

## **MECHANICAL BEHAVIOR OF INSULATING FOAM OF RIGID POLYURETHANE**

Arrué Burillo, Paloma; Cárcel González, Alfonso Cristóbal; Romero Sedó, Antonio  
Manuel; Aparicio Fernández, Carolina  
Universitat Politècnica de València

In this work the effects of the structure are analyzed on the mechanical behavior to rigid polyurethane foam compression (PU), used like thermal or absorbent insulators of energy. The structural parameters were determined from sections obtained by raise-fractures and images SEM, by means of techniques of image analysis. The structures are of closed pore, formed by cells dodecahedron type. The mechanical behavior is valued by the instantaneous resistance to compression, that presents/displays a dependency with the relative density of potential type with exponent  $m=1.5$ , and by the slope of the curved tension-deformation in the plateau, that reaches values between 0.14 and 0.34 MPa, affecting to the characteristics like absorbent. By means of diagrams of absorption of energy the effect of the homogeneity was quantified.

**Keywords:** Cellular solids; Foam; Polyurethane; Compressive strength

## **COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ESPUMAS AISLANTES DE POLIURETANO RÍGIDO**

En este trabajo se analizan los efectos de la estructura sobre el comportamiento mecánico a compresión de espumas de poliuretano rígido (PU), empleados como aislantes térmicos o absorbedores de energía. Los parámetros estructurales se determinaron a partir de secciones obtenidas por crio-fractura e imágenes SEM, mediante técnicas de análisis de imagen. Las estructuras son de poro cerrado, formadas por celdas tipo dodecaédrico. El comportamiento mecánico se valora por la resistencia instantánea a compresión, que presenta una dependencia con la densidad relativa de tipo potencial con exponente  $m=1.5$ , y por la pendiente de la curva tensión-deformación en la meseta, que alcanza valores comprendidos entre 0.14 y 0.34 MPa, afectando a las características como absorbedor. Mediante diagramas de absorción de energía se cuantificó el efecto de la homogeneidad.

**Palabras clave:** Sólidos celulares; Espumas; Poliuretano; Resistencia a compresión

## 1. Introducción.

Los materiales aislantes empleados en la edificación deben cumplir unas exigencias de resistencia mecánica frente a las cargas a que se vean sometidas durante y después de su instalación. Como ejemplo la resistencia a compresión de 500 kPa es la indicada para forjados o soleras sometidas a grandes cargas como los que exigen actividades de garaje, parking, naves industriales con tráfico rodado pesado. La necesidad de que los materiales aislantes presenten estas prestaciones implica el estudio y análisis tanto del material constituyente, como de su estructura celular o meso-estructura: espesores de paredes  $t$ , geometría de celda y densidad relativa  $\rho^*$  (Gibson & Ashby, 1997).

Los parámetros estructurales determinan la validez de los modelos que permiten predecir el comportamiento del material, bien sean estos modelos analíticos o para simulación por elementos finitos (Ren & Silberschmidt, 2008).

También resulta necesario la determinación de la estructura celular tipo que mejor reproduce la estructura real de la espuma, y para cuya determinación se requiere del empleo de modelos topológicos adecuados capaces de ocupar completamente el espacio (De Hoff & Rhines, 1968). Los modelos regulares del sólido celular, capaces de ocupar todo el espacio y satisfacer la mayoría de las reglas geométricas, necesarios para los cálculos por simulación de las propiedades mecánicas revisados por Kraynik y Warren (1994), sugieren el uso de estructuras tipo dodecaédrica o tetracaidecaédrica.

En el presente trabajo se determinan los parámetros estructurales de espumas aislantes comerciales de poliuretano rígido (PUR), y se analizan sus efectos sobre el comportamiento mecánico en compresión. El uso de estos materiales como absorbedores de energía requiere conocer tanto la resistencia como la uniformidad de la curva en la fase de aplastamiento que determina directamente su eficiencia.

## 2. Materiales y Método experimental.

Se han analizado tres tipos de espumas PUR. La tabla 1 muestra la resistencia a compresión y la densidad aparente nominal teórica de las muestras analizadas.

