Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (3): 1221-1231

METODOLOGIA PARA LA DETERMINACIÓN DE MEDIDAS BIAXIALES DE MATERIALES PLÁSTICOS EN UNA MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES

*Rosa A. Morales *, María V. Candal*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (3): 1221-1231

METODOLOGIA PARA LA DETERMINACIÓN DE MEDIDAS BIAXIALES DE MATERIALES PLÁSTICOS EN UNA MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES

*Rosa A. Morales *, María V. Candal*

Dpto. de Mecánica, GPUSB, Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela

** E-mail: rmorales@usb.ve*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.htmll*

Resumen

El objetivo de este estudio es diseñar un montaje experimental óptimo para el registro de la fuerza de penetración necesaria para deformar una lámina de material polimérico durante el proceso de termoformado asistido. El diseño consiste en adaptar a una maquina de ensayos universales convencional un sistema de calentamiento que simule el proceso de calentamiento de una lámina y a su vez, que permita registrar la deformación de la misma mediante la penetración de un asistente a velocidad controlada. Los parámetros de ensayo considerados fueron la temperatura de la cámara climática y la velocidad de deformación, los cuales están relacionados con la temperatura de la lámina y la velocidad de penetración de un asistente, respectivamente, en el proceso de termoformado. La correcta selección del sistema de calentamiento de la lámina afecta el registro de la fuerza de penetración así como la distribución de espesores de la lámina.

Palabras Claves: *Medidas Biaxiales, PP, Proceso de Termoformado.*

Abstract

The objective of this work was to design an optimal experimental test for monitoring the force applied by a plug on a polymer sheet during the plug assisted thermoforming process. The design must be adapted in an universal testing machine with a temperature controlled camera to simulate the heating sheet and be able to register the sheet strain deformation by a plug. The testing parameters considered were the camera temperature and strain rate. These parameters are related to the sheet temperature and plug speed penetration in the thermoforming process. It was observed the proper sheet temperature control design affects force curves behavior during biaxial measurements as well as thickness sheet distribution.

Keywords*: Biaxial Measurements, PP, Thermoforming Process*

1. INTRODUCCION

La complejidad de la respuestas viscoelásticas no lineales de cuerpos sometidos a grandes deformaciones causa grandes dificultades en la determinación de las ecuaciones constitutivas. Esto se debe a que hay que considerar las siguientes variables involucradas: temperatura, deformación y velocidad de deformación, tipo de esfuerzo, tiempo (frecuencia), la proporción de anisotropía en el esfuerzo total, la historia del esfuerzo (esfuerzos generados durante el moldeo), presencia de entallas, presencia de aditivos, pesos moleculares y distribución de pesos moleculares, morfología del polímero, esfuerzos ambientales y presión [1,2].

Hoy en día existen algunos programas de simulación comerciales que se están acercando a este objetivo. Estos programas muestran como resultados gráficos de las piezas moldeadas, la distribución de espesores, el estiramiento que ha sufrido la lámina en cada punto, así como la temperatura promedio. Con esta información y los datos del material es posible calcular las propiedades mecánicas y se puede ubicar sobre la lámina los puntos débiles del producto y así poder modificar el patrón de calentamiento para fortalecer estas zonas. Sin embargo, la calidad de la predicción depende de la información con que se cuente sobre las propiedades de los materiales y de los modelos matemáticos que se empleen para predecir su comportamiento [3].

La exactitud de cualquier simulación del proceso

depende enormemente de la correcta caracterización del material. Durante el termoformado el proceso de deformación que se presenta es principalmente biaxial [4]. Cualquier modelo que esté basado en datos uniaxiales del material sólo es una aproximación. En vista de estas consideraciones, numerosos autores han simulado mediante elementos finitos el proceso, usando tanto modelos hiperelásticos como viscoelásticos no lineales.

En todos los casos, lo que se busca es predecir el efecto de las condiciones de proceso, material de lámina y asistente, geometría del molde, coeficiente de fricción, forma del asistente, entre otros, sobre la distribución de espesores de geometrías complejas lo más exacto posible, modificando las ecuaciones constitutivas de los modelos existentes, así como optimizar el proceso. Para su simulación numérica se utilizan métodos basados en el análisis de elementos finitos, aunque la exactitud de los resultados depende del modelo usado para describir el proceso de deformación.

Particularmente, Harrow et. al [4], Novotny et. al [5], Throne [6], Kouba et. al [7,8], Dharia [9] y Tan [10] son algunos de los autores que han medido de una forma simple la deformación de la lámina en el tiempo, a través del monitoreo de la fuerza que ejerce el asistente sobre la lámina como variable fundamental para la optimización del proceso de termoconformado.

La fuerza generada es medida con la deformación, modificando variables de proceso, tales como temperatura, velocidades de penetración y geometría del asistente, entre otras. Los datos de fuerza son convertidos en un modelo predictivo y aplican el método de ingeniería en reverso. Esto lo realizaron con el fin de caracterizar las propiedades del material, para fijar los parámetros del modelo K-BKZ, para simular mediante elementos finitos el formado asistido. Estos autores determinaron la estrecha correlación que existe entre los parámetros del material con la distribución de espesores en una pieza.

Por las razones antes mencionadas, el principal objetivo de este estudio es diseñar un montaje experimental óptimo para el registro de la fuerza de penetración necesaria para deformar una lámina de material polimérico durante el proceso de termoformado asistido, considerando una deformación biaxial.

