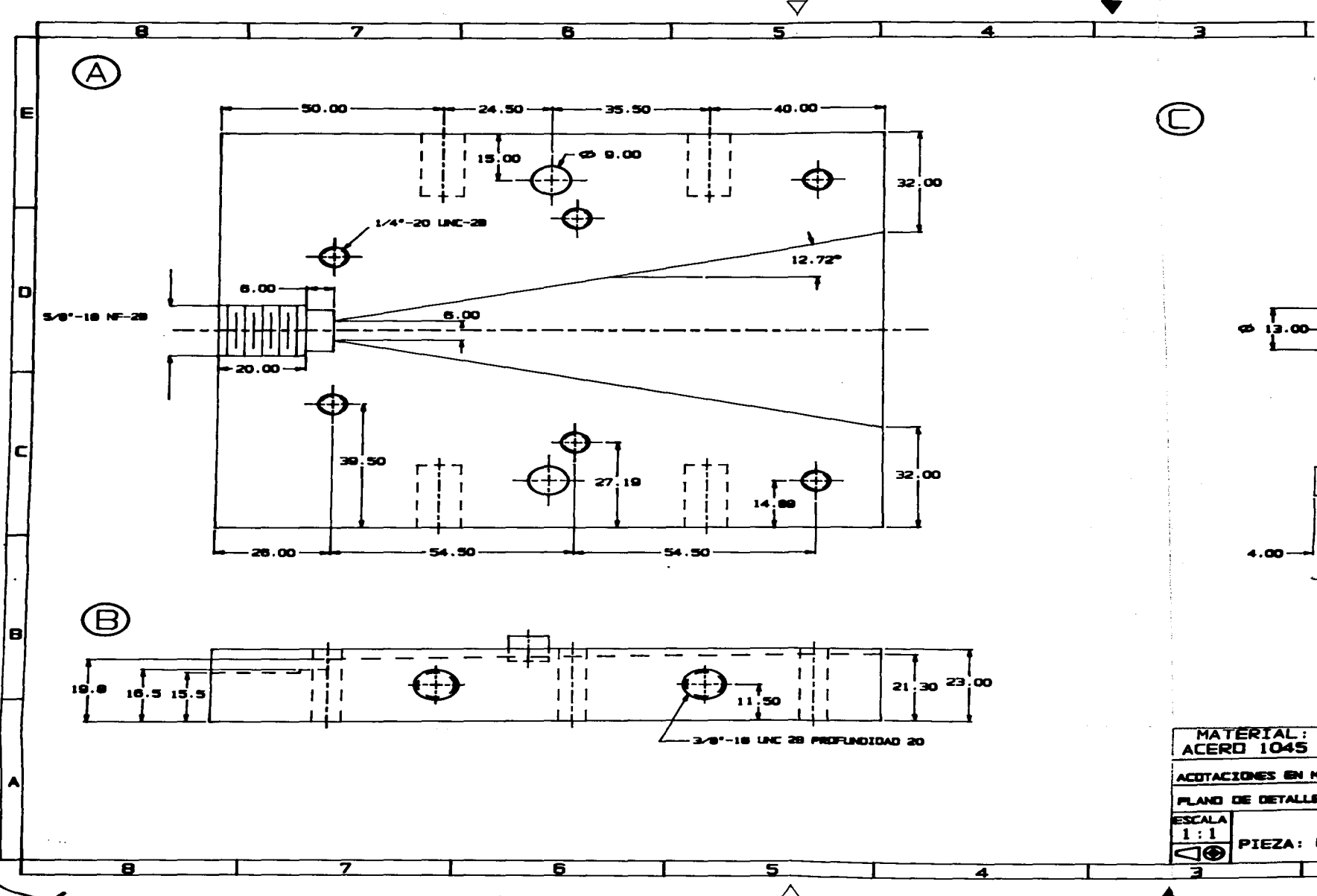
**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

100% Polietileno Alta Densidad

Deformación al Pico				
	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coefficiente de Variación</i>	<i>% de Comparación</i>
Sin Oscilación				
0	10.37	0.59	5.69	
45	9.924	0.744	7.5	
90	9.692	0.806	8.32	
135	10.08	0.684	6.78	
Oscilación Transversal				
0	9.78	0.841	8.6	-1 %
45	9.821	0.797	8.11	-6 %
90	9.6	0.698	7.27	-1 %
135	10.34	0.502	4.85	3 %
Oscilación Longitudinal				
0	10.56	0.59	5.59	2 %
45	10.62	0.619	5.83	7 %
90	9.685	0.887	9.16	0 %
135	10.77	0.729	6.76	7 %
Oscilación Helicoidal				
0	12.55	0.01	0.03	21 %
45	12.45	0.33	12.12	25 %
90	11.18	0.55	4.52	15 %
135	12.55	0	0.03	25 %

