

56
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



INGENIEROS PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

PARAMETROS FUNDAMENTALES DEL PROCESO
DE INYECCION EN LAS PROPIEDADES
FISICO-MECANICAS DEL POLIETILEN
TEREFTALATO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
BERNARDO GALICIA PADILLA

MEXICO, D. F..

1997.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE PROF. MENA-BRITO FLORES CARLOS HECTOR
VOCAL PROF. GUZMAN DE LAS CASAS CARLOS
SECRETARIO PROF. MANERO BRITO OCTAVIO
1er. SUPLENTE PROF. URESTI MALDONADO MARCO ANTONIO
2do. SUPLENTE PROF. CASSAIGNE HERNANDEZ MARIA DEL ROCIO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA :

DEPARTAMENTO DE POLIMEROS DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN
MATERIALES.UNAM.

ASESOR



DR. OCTAVIO MANERO BRITO

SUPERVISOR TECNICO



ING. ANTONIO SANCHEZ SOLIS

SUSTENTANTE



BERNARDO GALICIA PADILLA

AGRADECIMIENTOS

A DIOS POR ENSEÑARME EL CAMINO CORRECTO EN LA VIDA.

A MIS PADRES POR SU GRAN APOYO, COMPRENSION Y CARÍÑO INSUSTITUIBLES BRINDADOS.

A MIS HERMANOS POR SU APOYO Y CONFIANZA.

A LA FAMILIA GALICIA PORQUE SE CONSERVE EL RESPETO, AMISTAD Y CARÍÑO ENTRE NOSOTROS.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO POR HABER BRINDADO LA OPORTUNIDAD DE FORMARME COMO PROFESIONAL.

AL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES (IIM) POR HABER PERMITIDO EL USO DE SUS INSTALACIONES Y EQUIPOS EN LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS.

AL DR. OCTAVIO MANERO BRITO POR SU ESTÍMULO Y ASESORIA EN LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS.

AL ING. ANTONIO SANCHEZ SOLIS POR SU APOYO Y ASESORIA TÉCNICA, ASÍ COMO TAMBIÉN POR LOS CONOCIMIENTOS APORTADOS EN LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS.

AL ING. ALFREDO MACIEL CERDA POR LA AYUDA TÉCNICA OBTENIDA EN LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS.

AL ING. ERNESTO SANCHEZ COLIN POR LA AYUDA TÉCNICA OBTENIDA EN LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS.

AL Q. MIGUEL ÁNGEL CANSECO MARTÍNEZ Y CARMEN VÁZQUEZ RAMOS POR LA AYUDA TÉCNICA OBTENIDA EN LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS.

A LA DRA. MIRNA R. ESTRADA YÁÑEZ POR SU APOYO MORAL Y ADMINISTRATIVO.

AL SR. EDUARDO CABALLERO RODRÍGUEZ POR SU VALIOSO APOYO EN EL MATERIAL FOTOGRÁFICO.

A LAS PERSONAS : FERNANDO, ENRIQUE, JAIME, JAVIER, SERGIO, ALBERTO, GLADYS, VERO Y PATY, QUE DE ALGUNA MANERA, COLABORARON EN LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS.

INDICE

Capítulo 1 Introducción -----	1
Capítulo 2 Generalidades -----	3
2.1 Clasificación de los plásticos -----	3
2.2 Moldeo por inyección -----	5
2.2.1 Inyección por pistón -----	5
2.2.2 Inyección por tornillo -----	6
2.2.3 El ciclo de moldeo -----	6
2.3 Máquinas de inyección -----	7
2.3.1 Componentes principales de una máquina de inyección ----	7
2.3.2 Unidad de inyección -----	9
2.3.3 Unidad de cierre -----	10
2.4 Poli(tereftalato de etileno) (PET) -----	11
2.4.1 Viscosidad intrínseca del PET -----	13
2.5 Elaboración del PET -----	14
2.5.1 Obtención del ácido tereftálico -----	15
2.5.2 Obtención del etilén glicol -----	15
Capítulo 3 Desarrollo experimental -----	17
3.1 Preparación de la materia prima -----	17
3.2 Caracterización del PET -----	18
3.2.1 Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) -	18
3.2.2 Análisis termogravimétrico (TGA) -----	20
3.3 Equipo utilizado -----	21
3.4 Procedimiento -----	21
3.4.1 Ensayo de impacto -----	21
3.4.2 Ensayo de tensión -----	24

3.6 Determinación de la viscosidad del PET -----	27
3.6.1 Reología capilar para la viscosidad de corte -----	27
Capítulo 4 Resultados y discusión -----	31
4.1 Efecto de la velocidad de inyección en las propiedades mecánicas del PET -----	31
4.2 Efecto del tiempo de enfriamiento en las propiedades mecánicas del PET -----	47
4.3 Efecto de la temperatura del molde en las propiedades mecánicas del PET -----	54
4.4 Efecto de la contrapresión en las propiedades mecánicas del PET -----	60
4.5 Efecto de la humedad del material en las propiedades mecánicas del PET -----	65
4.6 Determinación de la viscosidad de fundido del PET -----	70
4.6.1 Determinación de la densidad de fundido -----	74
4.6.2 Cristalinidad del PET -----	74
Capítulo 5 Conclusiones -----	79
Apéndice I. Propiedades mecánicas -----	82
Apéndice II. Polí(tereftalato de etileno) -----	86
Apéndice III. Fallas más comunes presentadas durante el proceso de moldeo por inyección -----	86
Apéndice IV. Definición de terminos -----	89
Bibliografía -----	91

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Una de las áreas que se ha desarrollado fuertemente en los últimos años, es el área de los polímeros sintéticos, comúnmente denominados plásticos o elastómeros.

Actualmente, los materiales poliméricos juegan un papel importante en la satisfacción de muchas necesidades en nuestra vida cotidiana. Sus usos y aplicaciones son muchos y muy diversos y van desde nuestro hogar hasta elementos espaciales.

Algunos materiales como el metal, vidrio, cerámica, madera, etc., han sido sustituidos satisfactoriamente por los materiales poliméricos debido a las propiedades que poseen, entre las que destacan: bajo peso específico, resistencia química aceptable, baja constante dieléctrica, facilidad de transformación y un buen balance en sus propiedades mecánicas.

Uno de los polímeros sintéticos con mayor auge industrial es el Poli(Tereftalato de Etileno) (PET) con aproximadamente 54 % de crecimiento en el consumo de 1994 a 1995. El consumo de la resina PET se ha dado principalmente en el sector de bebidas carbonatadas en envases de 2 Lts., 1.5 Lts., 1 Lts., y 0.5 Lts. Sin embargo, también se ha iniciado la diversificación del uso de los envases PET en otros sectores de aplicación como licores, agua mineral, cerveza, alimentos, agroquímicos etc.

INTRODUCCION

El PET grado fibra fue patentado por Du Pont en 1955 con el nombre de DACRON. El PET grado película o resina plástica se puede usar como grado envase y como grado ingeniería. El grado envase es utilizado en la elaboración de botellas para refrescos, licores, vinos, aceite comestible, etc. El PET grado ingeniería es usado como aislante eléctrico, laminados metálicos, cintas y películas, recubrimientos y empaques.

Por otro lado, muchos procesos están siendo utilizados para transformar materiales plásticos en productos conformados como láminas, barras, secciones extruidas, tuberías o partes moldeadas acabadas. El proceso de moldeo por inyección, es la técnica de procesamiento más utilizada en la producción de artículos plásticos.

En este trabajo se analizan los parámetros del proceso de moldeo por inyección como son la velocidad de inyección, contrapresión, temperatura del molde y tiempo de enfriamiento de la pieza y su efecto en las propiedades físico-mecánicas del polímero PET.

El objetivo principal es presentar un panorama general de estos parámetros y su relación con las propiedades. Además, se analiza el cambio en propiedades de impacto y tensión con la variación de cada uno de los parámetros antes mencionados. También se analizan dichos cambios con respecto a la humedad del material.

Finalmente se determina la influencia de la humedad en la viscosidad del PET por el método de reometría capilar.

CAPITULO 2

GENERALIDADES

El gran desarrollo que ha tenido la industria de los plásticos durante los últimos años, ha sido progresivamente importante. Desde su inicio en 1940 la producción de los plásticos se convirtió en la industria química de mayor crecimiento a nivel mundial. Desde entonces, no solo continuó su rápido crecimiento, sino que se está expandiendo por el número de materiales diferentes comercialmente disponibles y el campo de su aplicación.

Actualmente los plásticos tienen una gran popularidad, demanda y aceptación por parte de los consumidores debido al éxito que han mostrado al sustituir, en numerosas aplicaciones, a otros materiales como el metal, vidrio, cerámica, etc. siendo los más usados los termoplásticos.

2.1. CLASIFICACION DE LOS PLASTICOS.

Los plásticos se pueden clasificar, en cuanto a su estructura molecular y comportamiento con la temperatura en tres grandes categorías como son:

- a) Materiales termoplásticos
- b) Materiales termofijos
- c) Elastómeros

GENERALIDADES

a) Los materiales termoplásticos [1] son los que se ablandan con calor, por lo que se les moldea en caliente y bajo presión, tienen en su estructura cadenas poliméricas lineales o ramificadas.

b) Los materiales termofijos (Thermosets) [1] son polímeros que reaccionan químicamente durante el procesamiento para formar mallas rígidas de cadenas de polímeros entrelazados.

La característica de estas mallas permite un aumento en las propiedades de estabilidad dimensional y resistencia química.

c) Los elastómeros son los que admiten altas deformaciones de tipo elástico; es decir, que cesando los esfuerzos que originan la deformación recuperan, al menos en parte, su forma original. Su estructura es también reticulada pero en mucho menor extensión que los materiales termofijos, de modo que admiten relativamente grandes deformaciones con recuperaciones elásticas.

La estructura molecular de los polímeros, el grado de ramificación, polimerización y la magnitud de las uniones cruzadas, ejercen una gran influencia en sus propiedades mecánicas.

En la tecnología de la transformación o procesado de termoplásticos existen varios procesos comúnmente usados, entre los cuales cabe destacar por su importancia, moldeo por soplado, extrusión y moldeo por inyección; este último es objeto principal de estudio en este trabajo.

2.2. MOLDEO POR INYECCION.

El proceso de moldeo por inyección es uno de los métodos más usado para producir artículos plásticos. Este método puede ser por medio de pistón o tornillo y se considera discontinuo por la necesidad de abrir el molde para extraer las piezas.

En el proceso de moldeo por inyección, la materia prima se calienta rápidamente hasta fundirse y se mantiene a temperatura elevada durante un periodo de tiempo relativamente prolongado. Estas condiciones tan drásticas del proceso influyen de manera muy marcada sobre la estructura del polímero y por consiguiente, sobre su comportamiento en las propiedades mecánicas [2]. Así, se deduce que las propiedades finales del polímero serán una combinación de la interacción de las variables del proceso y de las propiedades inherentes del mismo material.

Algunas de las variables básicas del proceso son: Tiempo de enfriamiento, Contrapresión, Temperatura del molde y Velocidad de inyección.

2.2.1. INYECCION POR PISTON.

En el proceso de moldeo por inyección por pistón, el material se alimenta en polvo o en pequeños trozos llamados pellets a través de una tolva al interior del cilindro de plastificación. Cuando el ciclo de inyección comienza el pistón empuja hacia adelante a la resina dentro del cilindro y la compacta detrás de un aditamento denominado torpedo localizado en el interior del barril. El torpedo está provisto de aletas que lo mantienen centrado y que le transmiten el calor proveniente de las paredes del cilindro; estas se calientan por medio de bandas

GENERALIDADES

de resistencias eléctricas. En algunas máquinas el torpedo se calienta separadamente. El calor y la presión se unen para la plastificación de la resina. El material ya fundido pasa por una boquilla al interior del molde.

2.2.2. INYECCION POR TORNILLO.

En el proceso de moldeo por inyección por tornillo existe un tornillo rotatorio que reemplaza al pistón. La rotación del tornillo hace que la resina fundida fluya hacia adelante hasta acumular un cierto volumen determinado. Posteriormente el tornillo detiene su giro y es empujado hacia adelante por un pistón, que envía el material fundido a través de una boquilla al interior del molde [3,4,5].

2.2.3. EL CICLO DE MOLDEO.

1.- El molde está cerrado. En esta etapa se encuentra vacío y la unidad de inyección está llena de material fundido.

2.- Se inyecta el material. La válvula de retención abre y el tornillo, que actúa como un pistón, es empujado hacia adelante permitiendo el paso del material fundido a través de la boquilla al interior del molde.

3.- Etapa de "retención", aquí, se mantiene la presión mientras el material se enfría para evitar la contracción. Una vez que inicia la solidificación, puede eliminarse la presión.

GENERALIDADES

4.- La válvula cierra y el tornillo inicia su giro. La presión se aplica a la boquilla cerrada y el tornillo retrocede para acumular una nueva carga de material fundido.

5.- Mientras tanto, la pieza moldeada se enfría en el molde. Cuando está lista el molde se abre y los pernos expulsores botan la pieza moldeada ; éstos funcionan automáticamente al abrirse el molde.

6.- El molde cierra de nuevo y se repite el ciclo.