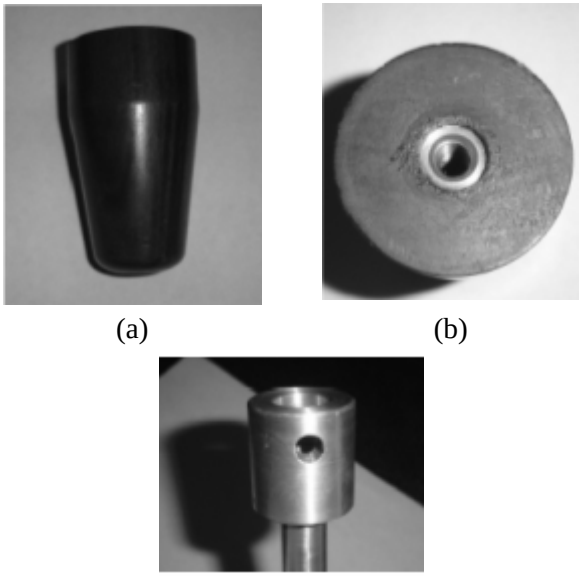
2. METODOLOGIA

2.1 Diseño Experimental preliminar para medidas biaxiales

Este diseño consistió en la construcción de una cámara climática. En primer lugar, se tomaron las medidas del área de trabajo disponible en la máquina de ensayos universales Lloyd modelo EZTest, y con éstas se procedió al modelamiento de los componentes de la cámara climática en el programa CAD Pro-ENGINEER. Se procedió a establecer las condiciones mínimas que debía presentar la cámara para la realización de los ensayos (calentamiento, convección forzada, área de trabajo, etc.). Luego se procedió al mecanizado de la caja y finalmente, a la instalación de los componentes eléctricos y de aislamiento requeridos para trabajar en la máquina de ensayos universales.

La cámara debía poseer una zona de trabajo (denominada “profundidad”) donde se permitiera la penetración del asistente hacia la lámina. La tapa posee un orificio central que permite la entrada del pistón. Ambas piezas se sujetaron mediante 2 bisagras, que permitían el cierre de la caja durante el proceso de formado con el asistente. Una vez obtenida la estructura, se procedió a calibrar los sistemas de calentamiento, en función del dial presente en el regulador (o termototalizador) empleado para el control de la temperatura. Así, se consiguió establecer un sistema eficiente y en control para realizar los ensayos.

Para realizar los ensayos de penetración, fue necesario en primer lugar, diseñar y mecanizar un adaptador que permitiera acoplar asistentes de forma cónica truncada (acero, aluminio y madera) a la máquina de ensayos universales. Para ello, se tomaron las medidas correspondientes al diámetro de las mordazas de los pasadores en la máquina de ensayos universales y de la hembra roscada que estaba inserta en el asistente (Figura 1). Se desarrolló el prototipo del asistente en el programa de diseño asistido por computador Pro-ENGINEER, se realizaron los planos correspondientes al acoplador y se procedió a su mecanizado. La escogencia del material (aluminio) se realizó en base a la facilidad de su mecanizado, y bajo peso.



(a) (b)

(c)

Figura 1. (a) Detalles del asistente, (b) su rosca de ajuste y (c) diseño del acoplador del asistente.

Con el sujetador, se procedió a instalar el asistente en la máquina, y se colocó bajo éste la cámara climática. Se calibró mediante el software de la máquina de ensayos el recorrido necesario para penetrar la lámina, sin que el asistente tocara el fondo de la caja. Se conectaron los sistemas de calentamiento y de ventilación, y se procedió a precalentar la cámara para realizar los ensayos con las probetas rectangulares cortadas previamente de láminas extruidas. La figura 2 muestra el detalle del posicionamiento de la cámara climática y el acoplador y en la figura 3 la medición de la temperatura real de la lámina.



Figura 2. Detalle del ensamblaje entre la cámara climática y el asistente acoplado.

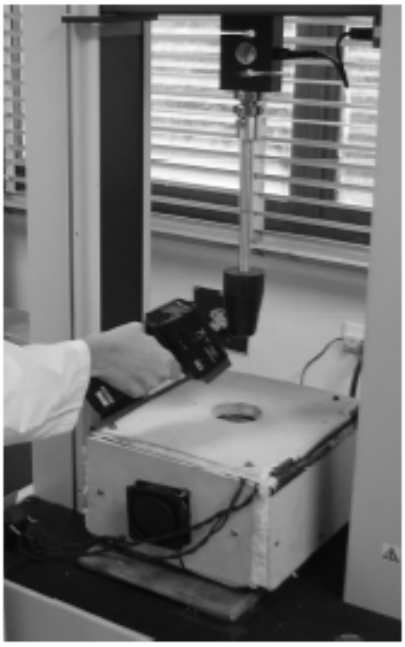


Figura 3. Toma de la temperatura de la lámina.

Se notó que por efecto de la fuerza ejercida por el asistente, los orificios que permitían sujetar la probeta tendían a desgarrarse, alterando los valores de fuerza. Para asegurar que las mediciones realizadas por la máquina de ensayos universales estuvieran sujetas solamente a la aplicación de la fuerza por parte del pistón, se tuvieron que asumir condiciones estacionarias de temperatura para la lámina, bajo calentamiento en el pistón y mínimo roce entre el pistón y la lámina.

2.1 Extrusión de láminas de PP

Para la extrusión de las láminas se empleó un Polipropileno PP F-502, con un índice de fluidez de 3,4 g/10min (2,16/230), suministrado por la empresa Propilven, el cual es un homopolímero de polipropileno utilizado en los procesos de extrusión de láminas y termoformado de empaque en general, formulado de acuerdo a regulaciones existentes para materiales que estarán en contacto con alimentos.

