

# COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE ESPUMAS CON BASE POLIOLEFINA, OBTENIDOS EN ENSAYOS DE COMPRESIÓN E INDENTACIÓN POR CAÍDA DE DARDO. CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO DINÁMICO

Por

O. A. Almanza<sup>\*1</sup>, J. G. Carriazo<sup>2</sup>, M. A. Rodríguez, Pérez<sup>3</sup> & J. A. de Saja<sup>3</sup>

## Resumen

**O. A. Almanza, J. G. Carriazo, M. A. Rodríguez, Pérez & J. A. de Saja:** Comparación del módulo de elasticidad de espumas con base poliolefina, obtenidos en ensayos de compresión e indentación por caída de dardo. Curvas de amortiguamiento dinámico. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 185-192, 2010. ISSN 0370-3908.

Se realizó una serie de experimentos en caída de dardo (impacto) con el objeto de cuantificar la capacidad de absorción de energía, antes de producirse un fallo por fractura, de un conjunto de espumas con base poliolefina. Se determinó la resistencia a la fractura  $s_{\text{máx}}$ , la tenacidad y las curvas de amortiguamiento dinámico, donde se representa el pico de desaceleración  $G$  para cada muestra en función del esfuerzo estático aplicado. En estas curvas es posible establecer tres regiones asociadas con explicaciones físicas diferentes, que permiten establecer la zona óptima de trabajo de estos materiales en condiciones particulares de uso. La rigidez de las espumas estudiadas crece con la densidad de los materiales. A partir de los ensayos es posible inferir que el mecanismo que contribuye apreciablemente al módulo de elasticidad obtenido en ensayos de indentación está relacionado con el estiramiento de las paredes de las celdas del material. Los módulos de elasticidad medidos en los ensayos de indentación resultaron ser casi independientes del diámetro del dardo. Los módulos de elasticidad obtenidos en ensayos de indentación son menores que los estimados en ensayos de compresión.

**Palabras clave:** caracterización de espumas, espumas de poliolefina, propiedades mecánicas de materiales, curvas de amortiguamiento dinámico, indentación.

<sup>1</sup> Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup> Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

<sup>3</sup> Departamento de Física de la Materia Condensada, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid (España).

\* A quien la correspondencia debe ser enviada: Correo electrónico: oalmanzam@unal.edu.co

### Abstract

A series of experiments of dart fall (impact tests) were developed in order to quantify the capacity of absorbing energy on a set of foam materials based on polyolefin structure, prior to a fracture failure can be occurred. Foams were produced by a process of nitrogen dissolution at high pressure. Fracture strength ( $s_{m\acute{a}x}$ ), tenacity and dynamic cushioning curves, representing the deceleration peak (G) for each sample as a function of the applied static stress, have been determined. On these curves it is possible to establish three regions associated with different physical explanations to give the optimal work zone to be used in particular conditions. The rigidity of these foams increases with the density of materials. From the developed tests it is possible to suppose that stretching of cell walls is a determining aspect in the mechanism to obtain the modulus of elasticity observed by the indentation experiments. The elasticity modules measured by indentation almost were independent of the dart diameter. These elasticity modules are lesser than those estimated by compression tests.

**Key words:** characterization of foams, polyolefin foam, mechanic properties of materials, dynamic cushioning curves, indentation.

## 1. Introducción

Las espumas poliméricas son ampliamente usadas en aplicaciones de absorción de energía, como en el caso de los sistemas de protección contra accidentes, atenuación de traumas en equipos avanzados de protección balística y de protección contra ondas de explosiones (Ouellet *et al.*, 2006). Con el paso de los años, las poliolefinas espumadas han mostrado mayor eficiencia y adaptabilidad a necesidades específicas. Entre ellas, su respuesta a solicitudes mecánicas es esencial en muchas de sus aplicaciones. Por esta razón, una parte de la investigación se ha dirigido hacia el análisis de la respuesta mecánica de estas espumas. Ello se ha realizado, desde el punto de vista experimental, usando dos técnicas diferentes, directamente relacionadas con aplicaciones distintas de estos materiales: experimentos en compresión a bajas velocidades de deformación y los ensayos de impacto por caída de dardo (peso) del cual nos ocuparemos en este artículo.