**Tabla 1. Designación y características de los materiales.**

Muestra	Resistencia a compresión Re10 (kPa)	Densidad aparente $\rho^*$ (kg/m <sup>3</sup> )
PUR-1	240±50	40
PUR -2	460±100	70
PUR -3	800±100	100

El comportamiento mecánico bajo tensiones de compresión se ha determinado sobre muestras prismáticas de dimensiones condicionadas por el espesor comercial de la muestra, siendo de secciones 40mmx30mmx30mm (PUR-1), 31mmx21mmx20mm (PUR-2), 31mmx21mmx23mm (PUR-3).

Se ha empleado una máquina universal de ensayos Instron 4204, con velocidad de deformación constante de 1 mm/s. La resistencia a compresión característica de las espumas Re10 se determina para una deformación total del 10%.

**Figura 1: Ensayo de compresión en la máquina universal Instron 4204.**



A partir de las curvas tensión-deformación se determinan también otros parámetros de interés, como la energía absorbida y las pendientes de la curva en la fase de meseta o “plateau” característica del ensayo de compresión, que muestran una fuerte dependencia de la uniformidad estructural.

La identificación de los parámetros estructurales se realizó a partir del análisis de imágenes SEM (Jeol JSM 5410 y JSM6300 del Servicio de Microscopía electrónica de la UPV), de muestras seccionadas mediante crio-fractura, según una metodología similar a la empleada por otros autores como Das, Dave y Wilkes, (2009) y Doroudiani, Park y Kotschot, (1996).

**Figura 2: Equipo de metalización y microscopia electrónica SEM de la UPV.**



La asignación de estructuras de celda tipo se llevó a cabo empleando criterios morfológicos para estructuras regulares (De Hoff & Rhines, 1968). Estos parámetros resultan de interés por su relación directa con los valores de densidad relativa. Para espumas de baja densidad, y en ausencia de aglomeraciones de material en bordes, con  $t \ll l$ , la densidad relativa en espumas de celda cerrada presenta una relación cuasi-lineal con la relación  $t/l$ , según la expresión:

$$\rho_r^* = \frac{\rho^*}{\rho_s} = C \cdot \frac{t}{l} \quad (1)$$

Para las estructuras de celda cerrada la constante C oscila de 1.18 a 4.46. Presenta valores mínimos  $C=1.18$  para estructuras tetracaidecaédricas y 1.9 para estructuras dodecaédricas. La resistencia al colapso de las espumas está relacionada con la densidad relativa a través de una ecuación potencial, del tipo:

$$\sigma = K \cdot \rho_r^m \quad (2)$$

Donde  $\rho_r$  es la densidad relativa y  $m$  es un exponente que depende la estructura celular. Para las espumas de poro cerrado que colapsan plásticamente por flexión, y considerando una baja fracción de material en bordes  $\phi \approx 0$ , los valores de  $m$  son próximos a 1.5.

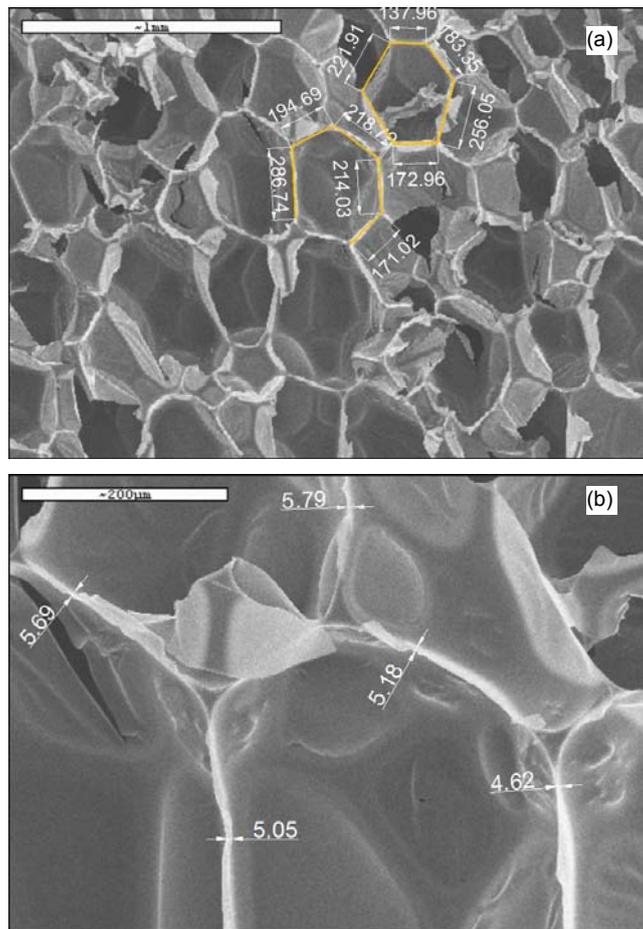
La caracterización de las espumas para su utilización potencial como absorbedor de energía bajo cargas de impacto se suele llevar a cabo empleando diagramas de absorción de energía, como los desarrollados por Maiti, Gibson y Ashby (1984). En este trabajo se ha empleado un tipo de diagrama alternativo, que representa los valores de energía absorbida por unidad de tensión frente a la deformación en compresión (B. Cárcel & A.C. Cárcel, 2008). La energía se calcula a partir del área bajo la curva tensión-deformación. Para un absorbedor ideal, la curva presentaría pendiente 1. El diagrama permite determinar también las condiciones óptimas de utilización de la espuma, y simultáneamente permite determinar los valores de eficiencia y analizar y visualizar las desviaciones respecto del comportamiento del absorbedor de energía "ideal".