2.3. MAQUINAS DE INYECCION.

En la elaboración de materiales termoplásticos por el procedimiento de inyección se dispone de una gran variedad de máquinas, sin embargo no se trata aquí de indicar todos los diseños corrientes en el mercado o describirlos, para esto se remite a la literatura especializada y a los impresos de los fabricantes [4,6,7,8].

2.3.1. COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA MAQUINA DE INYECCION.

Básicamente, una máquina de moldeo por inyección tiene dos componentes principales:

- la unidad de inyección
- la unidad de cierre.

La unidad de inyección abarca el dispositivo de aportación de material, los elementos mecánicos para la plastificación del mismo y el accionamiento del tornillo de inyección.

GENERALIDADES

La unidad de cierre efectúa los movimientos de apertura y cierre del molde de inyección dentro del ciclo total de trabajo de la máquina.

Existen varios tipos de máquinas de inyección las cuales pueden variar de acuerdo a su calidad, capacidad, sistema de prensado y de inyección [9]. Las máquinas modernas de inyección permiten un trabajo con tres formas de funcionamiento: manual, semiautomático y automático.

Las dificultades del proceso en la producción con máquinas de inyección residen, en una parte considerable, en mantener uniformes los parámetros de producción determinados.

A continuación se ilustra una máquina de inyección DEMAG ERGotech 50 y sus principales componentes.



Figura 2.1. Máquina de inyección " DEMAG ERGotech 50".

2.3.2 UNIDAD DE INYECCIÓN

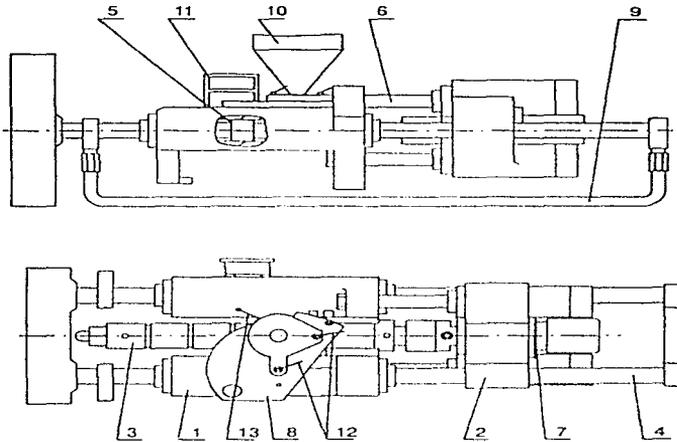


Fig. 2.2 Componentes principales de la unidad de inyección.

GENERALIDADES

1- Cilindro de desplazamiento	8- Alimentación de material
2- Carcasa del engranaje	9- Soporte
3- Unidad de plastificación	10- Tolva
4- Columna	11- Interfase termopar y resistencias
5- Vástago	12- Palanca de bloqueo
6- Cilindro de inyección	13- Palanca de giro
7- Accionamiento y alojamiento	

2.3.3 UNIDAD DE CIERRE

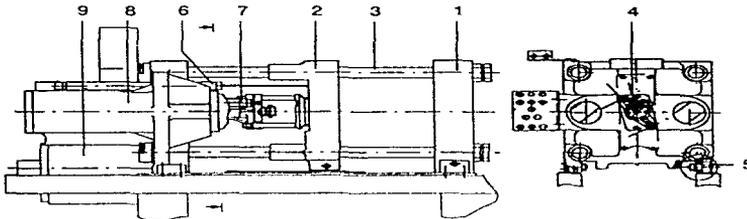


Fig. 2.3 Componentes principales de la unidad de cierre.

1-Plato porta-molde, fijo.	6-Detector de recorridos de la
2-Plato porta-molde, móvil	unidad de cierre
3-Columna	7-Detector de recorridos del expulsor
4-Expulsor	8-Cilindro de cierre
5-Soportes de las placas	9-Sistema de transductor de caudal

GENERALIDADES

2.4. POLI(TEREFALATO DE ETILENO) (PET).

El PET tuvo su origen en 1920 en los trabajos de W.H. Carothers y colaboradores en U.S.A. al querer construir moléculas gigantes (FM 10,000).

Basándose en estos trabajos John Rex Whinfield and James Tennant Dickson [10] patentaron en 1941 el descubrimiento del PET a nivel laboratorio.

En la actualidad se considera al PET dentro del grupo de plásticos de ingeniería que contiene al nylon, poliacetales, policarbonatos, poliésteres de ingeniería y óxidos de polifenileno. Estos tienen un buen balance en sus propiedades mecánicas, esfuerzos de compresión, de corte y rigidez, facilidad de moldeo y algunos una alta resistencia al impacto. Dentro del grupo de los poliésteres, se encuentran dos resinas conocidas como resinas poliésteres del tereftalato, derivadas del ácido tereftálico (ATP) o del dimetil tereftalato (DMT); una es el poli(tereftalato de butileno) conocido como PBT y el otro, de mucho mayor importancia, es el poli(tereftalato de etileno) mejor conocido como PET [11].

La cristalización del PET ocurre entre los 85 y 250°C, la velocidad de cristalización es lenta cerca de los límites de este intervalo y presenta su punto máximo a los 175°C; pero a temperaturas como 95°C ó 240°C la cristalización puede alcanzarse en horas [12].

El PET cristalino es blanco opaco, con densidad de 1.336 g/cm³ y el PET amorfo de 1.514 g/cm³. La temperatura de transición vítrea (Tg) y la temperatura de fundido (Tm) es de 80°C y 280°C respectivamente.

GENERALIDADES

La cristalización es un factor importante en las propiedades mecánicas del PET. Otro factor de igual importancia reside en el hecho de que debe ser secado rigurosamente antes de ser procesado ya que la humedad puede llegar hasta 0.3%.

La temperatura de transición vítrea [13,14.15.16] de un polímero es una característica térmica de la fase amorfa del polímero. En la Tg del polímero hay un cambio en la habilidad del polímero para tomar o ceder calor, esto da como resultado un cambio en las propiedades térmicas, como el calor específico y el coeficiente de expansión. El cambio en el calor específico constituye la base de la importante técnica de caracterización de polímeros conocida como Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) [17].

Si la rapidez de enfriamiento es lenta, se forman cristales tan grandes que ocasionan que el PET tenga apariencia blanquizca lechosa y además provoca que el polímero sea quebradizo. De otra manera, si la rapidez de enfriamiento es rápida se obtiene un PET con menor cristalinidad y los cristales que se forman son tan pequeños que no alcanzan a dispersar la luz, obteniéndose un polímero transparente.

El PET al calentarlo en presencia de humedad sufre una reacción de despolimerización por hidrólisis, sufriendo por consecuencia una pérdida de peso molecular y por lo tanto una pérdida de algunas propiedades mecánicas a tensión. Este mecanismo de reacción se muestra en la figura 2.4.[18].

Así mismo, al reusarlo y por calentamiento permite la formación de ácido carboxílico como se muestra en la figura 2.5.

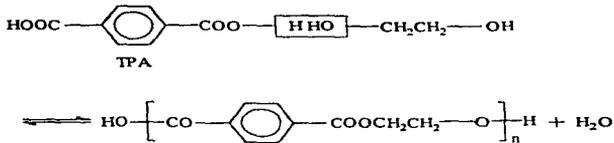


Figura 2.4. Despolimerización por hidrólisis.

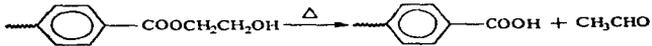


Figura 2.5. Descomposición del PET por calentamiento permitiendo la formación de ácido carboxílico.

2.4.1. VISCOSIDAD INTRINSECA DEL PET.

El PET grado envase está considerado como un homopolímero que tiene una viscosidad intrínseca de 0.72 a 0.80 dl/g. La viscosidad intrínseca (IV) es un índice de peso molecular del polímero. El PET tiene un peso molecular aproximado de 24 000 g/mol. El peso molecular es importante, ya que éste afecta:

- a) La viscosidad del polímero en estado fundido (referido al proceso).
- b) Las propiedades mecánicas de los artículos terminados.

GENERALIDADES

Un peso molecular bajo significa una viscosidad baja y menores propiedades mecánicas. Un peso molecular alto significa una viscosidad alta y mayores propiedades mecánicas.

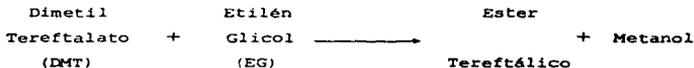
2.5. ELABORACION DEL PET.

Existen, en la elaboración del PET, dos reacciones básicas que son :

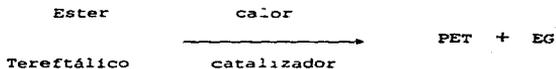
A. ESTERIFICACION DIRECTA:



B. TRANSESTERIFICACION:



Finalmente:



2.5.1. OBTENCION DEL ACIDO TEREFTALICO.

El ácido tereftálico (TPA) se obtiene a partir de la oxidación del p-xileno. Este último es producido por PEMEX quien abastece a los dos fabricantes principales en México como son: Petrocel y Tereftalatos Mexicanos.

2.5.2. OBTENCION DEL ETILEN GLICOL.

La oxidación del etileno produce óxido de etileno que se hidroliza para obtener finalmente el etilén glicol.

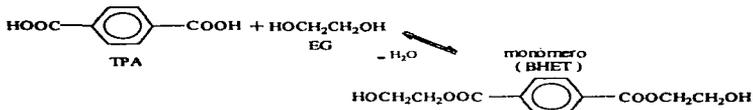
En términos químicos, la mejor alternativa para la obtención del PET es la reacción de esterificación directa entre el ácido tereftálico y el etilén glicol formando un monómero [bis(hidroxietyl) tereftalato] (BHET).

En la reacción de esterificación [19] los subproductos de reacción (agua y etilén glicol) son separados en una columna de rectificación [20]. La eliminación del agua en la fase de policondensación que se efectúa en condiciones de alto vacío, provoca la liberación de una molécula de glicol cada vez que la cadena se alarga por unidad repetida [20,21].

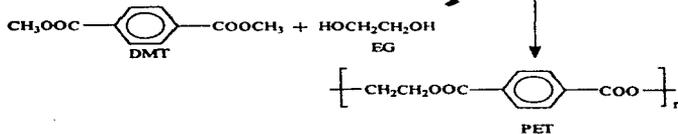
GENERALIDADES

A continuación se muestra un esquema simplificado de los dos tipos de reacciones posibles para la obtención del PET.

ESTERIFICACIÓN DIRECTA



TRANSESTERIFICACIÓN



CAPITULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

3.1. PREPARACION DE LA MATERIA PRIMA.

En el presente trabajo se utilizó como materia prima la resina (PET) en forma de pellets, proporcionada por la Cia. Celanese Mexicana con una viscosidad intrínseca de 0.85 dl/gr, densidad específica de 1.43 g/cm³ y un punto de fusión de 240°C.

Para el procesamiento de la resina PET, ésta es previamente secada en el interior de la tolva de alimentación de la inyectora, durante 12 horas a la temperatura de 110°C. La tolva permanece cerrada durante el tiempo de secado y durante el tiempo de procesamiento de la resina para evitar que se humedezca. Para prevenir oxidación en el proceso se le adicionan 2 gr de Irganox 1010 de la Cia. Ciba-Geigy por cada Kg de resina PET.

El molde se mantiene a una temperatura de 7°C haciendo circular agua de enfriamiento dentro del molde.

En la preparación del PET reusado (PET RE), primero se inyectó material obteniéndose las piezas moldeadas, posteriormente estas piezas se molieron y se inyectaron nuevamente una vez seco el material.

El PET parcialmente húmedo (PET P.H.) se prepara sometiéndolo a un proceso de secado durante 12 hrs. a la temperatura de 80°C. El PET totalmente húmedo (PET T.H.) es el material que se procesa directamente, es decir, sin someterlo al proceso de secado.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.2. CARACTERIZACION DEL PET.

3.2.1. ANALISIS POR CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC).

Este análisis se llevó a cabo en un equipo marca TA instruments modelo 2910 a una razón de calentamiento de 10°C/min. El intervalo de temperatura usado fue de 25-300°C en atmósfera de nitrógeno. El análisis térmico determina la temperatura de Transición vítrea (Tg), Temperatura de fundido (Tm) y Entalpía de fundido (ΔHm) de las muestras.

El porcentaje de cristalinidad se calcula asumiendo una ΔH^m=117.6 J/g para el cristal puro [22] de acuerdo a la ecuación (3.1) donde ΔHm es dada por los termogramas de DSC.

$$\%C = (\Delta H_m / \Delta H^m) * 100 \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Los resultados se muestran en los termogramas de las figuras 3.1 y 3.2.

En la figura 3.1 se observa el termograma de una muestra corrida una sola vez y en la 3.2 de una muestra corrida dos veces. Esta última muestra se fundió, se solidificó y se sometió nuevamente al análisis.

En el primer termograma (fig.3.1) se observa la presencia de un segundo pico en el punto de fusión, lo cual se atribuye a lo que se ha llamado, historia térmica del polímero. Además este material presenta el 36.4% de cristalinidad.

En el segundo termograma (fig.3.2) se observa la presencia de un sólo pico de fusión, lo cual indica que la historia

DESARROLLO EXPERIMENTAL

térmica ha desaparecido. En este termograma se puede observar el pico de cristalización (153.67°C) y el de fusión (249.38°C).