Las espumas de poliolefinas son materiales viscoelásticos y debido a esa razón sus propiedades mecánicas en general, y su resistencia al impacto en particular, dependen fuertemente de las condiciones de experimentación. Para establecer unas condiciones particulares de medida nos hemos centrado en una de sus aplicaciones de interés tecnológico. Esta ha sido su utilización como material de embalaje (Ozturk y Anlas, 2009; Marsavina y Sadowski, 2008; Ruiz-Herrero *et al.*, 2005; Lye *et al.*, 2004; Lye y Chuchom, 1997). En esta línea, existen trabajos previos realizados sobre algunas espumas a base de polímeros (Ozturk y Anlas, 2009; Ruiz-Herrero *et al.*, 2005; Loveridge *et al.*, 1991; Mills *et al.*, 1989), investigaciones en las que se ha recurrido a un cabezal (dardo) plano

instrumentado, para así tener información instantánea de las fuerzas y deformaciones experimentadas por la muestra durante la compresión con el dardo. Es un ensayo interesante que suministra información suficiente en determinadas aplicaciones. No obstante, este tipo de medida no toma en cuenta que los impactos son a menudo causados por un elemento agudo más pequeño que la muestra, donde más que deformación de compresión se debería hablar de indentación.

El objetivo del presente artículo es establecer la resistencia a la fractura  $s_{m\acute{a}x}$ , la tenacidad  $K_{IC}$  y el módulo de elasticidad  $E_f$  de un conjunto de espumas con base poliolefina, de interés industrial y comercial, mediante determinación del nivel de esfuerzo transmitido en cada instante cuando un dardo se deja caer sobre cada una de ellas. Adicionalmente, este artículo constituye un material complementario para el estudio y aprendizaje de las propiedades mecánicas de materiales, dentro del contexto de un curso de Ciencia de Materiales (Carriazo, 2009).

## 2. Aspectos teóricos

**Resistencia a la fractura y tenacidad:** las propiedades de resistencia al impacto dependen de factores como la velocidad de impacto, la temperatura, la presencia de discontinuidades o entallas, la orientación del polímero base, el grado de cristalinidad, el posicionamiento de las probetas, la historia mecánica, la presencia de aditivos, entre otros. Ello hace, una vez más, que sea muy complejo caracterizar y, sobre todo comprender la denominada **tenacidad**, habilidad de los materiales para absorber energía antes de producirse un fallo por rotura (fractura) (Velasco *et al.*, 2000; Rodríguez-Pérez *et al.*, 1999; Velasco *et al.*, 1998).

La aplicación del denominado análisis estático (**Casiraghi et al.**, 1988) permite, a partir de los datos registrados, obtener los valores de resistencia a la fractura y tenacidad de las espumas en estudio. Las ecuaciones base del análisis estático son las siguientes:

$$a(t) = \frac{F(t) - P}{m} \quad (1.a)$$

$$v(t) = v_0 - \int_0^t \frac{F(t') - P}{m} dt' \quad (1.b)$$

$$x(t) = \int_0^t (v_0 - \int_0^{t'} \frac{F(t'') - P}{m} dt'') dt' \quad (1.c)$$

$$E(t) = \int_0^t F(t') (v_0 - \int_0^{t'} \frac{F(t'') - P}{m} dt'') dt' \quad (1.d)$$

En estas ecuaciones  $F$ ,  $x$ ,  $v$ ,  $a$  y  $E$  representan la fuerza, desplazamiento, velocidad, aceleración y energía en cada al instante, respectivamente.  $P$  es el peso y  $m$  es la masa efectiva del dardo.

La tenacidad de las muestras, puede ser evaluada como la energía perdida por el dardo hasta que se alcanza la deformación máxima dividida por el volumen principal de muestra involucrado en la fractura (área transversal del dardo multiplicada por el espesor de la muestra) (**Rodríguez-Pérez et al.**, 1999), esto es:

$$\text{Tenacidad } (K)_c = \frac{E_{\text{máx}} - E_0}{\pi r Z} \quad (2)$$

$E_{\text{máx}}$  es la energía del dardo cuando la fuerza sobre él es máxima,  $E_0$  es la energía del dardo justo antes de la colisión, su valor depende de la altura de caída del dardo,  $r$  es el radio del dardo y  $Z$  el espesor de la muestra. Es de reseñar que se ha supuesto que la energía perdida por el dardo hasta que se experimenta la deformación máxima, es igual a la energía absorbida por la espuma en la fractura.