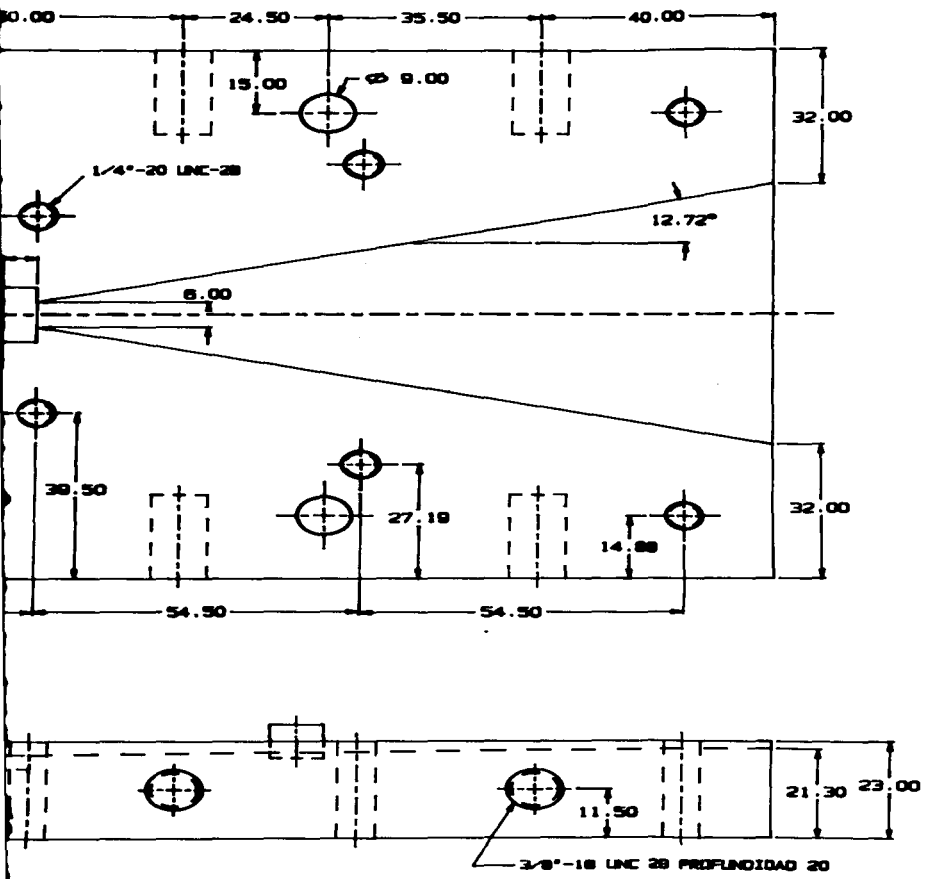
16.2. Planos de Fabricación



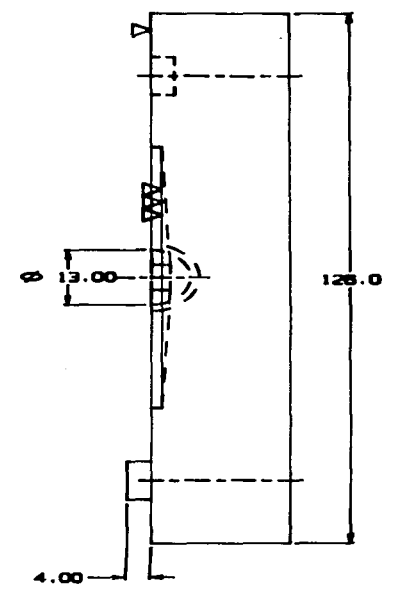


MATERIAL:
ACERD 1045
ACOTACIONES EN M
PLANO DE DETALLE
ESCALA
1:1
PIEZA: E

7 6 5 4 3 2 1

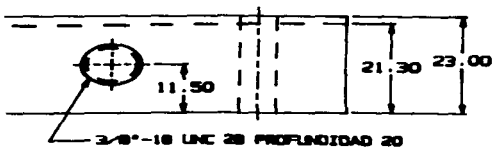
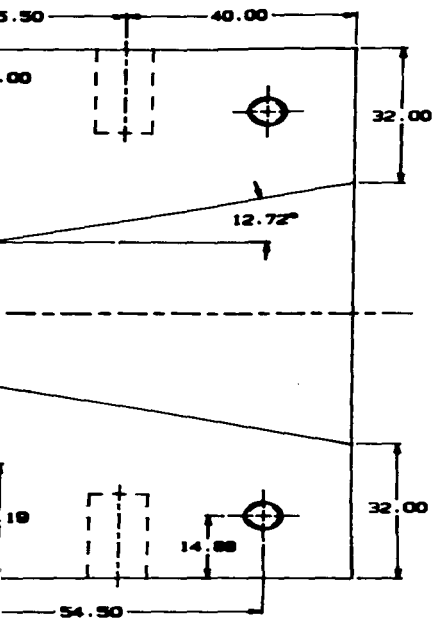


Ⓢ

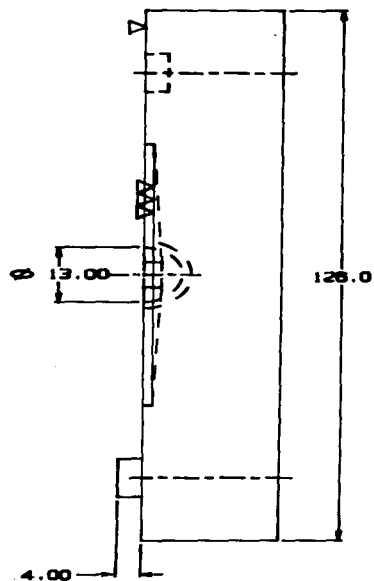


MATERIAL:	C	LATERAL	ELABORO:
ACERO 1045	B	FRONTAL	AVALDS ROJEL FR
ACOTACIONES EN MM.	A	SUPERIOR	FRANCO CONSUEGR
PLANO DE DETALLE	PLANO	VISTA	SANCHEZ TORAL
ESCALA	PIEZA: BASE DADO EXTRUSOR		FECHA:
1:1			ENERO DE