De la misma manera, la cristalinidad calculada es de 28.9 % un poco menor que la anterior.

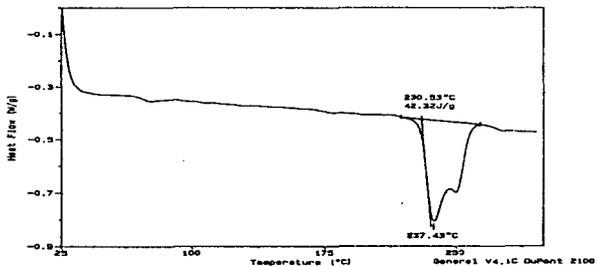


Figura 3.1. Termograma de DSC primera corrida.

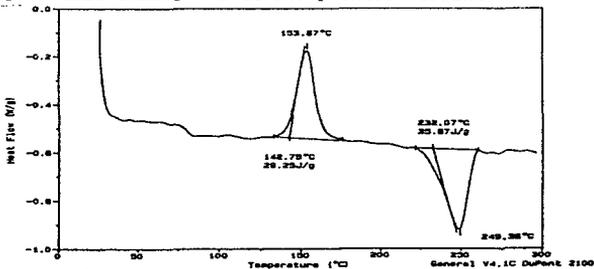


Figura 3.2. Termograma de DSC segunda corrida.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.2.2. ANALISIS TERMOGRAVIMETRICO (TGA).

Este método determina la pérdida de peso de una sustancia calentada a una razón constante como una función de la temperatura.

El análisis por TGA es una excelente técnica para la caracterización y control de calidad de materiales.

En la figura 3.3 se muestra un termograma de TGA para PET en el cual se observa una temperatura de descomposición de 379°C. El ensaye se llevó a cabo en un equipo marca TA instruments modelo 2950 , en atmósfera de nitrógeno y a una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Basándose en el termograma se calcula un 0.18% de humedad, para PET totalmente húmedo.

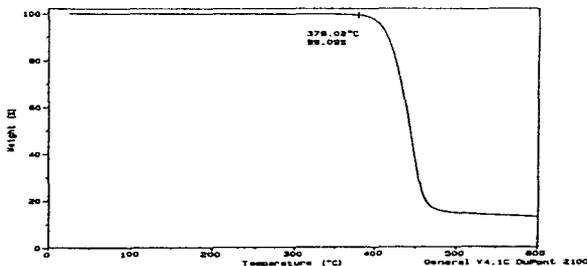


Figura 3.3. Termograma de TGA para una muestra de PET.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.3. EQUIPO UTILIZADO.

En la elaboración de los especímenes para los ensayos de IMPACTO y TENSION se utilizó una máquina de inyección " DEMAG ERGotech 50 (ver fig.2.1).

Para el ensaye de tensión se utilizó una máquina de pruebas universales " INSTRON " modelo 1125 . Los ensayos de resistencia al impacto se llevaron a cabo en un equipo que cumple con la norma ASTM D-256 [23] tipo IZOD. Más adelante se muestran las fotografías de estos equipos.

3.4. PROCEDIMIENTO.

3.4.1. ENSAYE DE IMPACTO.

El ensaye de impacto [24,25,26,27] mide la energía necesaria para romper una barra con entalladura o muesca patrón por una carga bajo impulso y, por lo tanto, es un indicio de la tenacidad en presencia de entalladuras, de un material sometido a cargas de choque. La fig.3.4 muestra el instrumento de péndulo con el cual se hicieron los ensayos de impacto. En este aparato, el espécimen se fija en la base de tal manera que quede en forma vertical hacia arriba, con la entalladura situada en la misma dirección del impacto.

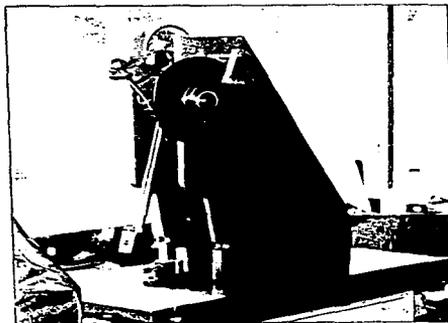


Fig.3.4. Instrumento de péndulo para impacto.

El espécimen de impacto se acondiciona de acuerdo con el procedimiento del método de prueba A (tipo Izod), ASTM D-256. La energía necesaria para romper el espécimen se calcula como la diferencia entre la energía máxima que posee el brazo del péndulo al inicio y la energía después de la ruptura ecuación (3.2).

$$E_s = (h_{max} W_p \cos \beta_{max}) - (h_{min} W_p \cos \beta_{min}) \quad \text{Ec. (3.2)}$$

donde:

E_s = energía de impacto sin corrección en (Kg .m).

W_p = peso del péndulo en (Kg .).

h = altura máxima y mínima del brazo en (m).

β = ángulo máximo y mínimo del brazo adimensional.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Además se hacen correcciones por fricción y aire de acuerdo a la norma D-256 del código ASTM.

La energía total de corrección por fricción y aire esta dada por la ecuación siguiente:

$$E_{TC} = (E_A - (E_A/2)) (\beta/\beta_{max}) + (E_A/2) \quad \text{Ec. (3.3)}$$

donde:

E_{TC} = energía total de corrección del espécimen, J.

E_A = energía de corrección por viento y fricción del péndulo, J.

E_B = energía de corrección por viento solamente del péndulo, J.

Finalmente la ecuación para calcular la energía de impacto absorbida por el espécimen es la siguiente:

$$I_s = (E_p - E_{TC})/t \quad \text{Ec. (3.4)}$$

donde:

I_s = energía de impacto absorbida por el espécimen, J/m.

t = espesor del espécimen, m.

Las pruebas de impacto se hicieron a la temperatura ambiente de $(22 \pm 3^\circ\text{C})$.

La resistencia al impacto indica la energía requerida para romper el espécimen en condiciones adecuadas y se calcula como (lb·ft)/in o en J/m. Para convertir J/m a (lb·ft)/in dividir por 53.38 .

Las especificaciones básicas del espécimen de impacto se ilustran en la figura 3.5.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

- A = 10.16 mm
- B = 31.5 mm
- C = 63.5 mm
- D = 45°
- E = 12.7 mm

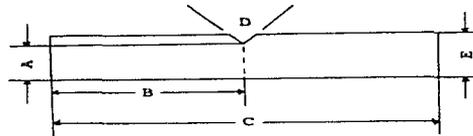


Fig.3.5. Especimen de impacto para ensayo Izod.

Procedimiento: El espécimen se fija en la base del péndulo de tal manera que quede como se ilustra en la fig.3.4.

El brazo del péndulo, con una masa de 1.038 Kg, se coloca a un ángulo de 120° y se libera; después de la ruptura se mide el ángulo final por medio de una aguja indicadora. La diferencia entre la energía inicial y final del péndulo es la energía sin correcciones absorbida por la muestra.

Una vez teniendo el ángulo inicial y final, se procede a calcular la energía necesaria para romper la muestra.

3.4.2. ENSAYE DE TENSION.

En el ensayo de tensión la muestra sufre elongación a una velocidad de deformación constante, midiéndose como una variable dependiente la carga necesaria para producir esta elongación.

La resistencia a la tensión es la relación que existe entre el esfuerzo máximo soportado por un espécimen durante la prueba y el área original de sección transversal del mismo.

La resistencia de fractura a la tensión es el punto de ruptura y se determina dividiendo la carga existente en el momento justo de la fractura y el área original de la sección transversal.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Al iniciarse el ensayo de tensión el material sufre una deformación elástica, esto significa que si se elimina la carga la muestra recupera su forma original. Por otro lado se dice que el material sobrepasó su límite elástico cuando la carga es de magnitud suficiente como para iniciar una deformación plástica, es decir, no recupera su forma original al eliminar la carga aplicada.

Las especificaciones básicas del espécimen de tensión se ilustran en la figura 3.6.

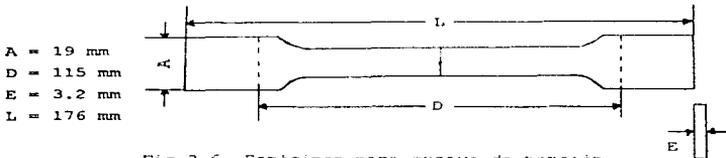


Fig.3.6. Especimen para ensayo de tensión.

Procedimiento: El espécimen se fija por ambos extremos firmemente en las mordazas del equipo INSTRON modelo 1125 (Ver fig.3.7).

El equipo es calibrado para mantener una velocidad de deformación constante.

Una vez colocada la muestra y calibrado el equipo se procede a aplicar la fuerza de deformación a una velocidad de desplazamiento de 50 mm/min de acuerdo a la norma ASTM D-638 [24].

Las condiciones de temperatura a las cuales se hicieron los ensayos de tensión fueron las ambientales ($22 \pm 3^\circ\text{C}$), determinándose los siguientes parámetros:

DESARROLLO EXPERIMENTAL

- 1.- Deformación a la tensión (%)
- 2.- Esfuerzo a la tensión (MPa)
- 3.- Deformación a la fractura (%)
- 4.- Esfuerzo a la fractura (MPa)
- 5.- Deformación al 0.2 % de cedencia (%)
- 6.- Esfuerzo al 0.2 % de cedencia (MPa)
- 7.- Módulo de Young (MPa)
- 8.- Energía al punto de cedencia (J)
- 9.- Energía al punto de fractura (J)

Para una mayor comprensión de los resultados, la definición de estos parámetros se enlistan en el APENDICE I.



Fig.3.7. Máquina de pruebas mecánicas INSTRON modelo 1125.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.6. DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD DEL PET.

Es de gran interés conocer la viscosidad de un polimero para poder entender su comportamiento durante su procesado.

Anteriormente se mencionó que una viscosidad alta significa un peso molecular alto y mayor resistencia al flujo, por el contrario para una viscosidad baja significa un peso molecular bajo y menor resistencia. De ahí la importancia de la medición de esta propiedad.

La viscosidad es función de la temperatura, presión, rapidez de flujo, además del peso molecular y estructura del polimero [29,30].

La determinación de la viscosidad del PET fundido se llevó a cabo por medio de la técnica de extrusión por capilar [15,31].

3.6.1. REOLOGIA CAPILAR PARA LA VISCOSIDAD DE CORTE.

La ecuación para fluidos Newtonianos es:

$$\eta = \frac{\pi R^4 P}{8 L Q} \quad \text{Ec. (3.5)}$$

$$\gamma_w = \frac{4 Q}{\pi R^3} = \frac{R P}{2 L \eta} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

$$\tau_w = \frac{R P}{2 L} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

DESARROLLO EXPERIMENTAL

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_w} \quad \text{Ec. (3.8)}$$

En estas ecuaciones, η es la viscosidad, R es el radio del capilar y L su longitud, Q es el flujo volumétrico a través del capilar bajo una caída de presión P a lo largo del capilar, τ es el esfuerzo cortante en la pared del capilar y $\dot{\gamma}_w$ es la rapidez de corte en la pared del capilar.

Este tipo de flujo capilar presenta efectos de entrada, para los cuales se deben hacer ciertas correcciones.

Dos correcciones son comúnmente aplicadas a los datos del capilar para obtener la viscosidad correcta del polímero fundido.

La ecuación de Rabinowitsch [15] corrige la rapidez de corte en la pared ($\dot{\gamma}_w$) para fluidos no-Newtonianos:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3n + 1}{4n} \right) \quad \text{Ec. (3.9)}$$

$$n = \frac{d \log \tau}{d \log \dot{\gamma}} \quad \text{Ec. (3.10)}$$

donde n es el exponente de la ley de potencia. El factor n es igual a 1 para fluidos Newtonianos.

La corrección de Bagley [15,32] corrige los efectos viscosos y elásticos a la entrada del capilar. La longitud efectiva de un

DESARROLLO EXPERIMENTAL

capilar es mayor que la longitud real, de modo que la ecuación del esfuerzo cortante en la pared viene siendo:

$$\tau_w = \frac{R P}{2(L + eR)} = \frac{P}{2(L/R + e)} = \frac{P - P_0}{2L/R} \quad \text{Ec. (3.11)}$$

El factor de corrección de Bagley e , es independiente de la longitud del capilar, pero generalmente varía con la relación L/R debido a la elasticidad del polímero fundido.

Bagley aplicó esta técnica en polímeros fundidos, empleando una gran variedad de capilares con distintos valores de L/D y graficando valores de P contra L/R con la rapidez de corte en la pared como parámetro. Se obtuvieron líneas rectas lo que implica que la corrección a la salida es independiente de L/R . La corrección a la entrada apropiada para una rapidez de corte fue determinada por la extrapolación de las líneas al cero de presión, interceptando la abscisa (ver fig.3.8).

En la ecuación (3.11), P_0 es la presión correspondiente a un capilar de longitud cero para una rapidez de corte dada.

En el caso específico de este estudio esta corrección no es aplicada debido a que se utilizaron capilares con L/D mayores a 15 y ángulo de entrada de 90° ; debido a ésto la corrección es mínima y se puede omitir [33].

