Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (3): 1269-1274

ESTUDIO COMPARATIVO CON BASE EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN DE ESPONJAS DE ALUMINIO OBTENIDAS MEDIANTE INFILTRACIÓN DE PREFORMAS SOLUBLES

Patricia Fernández [1], Mauricio Daza [2], Eduardo Oviedo [2], Camilo Ortega [2], Javier Cruz [1]*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (3): 1269-1274

ESTUDIO COMPARATIVO CON BASE EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN DE ESPONJAS DE ALUMINIO OBTENIDAS MEDIANTE INFILTRACIÓN DE PREFORMAS SOLUBLES

Patricia Fernández [1], Mauricio Daza [2], Eduardo Oviedo [2], Camilo Ortega [2], Javier Cruz [1]*

1: Escuela de Ingenierías, Facultad de Ing. Mecánica, GINUMA, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia
2: Escuela de Ingenierías, Facultad de Ing. Mecánica, Semillero GINUMA, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

** E-mail: patricia.fernandez@upb.edu.co*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

La incidencia de la técnica de fabricación, del tamaño de grano y de la geometría de las probetas fue evaluada mediante la determinación de la resistencia a la compresión de esponjas de aluminio obtenidas por el proceso de infiltración del metal líquido en preformas de NaCl. Unas esponjas fueron obtenidas por infiltración por gravedad y otras por infiltración asistida por presión de vacío. Se determinó el efecto del tamaño de grano del NaCl utilizado en las preformas ya que tiene un efecto directo sobre la estructura de los poros de las esponjas y sobre la densidad relativa. En este sentido, las esponjas de menor tamaño de grano presentaron una mayor absorción de energía de deformación. Se analizaron probetas de geometría cilíndrica y cúbica y se verificó que las cilíndricas producen resultados más confiables ya que muestran menores desviaciones estándar en sus propiedades. Los resultados obtenidos muestran una mejora en la calidad de las esponjas al ser fabricadas mediante infiltración bajo presión de vacío.

Palabras Claves: *Esponjas de aluminio, infiltración de preformas, NaCl, ensayo de compresión*

Abstract

The incidence of the manufacturing technique, the grain size and the geometry of the samples was evaluated by compression strength of aluminum sponges obtained by infiltration process of liquid metal in NaCl performs. The sponges were made by mean infiltration both by gravity and by infiltration supported with vacuum pressure. The effect of NaCl grain size used in the preforms was determined because it has a direct effect over the porous structure and the relative density of the sponges. In this sense, the higher strain energy absorption was showed by the aluminum sponges with the smaller porous size. Samples with cylindrical and cubic geometries were analyzed and was verified that the cylindrical samples produce more reliable results with smaller standard deviations in its properties. The results proved the quality improvement of the sponges that was obtained by mean the vacuum pressure infiltration process.

Keywords*: Aluminium sponges, infiltration of preforms, NaCl, compression test*

1. INTRODUCCIÓN

Los metales celulares (esponjas y espumas) con su interesante combinación de propiedades tales como rigidez y muy baja densidad hacen parte de la gran familia de los nuevos materiales que han despertado gran interés a nivel mundial. Su porosidad abierta o cerrada permite que sean empleadas en aplicaciones de tipo estructural o funcional [1]. El mayor nivel de desarrollo de este tipo de materiales se ha dado en países como EE.UU., Canadá, Reino Unido, Alemania y Japón. Entre las rutas reportadas para la obtención de metales celulares se tienen procesos de pulvimetalurgia, electrodeposición y fundición [2]. De esta última ruta se desprende el método denominado Infiltración de Preformas Solubles (IPS) conocido también como *Replication Process* [3], técnica alternativa para la producción de metales celulares de porosidad abierta que consiste en obtener una preforma porosa de un material con resistencia a la alta temperatura del metal fundido y que no reaccione con el mismo, luego sobre ésta se realiza el vaciado para la infiltración con el metal

líquido. El cloruro de sodio es comúnmente utilizado para la elaboración de la preforma debido a su fácil consecución, disponibilidad en grandes cantidades, bajo costo, no tóxico, y es de fácil remoción mediante disolución con agua corriente.