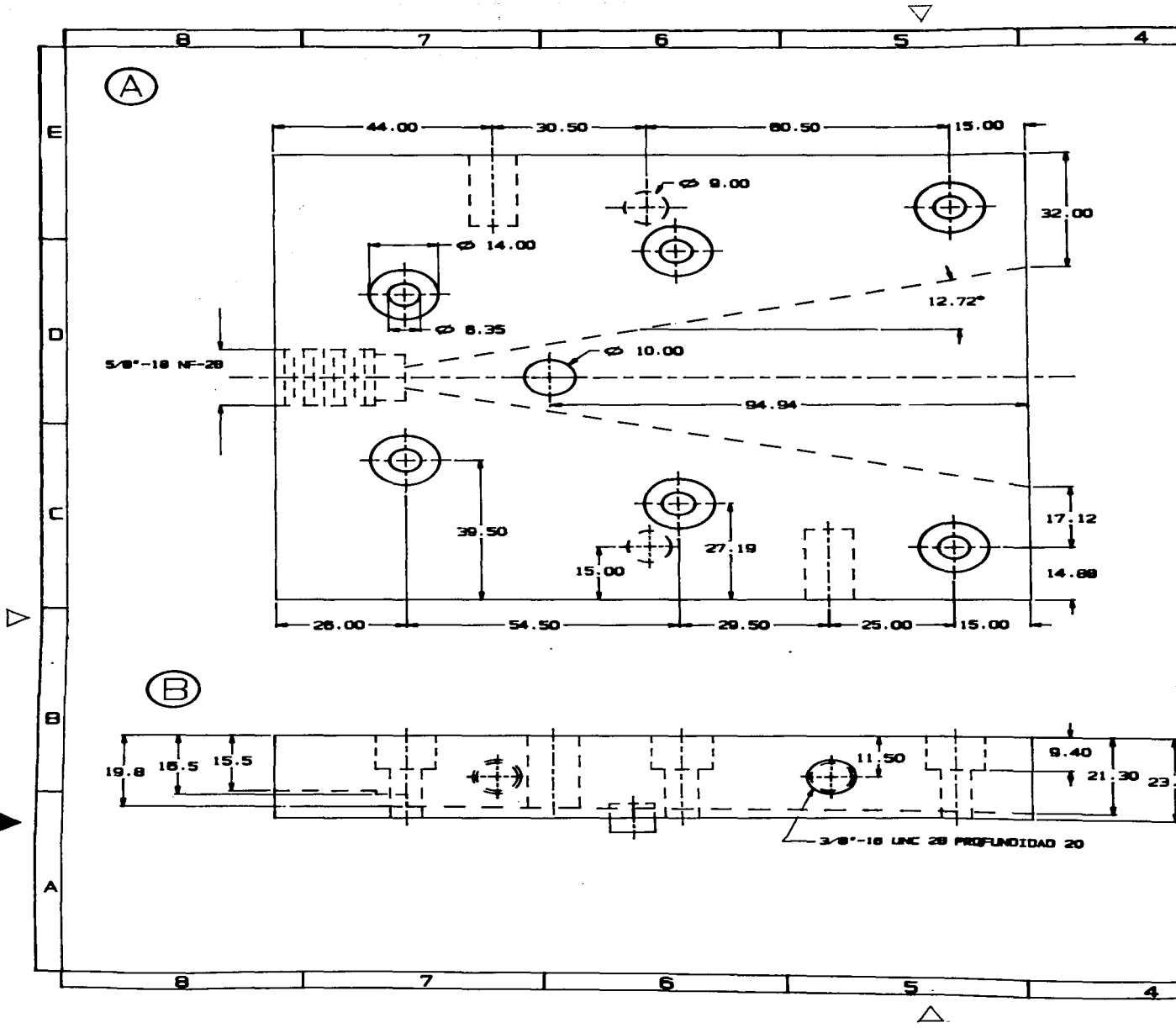
7 6 5 4 3 2 1



Ⓢ

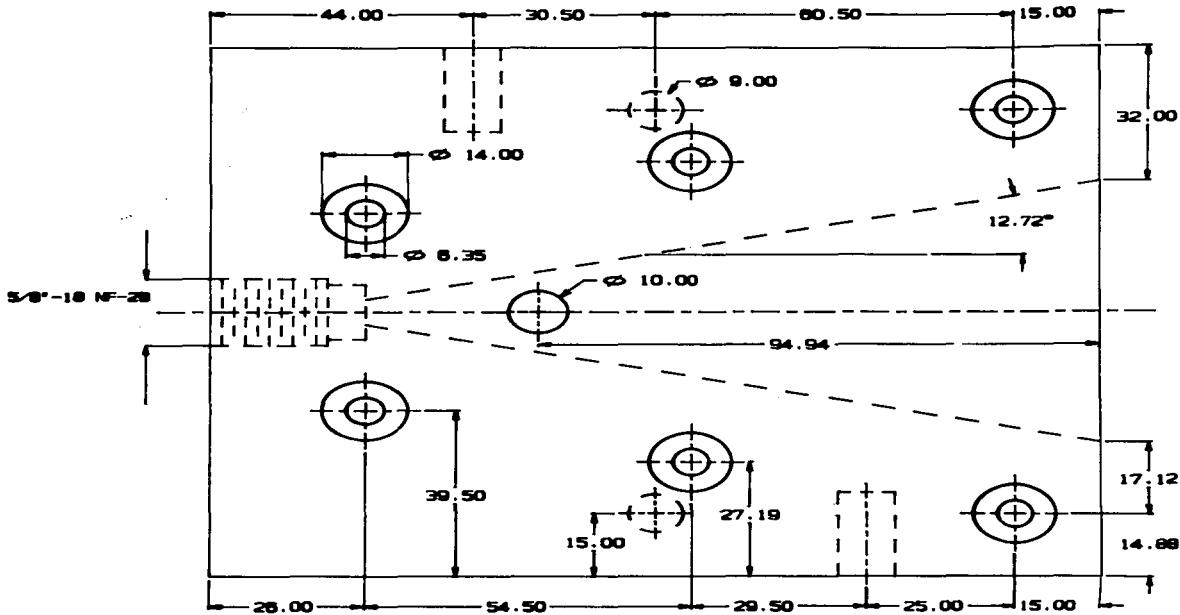


MATERIAL:	ACERO 1045	C	LATERAL	ELABORO:	AVALDS ROGEL FRANCISCO
ACOTACIONES EN MM.		B	FRONTAL		FRANCO CONSUEGRA WALFRE
PLANO DE DETALLE		A	SUPERIOR		SANCHEZ TORAL PEDRO
ESCALA	1:1	PIEZA: BASE DADO EXTRUSOR		FECHA:	ENERO DE 1997