DESARROLLO EXPERIMENTAL

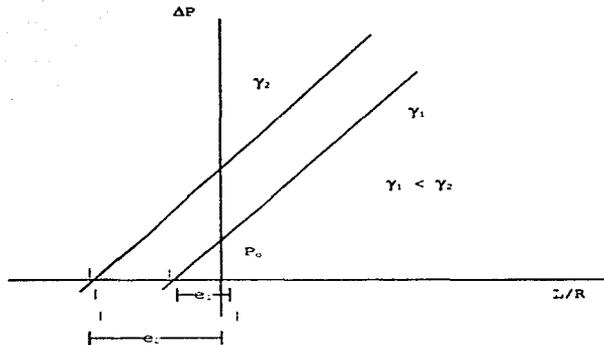


Fig.3.8. Corrección de Bagley para reómetros capilares.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSION.

4.1. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE INYECCION EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL PET.

El estudio experimental inicia con el análisis de las propiedades mecánicas del PET y PET reusado secos variando la velocidad de inyección, manteniendo la contrapresión en 900 psi, rapidez del husillo en 200 RPM, tiempo de enfriamiento en 60 seg y temperatura del molde en 7 C.

En las figuras 4.1 a la 4.4 las líneas continuas se refieren a las propiedades del PET y las punteadas a las del PET reusado.

En la figura 4.1 las propiedades de esfuerzo al 0.2% de cedencia, esfuerzo a la fractura y el esfuerzo a la tensión para el PET reusado decaen fuertemente a la velocidad de inyección de 170 mm/s. En tanto que a velocidades menores a ésta las propiedades se pueden considerar constantes.

Por otro lado, las propiedades anteriores para el PET presentan un ligero aumento conforme la velocidad de inyección se incrementa, excepto el esfuerzo a la fractura que se puede considerar constante.

Sin embargo, se observa que el esfuerzo a la tensión es mayor para el PET reusado e inferior para el PET, esto indica que el material reusado es más rígido pero menos dúctil. También se observa que el esfuerzo a la fractura es mayor para el PET reusado.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la figura 4.2 se ilustran las propiedades de energía al punto de cedencia, deformación a la tensión y deformación al 0.2% de cedencia para ambos materiales.

Nuevamente se aprecia que para el PET reusado estas propiedades disminuyen a la velocidad de 170 mm/s, en tanto que para el PET se pueden considerar casi invariables.

En la figura 4.3 se ilustran las propiedades de deformación al punto de fractura, módulo de Young y energía al punto de fractura.

Las propiedades de deformación al punto de fractura y energía al punto de fractura para el PET reusado son tan pequeñas que apenas se alcanzan a distinguir en la parte baja de la gráfica. Sin embargo estas mismas propiedades para el PET sufren una ligera disminución a velocidad superior a los 85 mm/s.

Por otro lado, el módulo de Young va en aumento conforme se incrementa la velocidad de inyección; esto sucede para ambos materiales. Comparando esta propiedad, se observa en la gráfica, que el mejor resultado se obtiene para el PET a cualquier velocidad de inyección.

Finalmente, en la figura 4.4 se ilustra la propiedad de resistencia al impacto para ambos materiales en la cual se observa un aumento considerable para el PET.

Como se puede observar la resistencia al impacto para este último material, disminuye a velocidades mayores a 85 mm/s, obteniendo un máximo valor a esta velocidad, no así para el PET reusado que resulta tener un valor mínimo a esta velocidad. Esta disminución significativa en la propiedad de impacto se atribuye a que el PET tiene cambios significativos en cristalinidad

RESULTADOS Y DISCUSION

conforme aumenta la velocidad de inyección, esto se puede observar en la figura 4.36.

En las figuras 4.5 y 4.6 se presentan los diagramas de esfuerzo-deformación para el PET con respecto a la velocidad de inyección. En estos diagramas se observa que a menores velocidades de inyección las muestras se deforman más pero el esfuerzo a la tensión disminuye.

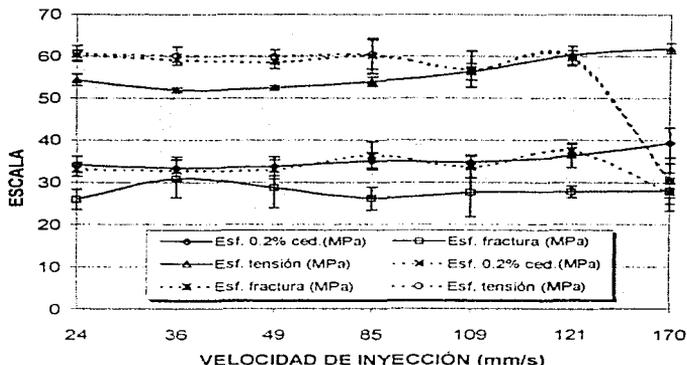
En las figuras 4.7 y 4.8 se presentan los diagramas de esfuerzo-deformación para el PET reusado con respecto a la velocidad de inyección. Como se puede observar y en comparación con los diagramas del PET, este comportamiento prácticamente no presenta fluencia y la deformación unitaria decae de 6 a 0.07. En estos diagramas además se observa que a menor velocidad de inyección las muestras se deforman más, mostrando una disminución drástica en la deformación a velocidad de 170 mm/s; esto probablemente se deba a causa de la cristalinidad del polímero como se menciona anteriormente.

La figura 4.9 muestra la curva de presión de inyección en función de la velocidad de inyección la cual presenta dos cambios de pendiente. Nótese que el primer cambio de pendiente es a 85 mm/s para después incrementarse. Este punto fue el elegido para posteriores experimentos.

Las fotografías de las probetas de tensión procesadas a diferente velocidad de inyección se muestran a continuación. En estas fotografías se observa que conforme aumenta la velocidad de inyección las probetas salen con rebaba y, algunas de las propiedades mecánicas disminuyen como se observó anteriormente. El hecho de que salgan con rebaba se debe a que a mayor velocidad

RESULTADOS Y DISCUSION

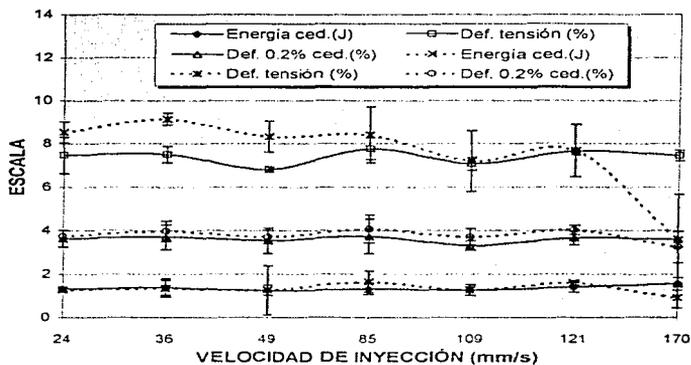
de inyección la presión de inyección aumenta, provocando que la presión de cierre del molde no sea suficiente para mantenerlo cerrado y por lo tanto se abren un poco permitiendo el flujo de material entre los platos. Otra posible razón es que la temperatura de fundido del material aumenta debido a que los esfuerzos de fricción dentro del tornillo de plastificación son mayores conforme aumenta la velocidad de inyección provocando que disminuya la viscosidad del polimero y aumente su fluidez.



Contrapresión = 900 psi
 Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
 Temperatura del molde = 7°C
 Rapidez del husillo = 200 RPM

Figura 4.1. Propiedades mecánicas en función de la velocidad de inyección para PET (—) y PET reusado (---).

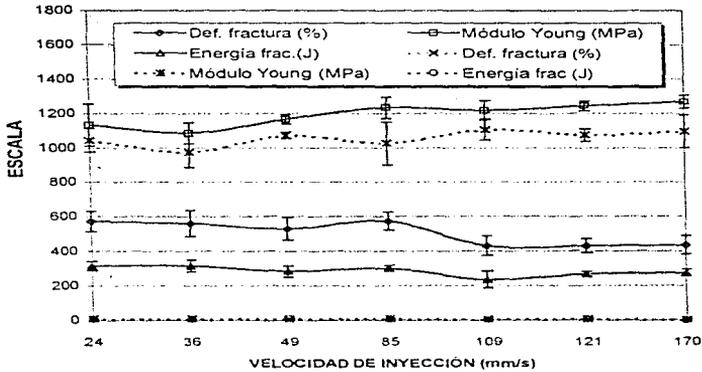
RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
 Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
 Temperatura del molde = 7°C
 Rapidez del husillo = 200 RPM

Figura 4.2. Propiedades mecánicas en función de la velocidad de inyección para PET (—) y PET reusado(---).

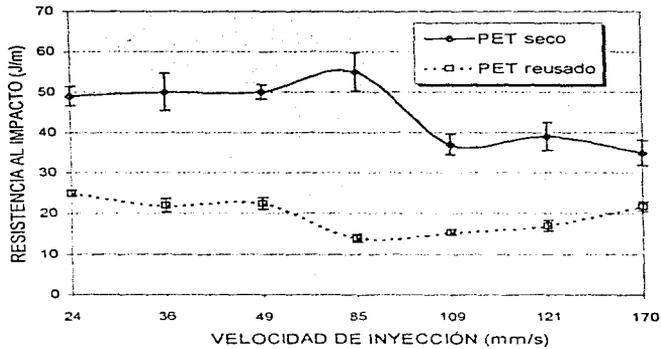
RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
 Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
 Temperatura del molde = 7°C
 Rapidez del husillo = 200 RPM

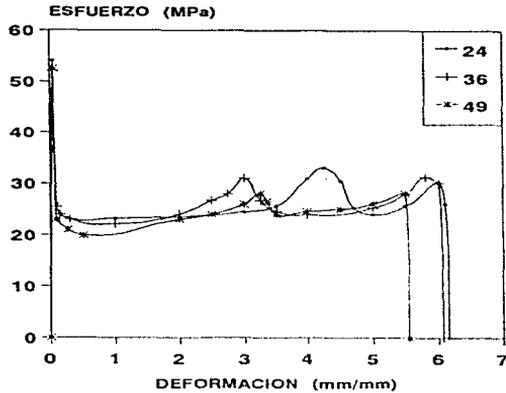
Figura 4.3. Propiedades mecánicas en función de la velocidad de inyección para PET (—) y PET reusado (---).

RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Temperatura del molde = 7°C
Rapidez del husillo = 200 RPM

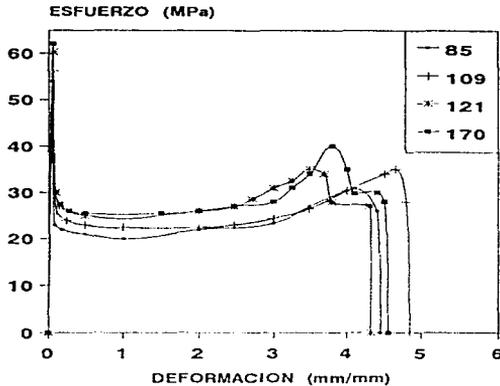
Figura 4.4. Resistencia al impacto en función de la velocidad de inyección para PET (—) y PET reusado (---).



Contrapresión = 900 psi
 Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
 Temperatura del molde = 7°C
 Rapidez del husillo = 200 RPM
 Velocidad de inyección = 24,36.49 (mm/s)

Figura 4.5. Gráfica esfuerzo vs deformación a diferente velocidad de inyección para PET.

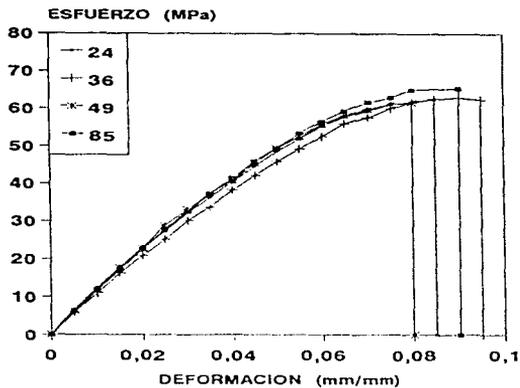
RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Temperatura del molde = 7°C
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85, 109, 121, 170 (mm/s)

Figura 4.6. Gráfica esfuerzo vs deformación a diferente velocidad de inyección para PET.

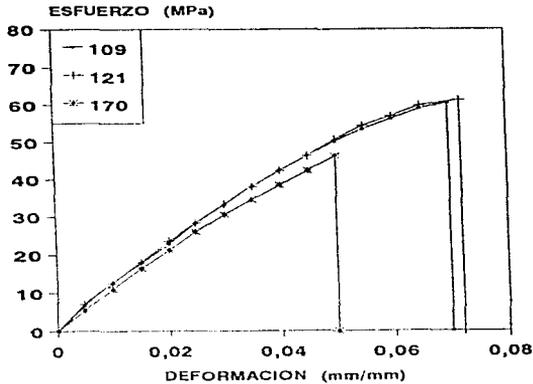
RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Temperatura del molde = 7°C
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 24,36,49,85 (mm/s)

Figura 4.7. Gráfica esfuerzo vs deformación a diferente velocidad de inyección para PET reusado.

RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Temperatura del molde = 7°C
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 109.121.170 (mm/s)

Figura 4.8. Gráfica esfuerzo vs deformación a diferente velocidad de inyección para PET reusado.

