

EFFECTO DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN SOBRE EL COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN EN POLÍMEROS

ROSA MORALES¹, MARÍA CANDAL¹, JENNIFER ROBLES²

¹Universidad Simón Bolívar. Grupo de Polímeros.

Departamento de Mecánica. Sección de Polímeros. Caracas. Venezuela

²Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas, Apartado Postal 89000, Caracas, 1080-A, Venezuela

e-mail: rmorales@usb.ve; mcandal@usb.ve

Recibido: enero de 2009

Recibido en forma final revisado: septiembre de 2009

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue analizar el comportamiento del coeficiente de endurecimiento por deformación (Gp) en materiales plásticos, para diferentes condiciones de inyección y velocidades de deformación durante el ensayo mecánico. Se inyectaron probetas tipo I de Polietileno de Alta Densidad (PEAD 2811) modificando las variables del proceso de inyección (presión, velocidad y temperatura de inyección). Se evaluaron las propiedades tensiles y se determinaron los parámetros mecánicos (Módulo de Young, Esfuerzo y Deformación a la fluencia y Gp). Se encontró que el Gp disminuye con la presión de inyección y se mantiene constante al incrementar la temperatura de inyección, sin embargo, con la velocidad de inyección presenta una dualidad de comportamientos, es decir a bajas velocidades de ensayo aumenta, mientras que a altas velocidades disminuye el coeficiente. También se obtuvo que a medida que la velocidad de deformación aumenta el Gp disminuye.

Palabras clave: Coeficiente de endurecimiento por deformación, Inyección, Temperatura de inyección, Presión de inyección, Propiedades mecánicas, Polietileno de alta densidad.

EFFECT OF THE MOLDING PROCESS ON THE STRAIN HARDENING INDEX BY DEFORMATION IN POLYMERS

ABSTRACT

The main objective of this study was to analyze the behavior of the strain hardening coefficient (Gp) in plastic materials, for different injection molding conditions and the strain rate during a mechanical test. Test specimen type I of High Density Polyethylene (HDPE 2811) was injected under different process conditions (injection pressure, injection temperature and injection velocity). The tensile properties were evaluated and the mechanical parameters (Young modulus, yield stress, yield strain and Gp) were determined. Gp decreases with injection pressure, and remains constant by increasing injection temperature; however, with injection velocity, it presents a mixed behaviour. A low velocity generated an increase of the Gp and a high velocity decreases the Gp. Also, the Gp decreases with an increase in the strain rate.

Keywords: Strain hardening index, Injection molding, Injection temperature, Injection pressure, Mechanical properties, High density polyethylene.

INTRODUCCIÓN

La resistencia mecánica de un material depende de su capacidad para soportar una carga sin deformación excesiva o falla. Esta propiedad es inherente del material y debe determinarse por experimentación. Para ello se han desarrollado diferentes ensayos a fin de evaluar la resistencia de un material bajo cargas estáticas, cíclicas, de duración prolongada o por impulso. De dichos ensayos se extrae una curva esfuerzo-deformación que proporciona datos sobre cómo es

la resistencia de un material, sin considerar el tamaño o la forma geométrica, y que sólo dependerá de la composición del material, imperfecciones cristalinas, condiciones de fabricación, velocidad y temperatura durante el ensayo.

A partir de estas curvas, es posible determinar diferentes tipos de comportamiento, así como etapas durante el proceso de deformación (dependientes del tipo de material ensayado), donde se puede resaltar, según Young, 1986; Hibbeler, 1998; y Askeland, 2004 (figura 1):

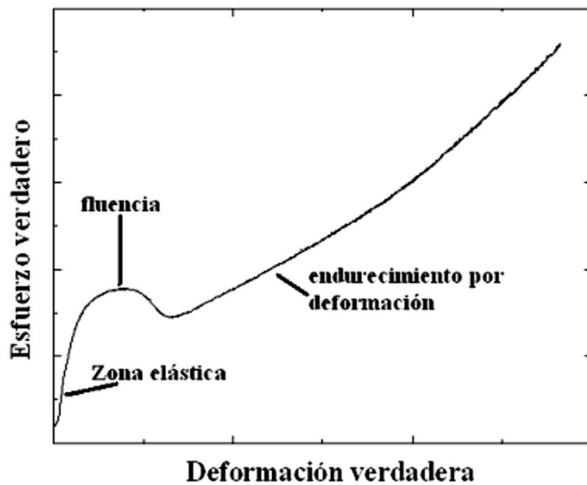


Figura 1. Curva típica de esfuerzo vs. deformación.

- *Comportamiento elástico*: es detectable a muy bajas deformaciones y se caracteriza por ser un proceso reversible, en el que el material almacena energía, por lo que, cuando cesa la fuerza externa, el material en esa zona es capaz de volver a su estado inicial, liberando la energía acumulada. Por lo general, la zona elástica coincide con la zona lineal de la curva esfuerzo-deformación, pudiendo emplear la relación de la ley de Hooke, la cual es válida sólo para la zona elástica-lineal, donde la constante E se denomina Módulo de Elasticidad o de Young.
- *Fluencia*: ocurre una vez que se sobrepasa el límite elástico de esfuerzo en el cual se realiza un proceso de deformación plástica, por lo que el material no será capaz de recuperarse completamente una vez retirada la carga.
- *Endurecimiento por deformación*: es una etapa que ocurre una vez sobrepasada la fluencia y habiéndose formado el cuello, y ocurre justo por los cambios de estructura cristalina en el material, por lo cual sólo ocurre en polímeros semicristalinos, de manera tal que es posible obtener una resistencia a deformaciones adicionales.