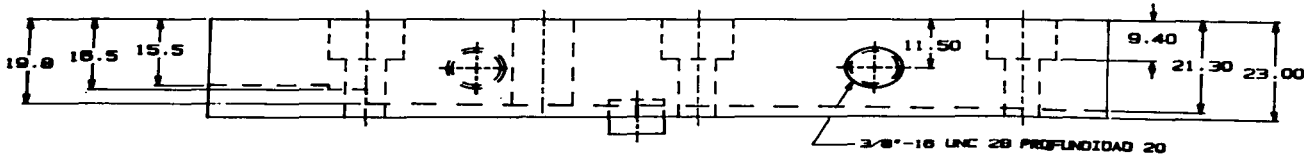


(A)

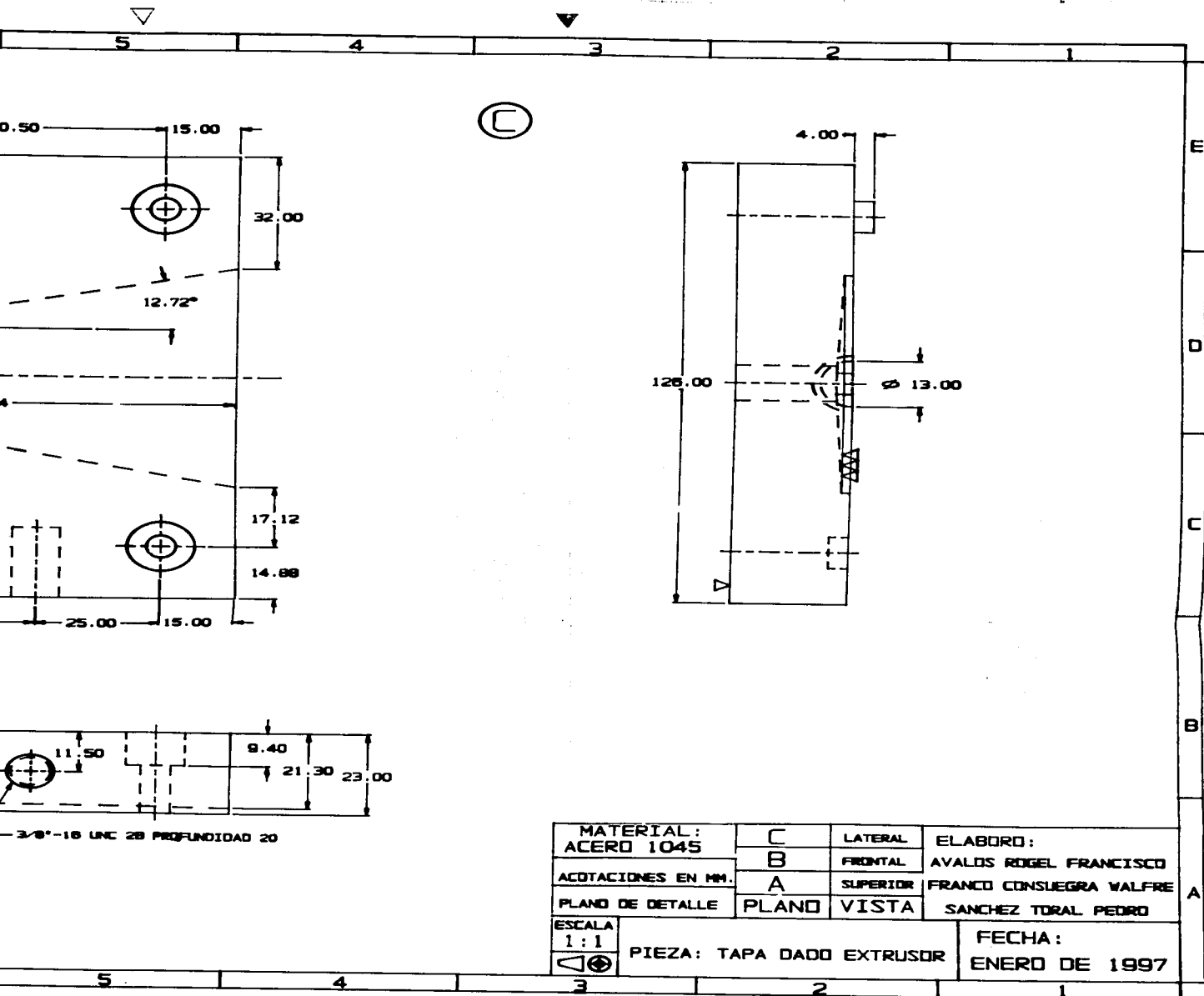
(C)



(B)

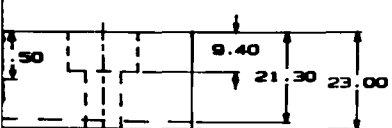
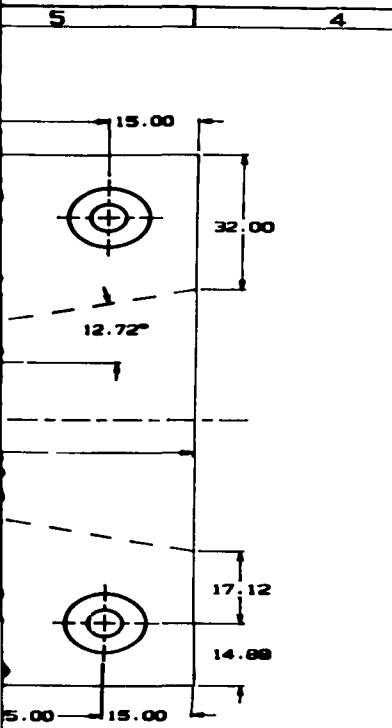


