

# Uso alternativo de la melaza de la caña de azúcar residual para la síntesis de espuma rígidas de poliuretano (ERP) de uso industrial

José Vega-Baudrit<sup>\*2</sup>, Karina Delgado-Montero<sup>1</sup>,  
María Sibaja-Ballesteros<sup>1</sup>, Patricia Alvarado-Aguilar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Polímeros (POLIUNA), Tel/Fax (506) 2773557, Universidad Nacional, 86-3000 Heredia, Costa Rica.

<sup>\*2</sup> Laboratorio Nacional de Nanotecnología, LANOTEC, Centro Nacional de Alta Tecnología CENAT-CONARE. 1.5 km Norte Embajada de los Estados Unidos, Tel. 00 506 232 3605 Fax 00 506 232 0423, San José, Costa Rica. Correo-e: jvegab@una.ac.cr

## RESUMEN

Se realizó un estudio para comprobar la efectiva sustitución parcial de los reactivos de uso común en la elaboración de espuma rígidas de poliuretanos, ERP (conocidas en Costa Rica como EPU) provenientes de los residuos de la agroindustria azucarera como la melaza de caña de azúcar. La melaza fue utilizada para sustituir parcialmente el polietilén glicol (PEG-300) que es uno de los reactivos comerciales utilizados tradicionalmente para la obtención de espumas de poliuretano. Este subproducto presentó 4% de humedad y 79.3°Brix. Mediante cromatografía líquida de alta resolución (CLAR) se determinaron los porcentajes de los principales azúcares presentes en la melaza, los cuales fueron de 30.6, 8.4 y 8.2% de sacarosa, glucosa y fructosa, respectivamente. La cantidad de grupos hidroxilo (-OH) presentes en este sustrato tenía valor de 7.71 equivalentes de grupos -OH por kilogramo de sustrato. Las espumas sintetizadas con la melaza de caña de azúcar fueron caracterizadas mediante la determinación de la densidad y análisis térmicos y mecánicos. De igual forma se sintetizó una espuma de referencia, la cual contenía todos los materiales de partida excepto la melaza de la caña de azúcar. Los resultados obtenidos indican que la espuma (ERP) que presenta la menor densidad es aquella que contiene un 70% de melaza de la mezcla PEG-Melaza. Asimismo, las pruebas térmicas realizadas indican una tendencia a la disminución de la temperatura inicial de descomposición ( $T_{d1}$ ) comparada con la espuma de referencia y conforme aumenta la cantidad de melaza utilizada en la preparación del ERP. En general, las pruebas mecánicas de compresión presentan una tendencia a aumentar el esfuerzo a la compresión y el módulo de Young, conforme se incrementa el porcentaje de melaza en las espumas sintetizadas.

Palabras clave: Poliuretano, espumas, desecho, caña de azúcar, melaza.

Keywords: Polyurethane, foams, wastes, sugar cane, molasses

\* Autor a quien debe enviarse la correspondencia  
(Recibido: Noviembre 08, 2007, Aceptado: Noviembre 30, 2007)

## INTRODUCCIÓN

### Subproductos agroindustriales

El desarrollo de los países debe considerar, entre otros aspectos, el avance tecnológico, científico y económico, lo que implica evaluar también la transformación de los residuos que se generan y utilizarlos para obtener productos útiles que contribuyan a disminuir la presión que ellos ejercen sobre el ambiente. Costa Rica es un país en el cual la agricultura ha sido durante muchos años una de las principales actividades económicas, la cual se ha orientado hacia la exportación y ha constituido una fuente importante de ingreso de divisas (Moya y col., 2001).

En el caso de la caña de azúcar, la estimación de derivados, según la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA), obtenidos por la agroindustria azucarera costarricense en la zafra 2001/2002, indica que de 3.5 millones TM de caña recibida se reportó una producción total de azúcar de 360,000 TM y 120,000 TM de miel final. Entre los subproductos formados durante este proceso, se encuentran la melaza y el bagazo que constituyen más del 25% del total de subproductos de la caña, el cual está constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina.

Como se ha determinado en diversas investigaciones realizadas en el Laboratorio de Polímeros de la Universidad Nacional de Costa Rica, POLIUNA, estos productos pueden ser utilizados para sustituir parcialmente algunos componentes en materiales poliméricos de uso común. Específicamente, para la síntesis de poliuretanos con características de ser biodegradables, se han utili-

zados residuos de la agroindustria de piña, maíz y café principalmente (Arroyo e Ibarra, 1995; Hatakeyama y col., 1993; Leão y col., 1997; Marcovich y col., 1998; Moya y col., 1995; Quesada-Solís y col., 2005; Vega-Baudrit, 1995; Vega-Baudrit y col., 2002; 2004; 2005; Zárate y col., 2000; Zhu y Tobías, 1995).