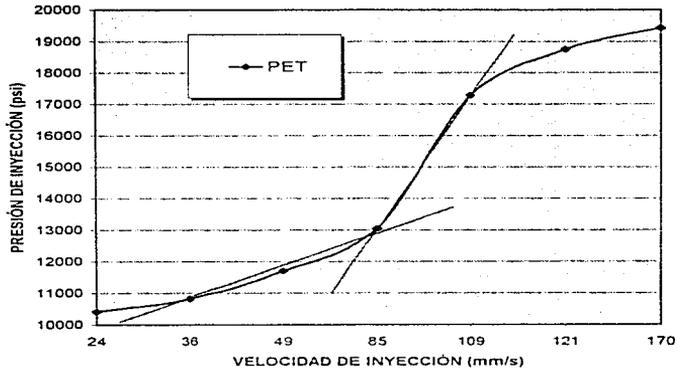


Figura 4.9. Gráfica presión de inyección vs velocidad de inyección para PET.

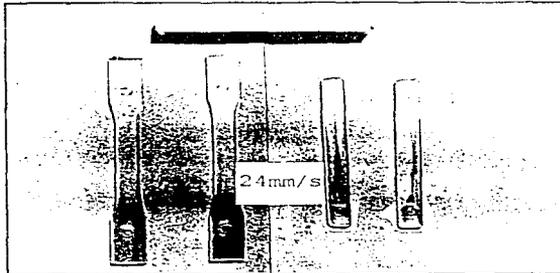


Figura 4.10. Fotografía de probetas procesadas a velocidad de inyección de 24 mm/s.

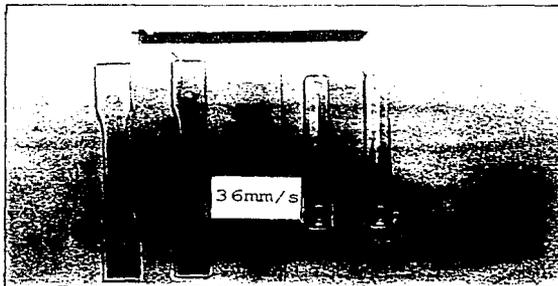


Figura 4.11. Fotografía de probetas procesadas a velocidad de inyección de 36 mm/s.

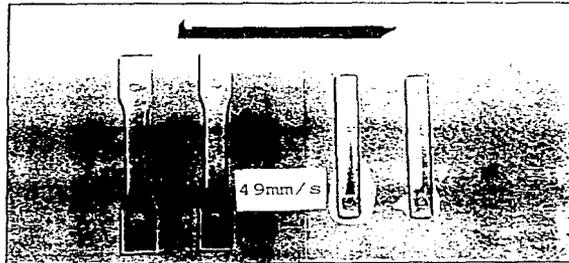


Figura 4.12. Fotografía de probetas procesadas a velocidad de inyección de 49 mm/s.

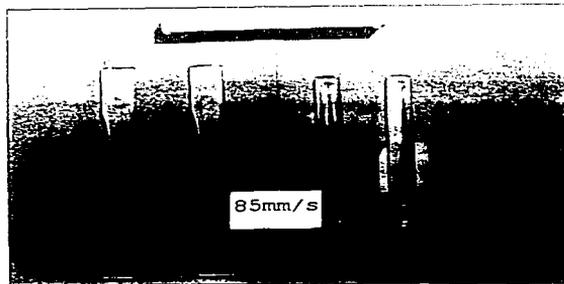


Figura 4.13. Fotografía de probetas procesadas a velocidad de inyección de 85 mm/s.

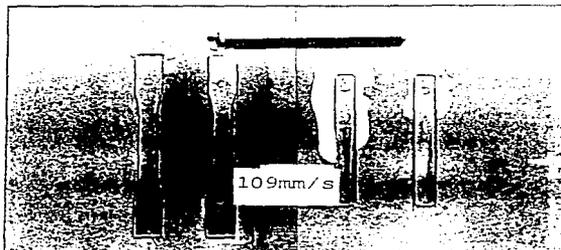


Figura 4.14. Fotografía de probetas procesadas a velocidad de inyección de 109 mm/s.

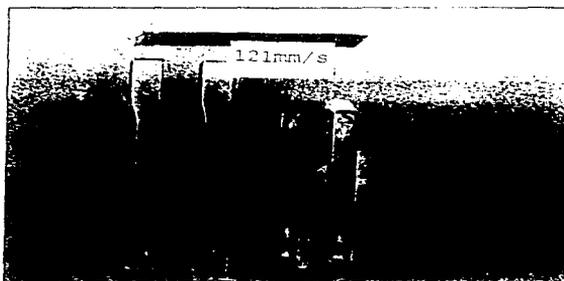


Figura 4.15. Fotografía de probetas procesadas a velocidad de inyección de 121 mm/s.

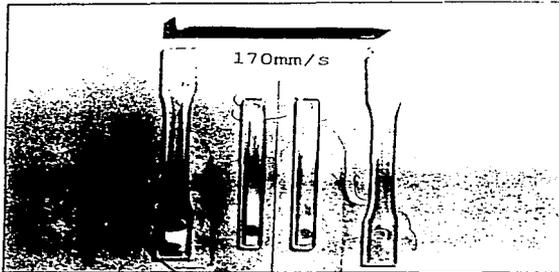


Figura 4.16. Fotografía de probetas procesadas a velocidad de inyección de 170 mm/s.

RESULTADOS Y DISCUSION

4.2. EFECTO DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL PET.

En esta sección se analizan las propiedades mecánicas del PET con respecto a la variación del tiempo de enfriamiento, manteniendo la velocidad de inyección en 85 mm/seg, la contrapresión en 900 psi, rapidez del husillo en 200 RPM y temperatura del molde en 7°C. El tiempo de enfriamiento es el tiempo que permanece la pieza dentro del molde.

En la figura 4.17 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de impacto, esfuerzo a la tensión, esfuerzo al 0.2% de cedencia y esfuerzo a la fractura en función del tiempo de enfriamiento.

Como se puede observar, prácticamente todas estas propiedades permanecen invariables. Sin embargo la propiedad de impacto tiene un marcado aumento a 60 seg.

En la figura 4.18 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de módulo de Young, deformación a la fractura y energía al punto de fractura en función del tiempo de enfriamiento. Se observa que las propiedades anteriores presentan una ligera mejoría a mayor tiempo de enfriamiento; obteniendo mejores resultados a 60 seg.

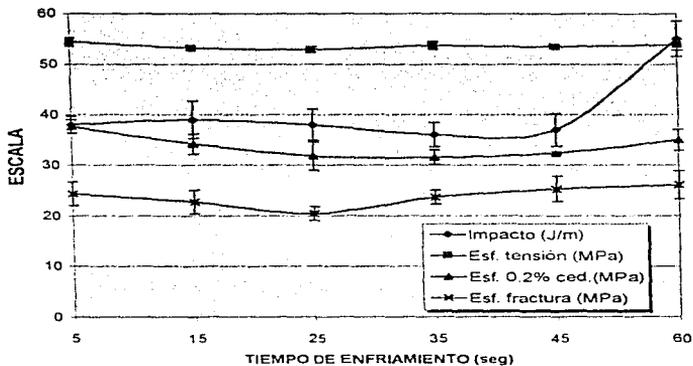
En la figura 4.19 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de deformación a la tensión, deformación al 0.2% de cedencia y energía al punto de cedencia en función del tiempo de enfriamiento. Estas propiedades disminuyen a tiempos intermedios pero aumentan ligeramente a tiempo de 60 seg.

RESULTADOS Y DISCUSION

En las figuras 4.20 y 4.21 se muestran los diagramas de esfuerzo-deformación en función del tiempo de enfriamiento en las cuales se observa mayor deformación para tiempos mayores de enfriamiento. Esto es debido a que a tiempos muy cortos de enfriamiento las probetas salen aun calientes y terminan de enfriarse a temperatura ambiente permitiendo que las moléculas se orienten dando como resultado que las piezas moldeadas cristalicen y por consiguiente adquieran un color blancuzco. Por otro lado, si se incrementa el tiempo de enfriamiento las probetas salen frías y de esta manera se logra que las moléculas no se alcancen a ordenar y por lo tanto se conserva una forma desorientada (amorfa) apreciándose un aspecto transparente en las probetas.

La diferencia de deformación unitaria entre 5 seg y 60 seg es aproximadamente de 1.

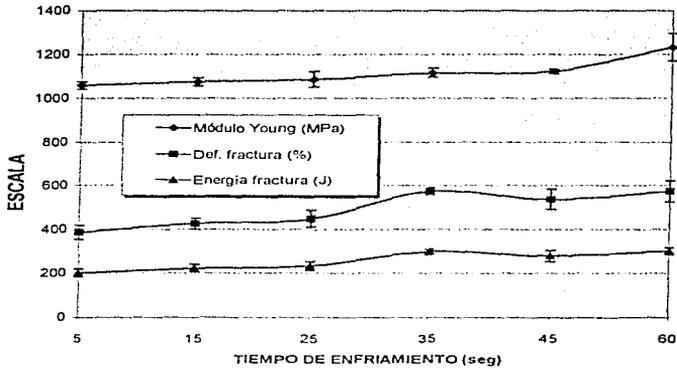
RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
 Temperatura del molde = 7°C
 Rapidez del husillo = 200 RPM
 Velocidad de inyección = 85 mm/s

Figura 4.17. Propiedades mecánicas en función del tiempo de enfriamiento para PET.

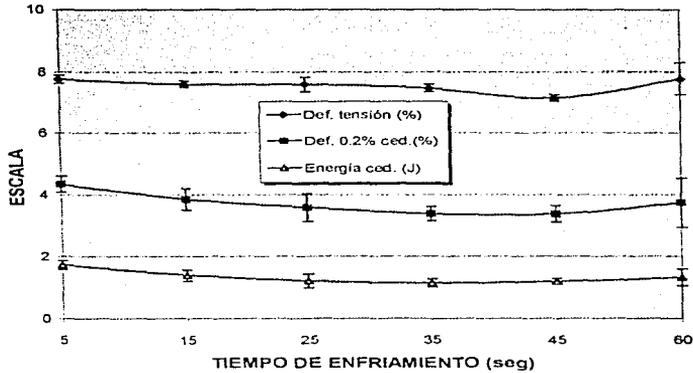
RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
Temperatura del molde = 7°C
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s

Figura 4.16. Propiedades mecánicas en función del tiempo de enfriamiento para PET.

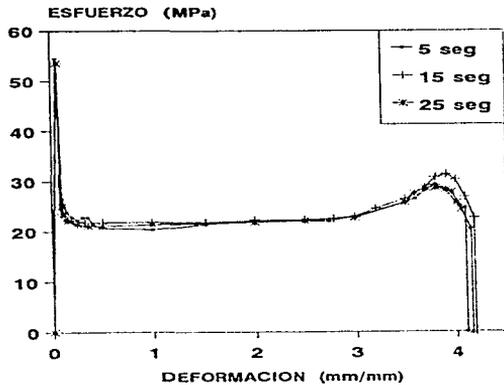
RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
Temperatura del molde = 7°C
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s

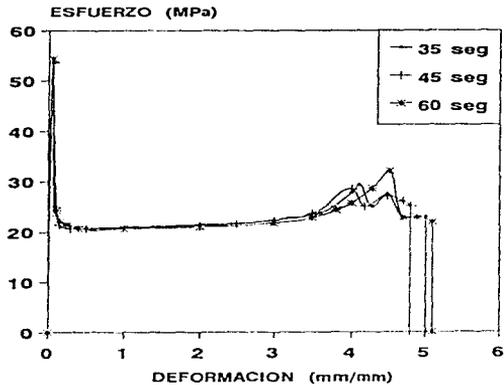
Figura 4.19. Propiedades mecánicas en función del tiempo de enfriamiento para PET.

RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
Temperatura del molde = 7°C
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s

Figura 4.20. Gráfica esfuerzo vs deformación en función del tiempo de enfriamiento para PET.



Contrapresión = 900 psi
 Temperatura del molde = 7°C
 Rapidez del husillo = 200 RPM
 Velocidad de inyección = 85 mm/s

Figura 4.21. Gráfica esfuerzo vs deformación en función del tiempo de enfriamiento para PET.

RESULTADOS Y DISCUSION

4.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL MOLDE EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL PET.

En esta parte se analiza el cambio de propiedades mecánicas del PET con respecto a la temperatura del molde, manteniendo la velocidad de inyección en 85 mm/seg, la contrapresión en 900 psi, la rapidez del husillo en 200 RPM y el tiempo de enfriamiento en 60 seg.

En la figura 4.22 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de impacto, esfuerzo de tensión, esfuerzo al 0.2% de cedencia y esfuerzo de fractura en función de la temperatura del molde.

Como se puede observar la resistencia al impacto es de 55 J/m para temperatura de 7°C y de 46 J/m para 35°C. Esto es aproximadamente un aumento del 16% para la temperatura de 7°C.

El esfuerzo a la tensión se mantiene invariable a ambas temperaturas y, en cuanto a las propiedades de esfuerzo al 0.2% de cedencia y esfuerzo a la fractura ambas presentan una ligera disminución a temperatura de 35°C.

En la figura 4.23 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de módulo de Young, deformación a la fractura y energía al punto de fractura en función de la temperatura del molde. Como se puede observar, las propiedades anteriores siguen una tendencia decreciente, es decir, disminuyen al aumentar la temperatura del molde, obteniéndose en general, buenas propiedades a temperatura de 7°C.