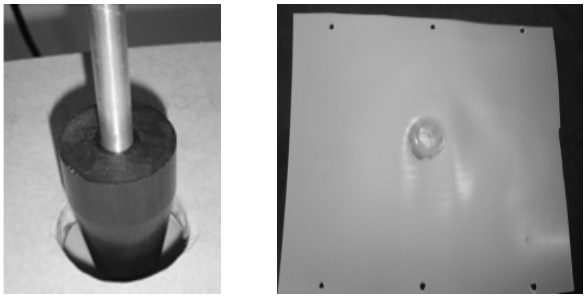
Se utilizó la extrusora MPM, junto a un cabezal de película plana y un sistema de embobinado de velocidad variable, ambos equipos de la misma marca y acoplados a la zona de descarga de la máquina. El espesor promedio empleado para efectos de este trabajo es aproximado a 1 mm., por lo que se fijaron las siguientes condiciones de

proceso: velocidad de tornillo 100 rpm y velocidad de halado 1 cm/s. El perfil ascendente de temperatura usado 150 a 230 ºC. La finalidad de obtener resultados a partir de dichos valores de espesor radica en la medición de parámetros experimentales que puedan ser comparados con la información obtenida en la literatura [4-8].

2.2 Ensayos de Penetración

Se introdujo una lámina del material de 30x30 cm en el montaje descrito en la sección anterior, y se procedió a calentarla hasta la temperatura de ensayo, la cual fue determinada mediante el uso de un termómetro infrarrojo Extech, modelo 42525 (rango de apreciación de –10 a 350 ºC). Una vez que la lámina llegó a la temperatura de ensayo, se procedió a realizar la experimentación modificando la velocidad de penetración. Los ensayos se realizaron para el PP F-502, a velocidades de 100, 200 y 500 mm/min., para 2 temperaturas (130 ºC y 140 ºC); dichas velocidades y temperaturas se tomaron en función a los trabajos previos encontrados [4-6], y se validaron tomando los tiempos de descenso del pistón basados en medidas experimentales en la termoformadora Brown.

Se tomaron tres muestras de láminas y se realizaron los ensayos. Se descartaron velocidades mayores a 500 mm/min, ya que la máquina de ensayos universales no permitía realizar ensayos con mayor rapidez. Se insertaron cada una de las muestras en las guías de sujeción de la cámara, se centró esta bajo el recorrido del pistón y se procedió a iniciar el ensayo a las condiciones establecidas. La figura 4 muestra el detalle de la penetración del pistón por la boquilla de la cámara climática y la apariencia de la muestra luego del ensayo.



(a) (b)

Figura 4. (a) Detalle de la penetración del pistón por la boquilla de la cámara climática y (b) Apariencia de la muestra luego de ensayo.

Es importante mencionar que para disminuir el efecto del coeficiente de fricción se usó aceite de silicona para lubricar el asistente. Esto se hizo en base a estudios realizados [9,10,13,14] donde se muestra que la variable que tiene mayor efecto sobre la interacción friccional entre un asistente y la lámina de polímero, en condiciones reales de procesamiento, es la temperatura de la lámina.

4. DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Diseño de la cámara climática para ensayos de penetración

El diseño de la cámara climática para los ensayos de penetración estaba sujeta al estudio de la aplicación de una fuerza biaxial por parte del asistente sobre la lámina a termoformar. Las consideraciones básicas para el desarrollo del prototipo se basaron en los modelos viscoelásticos reportados en la literatura, en particular en el modelo K-BKZ y en el establecimiento de los parámetros empleados durante un proceso de termoformado (temperatura uniforme de la lámina, velocidad de penetración del asistente, fuerza de roce entre la lámina y el asistente, etc.) [4, 5,11, 12, 15].

En primer lugar, el modelo K-BKZ permite describir el proceso de termoformado de una manera mas adecuada que un simple modelo elástico, el cual definitivamente no muestra la pérdida viscosa o amortiguada que presentan los polímeros durante un proceso de esfuerzo continuo. Generalmente, se tiende a considerar que los polímeros presentan una ecuación constitutiva integral en función del tiempo que permite relacionar el tensor esfuerzo con una función tiempo-memoria frente a un estado de fuerza aplicada biaxialmente. Esto quiere decir, que al aplicar una fuerza orientada en dos planos, se produce una respuesta elástica y una respuesta viscosa que no se recupera instantáneamente, sino que es dependiente del tiempo [16].

Como fue mencionado anteriormente, para efectos de este trabajo, el diseño descrito anteriormente consistió en una cámara climática que se acoplaba a la máquina de ensayos universales, de manera que se produjeran deformaciones similares a aquellas que se presentan durante el termoformado asistido. De esta manera, el sistema debía contar

con un mecanismo de empuje del pistón que permitiera la simulación de la penetración del asistente en el material y que pudiera cuantificar los valores de esfuerzo producidos en el proceso. La figura 5 muestra una secuencia de la simulación del proceso de penetración del asistente.