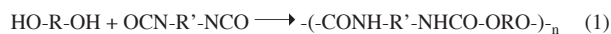
Específicamente, en el caso de los subproductos de la caña de azúcar, la melaza proviene de la cristalización del jugo concentrado. Una parte es empleada para la alimentación animal y otra se utiliza en la elaboración de alcohol carburante para la exportación, para la producción de lácteos y numerosos productos biotecnológicos. Los principales componentes de la melaza son el agua y los carbohidratos. Los valores promedio de los componentes de la melaza se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
*Composición de la melaza de caña de azúcar (Delgado, 2003)*

Componente	Composición (%)
Agua	20
Sacarosa	35
Glucosa	7
Levulosa	9
Otras sustancias reductoras	3
Otros carbohidratos	4.1
Cenizas	12
Compuestos nitrogenados	4.5
Compuestos no nitrogenados	5
Ceras, esteroides y esterofosfolípidos	0.4

## Los poliuretanos

En términos generales, los poliuretanos son el producto de la condensación de un poliisocianato con un poliol, en presencia de otros reactivos. Durante el proceso de policondensación, se producen reacciones químicas que producen diversos enlaces, entre ellos el grupo uretano según la siguiente ecuación:



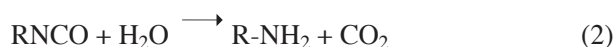
En la síntesis de un poliuretano, son muchas las variables que se deben controlar para la obtención de un producto adecuado a las aplicaciones requeridas. Entre esas variables se incluyen la optimización de las cantidades relativas de los reactivos, las variaciones en

la funcionalidad del poliol, la relación isomérica del isocianato, y el proceso de mezclado de los reactivos, entre otras (Oertel, 1993).

Debido a que los residuos de la melaza poseen un contenido importante de grupos OH, los cuales podrían estar disponibles para la reacción con el isocianato, se consideró su utilización como sustituyente parcial del poliol que se usa comúnmente en la elaboración de bioespumas de poliuretano.

Los poliuretanos son polímeros de importancia económica por la gran variedad de usos en la industria (Woods, 1990). La ventaja de los poliuretanos elaborados con melaza de caña de azúcar es la de ser potencialmente biodegradables, es decir, se descomponen más rápido que los materiales obtenidos con reactivos derivados del petróleo (Moya y col., 1995; Vega-Baudrit y col., 2005).

Por otro lado, uno de los puntos que debe ser considerado y controlado durante la elaboración de las ERP es el contenido de agua de los polioles y en este caso de la melaza, pues de su contenido van a depender las características finales del poliuretano sintetizado (Moya y col., 1995; Oertel, 1993; Vega-Baudrit, 1995). Para la elaboración de las espumas de poliuretano con las características óptimas, es necesario utilizar una razón estequiométrica de grupos NCO respecto a los OH de 1.2. Lo anterior se debe a la necesidad de que exista un exceso de isocianato durante el proceso de polimerización, pues se producen reacciones secundarias, que en este caso, brindan las características finales del material como es el espumado. La reacción de este proceso es el producto de la descomposición del isocianato en presencia del agua según la siguiente reacción:



Otros tipos de reacciones secundarias que se producen durante la elaboración de poliuretanos implican la reacción isocianato-uretano y la reacción isocianato-urea, las cuales producen enlaces alofanato y otros, respectivamente (Oertel, 1993).

En esta investigación se utilizaron distintas relaciones de mezclas de poliol-melaza. Posteriormente, estas mezclas se hicieron polimerizar con el isocianato en distintas proporciones de (NCO/OH), en presencia de un catalizador de estaño. Las espumas de poliuretano sintetizadas fueron caracterizadas mediante la determinación de la densidad aparente y las propiedades térmicas y mecánicas. Los resultados obtenidos fueron comparados con un poliuretano de referencia que no contenía melaza de caña de azúcar.