### 3. Resultados y análisis.

#### 3.1 Estructura de las espumas.

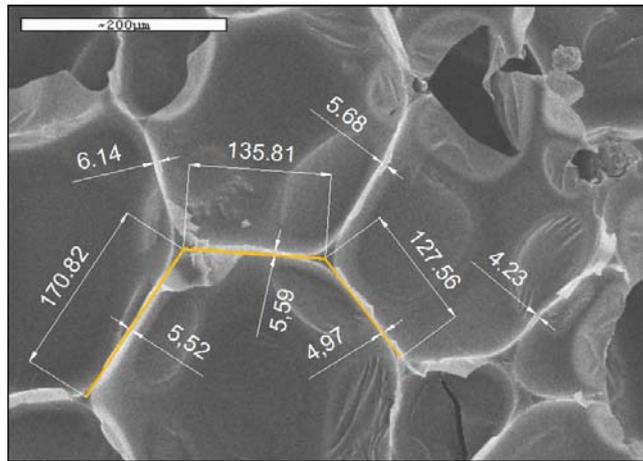
La figura 3 muestra dos imágenes SEM de la muestra PUR-1 con densidad aparente comercial de  $40 \text{ kg/m}^3$  a 50X para la medición de la longitud de arista y a 200X, para la medición del espesor de arista.

Figura 3: Estructura de la muestra PUR-1 D-40. 50X (a) y 200X (b).

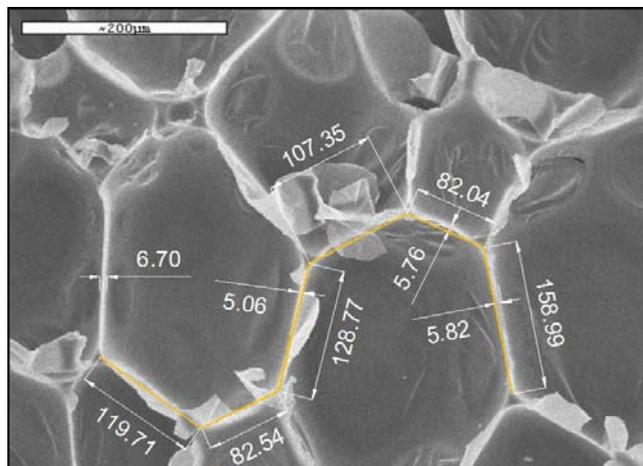


Las figuras 4 y 5 muestran la imagen SEM de las muestras PUR-2 y PUR-3 a 200X, con densidad aparente comercial de  $70 \text{ kg/m}^3$  y  $100 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. En estas muestras el tamaño de celda es inferior permitiendo la medición tanto de la longitud de arista como del espesor de arista en la micrografía 200X.

