

CARACTERIZACIÓN COMPUTACIONAL DE PLACAS DE ESPUMA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO BAJO CARGAS DINÁMICAS DE IMPACTO

A. Micuzzi⁽¹⁾ y G. Elvira⁽¹⁾

(1) Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, ARGENTINA

E-mail: gustavo@inti.gob.ar

RESUMEN

El poliestireno expandido es comúnmente utilizado como material amortiguante en embalajes de toda clase, principalmente debido a su elevada capacidad de absorber energía de impacto. En el presente trabajo se realiza un modelo computacional de elementos finitos para predecir el comportamiento a compresión de placas de espuma rígida de poliestireno expandido solicitadas mediante cargas dinámicas de impacto. Se caracterizó el material mediante un modelo de elasticidad lineal junto con un modelo de plasticidad con endurecimiento volumétrico, utilizando el software de elementos finitos Abaqus 6.10. La sensibilidad del material a la tasa de deformación se asumió gobernada por la ley potencial propuesta por Nagy et al. (1964). La calibración del modelo se realizó utilizando curvas esfuerzo-deformación obtenidas de ensayos experimentales de compresión cuasi-estática. Con el fin de validar el modelo numérico, se realizaron en laboratorio ensayos de impacto en probetas prismáticas de distintos tamaños. La comparación de resultados experimentales (desplazamientos y registros de acelerómetros) con los obtenidos numéricamente, confirman la validez y precisión del modelo.

Tópico: Tópico 3: Materiales Poliméricos

Palabras clave: Poliestireno expandido, Impacto, Análisis dinámico, Elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

Las espumas rígidas de poliestireno expandido (EPS) son ampliamente utilizadas como material de protección en embalajes de toda clase, debido a su excelente capacidad de absorber energía de impacto, baja densidad aparente y fácil conformado. Las mismas se elaboran a partir de partículas de poliestireno expandible, las cuales mediante un proceso de calentamiento rápido aumentan su volumen y se sueldan entre sí, obteniéndose un material compuesto por celdas cerradas de poliestireno.

El comportamiento general a compresión del EPS puede describirse observando la curva esfuerzo-deformación (Figura 1), la cual presenta tres zonas bien definidas: la zona inicial (A) se caracteriza por un comportamiento lineal elástico, el esfuerzo aumenta linealmente con la deformación, la cual es recuperable. La zona (B) presenta un comportamiento plástico con gran aumento de la deformación correspondiente a un incremento del esfuerzo relativamente pequeño, debido al progresivo colapso de las celdas de poliestireno. Este comportamiento provee la capacidad de absorción de energía del material. Finalmente, en la zona (C) la estructura celular ha colapsado totalmente y la espuma se comporta como un sólido compactado.

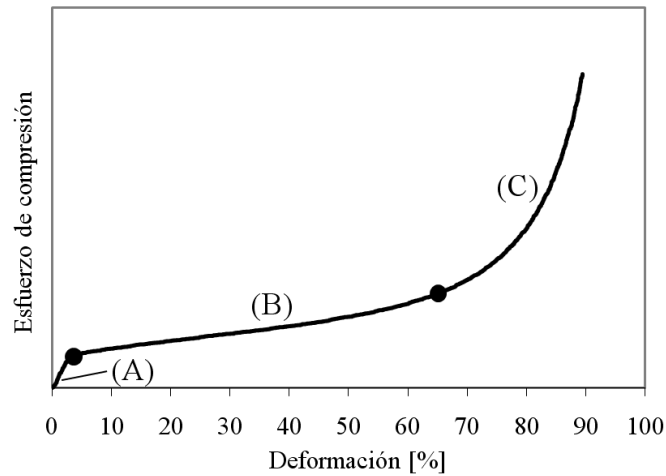


Figura 1. EPS – Zonas características de la curva esfuerzo de compresión-deformación.

Con la motivación de obtener una herramienta numérica para asistir al diseño de embalajes utilizando el EPS como material de protección, se desarrolla en el presente trabajo un modelo numérico utilizando el software de elementos finitos Abaqus 6.10, con el objetivo de predecir el comportamiento a compresión del EPS durante eventos dinámicos de impacto. Se caracterizó el material mediante un modelo de elasticidad lineal junto con un modelo de plasticidad con endurecimiento volumétrico incorporado en Abaqus. La sensibilidad del material a la tasa de deformación se asumió gobernada por la ley potencial propuesta por Nagy *et al.* (1964). Se presentan las estrategias utilizadas para obtener los parámetros del material a partir de curvas esfuerzo-deformación obtenidas de ensayos experimentales de compresión cuasi-estática y, finalmente, la validación del modelo mediante la comparación de resultados numéricos con los obtenidos de ensayos experimentales de impacto.