## PARTE EXPERIMENTAL

**Materiales**

La melaza de caña de azúcar fue donada por una industria dedicada al procesamiento del azúcar. Se mantuvo bajo refrigeración ( $<10^{\circ}\text{C}$ ). Se le colocó zeolita como desecante. Se determinó su contenido de humedad mediante el método de Karl-Fischer (Equipo Karl-Fischer Coulometer 684 Marca Metrohm) (Vega-Baudrit y col., 2002). Se utilizó como polioli el polietilén glicol PEG-300 (Aldrich, 20,237-1), el cual se llevó a 1.7% de humedad mediante rotaevaporación. La humedad se determinó mediante el método de Karl-Fischer (Equipo Karl-Fischer Coulometer 684 Marca Metrohm) (Vega-Baudrit y col., 2002). El isocianato utilizado fue el difenilmetanodiisocianato, DMI (MDI) de grado comercial, utilizado para la obtención de paneles de aislamiento y en construcción. Los grupos isocianato del DMI fueron cuantificados utilizando el método ASTM D 4666-8 (potenciómetro Hanna Instruments, serie #372887, Microprocessor Bench pHMeter) (Vega-Baudrit y col., 2002), bajo las siguientes modificaciones: la cantidad de material empleado fue de  $1 \times 10^{-3}$  kg, y se utilizó dietilamina en lugar de dibutilamina. El rango de temperatura fue de  $40-45^{\circ}\text{C}$ . Se utilizó dibutil dilaurato de estaño, DBLE (DBTL, Aldrich 29,123-4) como catalizador.

**Caracterización de las materias primas**

El análisis del contenido de grupos OH presentes en el polioli PEG-300 y en la melaza se realizó según el método ASTM D4274-88. Para la determinación de grupos ácido libre (COOH) de los materiales utilizados, se usó el método descrito en JIS K 1557-1970. En ambos casos se utilizó un potenciómetro Hanna Instruments (Serie #372887, Microprocessor Bench pHMeter) (Vega-Baudrit y col., 2002). El contenido de azúcares de la melaza fue determinado mediante cromatografía líquida de alta resolución (CLAR) bajo las siguientes condiciones: Columna de aminopropil, cromatógrafo Hewlett Packard 1050, detector IR Hewlett Packard Mod. 1047-A, agua tridestilada desionizada, filtros nucleopore policarbonato ( $2 \times 10^{-7}$  m), patrones estándar de glucosa, fructosa, sacarosa, fase móvil acetonitrilo/agua en una relación 80/20, a  $30^{\circ}\text{C}$ , flujo  $3.3 \times 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/s. Para la determinación de los grados Brix, se utilizó la técnica de índice de refracción mediante la utilización de un refractómetro Bellingham Stanley Ltd., modelo RFM 330.

**Preparación de las espumas de poliuretano**

Se prepararon cuatro mezclas (% peso:peso) de 50:50 (ERP50), 30:70 (ERP70), 20:80 (ERP80) y 10:90 (ERP90) con % de PEG:Melaza. Como patrón comparativo, se preparó una espuma de poliuretano que no contenía melaza (ERP0). En la Tabla 2 se muestran las cantidades utilizadas para elaborar las espumas de poliuretano, así como la nomenclatura empleada durante esta investigación. Las mezclas de la melaza con el polietilén glicol, conocido como PEG-300, se realizaron en recipientes plásticos. La relación de grupos isocianato a grupos OH empleada en esta investigación fue de 1.2. La cantidad de la mezcla a ser utilizada se calculó mediante la siguiente relación:

$$\text{NCO/OH: } \frac{\text{masa DMI(kg)} \times \text{eq.}}{\text{masa mezcla(kg)} \times \text{eq.}} \quad (3)$$

**Tabla 2**

*Cantidades utilizadas para la preparación de espumas rígidas de poliuretano ERP a partir de la melaza de caña de azúcar y la nomenclatura empleada*

Muestra	% en peso de melaza	Masa (kg) $\times 10^{-3}$		
		mezcla	DMI	Nomenclatura
1	0	28.95	30.00	ERP0
2	50	24.70	30.00	ERP50
3	70	25.97	30.00	ERP70
4	80	27.09	30.00	ERP80
5	90	27.60	30.00	ERP90

La metodología empleada para la preparación de las espumas de poliuretano es similar a la mencionada en la bibliografía existente (Hirose y col., 1994; Vega-Baudrit y col., 2002; 2004).