Se ha reportado en la literatura (Viana, 2005) que las variables del proceso de inyección pueden inducir cambios morfológicos en la proporción piel-núcleo, las cuales alteran directamente el comportamiento mecánico de los materiales plásticos. Debido a que la interacción de todos estos factores pueden afectar el comportamiento del producto acabado, se estudió en el presente trabajo el efecto que causa en las propiedades mecánicas, en particular en el fenómeno de endurecimiento por deformación, la modificación de las variables del proceso de inyección y el efecto que causa la orientación inducida en el proceso. Entre los factores que afectan el proceso de deformación en materiales plásticos, la temperatura y la velocidad de deformación suelen definir

el punto donde se observa la transición entre el comportamiento dúctil-frágil, los cuales son capaces de controlar la competencia entre los mecanismos de deformación. La determinación de esta temperatura establece que, tanto el esfuerzo de ruptura como el de fluencia, son parámetros independientes entre sí pero dependientes de la velocidad de deformación y la temperatura, por lo que la falla se dará en aquel que requiera menos esfuerzo aplicado (Viana, 2005).

Dada la importancia del PEAD en el proceso de inyección, y del aumento de productos fabricados en dicho material en aplicaciones de envases, tapas y juguetes, se ha hecho necesario el estudio de la variación de sus propiedades inducidas por el proceso, de manera de ampliar el rango de uso y aplicabilidad de dichas resinas, además para extender el rango del material en zonas de grandes solicitaciones.

Debido a la modificación en la estructura morfológica que causan las variables del proceso de inyección sobre el polímero inyectado, es importante estudiar los parámetros mecánicos característicos del material con base en éstas, ya que proporcionan una idea de su comportamiento de acuerdo al proceso de transformación, permitiendo conocer el efecto de cada una de las variables, y así mismo lograr conseguir la condición más óptima de acuerdo a la mejor propiedad que se esté buscando. Por otra parte es importante reconocer que el estudio del coeficiente de endurecimiento por deformación permitirá identificar la verdadera resistencia del material cuando esté sometido a grandes deformaciones.

El endurecimiento por deformación (γ) es definitivamente el parámetro más relevante en el fenómeno de formación de cuello, con la presencia de una inestabilidad plástica. En cualquier material que se presente este tipo de inestabilidad, la misma está gobernada por el Criterio de Considere, de acuerdo con la siguiente expresión (ecuación (1)):

$$\gamma = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln (1 + \epsilon)} < 1 \quad (1)$$

donde:

γ es el coeficiente de endurecimiento por deformación, σ es el esfuerzo y ϵ es la deformación lineal local. En particular, se considera este factor como la derivada de la curva del logaritmo del esfuerzo en función del logaritmo de la relación de estiramiento (Seguela, 2007).

Para el caso de materiales semicristalinos, las variaciones son producto de la deformación inducida por modificaciones en la morfología cristalina y topología de la cadena. La relación de estiramiento es, por lo tanto, una manifestación

externa del proceso de deformación del material, el cual depende de sus características específicas y puede ayudar a predecir las propiedades de polímeros semicristalinos. Por este motivo, el fenómeno de endurecimiento de una serie de polímeros termoplásticos ha sido estudiado por algunos autores a partir de ensayos de tracción mediante curvas de esfuerzo/deformación verdadera realizados a velocidad de deformación constante (Seguela, 2007; Gaucher-Miri *et al.* 1996).

Este fenómeno ha sido estudiado por otros autores en polímeros amorfos (Van Melick *et al.* 2003). A partir de experimentos bajo compresión uniaxial obtuvieron que el módulo de endurecimiento por deformación es proporcional a la densidad de enredos moleculares (obtenida mediante experimentos dinámico - mecánicos), y no a la naturaleza química de los enlaces, a temperatura ambiente. Sin embargo, al aumentar la temperatura, el módulo disminuye, relacionando este comportamiento a la influencia de la movilidad térmica de las cadenas. Adicionalmente, tomando los valores reportados por Van Melick *et al.* (2003) y Mergler *et al.* (2004) encontraron correlación entre este fenómeno de endurecimiento por deformación con la resistencia al desgaste y friccional en mezclas de polímeros amorfos.

Por su parte, Kurelec *et al.* (2005) han denominado al módulo de endurecimiento por deformación, el cual lo calculan a partir de la siguiente expresión:

$$(2) \quad G_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\lambda_{i+1} - \lambda_i}$$

donde:

σ es el esfuerzo verdadero y λ es la deformación verdadera

expresada como una relación adimensional. N está definido como el rango promedio entre el comienzo de la zona de endurecimiento por deformación y por debajo de la elongación máxima en la curva esfuerzo/deformación verdadera. Esta zona de la curva esfuerzo-deformación verdadera se considera que ha sido homogéneamente deformada una vez alcanzada la zona de deformación plástica del material, la cual puede ser determinada visualmente observando la propagación del cuello y por debajo de la máxima relación de estiramiento. Por esta razón, lo que en realidad se calcula es una pendiente en esta zona, la cual debe ser común para todas las condiciones a evaluar. Estos autores relacionaron la resistencia al ESCR en PEAD con el módulo de endurecimiento por deformación G_p mediante ensayos tensiles a 80 °C. Mencionan que la pendiente de la curva de esfuerzo/deformación por encima de la relación de estiramiento, es decir, G_p muestra buena correlación con el esfuerzo determinado. Un material con un alto G_p podría reducir la velocidad de deformación y por consiguiente el tiempo de falla podría aumentar significativamente.

Con base en estos estudios, con el presente trabajo se busca analizar el comportamiento del coeficiente de endurecimiento por deformación (G_p) en materiales plásticos, para diferentes condiciones de inyección y velocidades de deformación durante el ensayo mecánico.

TÉCNICAS EXPERIMENTALES

El material empleado para este estudio fue polietileno de alta densidad, grado inyección de casa comercial Venelene PEAD 2811, de aplicación en envases de pared delgada de uso doméstico, juguetes y tapas, cuyas propiedades físicas y mecánicas están reportadas en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del PEAD Venelene 2811.