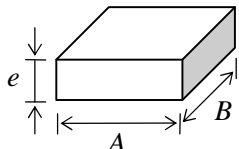
2. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Se realizaron en laboratorio ensayos experimentales de compresión y de impacto en probetas prismáticas de distintos tamaños. En particular, el material utilizado es EPS de 25kg/m^3 de densidad, elaborado a partir de partículas de poliestireno expandible BASF. Los ensayos se efectuaron en el Centro de Investigación y Desarrollo de Envases y Embalajes del Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

2.1 Ensayos de compresión.

Se efectuaron ensayos de compresión en probetas prismáticas utilizando dos velocidades de descenso (V_d) del cabezal del equipo de ensayo. En la Tabla 1 se presentan las dimensiones de las probetas y la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$) resultante de cada ensayo, estimada con $\dot{\epsilon} = V_d/e$, donde e es la dimensión de la probeta en la dirección del ensayo (espesor).

Tabla 1. Configuración de ensayos de compresión.

Probeta - Esquema 	Probeta N°	Dimensiones [mm]			V_d [mm/min]	$\dot{\epsilon}$ [1/seg]
		A	B	e		
	1	50	50	40	12,5	0,00521
	2	50	50	20	12,5	0,01042
	3	100	100	40	50	0,02083
	4	100	100	20	50	0,04167

Se realizaron cuatro ensayos por cada configuración, obteniéndose curvas esfuerzo-deformación prácticamente idénticas, lo que demostró la uniformidad del material ensayado. El aumento de la tasa de deformación se manifestó en un aumento de esfuerzos, registrándose valores entre 3% y 5% mayores en la Probeta N° 4 con respecto a la N°1, especialmente en la zona de comportamiento plástico, como se observa en la Figura 2.

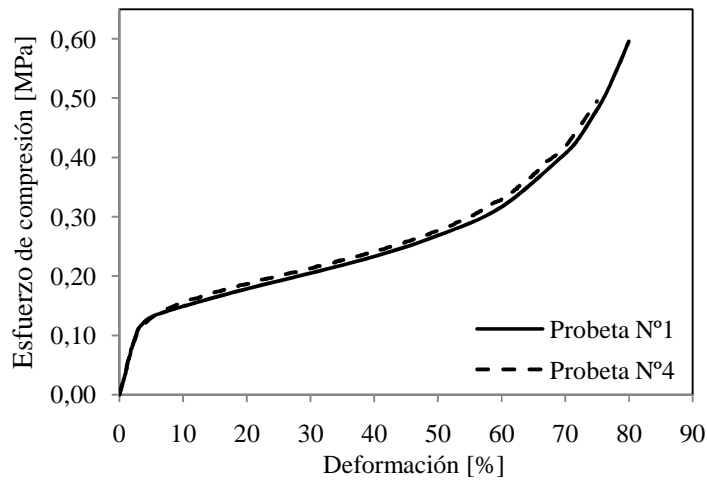


Figura 2. Ensayos de compresión. Curvas esfuerzo-deformación.

2.1 Ensayos de impacto

Se efectuaron ensayos de impacto en probetas prismáticas de distintos tamaños, siguiendo procedimientos normativos [9]. El mismo consiste en solicitar las probetas mediante el impacto de una platina en caída libre, utilizando un equipo de ensayos dinámicos para caracterización de materiales amortiguantes. La masa de la platina es de 7kg. La altura de caída es $h = 1,20\text{ m}$, generando una velocidad de impacto de

$$V_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = 4,85\text{ m/s}$$

donde $g = 9,81\text{ m/s}^2$ es la aceleración debida a la gravedad. Como resultado del ensayo se obtienen la máxima aceleración ($G_{m\acute{a}x}$) registrada mediante un acelerómetro ubicado en la platina y el mayor desplazamiento ($U_{m\acute{a}x}$) que sufre la probeta en la dirección del impacto. En la Tabla 2 se presentan las dimensiones de las probetas utilizadas y los resultados obtenidos.

Tabla 2. Ensayos de impacto – Probetas y resultados.