**Figura 4: Estructura de la muestra PUR-2 D-70. 200X.**



**Figura 5. Estructura de la muestra PUR-3 D-100. 200X.**



En las micrografías se aprecia la estructura característica de las espumas PUR de sólidos celulares de celda cerrada, pero con grandes diferencias en el tamaño celular presentando mayor tamaño las de menor densidad aparente.

Como se aprecia en las figuras 3, 4 y 5, las espumas PUR presentan una estructura de poro cerrado uniforme, de estructura poligonal.

La Tabla 2 indica los resultados obtenidos de la densidad aparente experimental y la densidad relativa calculada como la relación entre la densidad aparente experimental y la del sólido  $\rho_s = 1200 \text{ Kg/m}^3$ . Se trata de sólidos celulares al ser su densidad relativa menor de 0.3.

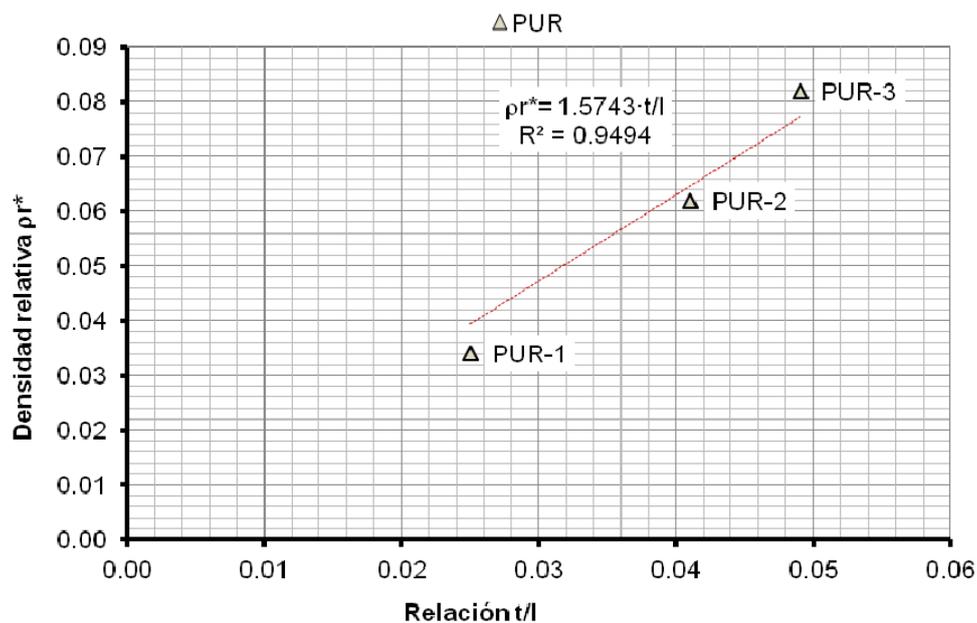
Otros parámetros estructurales de interés obtenidos de las micrografías son la relación entre espesor de arista y longitud de arista.

**Tabla 2. Parámetros característicos de los materiales analizados PUR.**

Muestra	Densidad aparente experimental $\rho^*$ (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad relativa $\rho r^*$	Espesor de arista t ( $\mu\text{m}$ )	Longitud de arista l ( $\mu\text{m}$ )	Relación t / l
PUR-1	41.04	0.034	5.27	210.10	0.025
PUR -2	74.63	0.062	5.29	128.43	0.041
PUR -3	97.99	0.082	5.84	119.06	0.049

Se observa una buena correlación entre los valores de t/l y los valores de densidad relativa, de acuerdo con la ecuación (1), con un valor de  $C=1.57$ , representados en la figura 6. Este valor, junto con otros parámetros también medidos en las muestras, de conectividad entre aristas, caras y bordes, sugieren que la estructura celular tipo para las espumas de PUR es mayoritariamente dodecaédrica.