En el mismo experimento es posible obtener la resistencia a la fractura como el valor del esfuerzo máximo obtenido a partir de la ecuación para platos flexados (**Timoshenko y Woinwsky - Krieger**, 1984):

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{Z^2} (1 - \nu) \left( 0.485 \log \frac{a}{Z} + 0.52 \right) \quad (3)$$

expresión en la cual  $F_{\text{máx}}$  es la fuerza máxima,  $Z$  el espesor de la muestra,  $a$  es el radio interno de los anillos de sujeción, y  $\nu$  es el coeficiente de Poisson de la muestra. Se utilizó un valor de  $\nu = 0.1$  para todas las espumas estudiadas.

**Indentación:** el fenómeno de indentación tiene lugar cuando colisiona un objeto con menor sección de impacto que el objeto contra el cual impacta. Un modelo de indentación fue esbozado por **Greszczuk** (1982) quien describe el fenómeno de indentación de un pequeño elemento hemisférico sobre un material. Este modelo ha sido utilizado con éxito para analizar la respuesta mecánica de espumas en ensayos de impacto por caída de dardo (**Velasco et al.**, 2000; **Rodríguez-Pérez et al.**, 1999; **Velasco et al.**, 1998). Esencialmente consiste en considerar un dardo hemisférico (impactador) que colisiona contra un material extenso e isotrópico (llamado material blanco o probeta).

Resultados obtenidos por **Rayleigh** (1906), muestran que si el tiempo de contacto entre el impactador y el blanco es muy grande en comparación con sus períodos naturales, las vibraciones del sistema pueden ser despreciadas. En estas condiciones puede asumirse la ley de Hertz (**Hertz y Reine**, 1881):

$$F = n\alpha^{3/2} \quad (4)$$

donde es la profundidad de penetración elástica y el término  $n$  viene definido como:

$$n = \frac{4\sqrt{R_1}}{3\pi(k_1 + k_2)} \quad (5)$$

siendo  $R_1$  el radio del impactador o indentador hemisférico y  $k_1$  y  $k_2$  la rigidez del dardo y el blanco respectivamente. Estos dos parámetros son definidos en el modelo como:

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \quad (7)$$

ecuaciones en las cuales  $E$  es el módulo elástico  $\nu$  el coeficiente de Poisson y los subíndices 1 y 2 se refieren al impactador o dardo y al blanco o probeta respectivamente.

La fuerza máxima soportada por la probeta y el tiempo de contacto entre el dardo y ésta pueden escribirse como:

$$F_{\text{máx}} = n^{2/5} \left( \frac{5v_0^2}{4M} \right)^{3/5} \quad (8)$$

$$t_c = 2.94 \frac{\alpha_1}{v_0} = 2.94 \left( \frac{5}{4Mnv_0^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (9)$$

**Amortiguamiento:** por otro lado, cuando un objeto cayendo se mueve hacia la tierra con una aceleración constante ( $g$ ) debida a la fuerza gravitatoria, para llevar este objeto al reposo, dentro de una distancia menor que la altura desde la cual ha caído, se requiere una aceleración negativa superior a la de la gravedad. Un adecuado material amortiguador es aquel que asegura que haya suficiente distancia para que el objeto sea llevado al reposo y al mismo tiempo suministre la fuerza de desaceleración necesaria para ello (material amortiguador hace referencia al material utilizado para embalar o empacar un objeto; es el material blanco o probeta utilizada en los ensayos de impacto).

La máxima aceleración que puede ser aplicada a un objeto dado sin causarle daño es conocida como factor de fragilidad  $G$ ; por ejemplo, un objeto con un factor de fragilidad de 50 soportará una desaceleración de 50 veces la debida a la gravedad. El factor de fragilidad de un objeto obviamente debe ser conocido antes de diseñar un empaque para él. El factor de fragilidad se determinó a partir de la relación:

$$G = F_{\text{máx}}/m.g. \quad (10)$$

A título de ejemplo, en la tabla 1 se muestran diferentes valores de  $G$  correspondientes a diversos objetos genéricos (**Zotefoams Ltda., 1992**).