PROPIEDAD	NORMA	UNIDADES	VALOR
Densidad	D792	gr / cm	0,953
MFI (190 / 2,16)	D1238	gr / 10 min	30
ESCR (F50 / 10% Igepal)	D1693	H	1
Esfuerzo a la fluencia	D638	MPa	21
Deformación a la fluencia	D638	%	19
Esfuerzo a la ruptura	D638	MPa	13
Deformación a la ruptura	D638	%	> de 500

Se inyectaron probetas de tracción tipo I en un molde de dos cavidades en una máquina de inyección REED de 100 toneladas de fuerza de cierre con un perfil de temperaturas de 130 a 170 °C utilizándose un ciclo óptimo de operación de tiempo de pistón adelantado de 15 seg., tiempo de molde cerrado de 30 seg. y tiempo de molde abierto de 1 seg. Se modificaron las variables de proceso (Presión de inyección, Velocidad de inyección y Temperatura de inyección), como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de proceso de inyección modificadas durante el estudio.

Condición	Presión de inyección (MPa)	Temperatura de inyección (°C)	Velocidad de inyección (cm ³ /seg)
1	6	170	8
2	7	170	8
3	8	170	8
4	6	170	12
5	6	70	6
6	6	180	8
7	6	190	8

Se procedió a evaluar las propiedades mecánicas a tensión en una máquina de ensayos universales Lloyd Instrument, modelo EZ20. Se modificó la velocidad del ensayo, teniendo un rango de variabilidad de 10, 25, 50 y 75 mm/min para obtener las curvas esfuerzo-deformación. Se evaluaron los parámetros mecánicos característicos en cada una de las zonas de dicha curva.

Antes de ensayar cada una de las probetas, fue necesario identificar la zona de estudio, es decir, el rango de deformación necesario de acuerdo al reportado por la norma ASTM 638-03, 50 mm (figura 2). En cada uno de estos ensayos

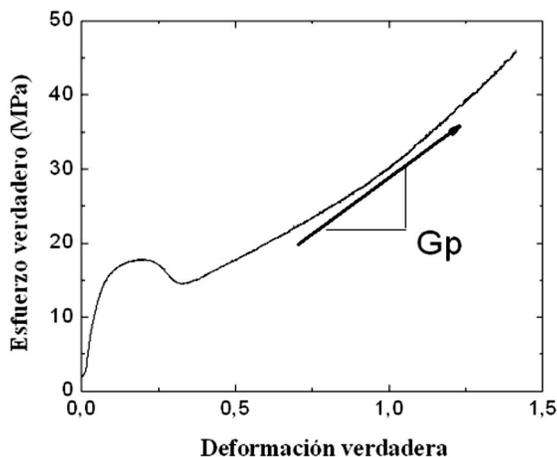


Figura 2. Curvas esfuerzo-deformación para la determinar G_p .

se utilizaron 5 probetas por condición. Adicionalmente, se impuso un límite de recorrido en la máquina de ensayos universales para garantizar que no ocurra deformación geométrica de la probeta y se identificó una zona de ensayo en cada probeta, como se muestra en la figura 3.

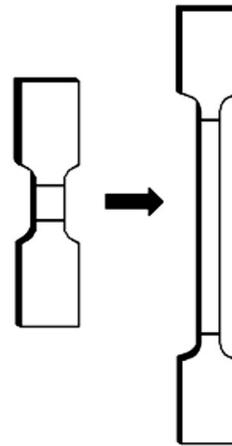


Figura 3. Marcas en la probeta de tracción (a) antes y (b) después de la propagación del cuello.

Una vez obtenidas las curvas esfuerzo verdadero-deformación verdadera para las diferentes condiciones ensayadas siguiendo el modelo aplicado por Kurelec *et al.* (2005), se determinó el coeficiente de endurecimiento por deformación (G_p) en la región plástica del material una vez que la probeta ha sido homogéneamente deformada (figura 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se observa en esta figura, la deformación plástica a diferentes velocidades de ensayo y/o diferentes temperaturas ocurre dentro de dicha zona, ya que de lo contrario se estaría deformando un área mayor a la del cuello de la probeta y entonces la fuerza registrada en el ensayo no estaría asociada a la zona de interés. En la medida en que disminuye la zona de estudio, se garantiza un mejor reporte de las propiedades mecánicas, ya que se está asegurando una región con mejor exactitud de los resultados, en base a lo reportado por G'Sell *et al.* (2002).

El cálculo del G_p se debió realizar en un rango común de deformación para todas las condiciones evaluadas. Por ser el PEAD estudiado un material con un alto rango de deformación antes de la ruptura (figura 4), en el rango de deformación de 0,46 a 0,61 se garantizó que no ocurrió deformación geométrica de la probeta que pudiese influir en el cálculo correcto de este coeficiente.

Esta variación con respecto a la velocidad de ensayo se debe a que cuando un material polimérico es expuesto a al-

tas velocidades presenta un comportamiento más elástico y menos viscoso. Adicionalmente, las variaciones en la forma de la curva son un indicativo de la mayor o menor capacidad del material a presentar una inestabilidad plástica. En el caso de los materiales semicristalinos, estas variaciones son inducidas por modificaciones en la morfología cristalina y la topología de las cadenas. La inestabilidad plástica es por consiguiente una manifestación del proceso de deformación del material, el cual depende de su estructura particular (Seguela, 2007). Por este motivo, en una investigación posterior a este estudio (a ser publicada), se relacionó el rango de inestabilidad plástica con el coeficiente de endurecimiento por deformación.