Se utilizó un agitador mecánico que giraba en torno a los 900 rpm. Cuando se alcanzó la gelación, proceso que se observó por un aumento de la temperatura y viscosidad de la mezcla de reacción, se retiró la propela y se dejó crecer la espuma. Se mantuvo el poliuretano en reposo (tiempo de curado) por 24 horas a temperatura ambiente. Asimismo, se sintetizó una espuma de referencia, la cual no contenía melaza.

**Metodologías empleadas para la caracterización de las espumas de poliuretano sintetizadas****Análisis de termogravimetría, ATG (TGA)**

Se empleó atmósfera de nitrógeno a un flujo de  $6.7 \times 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/s; velocidad de calentamiento de  $0.33^{\circ}\text{C/s}$  y un

intervalo de temperatura de 70°C a 675°C (Hirose y col., 1994). El equipo utilizado fue un TGA 6 Perkin-Elmer.

### Densidad aparente

Se cortaron las espumas en forma de cubos de 0.0200 m de lado y su masa fue determinada con una balanza analítica [Densidad ( $\rho$ )= Peso (kg)/Volumen (m<sup>3</sup>)].

### Propiedades mecánicas

Se tomó como base el método de compresión ASTM-D695M (Vega-Baudrit y col., 2002), modificando las dimensiones recomendadas en el método por cubos de 0.0200 m de lado. El análisis se realizó a temperatura ambiente con una velocidad para las travesas de  $1.7 \times 10^{-3}$  m/s. Se realizaron cinco repeticiones para cada tipo de muestra sintetizada, tomando como datos de análisis el esfuerzo de compresión a un 10% de deformación. Los datos de esfuerzo de compresión ( $\sigma$ ) y el valor obtenido para el Módulo de Young (E) fueron divididos entre la densidad aparente para normalizar el efecto de ésta sobre los resultados de las pruebas mecánicas (Hirose y col., 1994). Para esta caracterización se empleó un equipo de pruebas mecánicas universal marca Orientec RTM-100, según las instrucciones del fabricante.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de las materias primas

Como se ha mencionado, debido al importante contenido de grupos hidroxilo (-OH), la melaza es utilizada como un sustituto parcial del PEG. Lo anterior justifica la necesidad de caracterizar este sustrato en cuanto a su contenido de grupos hidroxilo, ya sea de tipo alcohol o ácido carboxílico. La melaza es principalmente una mezcla de sacáridos con grupos hidroxilo de tipo primario y secundario (Sanjuán, 1997). En la Tabla 3 se observan los resultados obtenidos para el análisis de los principales azúcares de la melaza mediante CLAR.

**Tabla 3**

*Resultados obtenidos en el análisis de azúcares de la melaza mediante CLAR*

Azúcar	Contenido (%)
Sacarosa	30.6
Glucosa	8.4
Fructosa	8.2
Otros componentes	52.8

Debido a que la relación molecular de la cantidad de grupos isocianato y la cantidad total de grupos hidroxilo (NCO/OH) es un parámetro fundamental para la síntesis de poliuretanos y sus propiedades finales, es necesario conocer tanto el contenido de grupos hidroxilo, como el contenido de grupos NCO del DMI empleado para la síntesis. En este estudio se utilizó una relación de NCO/OH de 1.2, ya que investigaciones previas (Moya y col., 2005; Vega-Baudrit, 1995; Vega-Baudrit y col., 2004) han demostrado que las espumas de poliuretano presentan mejores propiedades en general, al emplear esta relación. Como se observa en la Tabla 4, la melaza mostró un valor total de grupos OH de 7.71 eq/kg y un valor de ácido libre de 0.95 eq/kg, mientras que el PEG-300 presentó un valor de 6.45 eq/kg. Finalmente, el DMI mostró un valor de 7.50 eq/kg en cuanto a su contenido de grupos NCO.

**Tabla 4**

*Resultados obtenidos en la cuantificación de grupos (-OH) y (NCO) para la determinación de la relación isométrica, la humedad del PEG-300 y la melaza*

Sustrato	Grupos OH eq. grupos -OH/ kg de sustrato	Grupos COOH eq. grupos -COOH/ kg de sustrato	Humedad* (%)	Grupos NCO eq. grupos -NCO/ kg de sustrato
PEG-300	6.45	N/A	1.17	---
Melaza	7.71	0.95	3.49	---
DMI	---	---	---	7.50

\* Titulación Karl Fischer.