El objetivo entonces de todo material destinado al embalaje o protección, es absorber la energía cinética del objeto empacado mientras mantiene la fuerza transmitida por debajo del límite del cual le causa daño. Varios esquemas han sido sugeridos para caracterizar la absorción de energía en espumas (**Gibson y Ahsby, 1988**), los cuales dan una guía para hacer la mejor elección de un material particular. Determinaremos aquí las llamadas curvas de amortiguamiento dinámico.

### 3. Aspectos experimentales

Para ensayos a rotura se cortaron muestras cilíndricas de 8 cm de diámetro y espesor  $Z$  (tabla 2). La muestra se fijó mediante un sistema de anillos de 60 y 80 mm de diámetro interno y externo respectivamente. Se eligieron condiciones extremas de rotura compatibles con el equipo, es decir la mayor masa de dardo (3.743 kg) y el cabezal de menor diámetro (12.7 mm). La altura de caída fue de 0.99 m, máxima longitud disponible en el equipo.

Con las condiciones previas se alcanza una velocidad de impacto de 4.4 m/s lo que para una muestra de 25mm de espesor equivale a una velocidad de deformación de  $168 \text{ s}^{-1}$ . En las citadas condiciones se comprobó que el dardo perforaba las espumas, siendo despreciables los efectos dinámicos y el porcentaje de energía perdida por el impactador (inferior al 5%).

Para los ensayos de rebote en indentación se cortaron diez (10) muestras, aleatoriamente distribuidas en cada plancha de espuma, con dimensiones de 8cm x 8cm x  $Z$ . Con la muestra situada sobre una placa de acero de igual dimensión que las muestras, se dejó caer el cabezal hemisférico de 12.7 mm de diámetro y masa 0.743 kg. Las alturas ensayadas fueron situadas entre 13 y 30 mm. Estas condiciones experimentales implican velocidades de impacto ( $v_0$ ) entre 0.5 m/s y 0.77 m/s y velocidades de deformación entre  $20 \text{ s}^{-1}$  y  $30.8 \text{ s}^{-1}$ . Los valores característicos del dardo fueron:  $k_1 = 1.38 \cdot 10^{-6} \text{ N/mm}^2$ ,  $v_1 = 0.3$  y  $E_1 = 2.1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ . El coeficiente de Poisson de la espuma se tomó  $\nu_2 = 0.1$ .

Los ensayos para determinar las curvas de amortiguamiento se determinaron con las muestras situadas sobre una placa de acero de igual dimensión que ellas y se realizaron ensayos de impacto con distintas masas de dardo, desde una altura fija de 7.5 cm. La masa del dardo varió entre 0.743 kg y 3.743 kg. Estas masas y la altura de indentación elegida permitieron operar en un rango de energías de impacto de 0.56 J a 2.76 J y un rango de esfuerzo estáticos ( $m/\pi R^2$ ) entre 0.25 y 0.81 kgf/cm<sup>2</sup>;  $R$  es el radio del dardo y  $m$  su masa.

**Tabla 1.** Factores de fragilidad de algunos objetos genéricos (Zotefoams Ltda., 1992).

Factor de fragilidad $G$ .	Tipo de objetos
Hasta 40g	Portadores de discos duros, equipos electrónicos delicados.
40-60g	Monitores de ordenador, impresoras, máquinas de escribir electrónicas
60-80g	Equipos de audio y televisión, portador de discos suaves (disquetes).
80-100g	Electrodomésticos del hogar y hornos.
100-120g	Radiadores, herramientas para maquinaria, máquinas de coser, equipos industriales en general.

**Tabla 2.** Características básicas de las espumas ensayadas en impacto.  $\rho_r$  es la densidad de la espuma,  $\phi$  es el tamaño medio de poro. \*indica un material obtenido con catalizadores metalocénicos. LDPE = low density polyethylene, HDPE = High density polyethylene, EVA = Ethylene Vinyl Acetate Copolymer. MP = Metallocene low density polyethylene foams.