A partir de estas curvas se calculó el G_p ya que se observa claramente la zona del endurecimiento por deformación esperada en este material semicristalino (figura 1). El endurecimiento involucra un aumento de la tensión debido al desarrollo de la orientación molecular, ya que una vez que la barrera intermolecular para la deformación se ha superado, el material ha dado inicio a su deformación plástica amplia ocurriendo un flujo molecular y las cadenas se comienzan a alinear u orientar de un modo coincidente con la dirección del esfuerzo aplicado, dando un comportamiento altamente anisotrópico. Es así que el G_p se puede explicar como un aumento de la resistencia a la deformación plástica debida a cambios estructurales de un material, inducidos por deformación plástica previa y determinado visualmente por la propagación del cuello.

En estudio previo (Kurelec, 2005) se reportaron valores de G_p en órdenes de magnitudes más pequeñas que el módulo elástico del material, y siempre mayor a cero, para materiales semicristalinos; en caso de que el G_p sea cero, Kurelec *et al.* (2005) aclararon que el material es perfectamente elástico, mientras que si es menor a cero se tiene un material reblandecido. En este estudio, el PP presenta un G_p mayor a cero por efecto del endurecimiento por deformación producto de la alineación de las cadenas, típico de los materiales semicristalinos. Se puede decir entonces que, el G_p está directamente relacionado con la estructura y naturaleza del polímero; se puede relacionar entonces con la resistencia a la deformación plástica debida a cambios estructurales en el material (densidad de enredos moleculares), que han sido inducidos por una deformación plástica previa y que puede ser determinado visualmente por la propagación del cuello. También se puede considerar como una medida de las restricciones configuracionales y las interacciones moleculares de las cadenas a una velocidad de deformación constante a altas deformaciones.

Efecto de la velocidad de ensayo

Como se observa en la figura 5, al aumentar la velocidad de ensayo, el G_p disminuye para todas las temperaturas estudiadas. Esto se puede atribuir a que a bajas velocidades se le permite al material una mayor alineación de las cadenas en la dirección paralela a la dirección de la fuerza aplicada. A mayores velocidades de ensayo, la alineación de las cadenas disminuye, ya que no se le da suficiente tiempo a

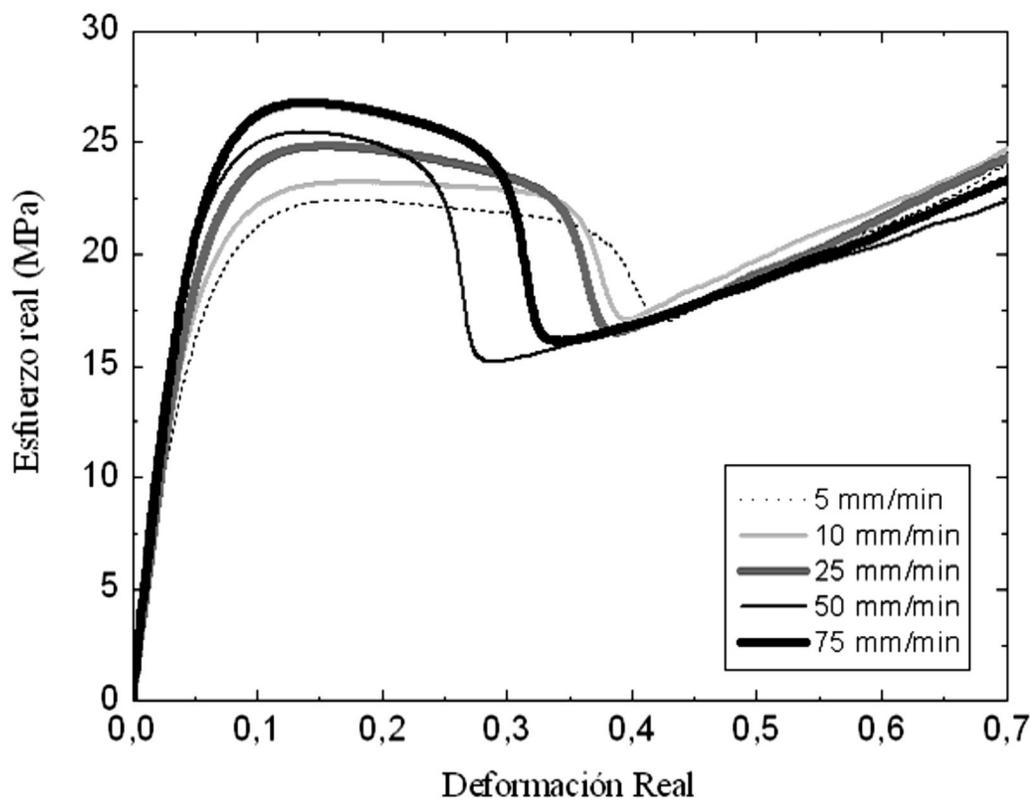


Figura 4. Curvas esfuerzo real – deformación real para el PEAD 2811 a diferentes velocidades de ensayo.

las cadenas para responder, y los requerimientos de fuerzas para deformarlos son menores, traduciendo esto en menores valores de G_p .

Por otra parte, también se observa en la figura 5 que en la medida que aumenta la velocidad de ensayo se logra mayor deformación en las muestras, sin embargo, para la velocidad de 75 mm/min la muestra se fractura. Esta velocidad ha sido la limitante para la elección del rango que permite calcular el G_p (figura 6).

Al estudiar la influencia de las condiciones del proceso en el G_p , es importante retomar los conceptos de estructura piel-núcleo, ya que la variación de dicho coeficiente va a depender directamente del aumento de la proporción del núcleo en las muestras ensayadas, donde por acción de la

fuerza aplicada va a permitir una alineación de las cadenas por deformación.

Efecto de las condiciones de inyección

Teniendo en cuenta que al modificar las condiciones de inyección usadas para un material semicristalino, como el PEAD, se logra afectar la orientación, por lo que es necesario estudiar la variación en los parámetros mecánicos frente a la influencia de variables en el proceso de inyección.