Esquema de ensayo	Probeta N°	Dimensiones			Superficie AxB[cm ²]	Resultados	
		A	B	e		$G_{m\acute{a}x}$ [g]	$U_{m\acute{a}x}$ [mm]
	A	130,30	258,50	15,40	337	192	8,30
	B	130,70	189,30	15,40	247	171	10,40
	C	130,50	119,80	16,50	156	194	13,20
	D	119,70	99,70	15,40	119	237	14,70

De los registros de aceleraciones se observa que la Probeta B provee mayor amortiguación a la platina de impacto, incluso con menor superficie que la Probeta A, esto se debe a que acusa mayor deformación, sacando mayor provecho del comportamiento del material en zona B (Figura 1), absorbiendo mayor energía de impacto. Para el caso de las probetas C y D, de menor tamaño, el material se densifica ingresando en zona C, lo cual se manifiesta en mayores valores de aceleración.

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

3.1 Relaciones Constitutivas

El comportamiento elástico se caracterizó mediante el modelo de elasticidad lineal (*Elastic) incorporado en Abaqus, utilizando los siguientes parámetros:

Módulo de elasticidad: $E = 3,82 \text{ MPa}$ (obtenido de los ensayos de compresión)

Coefficiente de Poisson: $\mu = 0,1$

El comportamiento plástico se caracterizó utilizando el modelo de plasticidad *Crushable Foam, cuya superficie de fluencia representa el círculo de Von Mises en el plano de esfuerzos deviatoricos y es una elipse en el plano meridional de esfuerzos p - q , donde p son los esfuerzos de presión y q son los esfuerzos de Von Mises, como se indica en la Figura 3. La forma de la superficie de fluencia se define especificando los valores de:

$$k = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0} \quad \text{y} \quad k = \frac{p_t}{p_c^0}$$

donde:

σ_c^0 = esfuerzo inicial de fluencia en compresión uniaxial

p_c^0 = esfuerzo inicial de fluencia en compresión hidrostática

p_t = esfuerzo inicial de fluencia en tracción hidrostática

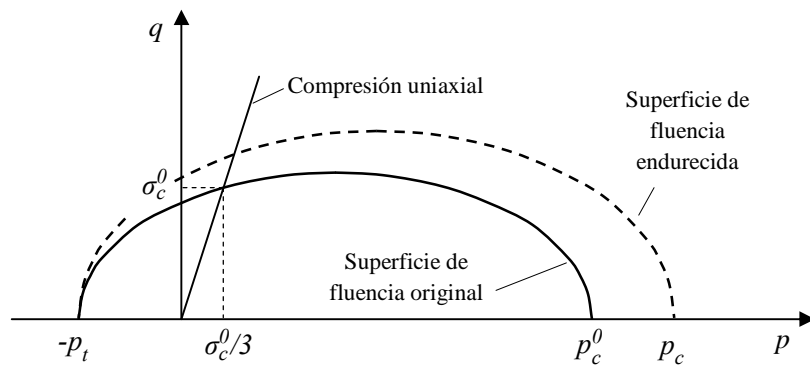


Figura 3. Modelo de plasticidad – Superficie de fluencia en el plano p - q .

De los resultados de los ensayos de compresión se obtiene $\sigma_c^0 = 0,113 \text{ MPa}$. A partir de valores de p_c^0 citados en la literatura [1,4] para diversas espumas poliméricas, se consideró $k = 1,9$. El valor de p_t no tiene influencia considerable en los resultados numéricos de espumas solicitadas a compresión, y debido a que es muy poco usual ensayar este tipo de material a tracción, resulta necesario estimar su valor. Debido a estas cuestiones, el manual de Abaqus [6] recomienda considerar p_t entre el 5% y 10% de p_c^0 (resultando $k_t = 0,05$ a $0,10$) lo cual resulta en valores bajos poco realistas de p_t , como ha sido demostrado por Moreau y Mills [4,5] quienes obtienen mejores aproximaciones con $k_t = 1$; valor que se adoptó en el presente trabajo.

El modelo asume que la evolución (endurecimiento) de la superficie de fluencia es controlada por la deformación plástica volumétrica de compresión (ϵ_{vol}^{pl}). El esfuerzo de compresión p_c evoluciona como resultado de la compactación o dilatación del material, mientras que p_t permanece fijo a lo largo del proceso de deformación plástica. Es importante destacar que debido a que el coeficiente de Poisson plástico (μ_{pl}) es cero, resulta:

$$\epsilon_{vol}^{pl} = \epsilon_{ax}^{pl}$$

donde ε_{ax}^{pl} es la deformación plástica de compresión uniaxial. En consecuencia, la evolución de la superficie de fluencia queda definida ingresando en Abaqus (*Crushable Foam Hardening), en forma tabular, el esfuerzo de fluencia en compresión uniaxial en función del valor absoluto de la deformación plástica axial. Teniendo en cuenta que deben especificarse deformaciones logarítmicas, resulta:

$$\varepsilon_{ax}^{pl} = -\ln(1 + \varepsilon_{ax}) - \sigma_{ax}/E$$

donde ε_{ax} es la deformación axial de compresión (negativa) y σ_{ax} es el esfuerzo correspondiente (positivo). Se utilizaron los datos obtenidos del ensayo de compresión de la Probeta N°1.