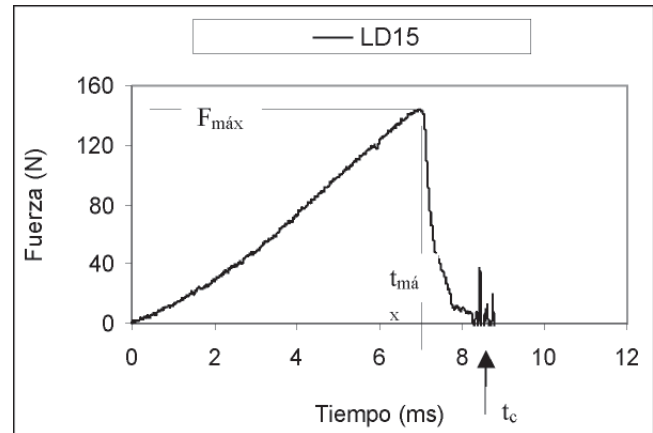
Espumas	Composición Química	$\rho_r$ (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor Z (mm)	$\phi$ ( $\mu$ m)
LD15	LDPE 100 %	16.4	25	296.5
LD18		22.1	25	892.6
LD24		22.3	25	294.8
LD29		30.3	25	448.7
LD33		31.7	25	388.8
LD45		42.7	25	429.3
LD60		55.0	20	545.9
LD70		70.0	12	542.7
HL34	50%LDPE	34.2	25	954.2
HL47	- 50% HDPE	42.9	25	677.2
HL79		80.4	22	1038.4
HD30	HDPE	27.2	23.5	609.1
HD60		51.9	23.5	761.4
EV50	EVA(18%VA)	44.2	25	166.9
VA25	EVA(9%VA)	23.1	25	304.6
VA35		34.2	25	725.8
VA65		59.0	10	356.4
MP24	LDPE*	23.7	25	479.5
MP45		41.8	25	374.2

Todos los ensayos se realizaron en un equipo DARTVIS (CEAST TORINO). Las muestras fueron amablemente suministradas por Z foams ltda y fueron fabricadas mediante un proceso de disolución de nitrógeno a alta presión.

#### 4. Resultados

**Fractura y Tenacidad.** Una curva típica registrada por el equipo en los ensayos de rotura se muestra en la figura 1. A partir de ella puede determinarse la fuerza máxima soportada por el dardo  $F_{m\acute{a}x}$  (aproximadamente igual a la soportada por la espuma), el tiempo en el que la fuerza es máxima ( $t_{m\acute{a}x}$ ) y el tiempo de contacto ( $t_c$ ). Las ecuaciones del análisis estático 1a-d (Mills y Hawng, 1989) permiten obtener las energías del dardo en los tiempos  $t = 0$  (instante de la colisión),  $t = t_{m\acute{a}x}$  (el punto de fuerza máxima) y en un tiempo  $t = t_c$ , así como las correspondientes velocidades en estos tiempos.

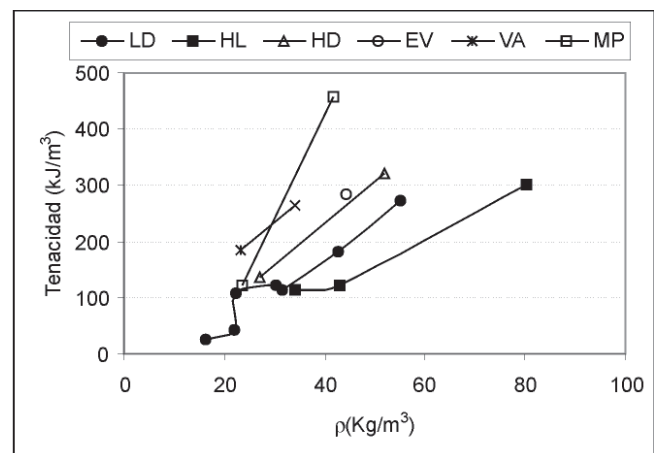
A partir de estos datos y de las ecuaciones 2 y 3 se puede determinar la tenacidad de las muestras y la resistencia a la rotura ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ). Los resultados para estas magnitudes están ilustrados en las figuras 2 y 3 en función de la densidad de los materiales.