Al estudiar la influencia de las condiciones del proceso en el G_p , es importante retomar los conceptos de estructura piel-núcleo (Beaumont, 2004; Rosato, 2001), ya que la variación de dicho coeficiente va a depender directamente del aumento de la proporción del núcleo en las muestra ensa-

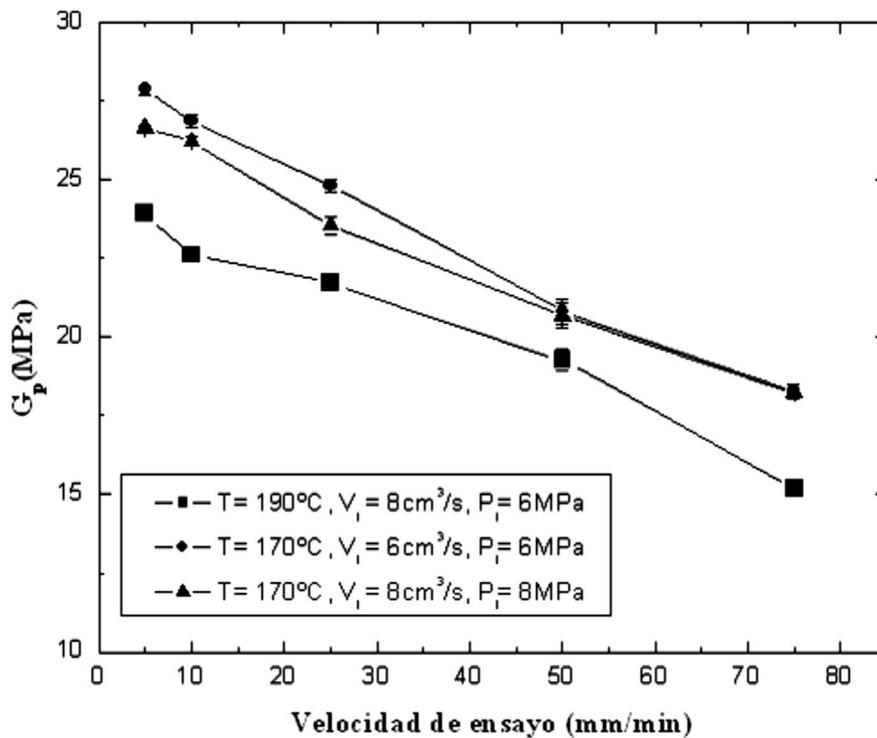


Figura 5. Efecto de la velocidad de ensayo sobre el G_p .

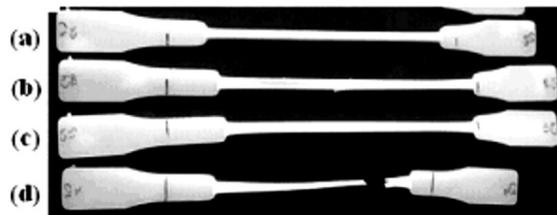


Figura 6. Probetas ensayadas a diferentes velocidades de ensayo (a) 10, (b) 25, (c) 50 y (d) 75 mm/min.

yadas, donde por acción de la fuerza aplicada va a permitir una alineación de las cadenas por deformación.

Efecto de la presión de inyección

En el caso de la presión de inyección, ésta está relacionada directamente con la fuerza necesaria que ejerce la máquina para vencer la resistencia del polímero fundido y permitir que fluya hacia el molde para el llenado de las cavidades. La presión sostenida permite introducir un poco más de material fundido en el molde, hasta completar el llenado. Para lograr inyectar las probetas de PEAD, fue necesario usar presiones de inyección con valores de 6, 7 y 8 MPa.

Cuando un colchón de material está presente dentro de la máquina de inyección y el tiempo para la aplicación de la presión es suficiente, al incrementar la magnitud de la presión de inyección, generalmente se aumenta también la orientación del material debido a dos razones principales. Primeramente, el material adicional puede fluir dentro de la cavidad del molde con la finalidad de compensar los efectos de contracción o alabeo post moldeo, causados por el proceso de enfriamiento de la pieza, así mismo, este material adicional que está siendo inyectado provoca una alta orientación interna o del núcleo de la pieza, por lo general, en la zona cercana a la entrada. Por otra parte, altas presiones reducirán la relajación del polímero fundido por lo que la orientación y consecuentemente, los esfuerzos residuales serán conservados (Beaumont, 2004).

Por otro lado, si se considera que los polímeros en esta-

do fundido son líquidos compresibles, se podrá comprender que la presión de sostenimiento determina el grado de contracción de la pieza moldeada solidificada. Los valores de contracción disminuyen en la medida que la presión aumenta, pero si es muy alta, surge enseguida la dificultad para extraer la pieza que se deforma al no separarse de las paredes del molde con facilidad (Rosato, 2001).

Al aumentar la presión de inyección en polímeros se consigue incrementar el caudal además del contacto que tiene el polímero con las paredes del sistema, lo que favorece el roce y por ende, los esfuerzos de corte hacen que disminuya la viscosidad del sistema. Esto hace que se le imponga cierta orientación al núcleo, y así al tener mayor orientación, el esfuerzo necesario para llegar a fluencia aumenta y en consecuencia, incrementa el módulo, mientras que la deformación disminuye.

En la figura 7 se observa que al incrementar la presión de inyección el G_p tiende a disminuir muy ligeramente, principalmente, a las mayores velocidades de ensayo evaluadas. A mayor presión de inyección estará entrando mayor cantidad de material a la cavidad a un tiempo determinado, y el recorrido del flujo será más rápido, haciendo que la proporción de piel sea menor. Esto implica que en la zona del núcleo se tiene una mayor cantidad de material más caliente y se puede alcanzar una mayor relajación de esfuerzos, permitiendo mayor orientación y entonces una mejor respuesta por parte del material, obteniéndose mejores propiedades mecánicas.