En la figura 4.24 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de deformación a la tensión, deformación al

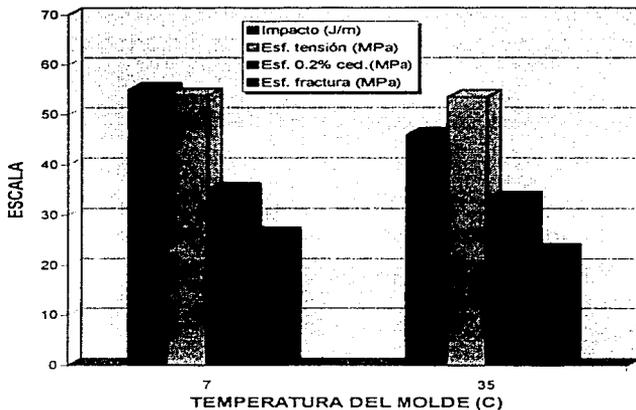
RESULTADOS Y DISCUSION

0.2% de cedencia y energía al punto de cedencia en función de la temperatura del molde.

Las propiedades anteriores disminuyen ligeramente al aumentar la temperatura del molde. Por consiguiente, los mejores resultados se obtienen a temperatura de 7°C.

En general, las propiedades mecánicas anteriores presentan mejores resultados a temperatura del molde de 7°C. Esto se debe a que a estas condiciones de procesamiento las moléculas pierden energía rápidamente y por consiguiente conservan una estructura desordenada (amorfa) dando como resultado una apariencia transparente.

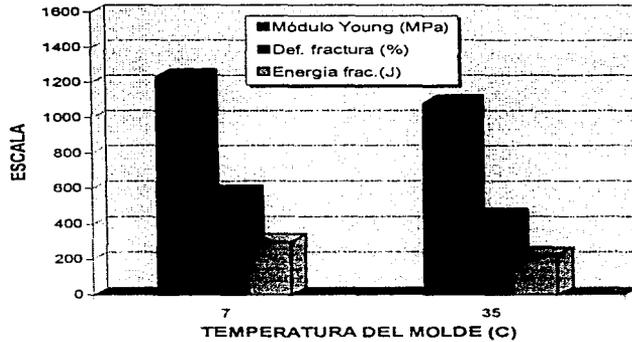
Finalmente en la figura 4.25 se presenta el diagrama esfuerzo-deformación a diferente temperatura del molde donde se muestra que, a menor temperatura, las muestras tienen mayor % de deformación.



Contrapresión = 900 psi
 Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
 Rapidez del husillo = 200 RPM
 Velocidad de inyección = 85 mm/s

Figura 4.22. Propiedades mecánicas en función de la temperatura del molde para PET.

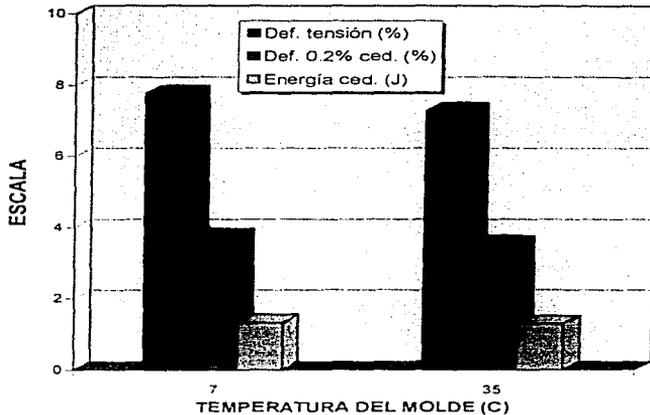
RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s

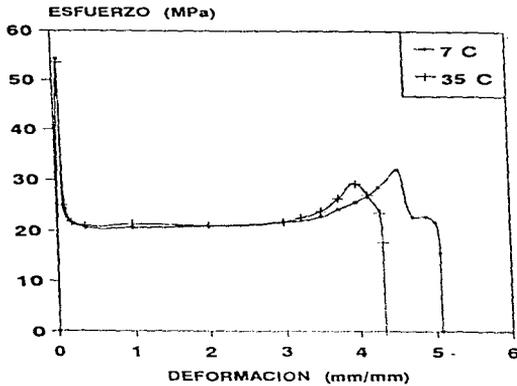
Figura 4.23. Propiedades mecánicas en función de la temperatura del molde para PET.

RESULTADOS Y DISCUSION



Contrapresión = 900 psi
Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s

Figura 4.24. Propiedades mecánicas en función de la temperatura del molde para PET.



Contrapresión = 900 psi
 Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
 Rapidez del husillo = 200 RPM
 Velocidad de inyección = 85 mm/s

Figura 4.25. Gráfica esfuerzo vs deformación en función de la temperatura del molde para PET.

RESULTADOS Y DISCUSION

4.4. EFECTO DE LA CONTRAPRESION EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL PET.

En esta sección se analizan los cambios en las propiedades mecánicas del PET con respecto a la variación de la contrapresión, manteniendo la velocidad de inyección en 85 mm/s, tiempo de enfriamiento en 60 seg, rapidez del husillo en 200 RPM y temperatura del molde en 7°C.

Como se observa en la figura 4.26 las propiedades de impacto, esfuerzo a la tensión y esfuerzo al 0.2% de cedencia se pueden considerar invariables al incrementar la contrapresión, no así para el esfuerzo a la fractura que disminuye.

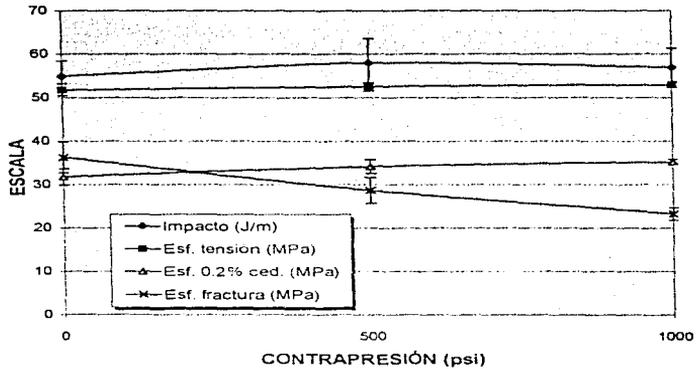
En las figuras 4.27 y 4.28 las propiedades mecánicas módulo de Young, deformación a la fractura y energía a la fractura no sufren cambios significativos al variar la contrapresión por lo que se pueden considerar invariables.

También se puede mencionar que a mayor contrapresión las piezas moldeadas salen más transparentes lo cual indica que su estructura es más amorfa o menos cristalina.

Finalmente en la figura 4.29 se muestra la gráfica de esfuerzo-deformación en la cual se observa que las probetas se deforman casi lo mismo al variar la contrapresión.

Cabe mencionar que a mayor contrapresión las piezas moldeadas salen con rebaba. Esto se debe a que la presión dentro del molde aumenta, permitiendo que ambas mitades del molde se separen.

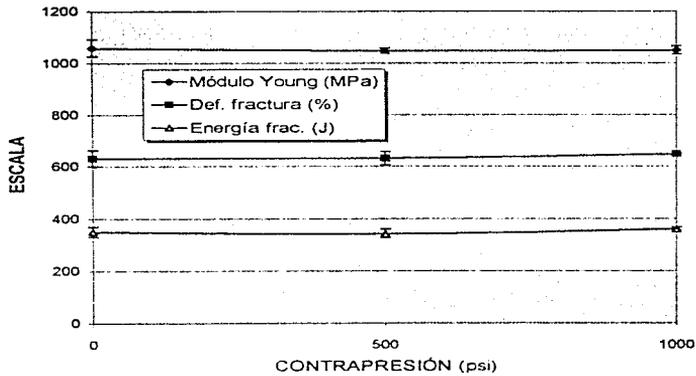
RESULTADOS Y DISCUSION



Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
 Rapidez del husillo = 200 RPM
 Velocidad de inyección = 85 mm/s
 Temperatura del molde = 7°C

Figura 4.26. Propiedades mecánicas en función de la contrapresión para PET.

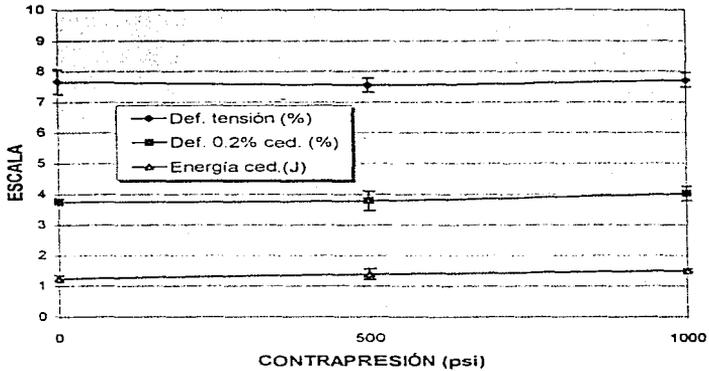
RESULTADOS Y DISCUSION



Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s
Temperatura del molde = 7°C

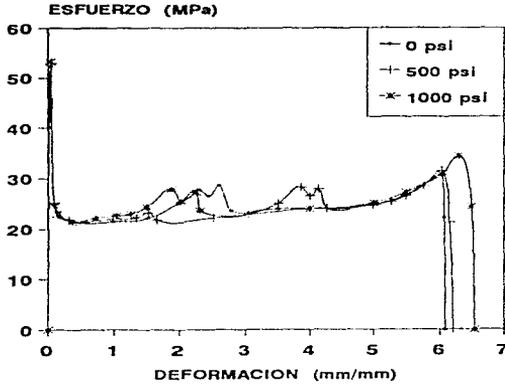
Figura 4.27. Propiedades mecánicas en función de la contrapresión para PET.

RESULTADOS Y DISCUSION



Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s
Temperatura del molde = 7°C

Figura 4.25. Propiedades mecánicas en función de la contrapresión para PET.



Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
 Rapidez del husillo = 200 RPM
 Velocidad de inyección = 85 mm/s
 Temperatura del molde = 7°C

Figura 4.29. Gráfica esfuerzo vs deformación en función de la contrapresión para PET.

RESULTADOS Y DISCUSION

4.5. EFECTO DE LA HUMEDAD DEL MATERIAL EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL PET.

La humedad del material es un factor importante a controlar puesto que el PET es un material higroscópico, es decir, absorbe fácilmente la humedad. La absorción de humedad máxima es de 0.3%.

En esta parte de resultados se analiza la variación de las propiedades mecánicas del PET con respecto a la humedad del material, manteniendo la velocidad de inyección en 85 mm/s, contrapresión en 900 psi, rapidez del husillo en 200 RPM, tiempo de enfriamiento en 60 seg y temperatura del molde en 7 C.

En la figura 4.30 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de impacto, esfuerzo a la tensión, esfuerzo al 0.2% de cedencia y esfuerzo a la fractura en función de la humedad del material. Como se puede observar la resistencia al impacto tiene fuertes cambios con respecto a la humedad, obteniéndose mejores resultados para el PET seco.

En cuanto al esfuerzo a la tensión, el peor valor es el obtenido por el PET totalmente húmedo, manteniéndose para los demás materiales casi invariable.

Por otro lado el esfuerzo al 0.2% de cedencia se mantiene casi invariable para todos los materiales.

El esfuerzo a la fractura es menor para el PET, debido a que se deforma más.

En la figura 4.31 se muestran los resultados de las propiedades mecánicas de módulo de Young, deformación a la fractura y energía a la fractura en función de la humedad del

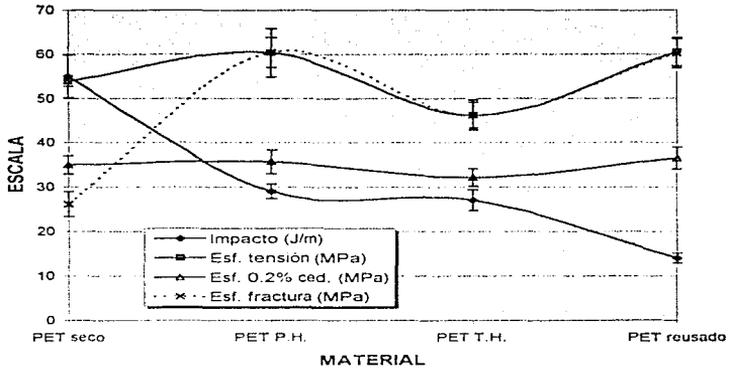
RESULTADOS Y DISCUSION

material. En esta figura se observa que estas propiedades disminuyen conforme aumenta la humedad del material, por lo que el PET es el que posee las mejores propiedades antes mencionadas.

En la figura 4.32 se muestran los resultados de las propiedades mecánicas de deformación a la tensión, deformación al 0.2% de cedencia y energía de cedencia en función de la humedad del material. En esta gráfica se observa que para el PET totalmente húmedo, la deformación a la tensión disminuye, en tanto que las demás propiedades permanecen casi invariables.

De manera general algunas de las propiedades anteriores dan mejor resultado cuando el material está totalmente seco.