MATERIAL:	ACERO 1045
ACOTACIONES EN MM.	
PLANO DE DETALLE	PLA
ESCALA	1:1
	PIEZA: TAPA



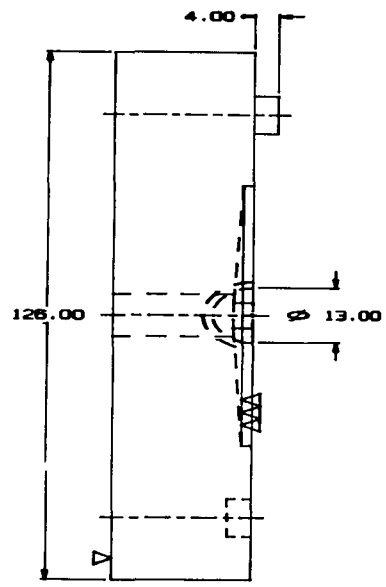
3/8"-16 UNC 28 PROFUNDIDAD 20

MATERIAL:	ACERO 1045	C	LATERAL	ELABORO:	
ACOTACIONES EN MM.		B	FRONTAL	AVALOS ROGEL FRANCISCO	
PLANO DE DETALLE		A	SUPERIOR	FRANCO CONSUEGRA WOLFRE	
ESCALA	1:1	PLANO	VISTA	SANCHEZ TORAL PEDRO	
PIEZA: TAPA DADO EXTRUSOR				FECHA:	ENERO DE 1997



UNC 28 PROFUNDIDAD 20

Ⓢ



MATERIAL:	ACERO 1045	C	LATERAL	ELABORO:	AVALOS ROGEL FRANCISCO
ACOTACIONES EN MM.		B	FRONTAL	FRANCO CONSUEGRA WALFRE	
PLANO DE DETALLE		A	SUPERIOR	SANCHEZ TORAL PEDRO	
ESCALA	1:1	PLANO	VISTA	FECHA:	ENERO DE 1997
PIEZA: TAPA DADO EXTRUSOR					

E
D
C
B
A

5 4 3 2 1



Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics By Use of Microtensile Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation D 1708; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method exists only for reference by certain material specifications for which a history of data has been obtained using the standard microtensile test specimen. This specimen has been found to fail prematurely in the fillet area for both brittle and ductile materials.² This test method has, therefore, been superseded for general use by either Test Methods D 882 or D 638. The very small Type V specimen in Test Method D 638 is the recommended specimen when limited amounts of material are available.

1.2 This test method covers the determination of the comparative tensile strength and elongation properties of plastics in the form of standard microtensile test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed. It can be used for specimens of any thickness up to 3.2 mm (1/8 in.), including thin films.

1.3 This test method cannot be used for the determination of modulus of elasticity. For the determination of modulus, see Test Method D 638 or D 882.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.5 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing³
- D 638 Test Method for Tensile Properties of Plastics⁴
- D 882 Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting⁵
- D 4066 Specification for Nylon Injection and Extrusion Materials⁶

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved July 27, 1984. Published September 1984. Originally published as D 1708 - 59 I. Last previous edition D 1708 - 79.

² Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR- D-20-1069.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

3. Significance and Use

3.1 This test method provides data for quality control and acceptance or rejection under specifications.

4. Definitions

4.1 Definitions of terms applying to this test method appear in the Annex to Test Method D 638.

5. Apparatus

5.1 The apparatus shall be as specified in Test Method D 638, with the following exceptions:

5.1.1 *Grips*—Serrated grips should be used with care, since yielding or tearing at the grips may interfere with measurement of elongation even when the specimen breaks in the reduced section. Rubber-faced grips are recommended for thin specimens. Self-tightening grips of the "V"-design type are not satisfactory for this test because of the change in grip separation that occurs as they bite on the specimen. If the specimen tab is not long enough to prevent the grip faces from cocking, shims should be inserted to provide more uniform clamping.

5.1.2 *Drive Mechanism*—The velocity of the drive mechanism shall be regulated as specified in Section 9.

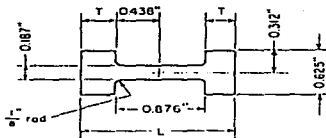
5.1.3 The fixed and movable members, drive mechanism, and grips should be constructed of such materials and in such proportions that, after grip slack is taken up, the total elastic longitudinal deformation of the system constituted by these parts does not exceed 1% of the total longitudinal deformation between the grips at any time during the test. If this is not possible, appropriate corrections shall be made in the calculation of strain values.

5.1.4 *Extension Indicator*—The extension indicator shall be capable of determining the distance between grips at any time during the test. The instrument shall be essentially free of inertia lag at the specified speed of testing, and shall be accurate to $\pm 1\%$ of extension or better.

NOTE 1—It is desirable that the load indicator and the extension indicator be combined into one instrument, which automatically records the load as a function of the extension or as a function of time. In the latter case, the conversion to a load-extension record can readily be made because extension is proportional to time after the take-up of the initial grip slack.

NOTE 2—Extension may also be measured by timing the test with a stop watch and calculating the distance of crosshead movement during that time. Time shall be taken from the instant that the machine records a load on the specimen to the instant the specimen breaks.

5.1.5 *Micrometers*—Micrometers shall read to 0.0025 mm (0.0001 in.) or less.



Tolerance: ± 0.05 mm (± 0.002 in.)
 Thickness = thickness of sheet.
 Minimum tab length, $T = 7.9$ mm (0.312 in.) (larger tabs shall be used wherever possible)
 Maximum length, $L = 30.1$ mm (1.50 in.)

Table of Metric Equivalents

in.	mm
0.107	4.75
0.438	11.13
0.312	7.92
0.625	15.88
0.876	22.25

FIG. 1. Microtensile Test Specimen

6. Test Specimens

6.1 Microtensile test specimens shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. This specimen shall be prepared by die-cutting or machining from sheet, plate, slab, or finished article. Dimensions of a die suitable for preparing die-cut specimens are shown in Fig. 2.

6.2 All surfaces of the specimen shall be free of visible flaws, scratches, or imperfections. Marks left by coarse machining operations shall be carefully removed with a fine file or abrasive, and the filed surfaces shall then be smoothed with abrasive paper (No. 00 or finer). The finishing sanding strokes shall be made in the direction parallel to the long axis of the test specimen.