La sensibilidad del material a la tasa de deformación se asumió gobernada por la ley potencial propuesta por Nagy *et al.*, utilizada por diversos autores [2,3] en la caracterización de espumas poliméricas:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^n$$

donde:

σ = esfuerzo correspondiente a una tasa de deformación $\dot{\varepsilon}$

σ_0 = esfuerzo correspondiente a una tasa de deformación cuasi-estática $\dot{\varepsilon}_0$

$n = a + b \cdot \varepsilon$; donde a y b son constantes del material.

Siguiendo los lineamientos de Zhang *et al.*[2], las constantes a y b se obtuvieron realizando la gráfica $\dot{\varepsilon} - \sigma$ en escala doble logarítmica para diferentes niveles de deformación, obteniéndose un conjunto de líneas rectas con pendiente n , que resulta aproximadamente una función lineal de ε , como se observa en la Figura 4. Finalmente, utilizando un programa de regresión lineal, n se ajusta a una forma lineal de ε , obteniéndose:

$$a = 0,0220 ; b = 0,0095$$

Utilizando la ecuación de Nagy con $\dot{\varepsilon}_0 = 0,00521$, se obtuvieron valores $\sigma - \varepsilon$ para tasas de deformaciones hasta 1000 1/seg. El comportamiento dependiente de la tasa de deformación se ingresó en Abaqus en forma tabular (*Rate Dependent, Type = Yield Ratio), especificando el valor $r = \sigma/\sigma_0$ en función de la tasa de deformación plástica equivalente ($\dot{\varepsilon}_{vol}^{pl}$). Debe tenerse en cuenta que con $\mu_{pl} = 0$, resulta:

$$\dot{\varepsilon}_{vol}^{pl} = \sqrt{2/3} \cdot \dot{\varepsilon}_{ax}^{pl}$$

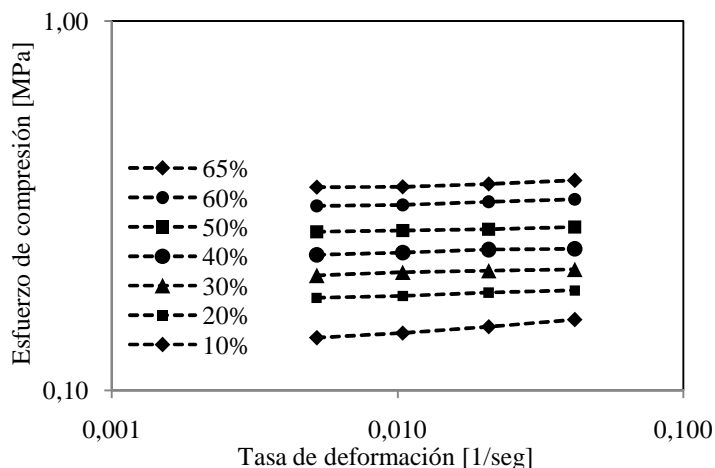


Figura 4. Sensibilidad a la tasa de deformación – Gráficas logarítmicas $\dot{\varepsilon} - \sigma$.

3.2 Simulación de ensayos de impacto

Con el objetivo de validar el modelo numérico, se realizaron simulaciones de los ensayos de impacto especificados en 2.1 utilizando Abaqus/Explicit. En la Figura 5 se aprecia un esquema de la configuración del modelo. Las probetas se modelaron con elementos finitos hexaédricos de ocho nodos con integración reducida (C3D8R). Se impidieron, como condición de borde, los desplazamientos verticales de la base de la probeta. La platina se modeló utilizando cuatro elementos rígidos cuadriláteros de cuatro nodos (R3D4), se ubicó $1mm$ por encima de la probeta y se impuso como sollicitación la velocidad de impacto (V_i). Se admitieron en la platina sólo desplazamientos verticales (los demás se restringieron como condiciones de borde). Se registraron valores de aceleraciones en el centro de la platina y desplazamientos en la probeta, en el centro de su cara superior, a modo de compararlos con los valores experimentales. En la Tabla 3 se detallan las dimensiones de las mallas de elementos finitos utilizadas.