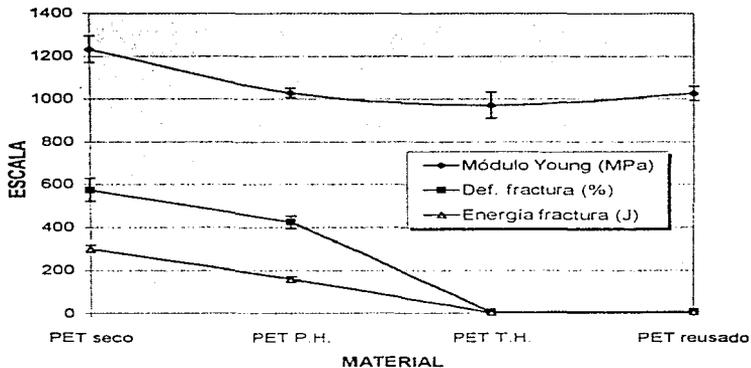
RESULTADOS Y DISCUSION



Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s
Temperatura del molde = 7°C
Contrapresión = 900 psi

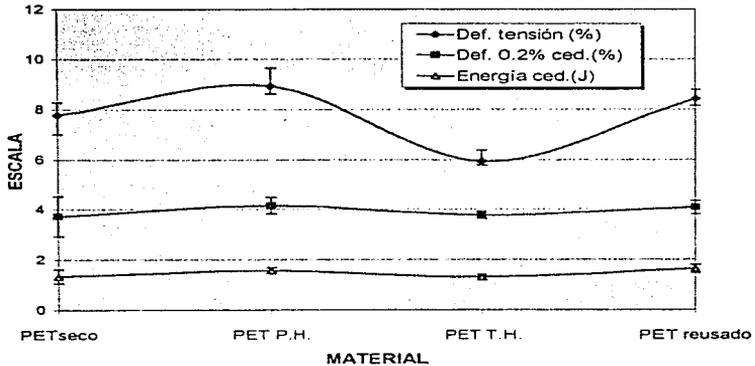
Figura 4.30. Variación de las propiedades mecánicas en función de la humedad del material.

RESULTADOS Y DISCUSION



Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s
Temperatura del molde = 7°C
Contrapresión = 900 psi

Figura 4.31. Variación de las propiedades mecánicas en función de la humedad del material.



Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
 Rapidez del husillo = 200 RPM
 Velocidad de inyección = 85 mm/s
 Temperatura del molde = 7°C
 Contrapresión = 900 psi

Figura 4.32. Variación de las propiedades mecánicas en función de la humedad del material.

RESULTADOS Y DISCUSION

4.6. DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD DE FUNDIDO DEL PET.

En la determinación de la viscosidad del PET se utilizaron 3 capilares con longitudes de 1, 1.435 y 1.957 in. con diámetro de 0.005 in. todos ellos.

Las pruebas se llevaron a cabo en un extrusor de doble husillo modelo TW-100 Haake Rheocord 90 con rapidez del husillo de 40, 60, 80, y 100 RPM. El perfil de temperatura fue de 270, 260, 260 y 260°C. La figura 4.33 muestra la fotografía de este equipo.

Las variables del ensaye a determinar son la presión de salida (psi) y el gasto (g/min).

Utilizando el método de reometría capilar y realizando la corrección de Rabinowitsch se obtienen los resultados para el PET y PET húmedo reportados en las figuras 4.34 y 4.35.

Como se puede observar en estas gráficas, tanto el esfuerzo de corte como la viscosidad de fundido son mayores para el PET seco que para el PET húmedo, lo anterior se debe precisamente a la humedad contenida en el material.

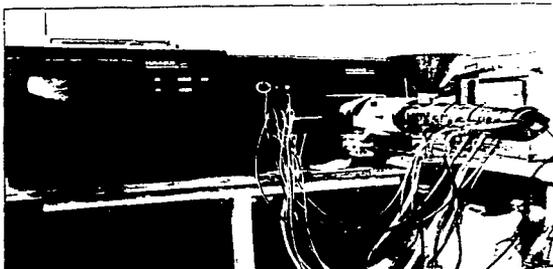


Figura 4.33. Fotografía del equipo Haake Rheocord 90.

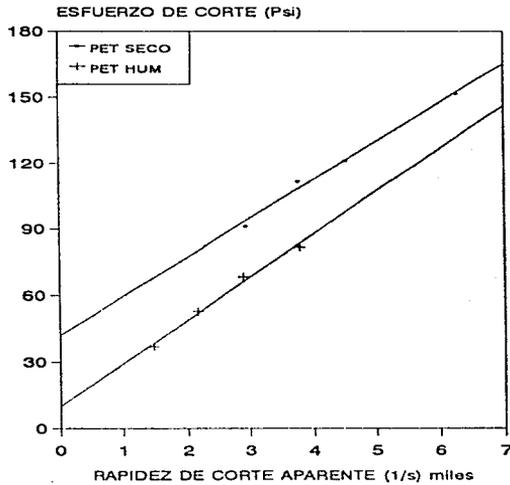


Figura 4.34. Gráfica esfuerzo de corte vs rapidez de corte aparente para PET (*) y PET húmedo (+).

RESULTADOS Y DISCUSION

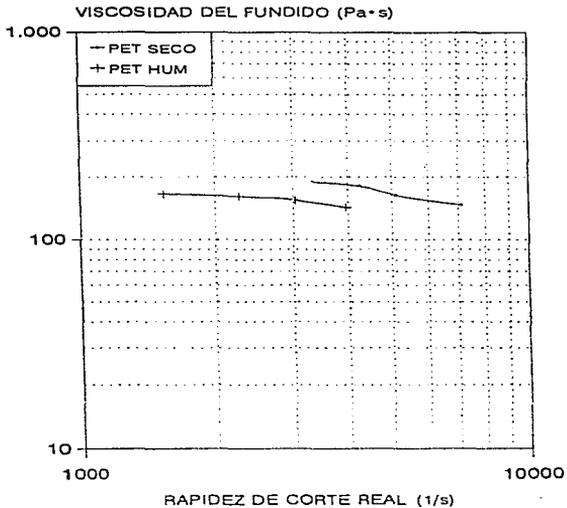


Figura 4.35. Gráfica de viscosidad de fundido vs rapidez de corte real para PET (*) y PET húmedo (+).

RESULTADOS Y DISCUSION

4.6.1. DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE FUNDIDO.

La metodología seguida para determinar la densidad de fundido es la siguiente : el capilar es cargado compactando el material y dando el tiempo suficiente para asegurar que dicho material esté totalmente fundido.

La temperatura a la cual se mantuvo el capilar fue de 260°C y una velocidad de desplazamiento del émbolo de 50 mm/min. El diámetro del embolo es de 3/8 de pulgada.

Con las condiciones anteriores se puede calcular la densidad de fundido , obteniendo los siguientes resultados :

Densidad del PET fundido seco = 1.099 g/cm

Densidad del PET fundido húmedo = 1.152 g/cm

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que la densidad del PET seco es menor a la del PET húmedo, esto se debe a que la masa del PET húmedo es mayor debido a que contiene moléculas de agua en su estructura molecular.

4.6.2. CRISTALINIDAD DEL PET.

En la figura 4.36 se muestran los resultados de la cristalinidad como una función de la velocidad de inyección. En esta gráfica se observa claramente el aumento de la cristalinidad conforme aumenta la velocidad de inyección. Se observa también que a velocidades de 24, 49 y 85 mm/s la cristalinidad aumenta lentamente, pero a velocidades de 121 y 170 mm/s aumenta considerablemente.

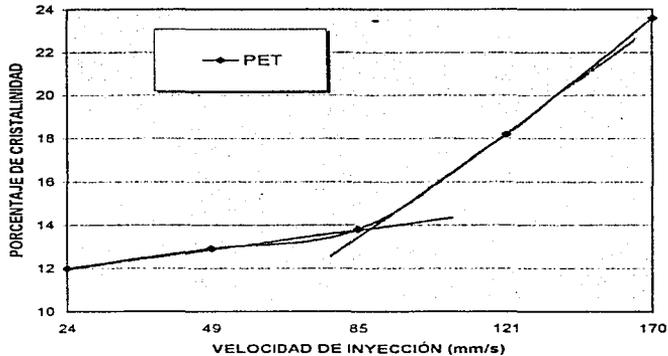
En la figura 4.37 se observa nuevamente que la cristalinidad aumenta al incrementar la temperatura del molde. El aumento de

RESULTADOS Y DISCUSION

crystalinidad se debe a que a temperatura de 35°C las probetas salen aun calientes permitiendo que las cadenas poliméricas se orienten.

Por otro lado, a la temperatura de 7°C las muestras se enfrían más rápido conservando su estructura desordenada y por lo tanto la cristalinidad es menor.

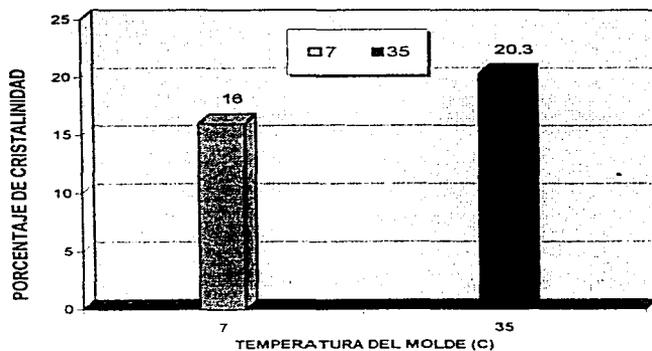
En la figura 4.38 se muestran los resultados de cristalinidad en función del tiempo de enfriamiento. En esta gráfica se observa que la cristalinidad disminuye conforme el tiempo de enfriamiento aumenta; ésto se debe a que las muestras tienen más tiempo para enfriarse dentro del molde y conservar su estructura amorfa.



Tiempo de enfriamiento = 60 seg
 Rapidez del husillo = 200 RPM
 Temperatura del molde = 7°C
 Contrapresión = 900 psi

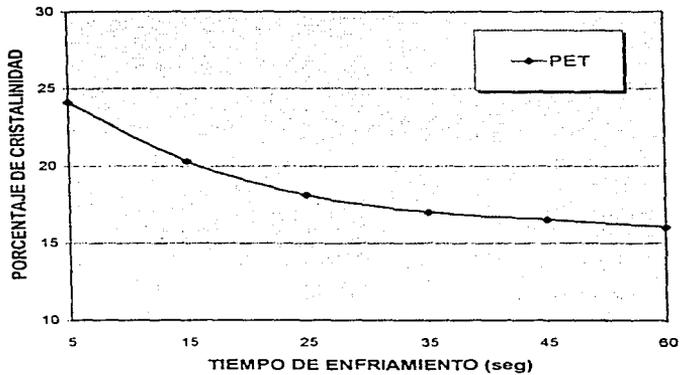
Figura 4.36. Gráfica de cristalinidad en función de la velocidad de inyección.

RESULTADOS Y DISCUSION



Tiempo de enfriamiento = 60 seg.
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s
Contrapresión = 900 psi

Figura 4.37. Gráfica de cristalinidad en función de la temperatura del molde.



Temperatura del molde = 7°C.
Rapidez del husillo = 200 RPM
Velocidad de inyección = 85 mm/s
Contrapresión = 900 psi

Figura 4.38. Gráfica de cristalinidad en función del tiempo de enfriamiento.

CAPITULO 5**CONCLUSIONES**

De los resultados obtenidos en la presente investigación se presentan las siguientes conclusiones:

A.-VELOCIDAD DE INYECCION.

Los resultados para el PET seco muestran que las propiedades mecánicas de impacto, deformación a la fractura y energía a la fractura disminuyen notablemente cuando se procesa a velocidades mayores a 85 mm/s (109,121,170 mm/s). A esta velocidad (85 mm/s) la resistencia al impacto es mayor que a cualquier otra. Esto indica que esta velocidad de procesamiento es la correcta y que el PET, comparado con el PET reusado, es mejor en cuanto a sus propiedades mecánicas se refiere.

De la figura 4.9 se concluye que existe una velocidad de inyección límite después de la cual se presenta un aumento considerable en la presión de inyección, esta es de 85 mm/s. Además a partir de esta velocidad la cristalinidad aumenta considerablemente por lo que algunas de sus propiedades mecánicas disminuyen.

B.-TEMPERATURA DEL MOLDE.

Particularmente, se obtienen mejores resultados a la temperatura de 7°C. Esto se debe a que a esta temperatura las muestras se enfrían rápidamente teniéndose una cristalinidad menor. Este fenómeno se manifiesta como un incremento en las propiedades mecánicas de impacto, módulo de Young, deformación a la fractura y energía a la fractura.

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

CONCLUSIONES

Finalmente y en base a los resultados obtenidos se concluye que la mejor temperatura de procesamiento determinada es de 7°C, debido a que a esta temperatura las piezas moldeadas obtienen buenas propiedades mecánicas, y menor cristalinidad comparadas con las obtenidas a 35°C.

C.-TIEMPO DE ENFRIAMIENTO.

Como se observó las propiedades de deformación a la fractura, módulo de Young y resistencia al impacto tienen un máximo valor al tiempo de enfriamiento de 60 seg. A este tiempo de enfriamiento las propiedades anteriores tienen un aumento notable, sobre todo la resistencia al impacto. Lo anterior se debe a que a menor tiempo de enfriamiento las piezas moldeadas salen aun calientes y se enfrían a temperatura ambiente permitiendo que cristalicen; esto provoca que el polímero sea quebradizo.