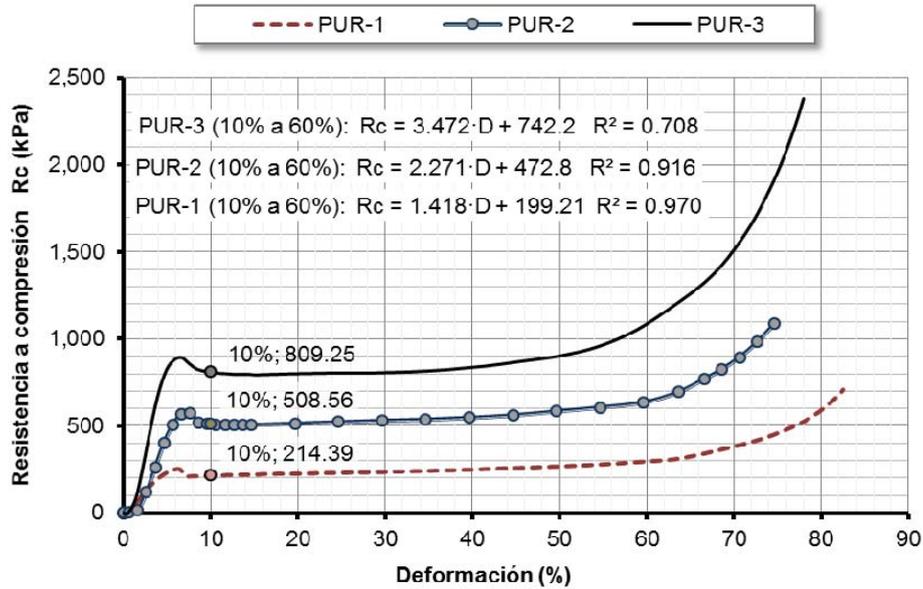
**Figura 6. Relación entre la densidad relativa y la relación t/l de las muestras PUR.**



### 3.2 Comportamiento mecánico.

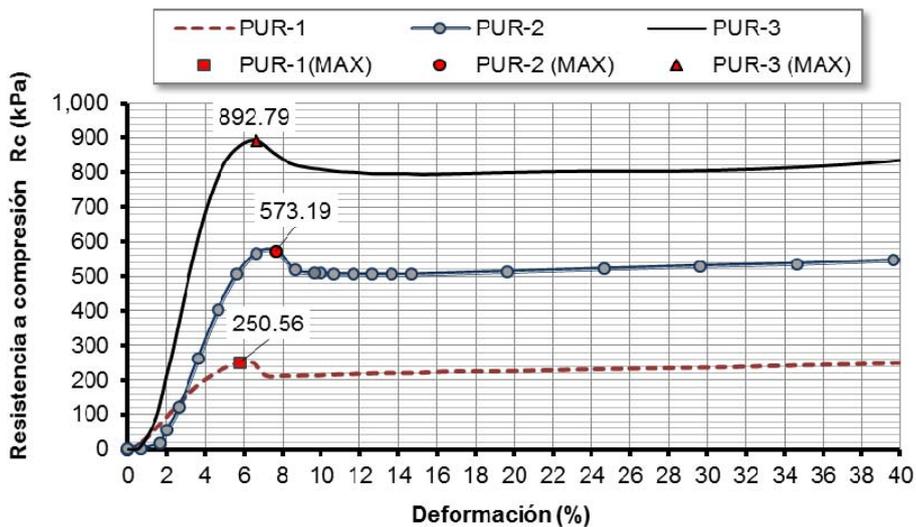
Los resultados de los ensayos de compresión en las muestras PUR se indican en la figura 7 y 8. La resistencia a compresión a un 10% de deformación obtenida  $R_{c10}$  es de 214.39 kPa en PUR-1, 508.56 kPa en PUR-2 y 809.25 kPa en PUR-3.

Figura 7. Relación entre la resistencia a compresión y la deformación de las muestras PUR.



También se han obtenido las resistencias a compresión máxima con deformación menor del 10%. La resistencia de las espumas es claramente superior en las espumas con mayor densidad.