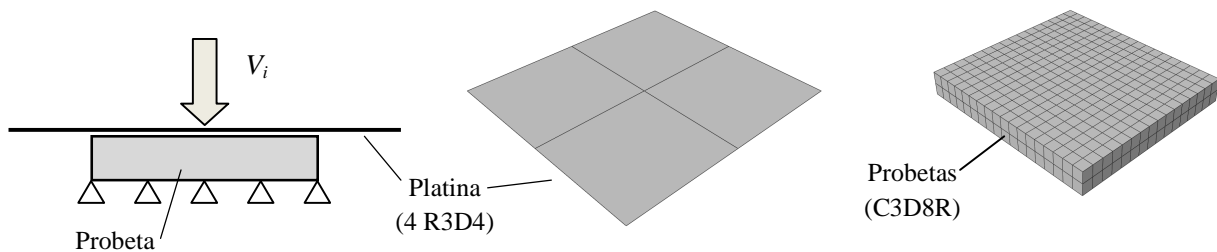


Figura 5. Esquema del modelo numérico.

Tabla 3. Simulación de ensayos de impacto – Mallas de elementos finitos.

Probeta N°	Malla de EF	
	Elementos	Nodos
A	1.224	1.995
B	936	1.539
C	576	969
D	448	765

3.3 Resultados – Validación del modelo numérico

Se realizaron simulaciones de los ensayos de impacto durante $t=0,01seg$ a partir de la configuración inicial del modelo numérico. Se realizaron las gráficas tiempo-aceleración (Figura 6), en la cuales se observa que el pico de aceleraciones se desplaza hacia la derecha, ya que el tiempo necesario para detener el movimiento de la platina resulta función del tamaño de la probeta. En la Figura 7 se observan las gráficas tiempo-desplazamiento, con mayores pendientes (mayor velocidad) y desplazamientos máximos a medida que disminuye el tamaño de la probeta.

Con el fin de validar el modelo numérico y cuantificar su precisión, se presenta en Tabla 4 la comparación de resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente ($G_{máx}$ y $U_{máx}$). Se observa que los desplazamientos obtenidos numéricamente se encuentran dentro del 8% de los valores experimentales, con una diferencia promedio de 5%. En cuanto a las aceleraciones máximas, se obtienen de las simulaciones valores dentro del 7% de los esperados, con una diferencia promedio de 2,5%, obteniéndose para 3 ensayos diferencias del 1%.

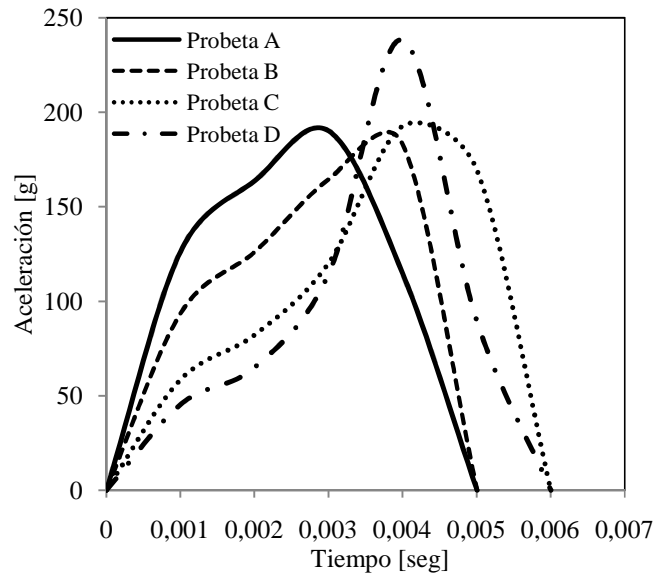


Figura 6. Simulación de ensayos de impacto. Gráficas tiempo-aceleración.