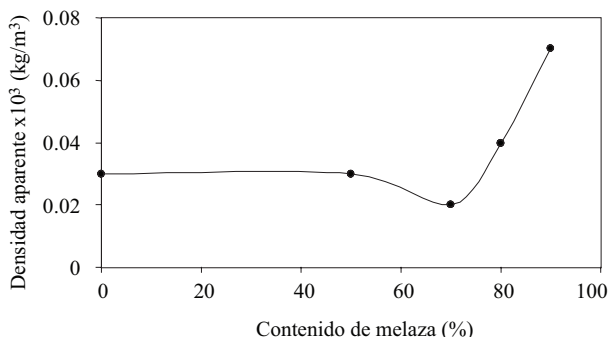
Asimismo, es importante la determinación del contenido de humedad de los sustratos empleados durante la síntesis del poliuretano, pues permite controlar la formación de la espuma del polímero. En el caso de existir abundancia de humedad en el sistema de estudio, el espumado es excesivo y se obtienen espumas de poliuretano con propiedades físicas no deseadas.

El resultado obtenido (Tabla 3) en la humedad de la melaza de caña de azúcar fue de 3.49% (titulación de Karl Fischer). Por otra parte, se realizó el análisis de grados Brix, del cual se obtuvo un valor de 79.3°B, dato que representa la cantidad de sólidos disueltos expresados como sacarosa. El anterior resultado implicaría tener un 20.7% de agua, el cual no concuerda con el obtenido por la técnica de Karl-Fischer debido a que con esta técnica se analiza el contenido de agua no ocluida en el material. Este último valor está más acorde con el observado en la composición de la melaza de caña de azúcar mostrada en la Tabla 1.

### Propiedades físicas de las espumas de poliuretano

Si se pretende utilizar las espumas de poliuretano como material de relleno, la densidad de una espuma es una característica esencial, ya que permite la obtención de mayor volumen de material con el menor peso posible. Asimismo, por razones económicas, es importante determinar el contenido óptimo de melaza que se puede introducir en una formulación y su efecto sobre la densidad de la espuma. Además es conocido que los azúcares por tener tres grupos hidroxilo por unidad de grupo piranósico aumenta el grado de entrecruzamiento de los poliuretanos afectando, por lo tanto, sus propiedades térmicas y mecánicas.

Con las cuatro mezclas de 50:50 (ERP50), 30:70 (ERP70), 20:80 (ERP80) y 10:90 (ERP90) con % de PEG:Melaza y con la espuma de poliuretano que no contenía melaza (ERP0), en la Figura 1 muestra un gráfico de la variación de la densidad de las espumas de poliuretano en función del contenido de melaza. La muestra que no contiene melaza (ERP0) presentó una densidad aparente de  $30 \text{ kg/m}^3$ , similar a la muestra ERP50.



**Figura 1. Efecto del contenido de melaza en la densidad aparente ( $\rho$ ) de las espumas de poliuretano que contienen melaza de caña de azúcar**

De esta figura se deduce que la espuma sintetizada con un 70% de melaza es la que presenta un valor más bajo para dicho parámetro, lo que la hace ideal para los propósitos mencionados. Las muestras con mayor contenido de melaza (ERP80 y ERP90), mostraron los valores mayores en la densidad aparente, incluso superiores a la que presenta la muestra utilizada como referencia (ERP0).

### Propiedades térmicas de las espumas de poliuretano

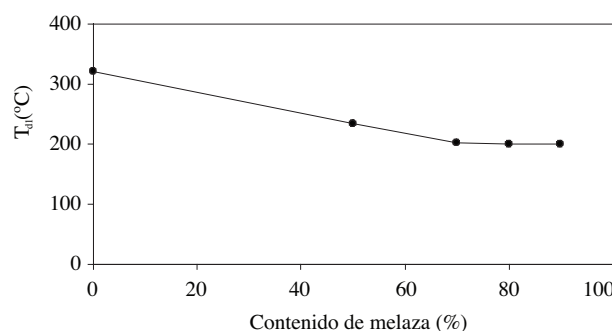
Los datos obtenidos para la primera temperatura de descomposición ( $T_{d1}$ ) conocida también como tem-

peratura inicial de descomposición en un termograma (Figura 2) y para la segunda temperatura de descomposición ( $T_{d2}$ ) o temperatura a la máxima velocidad de degradación térmica en un "derivatograma", se muestran en la Figura 3. En la Tabla 5 se muestran los datos de materiales residuales inertes obtenidos mediante este análisis.