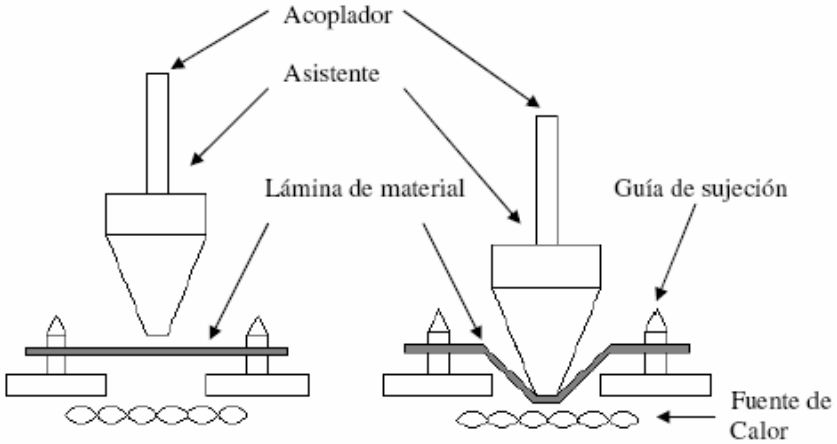


Figura 5. Simulación del proceso seguido por el pistón en la cámara climática.

Además de lo mencionado anteriormente, fue de suma importancia considerar el efecto de fuerza de roce y efecto "sag" o de deslizamiento entre la lámina y el pistón. Si se llegara a tener roce entre la lámina y el asistente, se tendrían distribuciones no uniformes en la aplicación de la fuerza sobre la lámina, por lo que se observarían distorsiones (por efecto de enganche y deslizamiento de la lámina sobre la superficie del pistón) en las lecturas tomadas del programa asociado a la celda de carga de la máquina de ensayos universales. A pesar de que la superficie de los asistentes empleados poseían un acabado fino por efectos del mecanizado, se decidió recubrir con aceite de silicona la totalidad del asistente. De esta manera, se pretendía evitar la adhesión del mismo a la lámina y se contribuyó a minimizar los efectos de roce.

A temperaturas de la cámara mayores a 140 |C, la temperatura de lámina no fue constante, razón por la cual este fue el valor limite superior empleado. El mantenimiento de la temperatura debe ser constante durante los ensayos para mantener la uniformidad de la medida de fuerza. Si la temperatura de ensayo no varía durante toda la ejecución del proceso, se tendrá una distribución de la fuerza uniforme sobre toda la superficie de contacto entre la lámina y el pistón. Igualmente, si el pistón llegara a presentar un gradiente de temperatura, las diferentes zonas en contacto tenderían a presentar diferentes temperaturas de reblandecimiento, por lo que el efecto sobre las propiedades a leer sería similar al que se presenta con una distribución no uniforme de temperatura de la lámina.

Se desarrolló un sistema aislante por capas para garantizar la disminución de calentamiento del pistón por calentamiento por convección y el mantenimiento de la temperatura de la celda de carga por debajo de los 35 ºC (según especificaciones del manual de la máquina Lloyd). Este sistema permitió operar por espacio de varias horas sin que se tuviesen incrementos significativos de la temperatura de las paredes exteriores de la cámara, y por ende, los efectos de convección sobre la celda de carga resultaban mínimos. De igual forma, el asistente se mantenía a una temperatura cercana a la ambiente.

4.2 Ensayos de penetración con el asistente

Luego de establecer las condiciones óptimas para los ensayos de penetración, se procedió a ensayar las probetas de PP en la cámara climática. Se observó que al eliminar la fuerza ejercida por el pistón, las láminas de PP tendían a recuperar su forma inicial casi completamente, sólo unas leves arrugas indicaban la deformación residual provocada por la penetración del pistón, y éstas se concentraban en el centro de la lámina, donde la deformación impuesta resultaba ser mayor (Figura 4).

Los resultados de fuerza para la penetración total del pistón, se muestra en la figura 6. Debido a que a

mayor espesor, mayor será la fuerza ejercida para lograr la deformación, se normalizó la fuerza en función del espesor para controlar el efecto del espesor de la lámina.

En las gráficas de fuerza en función de la extensión, se tiene que las curvas presentan una tendencia creciente de la fuerza con la extensión (figura 6). En esta figura se observa que a mayores velocidades de ensayo, mayor es la fuerza ejercida por el asistente para lograr la deformación. Igualmente ocurre cuando aumentamos la temperatura de calentamiento (figura 6). Esto puede ser explicado a través del efecto que produce deformar la lámina más rápidamente: al ser sometida a una mayor deformación en menor tiempo, el material tenderá a ejercer mayor resistencia para vencer los enredos de las cadenas y fluir por efecto de la fuerza aplicada, así, se registrarán mayores esfuerzos biaxiales en la zona de contacto entre el pistón y la probeta, los cuales son registrados por la celda de carga.