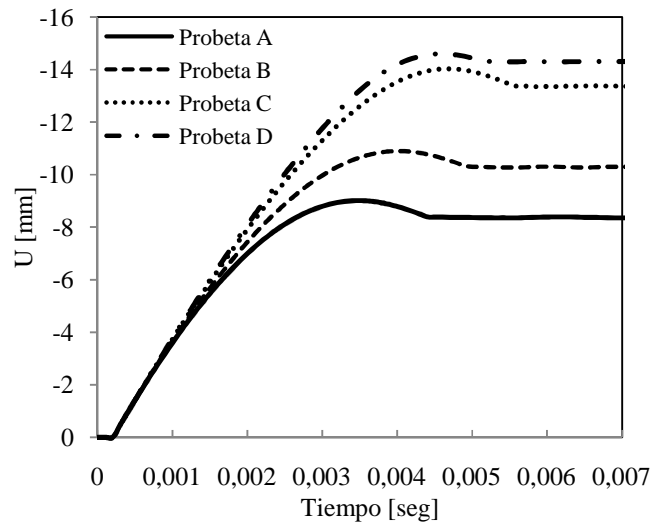


Figura 7. Simulación de ensayos de impacto. Gráficas tiempo-desplazamiento.

Tabla 4. Simulación de ensayos de impacto – Resultados.

Probeta Nº	$G_{m\acute{a}x}$ [g]			$U_{m\acute{a}x}$ [mm]		
	Experimental	Numérico	Exp./Num.	Experimental	Numérico	Exp./Num.
A	192	190	1,01	8,30	9,01	0,92
B	171	183	0,93	10,40	10,90	0,95
C	194	192	1,01	13,20	14,03	0,94
D	237	238	0,99	14,70	14,60	1,01

3.3 Sensibilidad a la tasa de deformación

Con el objetivo de cuantificar la sensibilidad de los resultados a la tasa de deformación, se realizaron simulaciones de los ensayos de impacto sin considerar la influencia de la misma en el comportamiento del material. Los resultados se resumen en Tabla 5. Como consecuencia de deformaciones de compresión excesivas,

el modelo numérico se vuelve inestable durante la simulación del ensayo de la Probeta D, por lo cual no se presentan resultados. Debido a que la tasa de deformación durante el ensayo aumenta a medida que disminuye el tamaño de la probeta, las diferencias con los valores esperados de aceleraciones aumentan notablemente para las probetas B y C.

Tabla 5. Simulación de ensayos de impacto – Modelo de material sin dependencia de la tasa de deformación.

Probeta N°	$G_{m\acute{a}x}$ [g]			$U_{m\acute{a}x}$ [mm]		
	Experimental	Numérico	Exp./Num.	Experimental	Numérico	Exp./Num.
A	192	197	0,97	8,30	10,71	0,78
B	171	229	0,75	10,40	12,45	0,84
C	194	323	0,60	13,20	15,31	0,86

4. CONCLUSIONES

Se presentó un modelo computacional de elementos finitos capaz de predecir con remarcable precisión el comportamiento del EPS durante eventos dinámicos de impacto, calibrado a partir de curvas obtenidas de ensayos de compresión de simple ejecución a diferentes tasas de deformación cuasi-estáticas. Si bien las diferencias entre los esfuerzos obtenidos experimentalmente a las diferentes tasas de deformación son pequeñas, resultaron suficientes para calibrar los parámetros de la ecuación de Nagy. Finalmente, del análisis efectuado en el punto 3.3 se concluye que a modo de obtener una predicción aceptable del comportamiento del EPS durante eventos dinámicos, la consideración de la influencia de la tasa de deformación en el comportamiento del material resulta imprescindible.

REREFENCIAS

1. A. Gilchrist and N.J. Mills, “Impact deformation of rigid polymeric foams: experiments and FEA modelling”; *International Journal of Impact Engineering*, 25 (2001), p. 767-786.
2. J. Zhang, N. Kikuchi, V. Li, A. Yee and G. Nusholtz, “Constitutive modeling of polymeric foam material subjected to dynamic crash loading”; *International Journal of Impact Engineering*, 21 (1998), p. 369-386.
3. S.Ouellet, D.Cronin and M.Worswick, “Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions”; *Polymer Testing* 25 (2006), p. 731-743.
4. Y. Masso-Moreu and N.J.Mills, “Impact compression of polystyrene foam pyramids”; *International Journal of Impact Engineering*, 28 (2003), p. 653-676.
5. Y. Masso-Moreu and N.J.Mills, “Rapid hydrostatic compression of low-density polymeric foams”; *Polymer Testing* 23 (2004), p. 313-322.
6. Abaqus Analysis User’s Manual. Version 6.10.
7. E. Dvorkin and M.Goldschmit, “Nonlinear Continua”; 2006, Springer.
8. Catálogo BASF, “Informaciones Técnicas Styropor”; 1998, Ludwigshafen, Alemania.
9. Standard D1596-97 (R.2003), “Standar test method for dynamic shock cushioning characteristics of packaging material”; ASTM International.