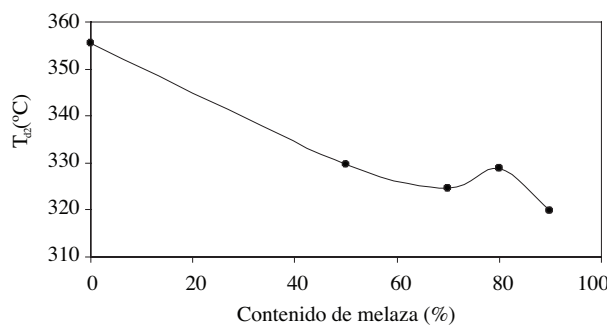
Se determinó que la incorporación de melaza disminuye la estabilidad térmica de los poliuretanos (Figura 2), pues el valor de  $T_{d1}$  de la espuma de referencia es cercano a los  $320^\circ\text{C}$ , mientras que el de las espumas con melaza muestran valores entre  $200$  y  $235^\circ\text{C}$ , manteniéndose casi constante a partir del 70% de contenido de melaza. Hirose y colaboradores observaron que los materiales que contienen mono y disacáridos, inician su temperatura de descomposición alrededor de los  $200^\circ\text{C}$  (Hirose y col., 1994), unido al hecho de que los enlaces uretano se disocian para formar grupos (-OH) y grupos (NCO) a temperaturas alrededor de los  $250^\circ\text{C}$  (Hernández y Macosko, 1994). Por lo tanto, los poliuretanos que contengan disacáridos en su estructura van a mostrar una disminución de su temperatura inicial de descomposición ( $T_{d1}$ ).

Con respecto a la temperatura de máxima velocidad de descomposición ( $T_{d2}$ ), la espuma de referencia (ERP0) presenta una mayor  $T_{d2}$ , indicando una mayor estabilidad térmica (Figura 3). En las espumas de poliuretano que contienen melaza de caña de azúcar, no se encontraron diferencias significativas en el valor de esas  $T_{d2}$ . Sin embargo, en términos generales, se observa una tendencia a disminuir la estabilidad térmica del poliuretano, conforme se incrementa el contenido de melaza utilizado.

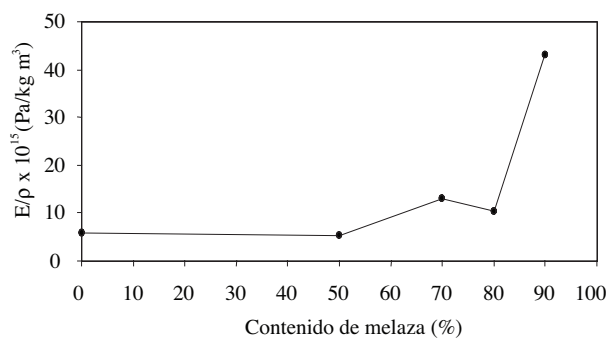
Finalmente, respecto al contenido de ceniza, la tendencia general mostrada (Tabla 5), indica que las muestras que contienen la melaza de caña de azúcar, poseen una mayor masa residual que la muestra de referencia (ERP0).



**Figura 2. Efecto del contenido de melaza en la temperatura inicial de descomposición ( $T_{d1}$ ) de las espumas de poliuretano**



**Figura 3.** Efecto del contenido de melaza en la temperatura a la máxima velocidad de degradación térmica ( $T_{d2}$ ) de las espumas de poliuretano



**Figura 5.** Efecto del contenido de melaza en el módulo de Young ( $E$ ) de las espumas de poliuretano en función de la densidad aparente del material,  $\rho$  ( $E/\rho$ , Pa/kg m³)

**Tabla 5**

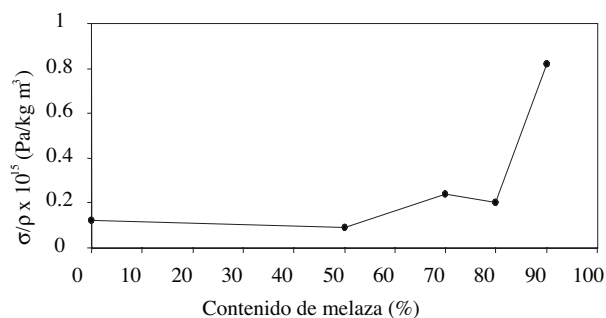
*Efecto del contenido de melaza en la masa residual de las espumas de poliuretano (a 675 °C)*

Muestra	Masa residual $\times 10^{-6}$ (kg)
ERP0	18
ERP50	24
ERP70	25
ERP80	27
ERP90	26

### Propiedades mecánicas de las espumas de poliuretano

Las tendencias mostradas por las espumas de poliuretano en los análisis mecánicos se muestran en las Figuras 4 y 5.