**Figura 1.** Curva típica registrada por el equipo de impacto cuando se realizan ensayos a rotura. Espuma LD15.

En las figuras 2 y 3 se puede apreciar que para una misma familia de espumas, la resistencia y la tenacidad de las muestras se incrementa con la densidad. Esto puede ser explicado si se tiene en cuenta que las muestras más densas tienen “paredes de celda” (paredes de las cavidades) más gruesas (Almanza *et al.*, 2001) y ello ha de implicar un mayor trabajo hasta la rotura. Otros factores como la reología de las muestras y la flexibilidad de la fase amorfa de estos materiales pueden también tener influencia sobre las propiedades a la rotura y tenacidad en las muestras. Las líneas que unen puntos de una misma familia de espuma debe mirarse como una guía óptica y no como una tendencia o interpolación entre puntos.

Las espumas MP (espumas de polietileno de baja densidad, obtenidas con catalizadores metalocénicos) aún cuando están basadas en PE (polietileno) difieren del



**Figura 2.** Tenacidad  $K_{TC}$  de las espumas estudiadas.

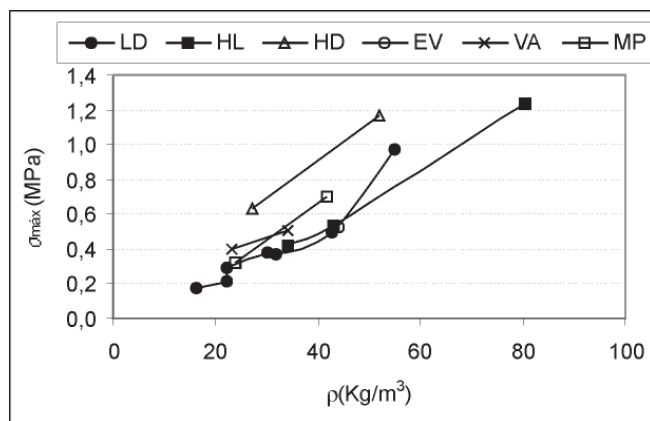


Figura 3. Resistencia a la rotura  $\sigma_{max}$ , de todas las espumas estudiadas (LD, HD, HL, EV, VA, MP).

comportamiento de estas últimas. Esto puede deberse al distinto proceso en la obtención de este material (utilizado catalizador metalocénico), que da mayor flexibilidad a sus cadenas moleculares y en consecuencia distintas características al impacto. El comportamiento de las muestras MP al impacto a rotura, se asemeja más al comportamiento de las espumas basadas en EVA, que también parecen seguir un comportamiento lineal con la densidad, aunque con una pendiente distinta.

**Indentación.** Un ajuste potencial de los valores  $E_{ind}/E_s$  con la densidad relativa de los materiales ( $\rho_f/\rho_s$ ) ha sido representado en la figura 4. A partir de esta figura se puede establecer que el exponente  $n$  de la ecuación (11) toma valores iguales a 1.037 y 1.158 para las espumas basadas en PE y las basadas en EVA respectivamente:

$$\frac{E_{ind}}{E_s} = A \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^n \quad (11)$$

Estos valores de  $n$  son muy similares para los dos conjuntos de espumas, lo que indica que los mecanismos que contribuyen al módulo de elasticidad obtenido en ensayos de indentación, son similares para los dos tipos de materiales químicamente diferentes. Además el valor obtenido para  $n$  es próximo a 1, lo que establece una dependencia casi lineal entre  $E_{ind}$  y  $\rho_f/\rho_s$ . Esto implica que el mecanismo de mayor influencia en el módulo de elasticidad, obtenido en ensayos de indentación, es el estirado de las paredes de las celdas. Lo anterior es una consecuencia de la geometría de los ensayos; el dardo penetra en la espuma y esta se curva localmente formando un arco alrededor del dardo. El ajuste lineal entre  $E_{ind}$  y  $(\rho_f/\rho_s)$  se muestra en la figura 4.

