

# Uso de aluminio reciclado para la producción a bajo costo de espumas metálicas de poro abierto

## Use of recycled aluminium for low cost production of metallic foams

P. Fernández M<sup>1</sup>, L. J. Cruz R<sup>2</sup>, L.E. García-Cambronero<sup>3</sup>

1,2. Docente Investigador. Universidad Pontificia Bolivariana  
Circ. 1ra. 70-01 Laureles, Medellín, Colombia  
patricia.fernandez@correo.upb.edu.co,

3. Docente Investigador. Universidad Politécnica de Madrid-ETSI Minas, España  
luis.gcambronero@upm.es

Recibido 30/10/09, Aceptado 1/12/2009

### RESUMEN

Los metales celulares (MC) son materiales innovadores con muy baja densidad que se caracterizan por poseer una atractiva combinación de propiedades mecánicas y físicas, lo que los convierte en potenciales candidatos para una amplia gama de aplicaciones en diversos sectores como el automotriz, aeronáutico, construcción, implantes biomédicos, entre otros. Sin embargo, una desventaja inherente a éste tipo de materiales está dada por su alto costo, el cual básicamente radica en los procesos existentes para la producción de metales celulares. Con el fin de obtener espumas de aluminio de porosidad abierta y a un bajo costo, se realizó el presente estudio basado en la selección de un proceso de producción económico aunado al uso de materias de bajo costo (aluminio reciclado) y de fácil consecución (sal comercial). Una vez obtenidas las espumas de poro abierto, su calidad se validó mediante la evaluación de los aspectos estructurales y microestructurales. Además, fueron evaluadas las propiedades de absorción de sonido y la resistencia a la compresión. Los resultados demostraron que el proceso propuesto fue exitoso, ya que las espumas de aluminio reciclado obtenidas presentaron propiedades físicas y mecánicas comparativas con las reportadas en la literatura para otros MC.

**Palabras clave:** Espumas metálicas, Aleación de aluminio, Infiltración de preformas, Metal reciclado, Caracterización mecánica y microestructural.

### ABSTRACT

Cellular metals are innovative materials with very low density characterized by their very attractive combination of mechanical and physical properties, it makes them potential candidates for a wide range of applications in several sectors such as: the automotive, aeronautical, construction, biomedical implants, etc. However, an inherent drawback of this kind of materials is given by their high cost, which is basically due to the production process used to produce cellular metals. In order to obtain aluminium foams with open porosity, the present work based in the selection of an economical production process together with the use of low price raw materials (recycled aluminium) and easy consecution (commercial salt), was done. The obtained aluminum foams quality was validated by mean the evaluation of structural and microstructural aspects. Moreover, sound absorption and compression strength properties were evaluated. The results showed that the process was satisfactory since the mechanical and physical properties exhibited by the obtained recycled aluminum foams were comparatives with other MC reported in the literature.

**Key words:** Metal foams, aluminum alloy, preforms infiltration, metal recycled, mechanical and microstructural characterization.

## Introducción

Los metales celulares (MC) pertenecen a una innovadora clase de materiales que recién comienzan a ser reconocidos entre el medio académico, científico e industrial. Estos se caracterizan por que además de ser tremendamente livianos, también poseen una interesante combinación de propiedades mecánicas y físicas, brindadas tanto por su estructura porosa como por el metal empleado como matriz. Lo anterior da lugar a aplicaciones tales como la absorción de energía de impacto en el sector automotriz, intercambiadores de calor, filtros, construcción, implantes ortopedicos, entre otras [1-2]. Sin embargo, los MC en general, se consideran materiales costosos, dado que los procesos utilizados para su sintetización hasta ahora reportados, requieren de equipos y tecnologías de avanzada y por lo tanto onerosos. En ese sentido, todo esfuerzo enfocado hacia la optimización de la producción de los MC es bienvenido.