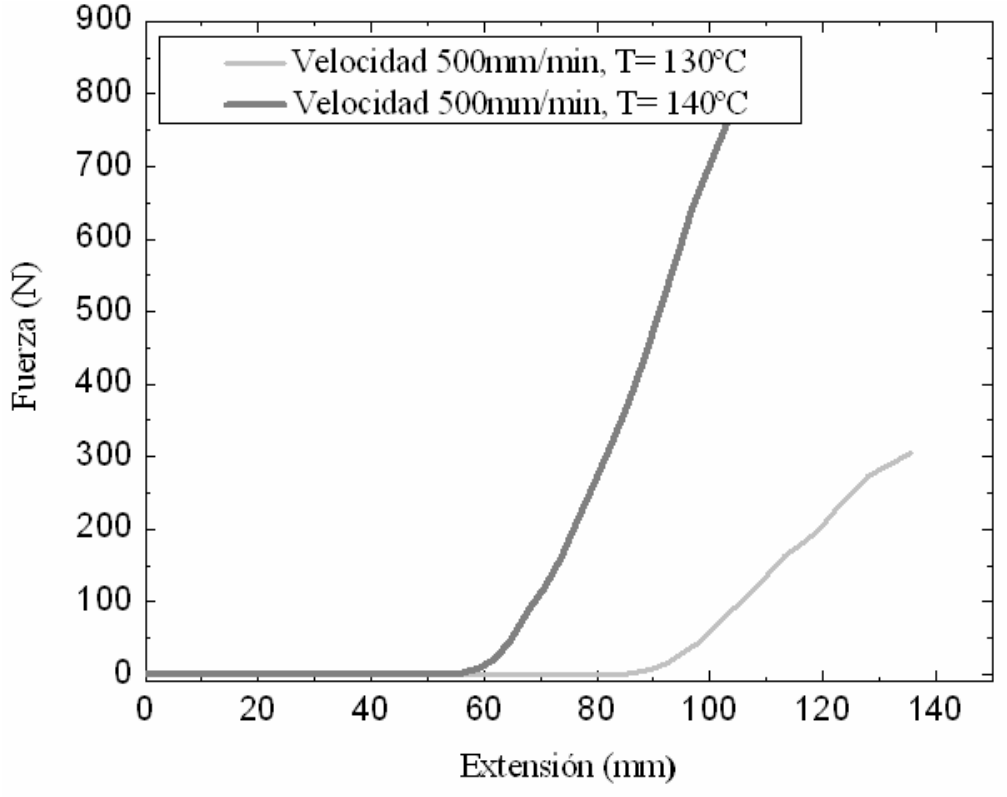
Cuando se incrementa la velocidad de ensayo, la capacidad de respuesta del material tiende a verse reducida limitando el flujo de las cadenas de polímero, por lo que se registran incrementos en la fuerza aplicada sobre la lámina. Adicionalmente, se esperaría que a mayor temperatura, menor sea la fuerza requerida para deformar la lámina (4, 5, 9,10); sin embargo, esto comportamiento no se observa en las curvas mostradas (Figura 6).

Con respecto a la temperatura de calentamiento, se esperaría que a menores temperaturas, una mayor fuerza sea ejercida por el asistente. Este hecho indica que al encontrar la lámina más rígida (por efecto de una menor temperatura), el asistente requiere penetrar la lámina con mayor fuerza para ejercer la deformación a una velocidad constante. Al incrementar la temperatura, las láminas se encuentran más fluidas (las cadenas poseen mayor movilidad por efecto de la adición de energía durante el calentamiento), por lo que se requiere menor trabajo para originar la deformación [4, 9, 11,12]. La relación entre la temperatura-fuerza indica que para la industria debe existir un compromiso entre el consumo de potencia para lograr el calentamiento, y la potencia requerida para deformar satisfactoriamente al material. Al disminuir la energía para calentar la lámina, se requerirá mayor potencia para deformarla, y viceversa.

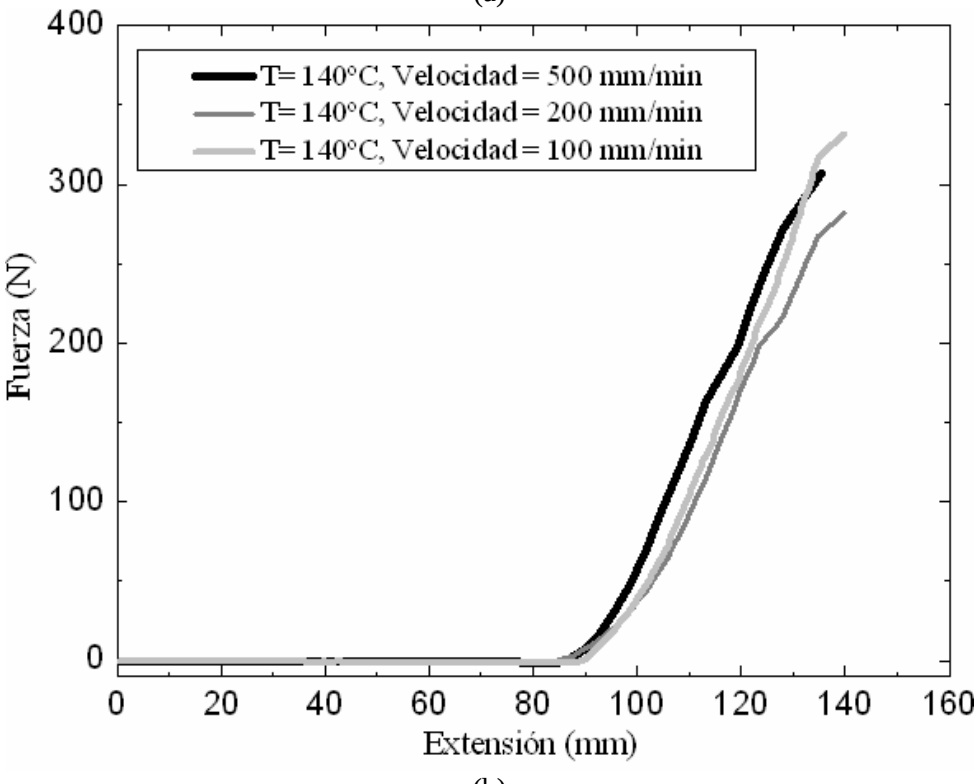
Los resultados encontrados en esta primera fase de estudio probablemente puedan deberse a las características del asistente usado que varían al aumentar la temperatura (coeficiente de fricción, conductividad térmica y transferencia de calor), así como la falta de uniformidad en el espesor de la lámina, factor que fue difícil de controlar durante la ejecución de este estudio. Las láminas con mayor espesor poseen gradientes de temperatura (desde los bordes hacia el interior) que aumentan la rigidez de las mismas, así como la presencia de una mayor cantidad de material a desplazar originará una mayor resistencia a la deformación. Al ser más delgadas, las láminas tenderán a presentar temperaturas más uniformes y la flexibilidad ganada a expensas de la ausencia de material, permitirá deformar las mismas a menores valores de fuerza.