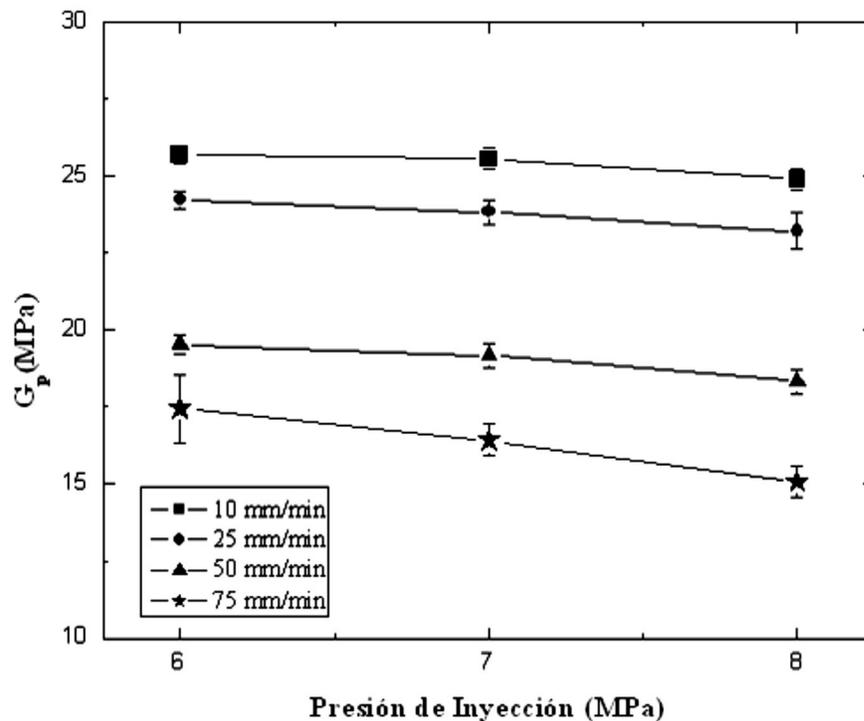


Figura 7. Efecto de la Presión de Inyección sobre el G_p .

Efecto de la velocidad de inyección

La velocidad de inyección es una medida de la entrada del material en el molde durante el tiempo de llenado. En general, cuando la inyección se realiza en un tiempo breve se alcanza a llenar el molde antes de que se empiece a solidificar la entrada, y por lo tanto, se interrumpe el flujo (Beaumont, 2004).

Para el caso de la velocidad de inyección se varió en 6, 8 y 12 cm³/seg. Este resultado se logró modificando en la máquina de inyección el tiempo de inyección en 2, 3 y 5 seg., respectivamente, y relacionándolo con el volumen inyectado se obtuvo dichos valores de velocidad, cumpliéndose que mayores tiempos de inyección implican menores velocidades y es así como se pudo calcular la velocidad de inyección.

Después de atravesar los canales de alimentación, el fundido entra en la cavidad en donde tienen lugar simultáneamente procesos de flujo y enfriamiento. Hay que distinguir entre el perfil de velocidades en el frente de llenado y el que se encuentra en zonas con un flujo plenamente desarrollado. Una capa solidificada, también llamada piel, se forma en contacto con las paredes frías del molde. En esa capa no es posible el flujo del material y se establece un gradiente de velocidades entre la piel y el núcleo caliente (Beaumont, 2004; Rosato, 2001).

El primero en demostrar esta estructura fue Kantz y es ampliamente aceptado el modelo explicativo propuesto por Tadmor durante la etapa de llenado del molde y durante el proceso de inyección, que dijo que las moléculas poliméricas se orientan a causa de la cizalla. La morfología y la orientación dependen de la dinámica de flujo del frente del fundido. Así, una combinación de cizalla y de flujo elongacional obligan al material de la sección central del frente fundido a fluir desde el centro hacia la superficie del molde, en un fenómeno comúnmente llamado flujo-fuente.

Cuando el plástico encuentra las paredes del molde sufre un enfriamiento rápido y solidifica. Hay por tanto un gradiente de velocidades no uniforme en el sentido transversal del molde, desde la capa solidificada y altamente orientada a lo largo de las paredes en que tiene una velocidad nula, hasta el frente de plástico fundido en el centro, en el cual tiene una alta velocidad, mientras fluye hacia las paredes del molde donde solidifica. El comportamiento de este flujo-fuente tiene una gran influencia en la orientación molecular, especialmente cerca de la superficie o piel de la pieza.

Por efecto del llenado tipo fuente aparece una región de flujo de arrastre o elongacional, en la que los elementos

quedan preferencialmente orientados en direcciones paralelas al frente de flujo, el cual, está definido en todo caso como flujo laminar. Este flujo es caracterizado por un perfil parabólico de velocidades, el cual presentará en las inmediaciones del centro de su distribución, un efecto global de achatamiento que permitirá su aproximación a un flujo de pistón.

El perfil de temperaturas tiene un valor máximo relativo cerca de las paredes del molde a causa de la elevada cizalla. Por supuesto, la existencia de ese pico de temperatura ocasiona una alteración de la tendencia de enfriamiento general de las paredes al centro y depende de la velocidad de inyección: la temperatura máxima aumenta gradualmente con el tiempo y se mueve hacia el centro del canal. Así, las propiedades del material estarán muy influenciadas por los procesos de flujo y enfriamiento que tienen lugar durante la fase de inyección (Rosato, 2001).