Por otra parte, se ha observado que la mayor cantidad de estudios realizados con respecto a la fabricación de MC corresponde a espumas metálicas de poro cerrado [3-4], por lo que cada día se incrementan los requerimientos donde es posible el uso de espumas metálicas de poro abierto. Adicional a lo anterior, surge la necesidad de ser ambientalmente amigables, por lo que trabajar con materiales reciclados y que permitan su reciclaje, se convierte en un punto clave en el procesamiento de nuevos materiales. De ahí surge entonces la motivación para la realización de éste trabajo de investigación, donde el fin último era lograr la obtención de espumas de aluminio de poro abierto, recurriendo a la selección de un proceso de producción económico tal como lo es la infiltración de preformas, aunado al uso de materias primas recicladas y de fácil consecución, tales como el aluminio reciclado y la sal comercial o de cocina. Una vez obtenidas las espumas de poro abierto, se estudiaron los principales aspectos estructurales de la red celular y, las características microestructurales del metal de la matriz. Así mismo, fueron evaluadas las propiedades de absorción de sonido y la resistencia a la compresión de las espumas de poro abierto obtenidas, determinando la posible influencia del material utilizado para su fabricación.

## Metodología

### Selección del proceso de producción y de las materias primas

La primera etapa del trabajo de investigación consistió en una búsqueda exhaustiva de información bibliográfica que conduciera a la selección a un conocimiento más profundo de las técnicas de fabricación reportadas y de esta manera se sentaran las bases para la selección tanto del proceso

de producción como de las materias primas, en lo posible recicladas y reciclables, que serían utilizadas para la fabricación del metal celular. El resultado de esta etapa se condensa en dos artículos [5-6] donde se hizo una revisión de los diferentes procesos consultados en la literatura.

### Fabricación de las espumas metálicas de aluminio de poro abierto

De la etapa anterior, el proceso seleccionado fue la infiltración de preformas removibles. En dicho caso y a fin de brindar un valor agregado a nivel ambiental y económico, se decidió trabajar con aluminio reciclado, material que hasta el momento no había sido utilizado por ninguno de los autores que han desarrollado MC, ya que se cree, puede llegar a tener un efecto detrimento en las propiedades del MC obtenido.

Con respecto a la materia prima, se seleccionó la sal comercial (NaCl) como preforma removible, pues es de fácil consecución, de fácil remoción, de bajo precio, y con posibilidad de ser reciclada en cierto nivel al final del proceso. Cabe anotar, que autores como Goodall y Despois [7-8], utilizan sales de alta pureza y aluminios de pureza certificada para la fabricación de espumas metálicas de poro abierto. La aleación de aluminio reciclado utilizada pertenece a la familia AlSiMg, con una composición promedio de los principales elementos de 9.8% Si, 0.42% Mg, 0.3% Fe, 0.14% Cu, 0.02% Mn, 88.2% Al.

El proceso de fabricación utilizado ha sido denominado en este trabajo como Infiltración de Preformas Solubles (IPS), y éste consistió de tres pasos básicos: i) elaboración de la preforma de sal, ii) fusión del aluminio y iii) aplicación de vacío para lograr la infiltración del metal entre los intersticios dejados en la preforma de sal. El lingote compuesto por Al/NaCl fue maquinado con el fin de obtener las probetas requeridas para los diferentes ensayos y posteriormente al corte, se realizó la remoción de la sal mediante disolución en agua.

### Evaluación estructural y de propiedades mecánicas y físicas

Una combinación de técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM) fueron utilizadas para el análisis estructural y microestructural de las espumas de aluminio obtenidas. Para el análisis metalográfico, fue necesario embeber las muestras de las espumas en resina epóxica para evitar el daño de los bordes de celda durante la etapa de pulido. El porcentaje de porosidad de las espumas, se calculó a partir de los resultados de la densidad relativa ( $\rho_R$ ), la cual puede expresarse como la fracción o el porcentaje dado por la relación entre la densidad del metal celular ( $\rho_{MC}$ ) con respecto a la densidad del metal sólido utilizado

como matriz ( $\rho_s$ ). De ahí que el porcentaje de porosidad corresponda a la diferencia  $(1-\rho_R) \times 100$ .