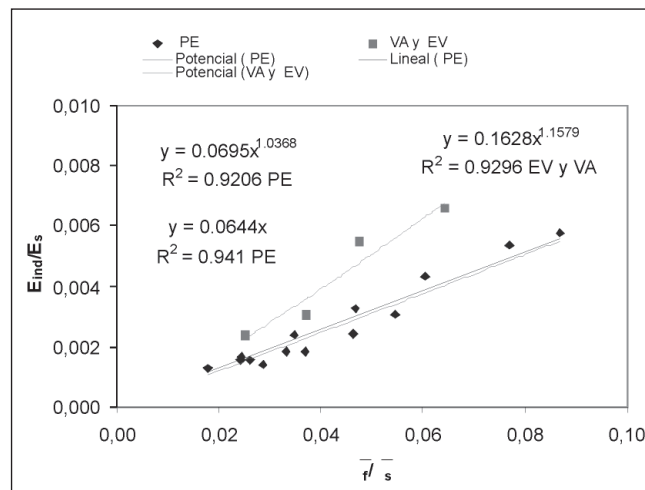


Figura 4. Módulo de elasticidad relativo de las espumas estudiadas frente a la densidad relativa. PE involucra a las espumas LD, MP, HL y HD.  $E_{ind}$  es el módulo de elasticidad de las espumas obtenidas en indentación;  $E_s$  es el módulo de elasticidad del polímero sólido,  $\rho_f$  es la densidad de la espuma y  $\rho_s$  es la densidad del polímero sólido.

Cuando se compara el módulo de elasticidad determinados en los experimentos de compresión con los determinados en ensayos de impacto, se observa que estos últimos son de menor magnitud. Lo anterior es debido a que en ensayos en compresión, a bajas velocidades de deformación, tanto el estirado de las paredes como la flexión de las aristas contribuyen a la rigidez del material en forma significativa. No ocurre lo mismo en ensayos en indentación donde ya se dijo que la mayor contribución era debido al estirado de las paredes de las celdas.

**Curvas de amortiguamiento dinámico.** La figura 5 es una representación de los datos experimentales de amortiguamiento dinámico para la espuma LD18. A partir de esta figura se pueden establecer tres regiones, asociadas con explicaciones físicas distintas.

Cuando un objeto muy liviano se deja caer sobre una espuma (material amortiguador), no aporta la fuerza suficiente como para hacer que la espuma se deforme. Por lo tanto, esta se comportará como una superficie rígida y el objeto experimentará una alta desaceleración, como aparece en el lado izquierdo de la curva de amortiguamiento (figura 4 Zona MN). En esta línea de razonamiento, si un objeto más pesado es dejado caer sobre la misma espuma, causa una gran deformación. En este caso, el choque ocurre durante un mayor tiempo y el objeto experimenta una menor desaceleración; corresponde a la situación representada en la porción central de la curva (Zona NP, es la llamada zona óptima de trabajo de la espuma,). Finalmente,

si un objeto extremadamente pesado se deja caer sobre la espuma, esta se deformará tanto que el objeto continuará hasta tocar con la superficie sobre la cual está apoyada la espuma y el objeto experimentará una alta desaceleración (lado derecho de la curva en la figura 4, Zona PQ).

Para las demás espumas cuando la densidad del material se incrementa el mínimo en la curva se desplaza hacia valores más altos en el esfuerzo. Esto es lógico si tenemos en cuenta las consideraciones físicas explicadas anteriormente y el hecho de que espumas más densas tienen paredes celulares más gruesas y por consiguiente necesitan un mayor esfuerzo para deformarse.

## 5. Conclusiones

El módulo de elasticidad de espumas con base poliolefinas es mayor cuando este es obtenido en ensayos de compresión que para los obtenidos en ensayos de indentación. Lo anterior es debido a que el único mecanismo de influencia en la deformación de las espumas, en

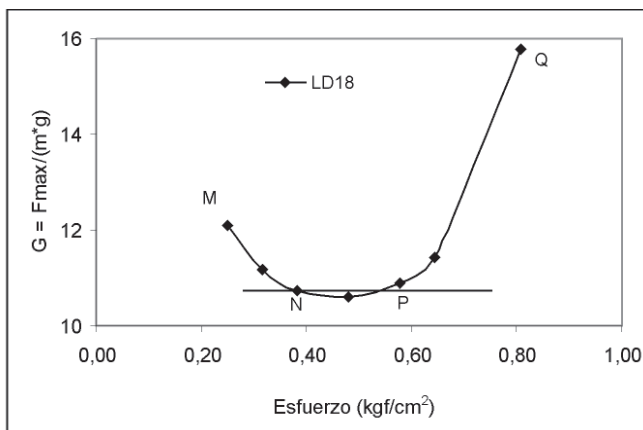


Figura 5. Curva de amortiguamiento para la espuma LD18. La altura de caída del dardo fue de 7.5 cm.

ensayos de indentación, parece ser el estirado de las paredes de las celdas. Lo anterior es importante tener en cuenta cuando se quiera diseñar un embalaje con estos materiales, para una aplicación particular.