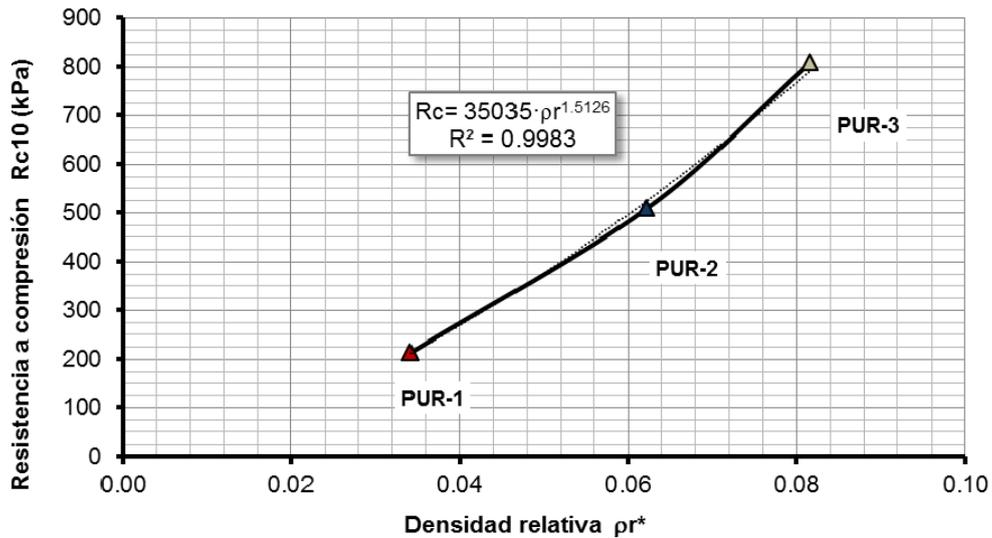
Figura 8. Resistencia a compresión máxima con una deformación menor del 10%.



La figura 9 ilustra el efecto de la densidad relativa sobre la resistencia  $R_{c10}$ . El ajuste de los valores de resistencia (kPa) a un modelo según la ecuación (3), resulta, con un valor de  $K=35035$  y  $m=1.51$ , con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.9983$ .

$$\sigma = 35,035 \cdot \rho_r^{1.5126} \quad (3)$$

Figura 9. Valores de resistencia  $R_{c10}$  frente a la densidad relativa  $\rho_r^*$ .



Los efectos de la homogeneidad estructural sobre la capacidad de absorción de energía se resumen en la figura 10, que representa los valores de energía absorbida por unidad de tensión frente a la deformación y en la figura 11, que representa los valores de energía absorbida frente a la deformación.

Figura 10. Diagramas de absorción de energía por unidad de tensión frente a la deformación.

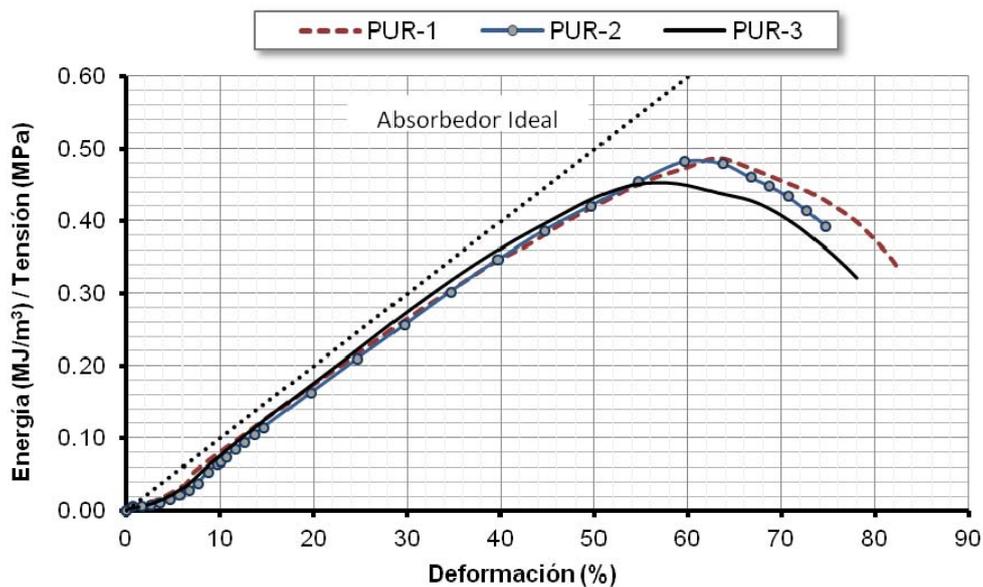
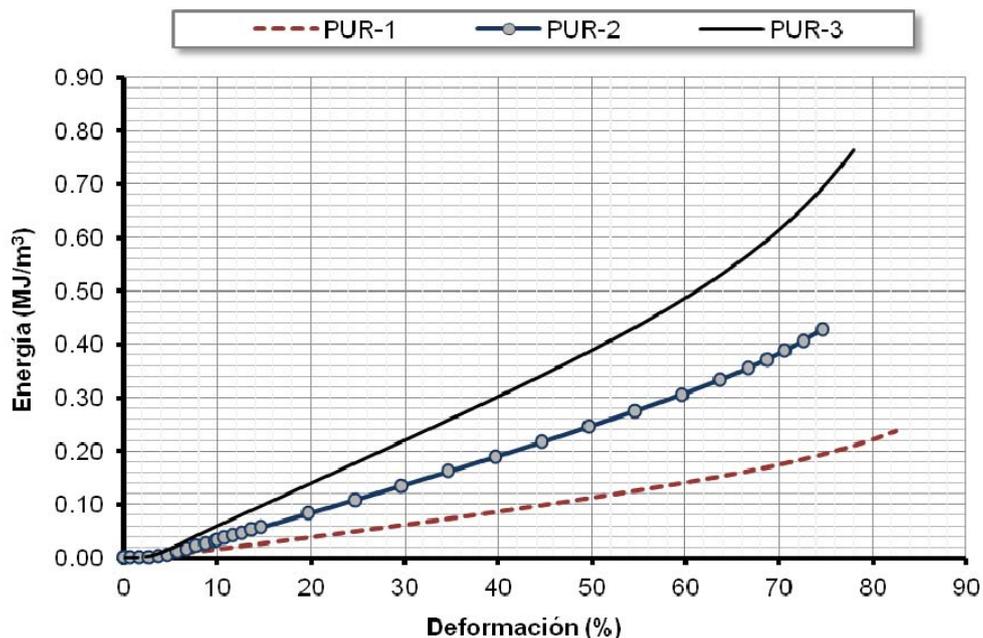