En la actualidad, el gran reto para los investigadores en materiales se fundamenta aun en el perfeccionamiento de las técnicas de fabricación que permitan obtener metales celulares reproducibles, confiables y de calidad. Lo anterior fue la principal motivación para llevar a cabo el estudio descrito aquí, el cual comprende la fabricación de esponjas metálicas y su análisis de resistencia mecánica a la compresión. Las esponjas fueron obtenidas mediante infiltración de aluminio en preformas de NaCl tanto por gravedad [4] como asistida por vacío utilizando un equipo con diseño y adaptación propia. La matriz de la esponja está constituida por la aleación de aluminio A356 y la preforma conformada básicamente por granos de NaCl seleccionados mediante análisis químico, morfológico y granulométrico. Entre las técnicas utilizadas para el análisis del NaCl están el SEM, EDS, y el análisis granulométrico a fin de seleccionar el tamaño de grano a densificar en la preforma.

Una vez obtenidas las esponjas de Al, se realizaron cortes de probetas para determinar la densidad relativa y para su uso en los ensayos de compresión. El análisis de los resultados permitió vislumbrar la influencia del uso de presión de vacío en la resistencia mecánica de las esponjas obtenidas con respecto a las esponjas obtenidas por gravedad. Así mismo, se estudio la influencia del tamaño de grano y de la geometría de las probetas utilizadas (paralepípedos vs cilindros) en el comportamiento a la falla de las probetas bajo esfuerzos uniaxiales de compresión. Con este estudio se determinaron las condiciones para la fabricación de estos materiales mediante IPS, apuntando a la mejora en su calidad y su futuro aprovechamiento en una amplia gama de aplicación para diversos sectores industriales.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Las esponjas de aluminio investigadas fueron fabricadas por fundición, específicamente mediante el método de infiltración. El proceso consistió básicamente en el vaciado directo del aluminio líquido sobre una preforma elaborada con partículas de cloruro de sodio, y una vez solidificado el aluminio se procedió a la disolución de la sal con agua corriente. El proceso de infiltración fue llevado a cabo tanto por gravedad como asistido por presión de vacío, constituyéndose éste aspecto en un parámetro a estudiar con respecto a su influencia en la resistencia a la compresión de las esponjas analizadas. La aleación de aluminio utilizada es la A356 con composición Al-6,7Si-0.4Mg; y el cloruro de sodio correspondía a sal común. A fin de obtener un tamaño de grano homogéneo en las preformas, la sal fue sometida a un análisis granulométrico a partir del cual fueron seleccionados los tamaños de grano con intervalos de 600-850μm (M30), 0.85-1.18 mm (M20), 1.18-1.68 mm (M16), 2.00-2.36 mm (M8-M10). Así mismo, se realizaron análisis químico y morfológico por SEM-EDS de las partículas de sal como se muestra en la figura 1. Debe notarse que la forma y el tamaño de las celdas de las esponjas depende directamente de estos parámetros de las partículas de sal lo que se refleja en las microestructuras de la figura 2. En la imagen obtenida por estereomicroscopía óptica se observa que la esponja consiste de un arreglo no periódico de bordes de celda que se interceptan de manera aleatoria para formar los nodos, alejándose del modelo ideal de esponja descrito por Gibson y Ashby [5].

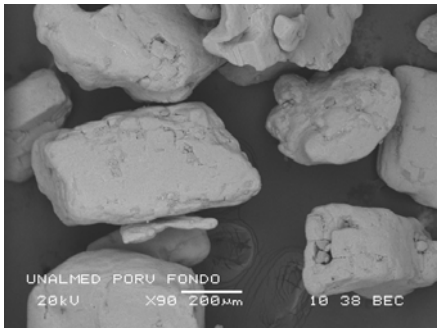


Figura 1. Imagen SEM de las partículas de NaCl

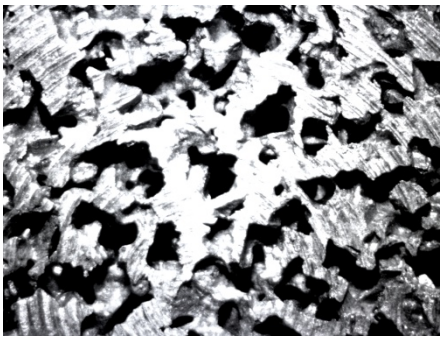


Figura 2. Imagen de la estructura porosa de las esponjas obtenida por Estereomicroscopía óptica