Como es de esperarse, en función del aumento del contenido de melaza utilizado en la preparación de las



**Figura 4.** Efecto del contenido de melaza en el esfuerzo de compresión ( $\sigma$ ) de las espumas de poliuretano en función de la densidad aparente del material,  $\rho$  ( $\sigma/\rho$ , Pa/kg m³)

espumas de poliuretano, tanto el esfuerzo de compresión normalizado ( $\sigma/\rho$ ) como el módulo de Young normalizado ( $E/\rho$ ), tienden a aumentar con el incremento de la cantidad de este sustrato. Es decir, la mezcla de PEG:melaza actúa como un endurecedor de la matriz polimérica del poliuretano.

Se encontró en estudios previos que la utilización de este tipo de materiales conlleva a un aumento de las propiedades mecánicas en general, debido probablemente a la creación de algunos puntos de entrecruzamiento entre los grupos OH del sustrato utilizado y el isocianato (Vega-Baudrit, 1995; Vega-Baudrit y col., 2002; 2004). Estudios realizados a la síntesis de espumas de poliuretano a partir de desechos de la cáscara de piña, permiten verificar que materiales lignocelulósicos proveen a la matriz del poliuretano una mayor capacidad de soportar pruebas de compresión y generar un aumento en el módulo (Moya y col., 1995).

### COMENTARIO FINAL

Aunque la espuma de poliuretano sintetizada con 90% de melaza (ERP90) es la que presenta la mayor resistencia a la compresión y su módulo también se ve beneficiado con la adición de este material en el mayor porcentaje, físicamente, esta espuma presenta cierta tendencia a pulverizarse, lo que la hace poco manejable para cualquier uso. Por tanto, como análisis de los datos gráficos se concluye que la espuma con un 70 % de melaza (ERP70) es la que presenta las mejores características mecánicas.

A partir de los datos generados por esta investigación, se emplearon residuos sólidos también generados por la agroindustrialización de la caña de azúcar, para ser utilizados como base para la elaboración de materiales compuestos.

## CONCLUSIONES

Finalizada esta investigación, se concluyó que es factible el empleo de materiales de origen natural como la melaza de caña de azúcar, de tal forma que permita la sustitución parcial de reactivos generados de la actividad petroquímica. Lo anterior permite emplear estos materiales de forma novedosa, lo que conlleva a dar un mayor valor agregado a estos subproductos de la agroindustria cañera.

En este estudio se sintetizaron espumas rígidas de poliuretano de baja densidad empleando melaza de caña de azúcar como sustituto parcial de los reactivos de partida. A pesar de que estos materiales, respecto al polímero de referencia, mostraron una disminución en las propiedades térmicas, tanto las propiedades mecánicas como la densidad aparente, se vieron favorecidas con la presencia de la melaza de caña de azúcar. Lo anterior debe ser tomado en cuenta a la hora de establecer sus posibles aplicaciones industriales.

## NOMENCLATURA

ATG	Análisis de termogravimetría ( <i>TGA</i> , siglas en inglés, <i>thermogravimetric analysis</i> )
CLAR	Cromatografía líquida de alta resolución ( <i>HPLC</i> , siglas en inglés, <i>high pressure liquid chromatography</i> )
DBLE	Dibutil dilaurato de estaño ( <i>DBTL</i> , siglas en inglés, <i>dibuthyl tin laureate</i> )
DMI	Difenilmetanodiisocianato ( <i>MDI</i> , siglas en inglés, <i>methanediphenyl-diisocyanate</i> )
E	Módulo de Young
ERP ( <i>EPU</i> )	Espumas rígidas de poliuretano
IR	Infrarrojo
LAICA	Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar
PEG	Polietilén glicol ( <i>PEG</i> , siglas en inglés, <i>polyethylene glycol</i> )
POLIUNA	Laboratorio de Polímeros de la Universidad Nacional de Costa Rica
<i>RPF</i>	<i>Rigid polyurethane foams</i> , espumas rígidas de poliuretano por sus siglas en inglés
T <sub>d1</sub>	Temperatura inicial de descomposición
T <sub>d2</sub>	Máxima velocidad de degradación térmica
TM	Toneladas métricas