Figura 11. Diagramas de absorción de energía frente a la deformación.



### 3.3 Comparativa de la resistencia a compresión de espumas poliméricas.

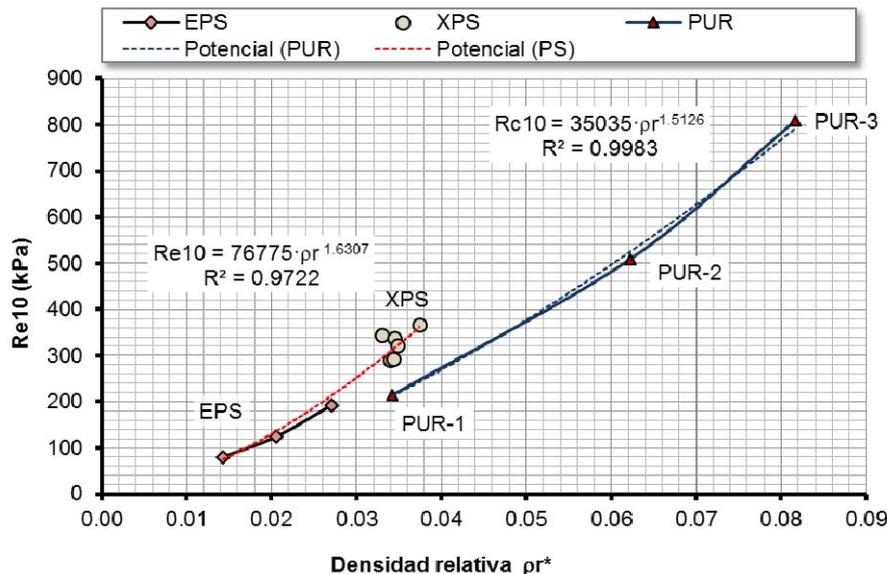
Los resultados de los ensayos de compresión Re10 en muestras de PUR pueden compararse con resultados obtenidos con otros tipos de espumas de poliestireno expandido (EPS), y de poliestireno extrusionado (XPS), de diferentes suministradores, analizadas en un trabajo anterior (Arrué et al. 2012).

La tabla 3 muestra la resistencia a compresión Re10, densidad aparente experimental y la densidad relativa y la figura 12, los valores de resistencia Re10 vs.  $\rho^*$ .