En el diseño presentado en este estudio, otra fuente de error se debe al desgarre de la lámina en los puntos de sujeción en la cámara climática, lo que trajo como consecuencia muy altas desviaciones del valor de la fuerza registrado. Adicionalmente a lo mencionado anteriormente, algunos autores [4,11] en su diseño incorporan el uso de un transductor en el centro del asistente como elemento de detección de la fuerza biaxial pero esto constituye una fuente de error severa, al incluir en la medida las posibles deformaciones que se presenten en el asistente.

En un trabajo reportado por Dharia [9], se tiene que los valores de fuerza obtenidos para un PP en estudio tienden a ser mucho menores a los encontrados durante esta experiencia. Esta variación puede ser explicada en base a diferencias en el grado del material empleado, en la forma del asistente, material del asistente, control del factor de roce y en la uniformidad en el espesor de la lámina, factor que fue difícil de controlar durante la ejecución de este estudio. Así, errores experimentales asociados al desarrollo de este trabajo conducen a variaciones con respecto a la fuerza generada por el asistente encontrada en literatura [4, 5, 9, 11,12]. Asimismo, la diferencia en el método experimental empleado puede traer como consecuencia variaciones con respecto a los valores hallados [4, 9, 11,12].



(a)



(b)

Figura 6. Curvas de fuerza ejercida por el asistente de acero en función de la extensión para láminas de PP, a diferentes temperaturas (a) T= 130 ºC y (b) T=140 ºC.

En base a las tendencias encontradas en los registros de la fuerza de penetración con el diseño preliminar, posteriormente se diseñó un nuevo montaje experimental. Para tal fin se utilizó una cámara climática perteneciente a una máquina de ensayos universales INSTRON. Se adaptó un controlador de temperatura digital de 4 dígitos de 110 voltios. Se determinó que era más fácil instalar dicho controlador con una termocupla tipo J con bulbo de 6 MM y con un relay de control de estado sólido. Se estudió la ubicación del controlador de manera que se encontrara en la parte externa de la cámara con un fácil manejo para el operario y la mejor ubicación de la termocupla para que detectara la verdadera temperatura del flujo de aire (Figura 7).



Figura 7. Detalle de los componentes de la cámara climática.

Dado que la cámara climática fue instalada en la máquina de ensayos universales LLOYD Easy Test modelo EZ-20, se diseñó un nuevo sistema de acoplamiento y de sujeción de la lámina polimérica con el programa modelador de sólidos en 3D Pro ENGINEER. Se colocó la cámara en la máquina de ensayos universales para tomar las medidas del área de trabajo disponible y evaluar las piezas adicionales que se requerían. Se diseñó un sistema de acople de mayor longitud, cuidando que el extremo inferior se acople con el asistente, y el extremo superior se acople a la parte móvil de la máquina, al igual que para el diseño preliminar, como se observa en la figura 1.

Adicionalmente, se diseñó un sistema para disipar el calor y proteger la celda de carga del equipo, la cual como fue mencionado anteriormente, no puede pasar los 35 °C en modo operativo. Este nuevo sistema consta de 4 láminas ubicadas a lo largo de la barra, distanciadas entre sí por anillos separadores, como se observa en la figura 8, las cuales absorben el calor y evitan que éste llegue a la celda de carga.

Luego de cumplidos los pasos anteriores se realizó el montaje final, el cual puede observarse en la figura 8. La consola de la máquina se ajustó la distancia entre las mordazas según la Norma ASTM D-638 para colocar la probeta, la cual debe ser 65 mm.

En la figura 9 se muestran las curvas de fuerza ejercida por el asistente de acero en función de la extensión para láminas de PP, a diferentes temperaturas, para el nuevo montaje experimental.