Note 1.—Tabs shown in Fig. 1 are minimum size for adequate gripping. Slabs may be required with thicker specimens to keep grips from cocking. Handling is facilitated and gripping improved by the use of larger tabs wherever possible.

7. Conditioning

7.1 *Conditioning*.—Condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 618 for those tests where conditioning is required. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1.8^\circ\text{F}$) and $\pm 2\%$ relative humidity.

7.1.1 Note that for some hygroscopic materials, such as nylons, the material specifications (for example, Specification D 4066) call for testing "dry as-molded specimens". Such requirements take precedence over the above routine preconditioning to 50% RH and require sealing the specimens in water vapor-impermeable containers as soon as molded and not removing them until ready for testing.

7.2 *Test Conditions*.—Conduct tests in the Standard Laboratory Atmosphere of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified in the test methods. In cases of disagreements, the tolerances shall be

$\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1.8^\circ\text{F}$) and $\pm 2\%$ relative humidity.

8. Number of Test Specimens

8.1 At least five specimens shall be tested for each sample in the case of isotropic materials.

8.2 Ten specimens, five normal to and five parallel to the principal axis of anisotropy, shall be tested for each sample in the case of anisotropic materials.

8.3 Results obtained on specimens that break at some obvious fortuitous flaw or at the edge of the grips shall be discarded and retests made, unless such flaws constitute a variable, the effect of which it is desired to study.

9. Speed of Testing

9.1 Speed of testing is the velocity of separation of the two members (or grips) of the testing machine when running idle (under no load).

9.2 The speed of testing shall be chosen such that the rate of straining shall be approximately the same as the rate of straining obtained when the material is tested at the designated speed according to Test Method D 638. Speeds giving rates of straining approximating those given in Test Method D 638 are as follows:

Speed A	0.25 mm (0.01 in./min
Speed B	1 to 1.3 mm (0.04 to 0.05 in./min
Speed C	10 to 14 mm (0.4 to 0.5 in./min
Speed D	100 to 140 mm (4 to 5 in./min

These speeds are 0.20 to 0.25 times the speeds designated in Test Method D 638, since the effective gage length of bars specified in the latter test method is 4 to 5 times that of the microtensile specimens. When the speed of testing is not specified, Speed B shall be used.

10. Procedure

10.1 Specimens shall be tested at the Standard Laboratory Atmosphere as defined in Methods D 618.

10.2 Measure and record the minimum value of the cross-sectional area of each specimen. Measure the width to the nearest 0.025 mm (0.001 in.), and the thickness to the nearest 0.0025 mm (0.0001 in.) for specimens less than 2.5 mm (0.1 in.) thick, or to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) for specimens 2.5 mm (0.1 in.) or greater in thickness.

10.3 Set the testing machine so that the distance between the grips is 22.9 ± 0.25 mm (0.900 ± 0.010 in.).

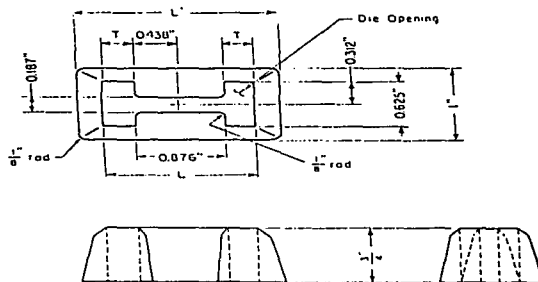
Note 1.—This may easily be checked by the use of a 22.86-mm (0.900-in.) gage block or a pair of inside calipers.

10.4 Place the specimen in the grips of the testing machine with the inside edge of each tab visible at the edge of the grip, taking care to align the long axis of the specimen and the grip with an imaginary line joining the points of attachment of the grips to the machine. Tighten the grips evenly and firmly to the degree necessary to prevent slippage of the specimen during the test, but not to the point where the specimen would be crushed.

10.5 Set the speed control at the speed desired (9.2) and start the machine.

10.6 Record the load at the yield point (if one exists), the maximum load carried by the specimen during the test, the load at rupture, and the elongation (extension between grips) at the moment of rupture.

D 1708



Material: Tool steel, Rockwell hardness = C 50 to C 55.
Tolerance: 0.051 mm (± 0.002 in.)
Dimensions of T and L as in Fig. 1, L' as determined by L.

Note—Dimensions of die opening are inside dimensions. Where dimensions and angles are not shown, tool maker make to suit. Die edges to have no nicks or marks.

Table of Metric Equivalents							
in.	1/4	0.187	0.312	0.430	0.625	3/4	0.876
mm	3.2	4.75	7.92	11.13	15.88	19.05	22.25
							1
							25.4

FIG. 2 Die for Die-Cutting Microtensile Specimens

11. Calculation

11.1 **Yield Strength, Tensile Strength, and Tensile Strength at Break**—Calculate the yield strength, tensile strength, and tensile strength at break in accordance with Test Method D 638.

11.2 **Percentage Elongation at Break**—Calculate the percentage elongation at break by dividing the elongation (extension) at the moment of rupture of the specimen by the original distance between tabs 22.250 ± 0.051 mm (0.876 ± 0.002 in.), and multiplying by one hundred. Report the percentage elongation to two significant figures.

11.3 **Percentage Elongation at the Yield Point**—Calculate the percentage elongation at the yield point, if desired, by dividing the elongation (extension) at the yield point by the original distance between tabs 22.250 ± 0.051 mm (0.876 ± 0.002 in.), and multiplying by one hundred.

11.4 Calculate the "average value" and standard deviation for each property in accordance with Test Method D 638.

12. Report

12.1 Results of this test method shall not be reported as having been obtained in accordance with Test Methods D 882 or D 638 regardless of any modifications that might

be made to simulate those testing parameters.

12.2 The report shall include the following:

12.2.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code numbers, form, principal dimensions, previous history, and other pertinent information.