Se han determinado las curvas de amortiguamiento dinámico de muestras con base poliolefina.

## 6. Referencias

Almanza O., Rodríguez-Pérez M. A., de Saja J. A. 2001. The microstructure of polyethylene foams produced by a nitrogen solution process. *Polymer*, 42, 7117-7126.

Carriazo, J. G. 2009. Introducción a la Ciencia de los Materiales (Código: 1000040)-Programa de asignatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Casiraghi, T., Castiglioni, G., Ronchetti, T. 1988. Fracture mechanics of polymers. Critical evaluation for linear elastic behaviour at high speed testing. *J. Matter. Sci.*, 23, 459-466.

Gibson, L. J., Ahsby, M. F. 1988. "Cellular Solids: Structure and Properties", Pergamon Press, Oxford, p. 217, England.

Greszczuk, L. B. 1982. In "Impact Dynamics", edited by Greszczuk, L. B., Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F.; Curran, D.R.; (John Wiley & Sons, New York), p. 55.

Hertz, H. 1881. On the contact of elastic solids. *J. Reine Angew. Math.*, 92, 156-171. Translated and reprinted in English in Hertz's miscellaneous papers: Macmillan & Co., London, 1896.

Loveridge, P., Mills, N.J. 1991. The mechanism of the recovery of impacted high-density polyethylene foam. *Cell. Polym.*, 10, 393-405.

Lye, S. W., Chuchom S. 1997. A neural predictive model for characterising impact cushioning curves. *Engng. Applic. Artif. Intell.*, 10, 639-646.

Lye, S.W., Lee, S.G., Chew, B.H. 2004. Virtual design and testing of protective packaging buffers. *Computers in Industry*, 54, 209-221.

Marsavina, L., Sadowski, T. 2008. Dynamic fracture toughness of polyurethane foam. *Polymer Testing*, 27, 941-944.

Mills, N. J., Hwang, A. M. H. 1989. The multiple-impact performance of high density polyethylene foam. *Cell. Polym*, 9, 259-270.

Ouellet, S., Cronin, D., Worswick, M. 2006. Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions. *Polymer Testing*, 25, 731-743.

Ozturk, U. E., Anlas, G. 2009. Energy absorption calculations in multiple compressive loading of polymeric foams. *Materials and Design*, 30, 15-22.

Rayleigh, L. 1906. On the production of vibration by forces of relatively long duration with the applications to the theory of collisions. *Phil. Mag.*, 11[3], 283.

Rodríguez-Pérez, M. A., Velasco, J.I., Arencón, D., Almanza O., De Saja, J. A. 2000. Mechanical characterization of closed-cell polyolefin foams. *J. Appl. Polym. Sci.*, 75, 156-166.

Ruiz-Herrero, J.L., Rodríguez-Pérez, M.A., de Saja, J.A. 2005. Design and construction of an instrumented falling weight impact tester to characterise polymer-based foams. *Polymer Testing*, 24, 641-647.

Timoshenko, S. P., Woinowsky - Krieger, S. 1984. "Theory of Plates and Shells"; McGraw-Hill: Tokyo, Japan.

Velasco, J. I., Martínez, A. B., Arencón, D., Rodríguez-Pérez, M. A., de Saja, J. A. 1999. Application of instrumented falling dart impact to the mechanical characterization of thermo-plastic foams. *J. Matter. Sci.*, 34, 431-438.

**Velasco, J. I., Martínez, A. B., Arencón, D., Almanza O., Rodríguez-Pérez, M. A., De Saja, J. A.** 2000. Rigidity characterization of flexible foams by falling dart rebound tests. *Cell. Polym.*, 19,115-133.

**Zotefoams Ltda.** 1992. *Cushioning Packaging Guide*, Croydon, U. K.

Recibido: abril 19 de 2010.

Aceptado para su publicación: junio 2 de 2010.