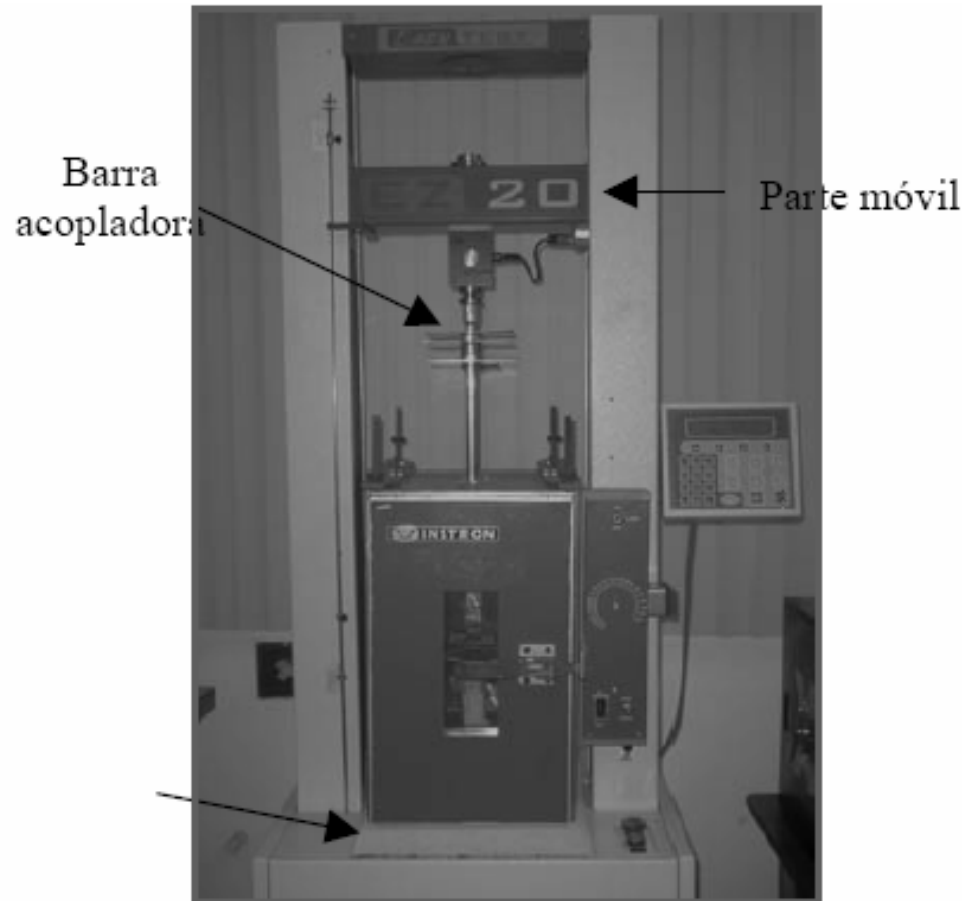
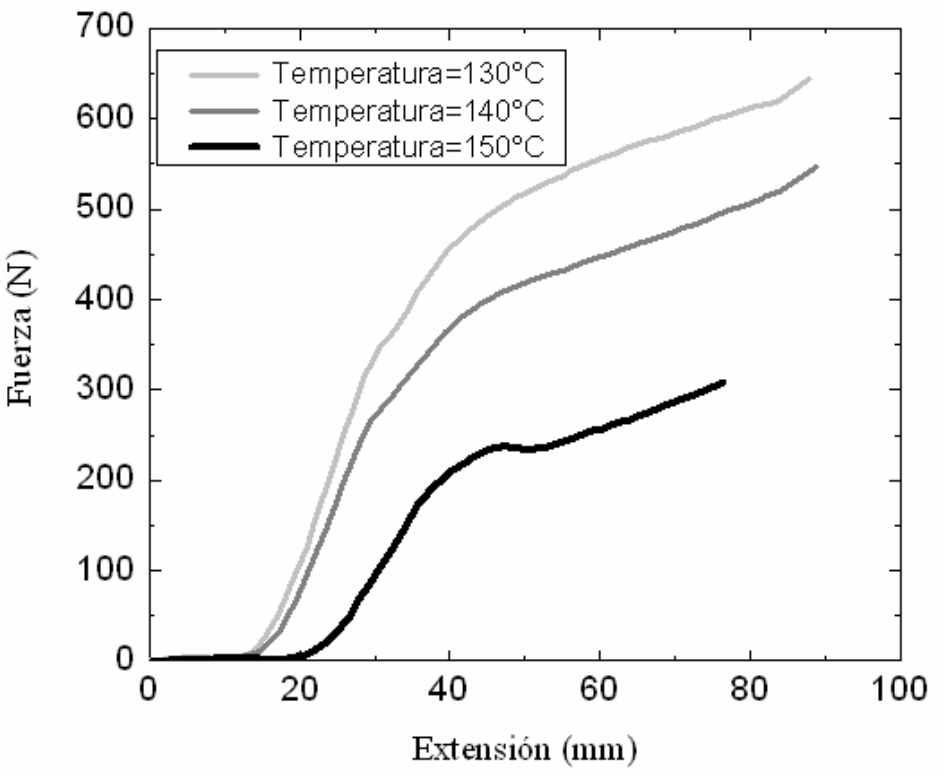


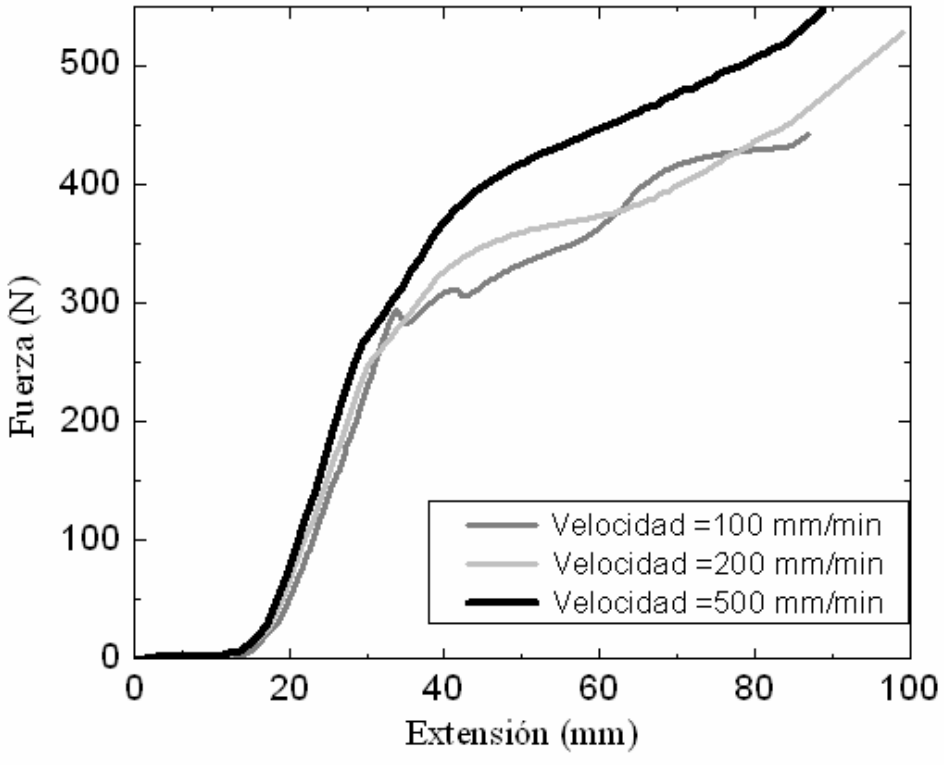
Figura 8. Ensamblaje de la cámara climática, el asistente acoplado y las láminas aislantes a la máquina de ensayos universales del nuevo diseño experimental.