12.2.2 Method of preparing test specimens,

12.2.3 Specimen thickness,

12.2.4 Conditioning procedure used,

12.2.5 Atmospheric conditions in test room,

12.2.6 Number of specimens tested,

12.2.7 Speed of testing,

12.2.8 Yield strength (if any), average value, and standard deviation.

12.2.9 Tensile strength, average value, and standard deviation.

12.2.10 Tensile strength at break, average value, and standard deviation.

12.2.11 Percentage elongation at break, average value, and standard deviation.

12.2.12 Percentage elongation at the yield point, average value, and standard deviation (if desired), and

12.2.13 Date of test.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

16.4. Influencia de las Fibras Naturales en las Propiedades Mecánicas de un Material Compuesto

A continuación se presentan algunas propiedades mecánicas de un material compuesto en función del contenido de fibras naturales. Las gráficas mostradas son producto de un estudio realizado en el Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán [18]. En este estudio se emplearon tres diferentes tipos de fibras naturales como refuerzo en una matriz de PVC.

En la figura 16.1 se muestra la gráfica de resistencia máxima en función de la fracción volumétrica de fibras. Es notorio como la resistencia de la matriz decae significativamente conforme aumenta la cantidad de fibras agregadas. Es importante observar que la resistencia es prácticamente la misma para los compuestos con una fracción de fibra de 0.1 que para los que contienen una fracción de 0.4. Además, se observa que para ciertas fracciones (mayores a 0.4) el comportamiento de la resistencia depende del tipo de fibra; para los compuestos con fibras de cuero esta disminuye conforme aumenta la fracción volumétrica, para los compuestos con fibras de henequén disminuye en forma menos dramática y para los compuestos con fibras de coco la resistencia aumenta.

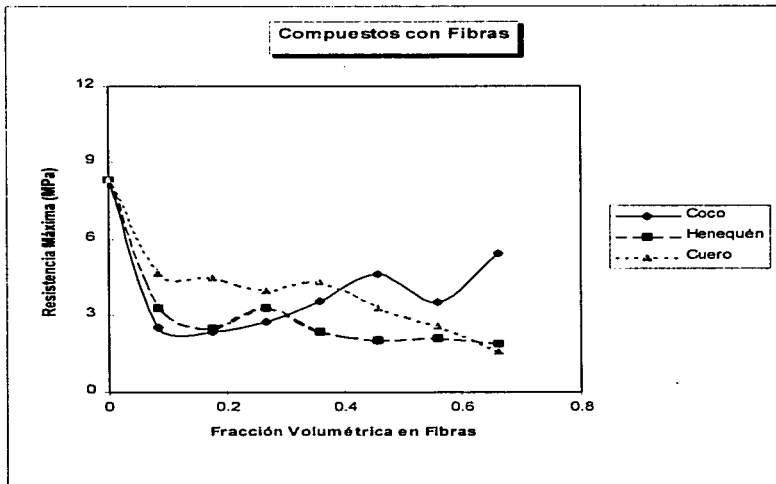


Figura 16.1

En la figura 16.2 se muestra el modulo elástico en función de la fracción volumétrica de fibras. En todos los casos se observa un incremento sustancial de este modulo conforme aumenta el contenido de fibras en el material compuesto.

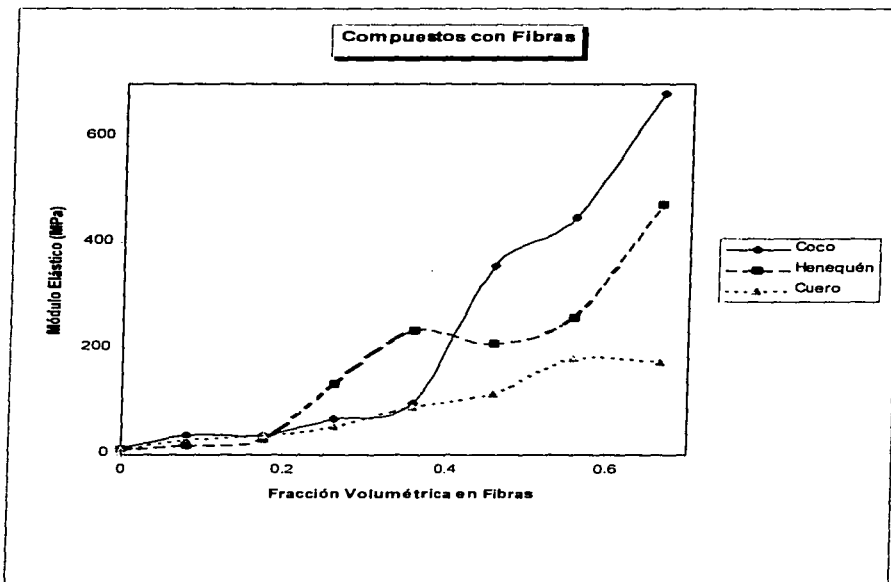


Figura 16.2

La deformación a la ruptura de los diferentes materiales compuestos decae dramáticamente con la cantidad de fibras agregadas. Como se muestra en la gráfica de la figura 16.3.