Tabla 3. Designación y características de los materiales.

Muestra	Densidad aparente experimental, $\rho^*$ (kg/m³).	Densidad relativa $\rho^*$	Resistencia a compresión experimental, Re10 (kPa).
EPS-1	14.896	0.014	80.82
EPS-2	21.446	0.021	124.09
EPS-3	28.251	0.027	192.44
XPS-1	35.877	0.034	294.07
XPS-2	34.449	0.033	344.90
XPS-3	36.323	0.035	322.471
XPS-4	39.112	0.037	366.97
XPS-5	36.004	0.034	338.52
XPS-6	35.548	0.034	290.06
PUR-1	41.04	0.034	214.39
PUR-2	74.63	0.062	508.56
PUR-3	97.99	0.082	809.25

**Figura 12. Valores de resistencia Re10 frente a la densidad relativa  $\rho_r^*$  en muestras EPS, XPS y PUR.**



Los espumas PUR presentan un menor valor del exponente  $m$  de 1.51 frente a 1.63 en las espumas PS, debido principalmente a que la densidad del material sólido constituyente de la espuma PUR es de  $1200 \text{ kg/m}^3$ , mayor que en las PS de  $1045 \text{ kg/m}^3$  lo que disminuye la densidad relativa. Cabe destacar que para una misma densidad relativa de 0.034 se obtiene una resistencia a compresión  $Re_{10}$  un 73% menor en la espuma PUR que en las XPS.

#### 4. Conclusiones

Los parámetros topológicos y de conectividad indican que el tipo de estructura celular de las espumas PUR es de tipo dodecaédrico. La estructura celular de las muestras PUR presentan una correlación de  $C=1.57$  entre la densidad relativa y la relación del espesor y longitud de arista observándose una homogeneidad en los tamaños de celda y espesores de pared. Esta homogeneidad se manifiesta en los ensayos de compresión, con pendientes en la meseta de 0.14 a 0.35 MPa y una buena eficiencia en la absorción de energía respecto de un absorbedor ideal. La resistencia  $Re_{10}$  indica una clara relación tipo potencial con la densidad relativa con exponente  $m=1.51$  característico de espumas de poro cerrado que colapsan por mecanismos de flexión.

#### 5. Referencias

- Arrué P., Cárcel A.C., Romero A.M. & Cárcel B. (2012). Comportamiento mecánico de espumas aislantes EPS y XPS: efectos de la estructura celular. *Actas del XII Congreso Nacional de Materiales and XII Congreso Iberomat, Alicante, España.*
- Cárcel, B. & Cárcel, A.C. (2008). Porous metals and metallic foams. *Destech Publ. Inc. pp 411-415.*
- Das S., Dave M. & Wilkes G. L.(2009). Characterization of flexible polyurethane foams based on soybean-based polyols. *J. Appl. Polym. Sci. 112: 299-308.*
- De Hoff, R.T. & Rhines F.N. (1968). *Quantitative microscopy*, New York. Mc Graw Hill.

- Doroudiani S., Park C.B. & Kortschot M.T. (1996). Effect of the crystallinity and morphology on the microcellular foam structure of semicrystalline polymers. *Polymer Engineering and Science* 36, 2645-2662.
- Gibson L.J. & Ashby M.F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*. (2nd Ed.). Oxford, England. Pergamon Press.
- Kraynik A.M. & Warren W.E. (1994). The elastic behavior of low density cellular plastics. In: *Hilyard N.C. and Cunningham, A. (Eds.), Low density cellular plastics, Chapman & Hall, London*.
- Maiti, S.K., Gibson L.J. & Ashby M.F. (1984). Deformation and energy absorption diagrams for cellular solids. *Acta Metallurg.* 32, 1111: 1963-1975.
- Ren X.J., & Silberschmidt V.V. (2008). Numerical modelling of low-density cellular materials *Computational Materials Science* 43, 65–74.
- UNE-EN13165 Productos aislantes térmicos para aplicaciones en edificación. Productos manufacturados de espuma rígida de poliuretano (PUR). CEN-AENOR (2013).
- UNE-EN826 Productos aislantes térmicos para aplicaciones en edificación. Determinación del comportamiento a compresión. CEN-AENOR (2013).