La orientación molecular resultante durante el procesamiento dependerá de la orientación generada durante la fase de llenado del polímero en el molde y de la relajación de las cadenas durante el enfriamiento del polímero. La orientación generada por el flujo es función de la tensión de cizalla, mientras que la otra orientación es producto de la relajación del polímero y el tiempo disponible para la que ocurra, este tiempo disponible para la relajación depende de la transferencia de calor que se lleve a cabo en el molde y además es una función de la temperatura de fusión y la temperatura de solidificación del material. Estas tendencias obtenidas con la Velocidad de inyección, son las reportadas en la bibliografía (Gaucher-Miri *et al.* 1996).

Para el caso del G_p , en función de la velocidad de inyección tal como se observa en la figura 8, pareciera presentarse una dualidad de comportamiento, es decir, que a bajas velocidades de ensayo el coeficiente aumenta levemente, mientras que a altas velocidades disminuye.

Esto se debe al hecho de que en tiempos rápidos de llenado el espesor de piel es menor, porque se le da menos tiempo al material para que esté en contacto con las paredes más frías del molde que para tiempos largos, y además, el núcleo por ser la zona más caliente permitirá con el tiempo tener mayor orientación. Entonces, cuando el material sea sometido a esfuerzo el número de cadenas alineadas será mayor y se tendrán menos cadenas para alinear, haciendo que la deformación disminuya.

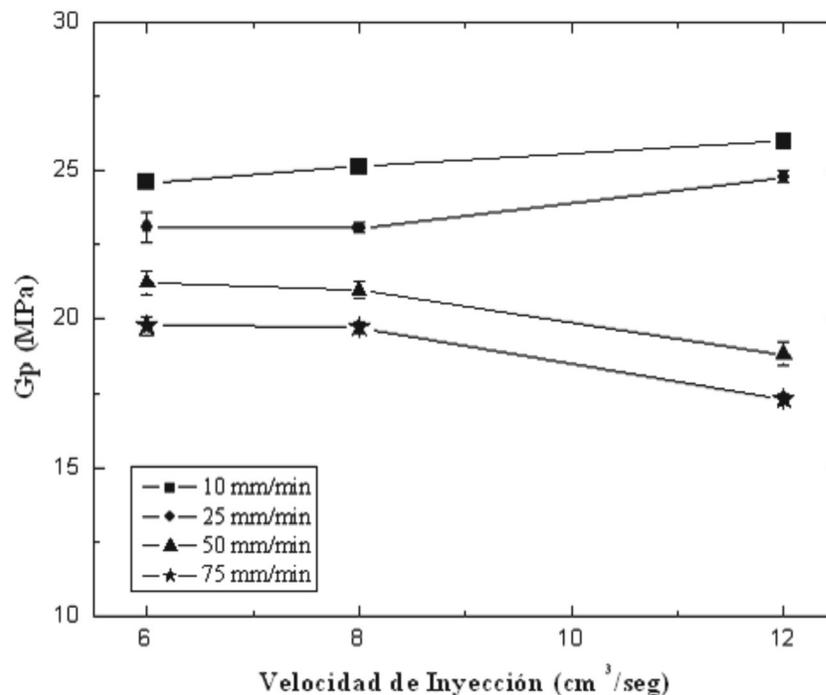


Figura 8. Efecto de la velocidad de inyección vs. G_p .

Efecto de la Temperatura de inyección

Un aspecto elemental a considerar para el moldeo de cualquier material es su comportamiento reológico, el cual no es constante durante el procesamiento debido, básicamente, a la variación de la viscosidad con la temperatura. De hecho, durante el proceso de moldeo por inyección de los termoplásticos, la viscosidad de la masa fundida disminuye. Luego al llenar el molde, se inicia la fase de enfriamiento por transferencia de calor, y la viscosidad del polímero aumenta nuevamente hasta alcanzar la solidificación (Rosato, 2001).

Al variar la temperatura se logra modificar la viscosidad del fundido y el volumen. Esta temperatura puede ser efecto directo del trabajo de cizalla o por la aplicación directa de los medios de calefacción en la máquina. El valor de la viscosidad de un material requerido para inyectar dependerá de la entrada, longitud y espesor de la cavidad del molde, así como de la presión.

Se espera que aumentos en la temperatura de inyección produzcan una disminución del espesor de la piel debido a que las cadenas poseen mayor energía y tiempo de enfriamiento para relajar las tensiones impuestas. Igualmente, a mayores temperaturas también hay una mejor transmisión de presiones lográndose menores espesores de la piel con una mayor orientación del material en el núcleo (Beaumont, 2004; Rosato, 2001).

Aumentos en la temperatura de inyección permiten tener bajas viscosidades, lo cual mejora la transmisión de presiones sobre el material, y así mismo, una mejor fluidez del material al interior de la cavidad. Las bajas viscosidades admiten separación de cadenas con bajas tensiones, dando lugar a una alineación y pequeños alargamientos por efecto de la relajación, aumentando la orientación y por ende disminuyendo la contracción. También altas temperaturas dan la energía suficiente para reorganizarse e ir a su estado de menor energía, que para el PEAD es la formación de cristales.

La temperatura de inyección necesaria para inyectar las probetas tipo I de PEAD 2811, se modificó en tres perfiles (tabla 1), las cuales fueron 170, 180 y 190 °C; el uso de estos valores se hizo tomando como base los valores de temperatura de procesamiento de este material, la cual se sugiere en un intervalo de temperatura entre 130 y 170 °C.

Con respecto al efecto de la Temperatura de inyección sobre el G_p , se puede decir que no hay una tendencia clara, ya que se esperaría que a mayores temperaturas se mejore la transmisión de presiones, permitiendo una piel más fina, es decir un núcleo más grueso, en el cual se dará una mayor cantidad de alineamientos cuando se aplique una fuerza y por ende el G_p disminuya. Pero todas las curvas tienen un comportamiento distinto (figura 9). Pareciese existir dos comportamientos diferentes dependiendo de la velocidad de ensayo, pero realmente no es nada concluyente.