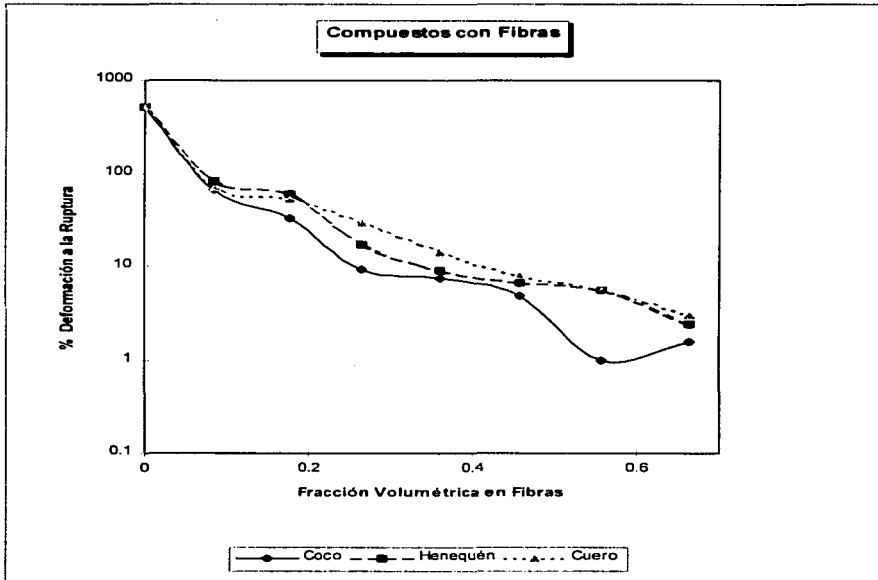


Figura 16.3

En la figura 16.4 se grafica la energía absorbida en función de la fracción volumétrica de las fibras. Claramente se observa que se requiere menor energía para romper las probetas conforme aumenta el contenido de fibras.

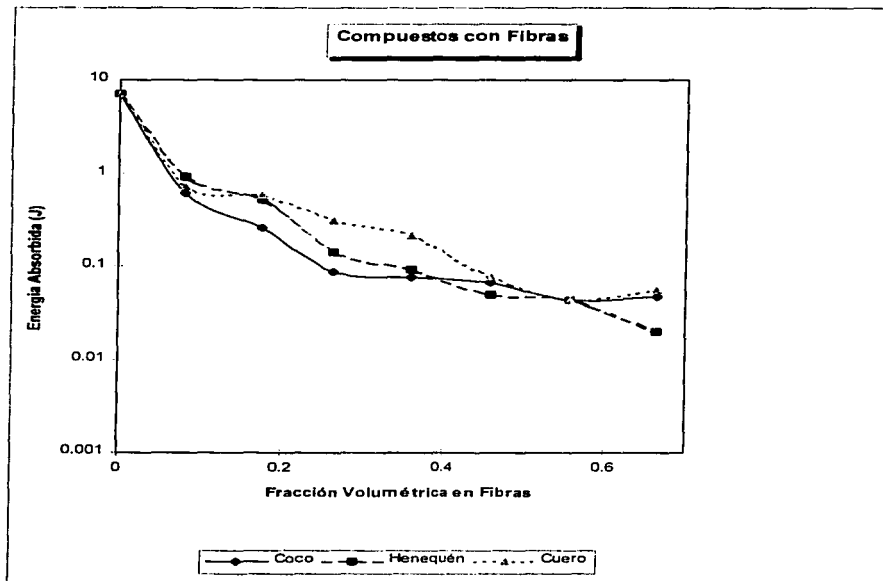


Figura 16.4

17. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Referencias

1. B. Mena and O. Manero, Proc. VII Intl. Cong. on Rheology, Gottenburg, Sweeden. Ed. Tages-Anzelger/Reginaa Druck, Zurich, 400 (1976).
2. O. Manero and B. Mena, *Rheol. Acta* 16, 573 (1977).
3. O. Manero and B. Mena, and R. Valenzuela, *Rheol. Acta*, 17, 454 (1978).
4. B. Mena, O. Manero, and D. M. Binding, *J. Non-Newt. Fluid Mechs.*, 5, 427 (1979).
5. J. Y. Kazakla and R. S. Rivlin, *Rheol. Acta* 17, 210 (1978).
6. J. Y. Kazakla and R. S. Rivlin, *J. Non-Newt. Fluid Mechs.*, 6, 145 (1979).
7. M. L. Fridman, S. L. Peshkovsky, and G. V. Vinogradov, *Polym. Eng. Sci.*, 21, 755 (1981).
8. A. I. Isayev, C. M. Wong, and X. Zeng, *SPE ANTEC Tech. papers*, 33, 207 (1987).
9. J. Casulli, J. R. Clermont, and B. Mena, *Proc. Xth Int. Cong. on Rheology*, Sydney, 1988, vol. 1.
10. J. Cassulli, J. R. Clermont, A. Von Ziegler and B. Mena, The Oscillation Die: A Useful Concept in Polymer Extrusion.
11. M. L. Fridman, S. L. Peshkovsky and G. V. Vinogradov, The Rheology of Thermoplastics Under Conditions of Spiral Flow and Vibrations on Extrusion.
12. A. Von Ziegler, Nuevo proceso para extrusión de polímeros, *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ingeniería UNAM.
13. K. Joseph, S. Thomas C. Pavithran and M.J. Brahmakumar, *Appl. Polym. Sci.* 47, 1731, 1993.
14. K. Joseph, S. Thomas and C. Pavithran, Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites. *Polymer* Vol. 37 No. 23 pp 5139-5149, 1996.

15. M. Aguilar and C. Cruz, Effects of cellulosic fibers on the polymerization of a polyurethane. *Polym Eng. Sci* 28(20), pp 1334-1341, 1988.

16. M. Aguilar and C. Cruz, Properties of henquen cellulosic fibers, *J of Appl. Polym. Sci.* Vol. 56, 1245-1252, 1995.

17. M. N. Cazaurang-Martinez, P. J. Herrera-Franco, P. I. Gonzales-Chi and M. Aguilar-Vega, Physical and mechanical properties of henquen fibers, *J of Appl. Polym. Sci.* Vol. 43, pp 749-756, 1991.

18. M. E. Ayora Cámara, Comportamiento reológico de suspensiones con fibras naturales, *Tesis de Doctorado*, Facultad de Química UNAM

Bibliografía

BIRD R.B., Dynamics of Polymeric Liquids Volume I.
John Wiley & Sons,
U.S.A.,
1977.

HULL D., An Introduction to Composite Materials.
Cambridge University Press,
1981.

Handbook of Plastics Materials and Technology. John Wiley and Sons, U.S.A. 1990.

Handbook of Plastics Testing Technology. John Wiley and Sons, U.S.A. 1984.

Apuntes de la Primera Escuela Sobre Materiales Compuestos. Universidad de Colima,
1996.