El ensayo de compresión uniaxial fue realizado en una máquina universal Instron 5582 a una velocidad de cabezal de  $0.5 \text{ mms}^{-1}$ . Se utilizaron probetas cilíndricas con dimensiones de 20 mm de diámetro y 20 mm de longitud y con tamaño de poro de 0.5 mm. El ensayo de absorción de sonido se basó en la norma ASTM C384-98 utilizando la técnica del tubo de impedancia, denominado también tubo de Kundt [9]. El intervalo de frecuencia utilizado para el ensayo estuvo entre 500 y 6400 Hz. Para éste ensayo se utilizaron probetas cilíndricas de 30 mm de diámetro por 20 mm de espesor con tres tamaños de poro diferentes: 0.5, 1.2 y 2.0 mm.

### Presentación y análisis de resultados

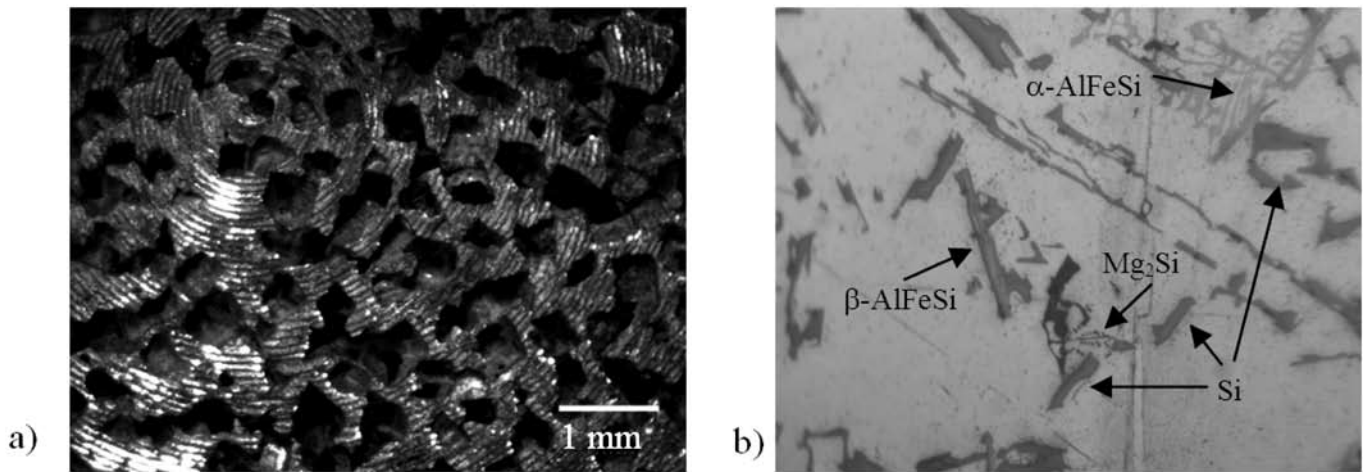
#### Estructura celular y microestructura metalográfica

La figura 1a. muestra las esponjas de aluminio con una estructura celular que replica, tanto la morfología irregular

de las partículas de sal, como el tamaño de partícula utilizado. Las esponjas obtenidas se caracterizaron por tener porosidad totalmente interconectada y uniformemente distribuida a través de toda la matriz de aluminio. Las esponjas obtenidas presentaron densidades relativas de 0.33, lo que equivale a un porcentaje de porosidad del 67%.

En la figura 1b. se muestran las partículas de Si,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\alpha\text{-AlFeSi}$  y  $\beta\text{-AlFeSi}$ , microconstituyentes hallados en la matriz metálica de las esponjas de aluminio analizadas. Aunque la presencia de precipitados del tipo  $\beta\text{-AlFeSi}$  es común en aleaciones de aluminio del tipo  $\text{AlSiMg}$  con altos porcentajes de Fe, estos pueden llegar a disminuir dramáticamente las propiedades mecánicas de la aleación, dado que además de ser partículas duras y frágiles, éstas poseen una morfología en forma de aguja que las convierte en un posible concentrador de esfuerzos de la matriz metálica [10]. En cuanto al Si, se encontró con morfología tipo "coral" y en forma de poliedros y barras, donde estas últimas se caracterizan por su inherente dureza y fragilidad, lo que induce a una menor capacidad de absorción de esfuerzos de la aleación.