La geometría del conjunto de muestras a ensayar bajo esfuerzos de compresión correspondió a cilindros de 20 mm de diámetro y 20 mm de altura; y cúbicas de 20 mm de lado, como se muestran en la figura 3. En total fueron ensayados 6 grupos de 3 probetas cada uno, 15 cilíndricas y 3 cúbicas. Asumiendo que la densidad de la aleación es de 2,7 g/cm^3, la densidad relativa promedio para las esponjas ensayadas se diferencio entre las obtenidas por gravedad con ~43% (1,17 g/cm^3) y las fabricadas por presión de vacío con ~33% (0,89 g/cm^3). Las probetas fueron ensayadas utilizando una máquina universal de ensayos Instron 5582, a una velocidad de cabezal de 0.5 mm/s y bajo condiciones de temperatura y humedad normales de laboratorio.



Figura 3. Probetas de esponjas de Al: M8 infiltradas por gravedad, y M10-M16-M20-M30 infiltradas por presión de vacío.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la resistencia a la compresión se presentan de manera independiente para cada uno de los parámetros analizados: i) la influencia del método de fabricación (gravedad vs presión de vacío), ii) la influencia del tamaño de grano (tamaño de poro), y iii) el efecto de la geometría de la probeta.

En general, las curvas de esfuerzo vs deformación obtenidas no muestran claramente definida la zona de meseta para el total de las probetas ensayadas, lo que puede deberse al endurecimiento continuo de las esponjas por el re-acomodamiento de la estructura durante el proceso de deformación. Así mismo, las curvas exhiben un punto de inflexión a un porcentaje de deformación menor del 10%, y conforme la deformación a compresión se incrementa, la rigidez disminuye levemente para luego incrementarse rápidamente cerca del 15% de deformación. Este comportamiento no se observó en las probetas obtenidas por gravedad. Todos los ensayos fueron llevados hasta un porcentaje cercano al 40% de deformación.

3.1. Infiltración por gravedad vs. Presión de vacío

La influencia que el método de infiltración puede presentar en la resistencia a la compresión se infiere de entrada con los datos de densidad relativa obtenidos en las esponjas bajo estudio, 0.43 para las esponjas obtenidas por gravedad y 0.33 para las fabricadas por presión de vacío. Se ha establecido que las propiedades tanto físicas como mecánicas dependen en cierto modo de la densidad relativa de la esponja.

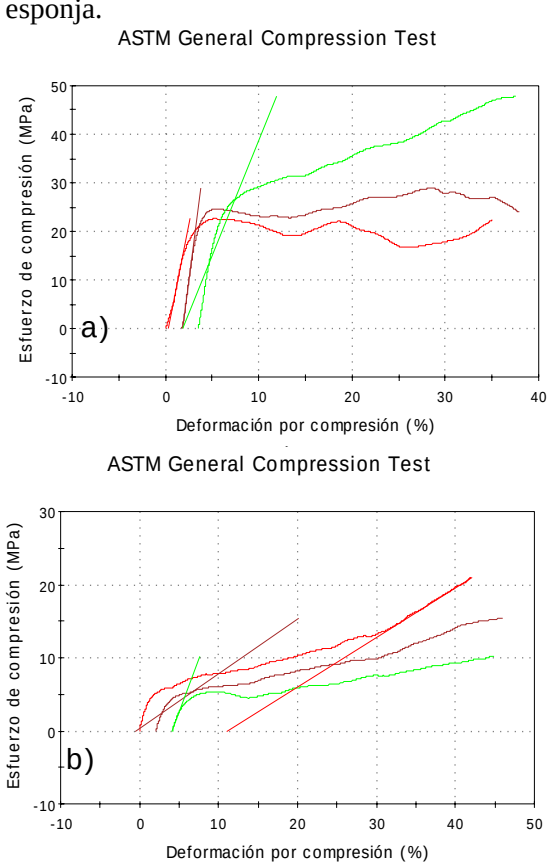


Figura 4. Esfuerzo vs. deformación por compresión. a) Muestras infiltradas por gravedad, b) Muestras infiltradas por presión de vacío.