## Letras griegas

$\rho$	Densidad aparente del material
$\sigma$	Esfuerzo de compresión

## BIBLIOGRAFÍA

- Arroyo, M., Ibarra, L. 1995. Fibras orgánicas cortas como refuerzo de matrices poliméricas. *Rev. Plást. Mod.* 74: 226-232.
- Delgado, K. 2003. Uso alternativo de residuos de caña de azúcar para la obtención de espumas rígidas de poliuretano. *Tesis Profesional*. Universidad Nacional de Costa Rica, Escuela de Química. Heredia, Costa Rica.
- Hatakeyama, H., Hirose, S., Nakamura, K., Hatakeyama, T. 1993. New types of polyurethanes derived from lignocelluloses and saccharides in cellulose: Chemical, biochemical and material aspects. En *Ellis Horwood Series in Polymer Science and Technology*, Ed. Ellis Horwood Limited. P. 525. Chichester, Reino Unido.
- Hernández, M., Macosko, C. 1994. Thermal stability of polyurethanes: applications to thermoset recycling. En *35th Annual Polyurethane Technical Marketing Conference*, Pp. 669-674. Boston, EE.UU.
- Hirose, S., Kobashigawa, K., Hatakeyama, H. 1994. Preparation and physical properties of polyurethanes derived from molasses. *Sen-I-Gakkaishi*. 50(11):78-82.
- Leão, L., Carvalho, F.X., Frollini, E. 1997. Utilization of natural fibers in plastic composites: Problems and opportunities. En *Lignocellulosic Plastic Composites*. Ed. UNESP. P. 23. Sao Paulo, Brasil.
- Marcovich, N., Reboredo, M., Aranguren, M. 1998. Mechanical properties of wood flour unsaturated polyester composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 70:2121-2131.
- Moya, M., Sibaja, M., Durán, M., Vega-Baudrit, J. 1995. Obtención potencial de polímeros biodegradables. Estudio de la disolución de la cáscara de piña en PEG. *Uniciencia*, 12:39-43.
- Moya, M., Vega-Baudrit, J., Sibaja, M., Durán, M. 2001. Polyurethanes from pineapple wastes. En *Recent advances in environmentally compatible polymers*. Ed. Woodhead Pub. Lim. P. 320. Cambridge, Reino Unido.
- Oertel, G. 1993. *Polyurethane Handbook: Chemistry, Raw Materials, Processing, Application, Properties*. Ed. Hanser P. 7. Munich, Alemania.
- Quesada-Solís, K., Alvarado-Aguilar, P., Sibaja, M., Vega-Baudrit, J. 2005. Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comusus*, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster. *Rev. Iber. Polím.* 5(2):157-179.
- Sanjuán, R. 1997. *Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel*. Ed. Universidad de Guadalajara. P. 49-54, 57-86. Guadalajara, México.
- Vega-Baudrit, J. 1995. Obtención de espumas rígidas de PU a partir de cáscara de piña. *Tesis Profesional*. Universidad de Costa Rica, Escuela de Química. San José, Costa Rica.
- Vega-Baudrit, J., Alvarado-Aguilar, P., Sibaja-Ballesteros, R., Moya-Portuguez, M., Nikolaev, S. 2005. Obtención y caracterización de disoluciones de polietilén glicol (PEG) a partir de residuos de olote de la agroindustria del maíz. Síntesis de polímeros potencialmente biodegradables. *Rev. Iber. Polím.* 6(3):199-212.
- Vega-Baudrit, J., Moya, M., Sibaja, M., Pereira, R., Alvarado, P. 2004. Síntesis y caracterización de poliuretanos potencialmente biodegradables a partir de desechos de la agroindustria del maíz. *Rev. Quím. Ind.* 51(9):572-578.
- Vega-Baudrit, J., Moya, M., Sibaja, Durán, M. 2002. Obtención de polímeros a partir de biomasa: Síntesis y caracterización de polímeros potencialmente biodegradables derivados de cáscara de piña (*Ananas comusus*). *Rev. Quím. Ind.* 49(2):354-358.
- Woods, G. 1990. *The ICI polyurethanes book*. Ed. John Wiley and Sons. P. 15-30. Nueva York, EE. UU.
- Zárate, C., Aranguren, M.I., Reboredo, M. 2000. Resol-Vegetable Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 77:1832-1840.
- Zhu, W H., Tobías, B.C. 1995. Banana fiber strands reinforced polyester composites. *J. Mater. Sci. Lett.* 14:508-510.