Figura 1. Esponja de aleación de aluminio  $\text{AlSiMg}$ : a) Estructura celular y b) microestructura metalográfica

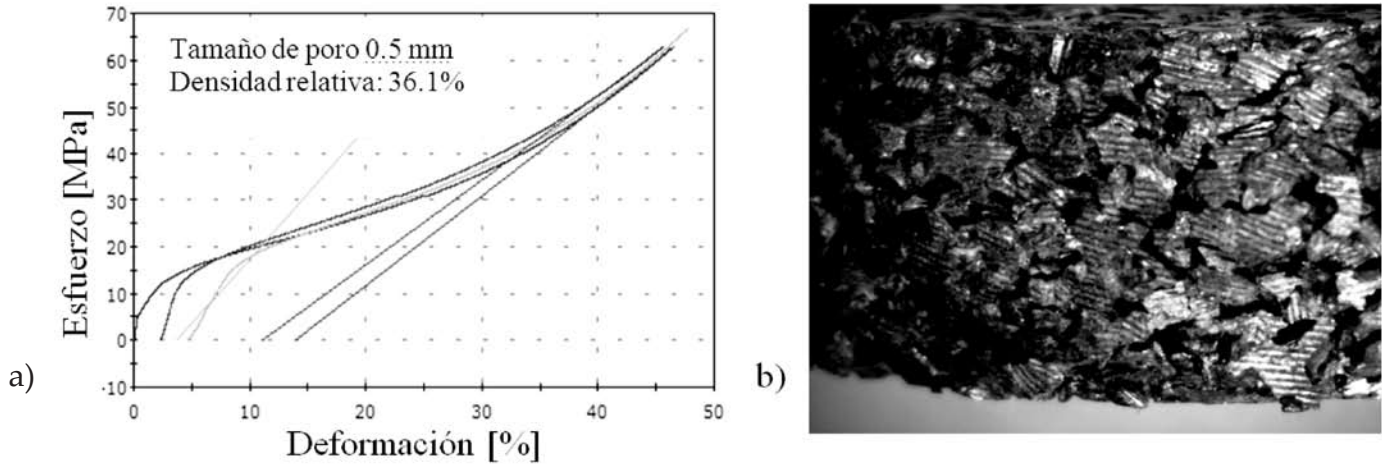


#### Comportamiento a compresión uniaxial

La figura 2a. muestra las curvas de esfuerzo – deformación obtenidas para las esponjas con tamaño de poro de 0.5 mm, en las cuales es posible observar un comportamiento uniforme caracterizado por una región elástica seguida de una región tipo meseta (denominada *plateau region*) donde el flujo de esfuerzos es casi constante hasta valores de deformación de alrededor del 50%, para finalmente culminar en una transición donde el flujo de esfuerzos incrementa abruptamente debido a la densificación que sufre la estructura celular (ver

figura 2b). Dicha densificación es el resultado del acomodamiento de la estructura celular que se origina durante la deformación, donde los bordes de celda van ocupando el espacio entre los poros. Esta tendencia es similar a la observada en otras espumas metálicas de aluminio obtenidas por proceso de infiltración en preformas de sal deformadas bajo compresión uniaxial [11]. No obstante a la presencia de precipitados de segunda fase del tipo  $\beta\text{-AlFeSi}$  y partículas frágiles de Si, los resultados obtenidos en las probetas sometidas a compresión están acorde con los reportados por otros autores para espumas base aluminio [12].

**Figura 2.** Comportamiento mecánico de las esponjas con tamaño de poro de 0.5 mm: a) Curvas de esfuerzo – deformación y b) densificación de la estructura celular al final de la deformación.



**Absorción de sonido**

Teniendo en cuenta que los materiales utilizados en aplicaciones de aislamiento acústico poseen coeficientes de absorción de sonido entre 0.8 -1.0 [13], se puede decir en general, que las probetas de esponjas de aluminio poseen una buena capacidad de absorción de sonido a incidencia normal. Con respecto al tamaño de poro, las probetas con tamaño de poro de 0.5 mm exhibieron el mejor comportamiento acústico. En la tabla 1, se registran los valores del coeficiente de absorción de sonido obtenidos para cada tamaño de poro en las probetas de las esponjas de aluminio analizadas con respecto a la frecuencia. Teóricamente, se considera que los poros más pequeños tendrán una buena capacidad de absorción de sonido debido a que su estructura porosa conduce a una absorción más eficiente de la energía vibracional generada por las ondas de sonido [14].