Finalmente y en base a lo anterior se concluye que el tiempo de enfriamiento encontrado es de 60 seg.

D.-CONTRAPRESION.

Como se apreció, la deformación a la fractura no sufre cambios importantes por lo que se pueden considerar constante.

El resto de las propiedades permanecen sin cambios de importancia. En base a lo anterior se puede concluir que la contrapresión es un parámetro que influye poco en las propiedades.

Finalmente se concluye que la contrapresión de operación de la máquina debe ser de 900 psi, pues de lo contrario si se aumenta, las muestras salen con rebaba.

CONCLUSIONES

E.-HUMEDAD DEL MATERIAL.

La humedad del material es un factor que debe ser cuidadosamente controlado ya que la resina PET es un polímero higroscópico, es decir, absorbe fácilmente la humedad del medio ambiente. Esto hace que las propiedades mecánicas disminuyan drásticamente.

Los mejores resultados se dan cuando el material está totalmente seco. Esto se debe a que la humedad (ver reacción de hidrólisis) provoca que la reacción se lleve a cabo en sentido inverso.

Finalmente se concluye que para obtener buenos resultados, es imperativo mantener los parámetros de proceso invariables y que el material debe ser secado rigurosamente.

Por otro lado, el PET tiene mayor viscosidad que el PET húmedo como era de esperarse, lo anterior demuestra que la humedad degrada el material por lo que la viscosidad, el esfuerzo de corte y las propiedades mecánicas disminuyen.

APENDICE I

PROPIEDADES MECANICAS.

1.-Deformación a la tensión (%) : se define como la deformación máxima que sufre la muestra antes de formarse el cuello en la probeta.

2.- Esfuerzo a la tensión (MPa) : se define como el esfuerzo máximo para hacer que la muestra ceda notoriamente, es decir, se forme el cuello en la probeta.

3.-Deformación a la fractura (%) : se define como la deformación que sufre la muestra justo antes de romperse.

4.- Esfuerzo a la fractura (MPa) : se define como el esfuerzo máximo que tiene la muestra justo al momento de romperse.

5.-Deformación al 0.2% de cedencia (%) : se define como la deformación que sufre la probeta al deformarse 0.2% más allá del límite elástico.

6.-Esfuerzo al 0.2% de cedencia (MPa) : se define como el esfuerzo máximo que tiene la probeta al deformarse 0.2% más allá del límite elástico.

7.-Módulo de Young (MPa) : se define como la constante de proporcionalidad " E " que relaciona el esfuerzo " σ " con la deformación " ϵ ".

De esta manera se tiene :

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{ó} \quad E = \sigma/\varepsilon$$

El Módulo de Young o módulo elástico tiene unidades de libras por pulgada cuadrada; pero no es un valor de esfuerzo. E se determina a partir de la curva esfuerzo y deformación, midiendo la pendiente de la porción lineal de la línea recta de la gráfica.

8.-Energía al punto de cedencia (J) : se define como el área bajo la curva de esfuerzo deformación, desde el origen hasta el punto de cedencia.

9.-Energía al punto de fractura (J) : se define como el área bajo la curva de esfuerzo y deformación, desde el origen hasta el punto de fractura. El área bajo la curva representa la energía absorbida por pulgada cúbica del material, hasta el punto de fractura.

APENDICE II

POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) .

Para visualizar el consumo industrial del PET respecto a algunos plásticos, se presenta la siguiente tabla:

TABLA I. CRECIMIENTO DEL CONSUMO INDUSTRIAL DEL PLASTICO.*
Miles de Toneladas

PLASTICO	1994	1995	%
PET	67	103	53.7
PEAD	307	295	(3.9)
PELBD	53	130	145.3
PVC	255	250	(1.9)
PP	237	254	7.2
PS	181	189	4.4
PEBD	360	314	(12.8)
TERMOFIJOS	380	371	(2.4)
TECNICOS	46	48	4.3
OTROS	114	111	(2.6)
TOTAL	2000	2065	3.2

* datos proporcionados por el impi.

Los números entre paréntesis indican un decremento en el consumo industrial.

APENDICES

Para el PET se tiene un crecimiento positivo en el consumo industrial del 53.7 % en el año de 1995.

POLI (TEREFTALATO DE ETILENO)

TABLA II. Miles de Toneladas

	1994	1995
PRODUCCION	55	130
EXPORTACION	6	41
IMPORTACION	18	14
CAPACIDAD INSTALADA	130	160
CONSUMO APARENTE	67	103

APENDICE III

FALLAS MAS COMUNES PRESENTADAS DURANTE EL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCION.

Es muy importante mencionar los problemas o fallas más comunes que se presentaron durante el proceso de moldeo por inyección, originadas por inyectar la resina PET en condiciones no óptimas, obteniéndose piezas defectuosas; así como las causas y sus posibles soluciones.

I. Cuando las piezas salen incompletas.

CAUSA	SOLUCION
Material muy frio.	a. Aumentar la temperatura del cilindro de plastificación
Presión de inyección baja.	a. Aumentar la presión de inyección.
Parada de dosificación corta.	a. Aumentar la parada de dosificación.

II. Cuando las piezas salen con rebaba.

CAUSA	SOLUCION
Material demasiado caliente.	a. Reducir la rapidez del husillo (RPM). b. Disminuir la temperatura del cilindro de plastificación. c. Disminuir la velocidad de inyección.

APENDICES

- | | |
|-----------------------------------|---|
| Presión de inyección alta. | a. Disminuir la presión de inyección. |
| Presión de cierre del molde baja. | a. Aumentar la presión de cierre del molde. |
| Ajuste defectuoso del molde. | a. Ajustar nuevamente el molde. |

III. Cuando las piezas se deforman después de salir del molde.

CAUSA

SOLUCION

- | | |
|---|---|
| Piezas aún muy calientes. | a. Aumentar el tiempo de enfriamiento.
b. Reducir la temperatura del cilindro de plastificación. |
| Cuando las piezas moldeadas de sección gruesa se deforman por su propio peso. | a. Sumergir la pieza en agua fría enseguida de salir del molde. |

IV. Contracciones o marcas de encogimiento en la superficie de la pieza.

CAUSA

SOLUCION

- | | |
|--|---|
| Contracción térmica del material al enfriarse. | a. Aumentar el tiempo de permanencia del pistón en el máximo de su carrera.
b. Aumentar la presión posterior |
| Insuficiente inyección de material en las cavidades. | a. Aumentar la alimentación.
b. Aumentar el tiempo de enfriamiento |
| Si la pieza es extraída muy caliente. | a. Reducir la temperatura del molde. |

APENDICES

Velocidad de inyección lenta.	a. Aumentar la velocidad de inyección.
Si el material está muy caliente.	a. Regular la temperatura del cilindro de plastificación.

V. Si las piezas tienen marcas de flujo en la superficie.

CAUSA	SOLUCION
Si el material está muy frío.	a. Aumentar la temperatura del cilindro de plastificación.
Si el material está muy húmedo.	a. Secar muy bien el material.
Si el material se quema en el cilindro de plastificación.	a. Reducir el calentamiento y aumentar el ciclo.

VI. Cuando las piezas tienen burbujas en su interior.

CAUSA	SOLUCION
Generalmente son causadas por encogimientos internos después de solidificarse la superficie.	a. Aumentar la velocidad de inyección. b. Aumentar el tiempo de enfriamiento

APENDICE IV

DEFINICION DE TERMINOS.

TEMPERATURA DE TRANSICION VITREA. El centro del intervalo de temperaturas en el que un termoplástico amorfo o cristalino caliente en curso de enfriamiento cambia desde un estado de líquido viscoelástico al de un vidrio quebradizo.

ESFUERZO CORTANTE (τ) : es la relación entre la fuerza aplicada (F) por unidad de área (A) que causa el movimiento del fluido.

$$\tau = F/A$$

VISCOSIDAD. : es una medida de la resistencia al flujo o de la deformación de un fluido al actuar sobre él un esfuerzo cortante (τ) que da lugar a esfuerzos que se oponen al movimiento. La viscosidad según Newton (μ) se caracteriza cuando el esfuerzo tangencial que actúa entre dos láminas de igual área (A) separadas una distancia (dy), y que se desplazan con una velocidad (dv) es proporcional al gradiente transversal de velocidad dv/dy.

A la constante de proporcionalidad se le conoce como viscosidad absoluta o dinámica (μ) y se aplica para flujo laminar.

$$\tau = F/A = \mu \, dv/dy$$

FLUIDO NEWTONIANO : es aquel que establece una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado (τ) y la rapidez de corte

(γ). Su comportamiento reológico se describe mediante la ley de la viscosidad de Newton.

FLUIDO NO-NEWTONIANO : a diferencia de los Newtonianos éstos poseen una viscosidad que es función de la rapidez de corte (γ).

RAPIDEZ DE CORTE (γ) : también se le conoce como el gradiente de velocidad en el cual las capas intermedias se mueven cada una con respecto a las otras, debido al esfuerzo cortante aplicado.

VISCOSIDAD INTRINSECA, viscosidad límite o índice de Staudinger, $[\eta]$, es el valor de la viscosidad reducida a dilución infinita; se obtiene extrapolando a $C=0$, donde C es la concentración que generalmente se expresa en g/cm^3 .

$$[\eta] = \left[\frac{\eta_{sp}}{C} \right]_{C=0}$$

donde :

η_{sp} : viscosidad específica.

$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1$

η_{rel} : viscosidad relativa

$\eta_{rel} = \eta/\eta_0$

η : viscosidad de la disolución

η_0 : viscosidad del disolvente puro

BIBLIOGRAFIA

- 1.-Robert A.Malloy."Plastic Part Design for Injection Molding a Introduction".1994.
- 2.-R.M.Ogorkiewicz."Termoplásticos: Influencia de los Procesos de Transformación en sus Propiedades".1972.
- 3.-D.H.Morton-Jones."Procesamiento de Plásticos".Ej. 3,1993.
- 4.-F.Johannaber."Injection Molding Machines a user's guide".3rd. edition.1994.
- 5.-J.Harry Dubois, Frederick W.Jhon."Plastics".1991.
- 6.-Herbert R.Simonds."The Encyclopedia of Plastics Equipment". 1968.
- 7.-Dominick V.Rosato, Donald V.Rosato."Injection Molding Handbook".1985.
- 8.-J.Delmonte, J.Monteso."Moldeo de Plásticos".1967.
- 9.-Herman F.Mark, Norbert M.Bikales."Encyclopedia of Polymer Science and Engineering".Vol. 8, 102-114 (1985).
- 10.-Irvin Y.Rubin."Handbook of Plastic Materials and Technology".1990.
- 11.-Herman F.Mark, Norbert M.Bikales."Encyclopedia of Polymer Science and Engineering".Vol. 2, 189-191 (1985).
- 12.-Ignacio Cruz Claudia, Sanchez Rodriguez Sonia."Tesis".Facultad de Química UNAM. pp 12, 1991.
- 13.-Donald V.Rosato, Dominik V.Rosato."Plastics Processing Data Handbook".1989.

BIBLIOGRAFIA

- 14.-Arthur W.Birley, B.Haworth and Jim Batchelor."Physics of Plastics".Ej. 3, 1991.
- 15.-F.N.Cogswell."Polymer Melt Rheology".1981.
- 16.-Herman F.Mark, Norbert M.Bikales."Encyclopedia of Polymer Science and Engineering".Vol. 3, 761 (1985).
- 17.-Edith A.Turi."Thermal Characterization of Polymeric Materials".1981.
- 18.-R.J.Ehrig, Editor. Plastics Recycling Products and Processes, 1992.
- 19.-Toshiro Yamada.Polymer Journal;Vol. 24,pp 43-61 (1992).
- 20.-A.Whalen and J.L.Craft."Developments in Plastics Technology". Vol. 2, (1985).
- 21.-Boletin Tecnico 1.Celanese Mexicana S.A.Diciembre,1992.
- 22.-L.Quintanilla, M. Alonzo,Journal of Applied Polymer and Science.Vol. 59, pp 769-774 (1996).
- 23.-ASTM D256-92, American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 8.01 (1993).
- 24.-Roger P Brown."Handbook of Plastics Test Methods".1988.
- 25.-Giles F.Carter and Donald E.Paul."Materials Science and Engineering".1991.
- 26.-W.Brostow, R.D.Corneliusen."Failure of Plastics".1986.
- 27.-Herman F.Mark, Norbert M.Bikales."Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", Vol. 8, 37-67 (1985).
- 28.-ASTM D638-91, American Society for Testing and Materials,

BIBLIOGRAFIA

- Annual Book of ASTM Standards, Vol. 8.01 (1993).
- 29.-Lawrence E.Nielsen."Polymer Rheology".1a. ed. Marcel Dekker.
1977.
- 30.-Fried J.R."Plastics Engineering". Vol. 3, 41-44, Feb.1984.
- 31.-John M.Dealy and Kurt F.Wissbrun."Melt Rheology and its role
in plastic processing".1990.
- 32.-E.B.Bagley, J. Appl. Phys., 28,624 (1957).
- 33.-James L.White Twin Srew Extrusion New York,USA Ed.Hanser.1991