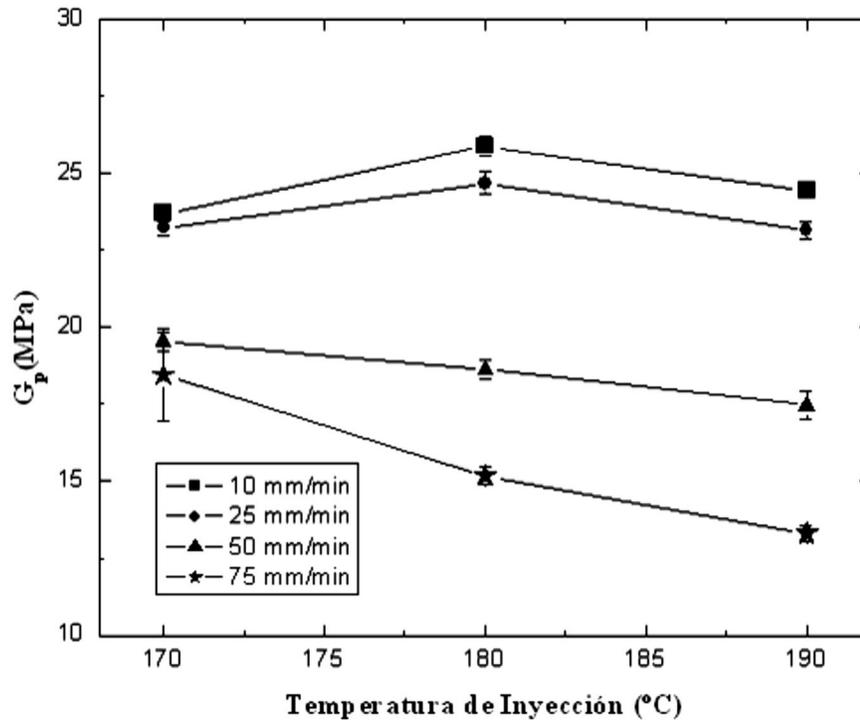


Figura 9. Efecto de la temperatura de inyección sobre el G_p .

En un estudio posterior a ser publicado, se demostró que los valores del coeficiente de endurecimiento por deformación en PP, tomados en la zona posterior a la estabilización del cuello, no presentaron variaciones significativas para diferentes condiciones de inyección utilizando el método de Kurelec *et al.* (2005), ya que en la zona de deformación en que se calcula el coeficiente de las condiciones ensayadas, todas las curvas presentaron una pendiente similar. Como puede observarse, las curvas esfuerzo-deformación mostradas para el PEAD estudiado (figura 4), en la zona en la cual se calculó el G_p , las pendientes no mantienen una tendencia definida.

Por tal motivo, Seguela (2007) sugiere entonces que se deben estudiar los valores de deformación a los cuales comienza la inestabilidad plástica y los valores cuando ocurre la estabilización del cuello, en una curva donde se estudie el comportamiento del coeficiente en función de la deformación real. Se encontró en PP que la curva intercepta al eje x justo cuando comienza la formación del cuello, coincidiendo con el punto de fluencia de la curva esfuerzo-deformación real; la segunda vez que cruza el eje x representa la estabilización del cuello. Es en este rango en donde se observan diferencias significativas entre las condiciones estudiadas.

Si consideramos que la inestabilidad plástica está relacionada con la cantidad de enredos moleculares, o con la orien-

tación de las cadenas del material, por ser en esta zona en donde ocurre un arreglo de las mismas, este rango puede relacionarse entonces con el fenómeno de endurecimiento por deformación; por ejemplo, si se tiene una menor cantidad de enredos moleculares, la estabilización del cuello ocurrirá a menores valores de deformación por tener una menor cantidad de cadenas que reacomodar (Shah, 2007).

CONCLUSIONES

Al incrementar la presión de inyección, el G_p tiende a disminuir ligeramente.

A bajas velocidades de ensayo, a medida que aumenta la velocidad de inyección el G_p aumenta, pero a altas velocidades de ensayo, cuando la velocidad de inyección aumenta, el G_p disminuye.

No hay una tendencia clara para la temperatura de inyección respecto al G_p .

A medida que la velocidad de ensayo aumenta, el G_p disminuye.

REFERENCIAS

ANGUITA, R. (1975). Moldeo por Inyección. Madrid: Editorial Gustavo Gili.

- ASKELAND, D. (2004). Ciencia e ingeniería de los materiales. México: International Thompson Editores.
- BEAUMONT, J. (2004). Runner and Gating Design Handbook. Munich: Hanser.
- G'SELL, C., HIVER, J.M., DAHOUN, A. (2002). International Journal of Solid and Structures, 39, 3857-3872.
- GAUCHER-MIRI, V., FRANCOIS, P., SEGUELA, R. (1996). Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics, 34, 113-1125.
- HIBBELER, R. (1998). Propiedades mecánicas de los materiales. Mexico: Editorial Prentice Hall.
- KURELEC, L., TEEUWEN, M., SC HOFFELEERS, H., DEBLIECK, R. (2005). Polymer 46, 6369-6379.
- MERGLER, Y., SCHAAKE, R. (2004). Journal of Applied Polymer Science 92, 2689-2692.
- ROSATO, D. (2001). Injection Molding Handbook. Boston: Editorial Kluwer Academic.
- SEGUELA, R. (2007). Macromolecular Materials and Engineering 292, 235-244.
- SHAH, V. (2007). Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis. USA: John Wiley and Sons, Inc. Publication.
- VAN MELICK, H., GOVAERT, L., MEIJER, H. (2003). Polymer 44, 2493-2502.
- VIANA, J.C. (2005). Polymer 46; 1783-1785.
- YOUNG, R. (1986). Introduction to Polymers. Londres: Chapman and Hall.