Aun cuando las tendencias encontradas son similares, la forma de la curva cambia. En este caso, como era de esperar, al aumentar la temperatura la fuerza necesaria para deformar la lámina disminuye (figura 9b). Al realizar los ensayos a una temperatura cercana a la temperatura de fusión de este PP (alrededor de 156 °C), se tiene un material con un menor grado de resistencia en el fundido, ya que comienza la fusión de las esferulitas; sin embargo, una vez que se alcanza la completa fusión, la resistencia cae drásticamente y se puede observar gran deformación (sag) que afecta negativamente la termoformabilidad. Por este motivo, los ensayos no pueden ser realizados a temperaturas mayores a los 150 °C.

Adicionalmente, en este nuevo diseño, aun cuando la cámara actúa por convección, y ésta no es la mejor manera para calentar las láminas, el control de la temperatura es más homogéneo que en el anterior, ya que se puede apreciar que la temperatura del horno oscila entre unos 2 ó 3 °C por encima de la temperatura fijada, lo cual se encuentra en un rango aceptable para el trabajo.



(a)



(b)

Figura 9. Curvas de fuerza ejercida por el asistente de acero en función de la extensión para láminas de PP, a diferentes temperaturas, (a) V= 500 mm/min y (b) T=140 ºC.

4. CONCLUSIONES

El diseño de cámaras climáticas debe envolver al menos tres factores fundamentales: uniformidad en el calentamiento de la lámina, mantenimiento de las condiciones de ensayo estables y mínimo roce entre las partes de la cámara y el asistente. Asimismo, el efecto de roce entre el asistente y la lámina debe ser eliminado para que no se generen ruidos en las medidas.

La selección de las condiciones de ensayo en las medidas de la fuerza bajo deformación biaxial juega un papel importante en el registro de la fuerza generada y al mismo tiempo tendrá un fuerte efecto en los datos experimentales usados para fijar los parámetros del material para la determinación de la ecuación constitutiva.

La fuerza generada por el asistente es fuertemente dependiente de la velocidad de penetración, de la temperatura del ensayo y de la uniformidad de espesores de la lámina.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Eirich, F., "Rheology: Theory and Applications", Academic Press, New York, 1967.

[2] Lenk, R., "Plastics Rheology", Maclaren and Sons, London, 1968.

[3] Serrano C., "Tecnología de simulación en termoformación", *Tecnología del Plásticos* 6-8, Mayo (2001).

[4] Harrow G., Harkin-Jones E. y Martin P., *"Plug force monitoring for the control and optimization of the thermoforming process"*, ProQuest Sc. Journals, 3, 181-188 (2003)

[5] Novotny P., Sáha P. y Kouba K., *International Polymer Processing XIV*, **3**, 291-195 (1999)

[6] Throne J., *Advanced in Polymer Technology*, **4**, 309-320 (1989).

[7] Kouba K., Ghafur O y Vlachopoulos J., "*Some new results in modeling thermoforming"*, Conference Proceedings ANTEC 94, The Society of Plastic Engineers SPE, 850-853 (1994)

[8] Kouba K., Novotny P. y Kech A., *"Viscoelastic material characterization at large deformation", Conference Proceedings ANTEC 2001, The Society of Plastic Engineers SPE*, 830-833 (2001).

[9] Dharia A., "*Novel Method for Rapid Determination of Thermoformability", Conference Proceedings ANTEC 2005, The Society of Plastic Engineers SPE,* 1214- 1219 (2005).

[10] Tan C., Harkin-Jones E., Menary G., Martin P. y Arnstrong C., *"Biaxial Testing for the Modeling of the Thermoforming Processes"*, Conference Proceedings ANTEC 2005, The Society of Plastic Engineers SPE,1186-1191 (2005).

[11] Harron G., Harkin-Jones E. y Martin P., *"Influence of Thermoforming parameters on final part properties"*, Conference Proceedings ANTEC 2000, The Society of Plastic Engineers SPE, 3723-3727 (2000).

[12] Harron G., Harkin-Jones E. y Martin P., *"An experimental investigation of the Plug Assist Thermoforming Process"*, Conference Proceedings ANTEC 2001, The Society of Plastic Engineers SPE, 825-829 (2001).

[13] Hegemenn B., Liebin D. y Eyerer P., *"Development of a measurement technique for tailored material characterization and validation of thermoforming simulation"*, Conference Proceedings ANTEC 2004, The Society of Plastic Engineers SPE, 909-913 (2004).

[14] Tulsian A., Mead J. y Orroth S., "*Computer simulation of the effect of coefficient of friction in plug assist thermoforming*", Conference Proceedings ANTEC 2004, The Society of Plastic Engineers SPE, 904-908 (2004).

[15] Novotny P. y Sáha P., "*Optimization of thermoforming"*, Conference Proceedings ANTEC 99, The Society of Plastic Engineers SPE, 841-843 (1999).