**Tabla 1.** Valores del coeficiente de absorción para las esponjas de AlSiMg

Tamaño de poro [mm]	Espesor muestra 20 mm	
	$\alpha_m$ [-]*	Frecuencia [Hz]
0.5	0.87	2.234
1.2	0.80	2.940
2.0	0.63	2.942

\* $\alpha_m$ : Coeficiente de Absorción de Sonido máxima [-]

**Conclusiones y Recomendaciones**

El uso de metales reciclados en la fabricación de metales celulares, estimula su producción a bajo costo, al tiempo que genera conciencia ambiental en el campo del procesamiento de materiales.

La posibilidad de usar materiales reciclados para la fabricación de metales celulares, específicamente metales y sus aleaciones, es totalmente viable, siempre y cuando se realicen los controles de proceso requeridos para que los contenidos de impurezas, inclusiones, y otros elementos indeseables dentro de la composición química, no interfieran de manera negativa principalmente en el comportamiento mecánico.

Las pruebas de compresión y de absorción de sonido realizadas a las esponjas obtenidas con aleación de aluminio, arrojaron resultados satisfactorios, mostrando valores congruentes con los reportados por otros autores. Se comprobó así mismo, la alta capacidad de absorción de energía de deformación de este tipo de materiales, lo cual se debe primordialmente al acomodamiento de la red porosa durante la aplicación del esfuerzo. La influencia del tamaño de los poros en la capacidad de absorción de sonido de las esponjas, presentó un mejor comportamiento en aquellas esponjas con el menor tamaño de poro, obteniéndose valores del coeficiente de absorción de sonido  $\alpha$  acordes con los requeridos para aplicaciones de aislamiento acústico.

Al utilizar aleaciones de aluminio del tipo AlSiMg recicladas, se recomienda mantener el contenido de Fe en los niveles más bajos, y evitar períodos muy largos de enfriamiento del material fundido, con el fin de prevenir la formación de precipitados de segunda fase de tipo  $\beta$ -AlFeSi.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a COLCIENCIAS por la financiación de éste trabajo por medio del programa Apoyo a Doctorados Nacionales y del proyecto de investigación cod. 1210-452-21201. Así mismo, expresan sus agradecimientos a la Dra. Navacerrada de la ETSI Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid.

## Referencias

- [1] Ashby, M.F. *et al. Metal foams: a design guide*, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] Gibson, L.J., Ashby, M.F. *Cellular solids: structure and properties*, Cambridge University Press, Cambridge, UK., 2001.
- [3] Banhart, J., *Progress in Materials Science* 46, (2001) 559-632.
- [4] G. J. Davies, Shu Zhen, *Journal of Materials Science* 18 (1983), 1899-1911.
- [5] Fernández, P., Cruz; L. J., Coletto, J., *Revista de Metalurgia de Madrid*, 44 (6), (2008), 540-555.
- [6] Fernández, P., Cruz; L. J., Coletto, J., *Revista de Metalurgia de Madrid*, 45 (2), (2009), 124-142.
- [7] Goodall, R., Despois, J. F., Marmottant, A., Salvo, L., Mortensen, A. *Scripta Materialia* 54 (2006), 2069-2073.
- [8] Goodall, R., Despois, J. F., Mortensen, A. *Journal of the European Ceramic Society* 26 (2006), 3487-3497
- [9] Norma ASTM C384-04. Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method. ASTM International, (2004), 1-9.
- [10] Moustafa, M. A., *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (2009), 605-610.
- [11] Cao Xiao-qing, *et al.*, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 16 (2006), 351-356.
- [12] Amsterdam, E., Babcsan, N., De Hosson, J.T.M., Onck, P.R., Proc.: *MetFoam2005, Porous Metals and Metal Foaming Technology*, (2005), 1-4.
- [13] Kim, S. Y., Hur, B. Y., Kwon, K.C., Cho, S. H., Lim, C.Y., Yoo, Y. M., Lee, M. H. Proc.: *Cellular Metals: Manufacture, properties, applications, MetFoam 2003*, (2003), 469-474.
- [14] Lu, T. J., Hess, A., Ashby, M. F., *J. Appl. Phys.*, 85 (11), (1999), 7528-7539.