De las curvas de esfuerzo vs deformación mostradas en la figura 4, la respuesta de las probetas obtenidas por infiltración mediante vacío presentan un comportamiento más uniforme durante el proceso de deformación hasta lograr valores de resistencia a la compresión entre 10 y 20 MPa. Cosa contraria ocurre con las probetas obtenidas por gravedad, en las que solo hay un comportamiento similar entre dos de ellas y cuyos valores de resistencia a la compresión oscilan entre 22 y 47 MPa. Si bien las probetas infiltradas por gravedad registraron un mayor valor de resistencia a la compresión, su

comportamiento a la falla fue más catastrófico que el mostrado por las probetas obtenidas por presión de vacío. En este sentido, las probetas infiltradas por gravedad sufrieron pérdidas de material al disgregarse parcialmente al final de la prueba, mostrando así mismo rastros de granos de sal incrustados al interior de la probeta. Esto es un indicativo de la falta de cohesión entre granos durante el proceso de infiltración por gravedad y que resulta en el atrapamiento de partículas de sal por el metal y que no son removidas durante el proceso de disolución. En el caso de las probetas obtenidas por vacío, el tipo de falla observado es un aplastamiento plano y uniforme, y ninguna de las muestras presenta trazas mínimas de sal.

3.2. Influencia del tamaño de poro

Para llevar a cabo el análisis de la influencia del tamaño de poro, el cual es proporcionado a su vez por el tamaño de partícula de la sal utilizado para la fabricación de las esponjas, se ha tomado un grupo de probetas de esponjas en cuatro tamaños de poro diferentes e infiltradas todas por presión de vacío. Los tamaños de poro utilizados son graficados vs. la resistencia a la compresión. Adicionalmente, se incluyen los valores de densidad relativa para cada una de los tamaños de poro graficados y de esta manera evidenciar la relación que existe entre estos dos parámetros y su efecto en la resistencia a la compresión, tal como lo propone en su investigación San Marchi y Mortensen [6].

De acuerdo al gráfico de la figura 5, la resistencia a la compresión estuvo por encima de 17 MPa para tamaños de poro entre 0.6 – 1.68 mm, mientras que para tamaños de grano mayores a 2.00 mm no superó los 15 MPa. Con respecto a la densidad relativa (valores entre paréntesis), se deduce un comportamiento un tanto similar entre las diferentes probetas, esto es, para las densidades relativas entre 0.30-0.36 la resistencia a compresión está en un intervalo entre 15-20 MPa. Sin embargo, definir un valor de resistencia a compresión para este tipo de materiales resulta un poco ambiguo como lo expresa Cao et al. [7] en un estudio realizado recientemente y con el cual se han encontrado algunos puntos coincidentes con la investigación presentada en este artículo. En dicho estudio, Cao encontró el mismo comportamiento de colapso de las celdas y la compactación de las mismas de manera que se incrementa el esfuerzo requerido luego de sobrepasar el punto de fluencia. En cuanto al modulo de elasticidad, se encontró que este fue mayor para tamaños de poro de 2-2.36 mm.

Todas las probetas mostraron falla por aplastamiento plano excepto el grupo de probetas con tamaño de poro de 0.85-1.18 mm (M20), la cual presentó falla de tipo cortante. En ningún caso se manifestó presencia de sal, ni desmoronamiento de las probetas. Se resalta el alto grado de acomodamiento que sufrió la estructura de la probeta de menor tamaño de poro, 0.60-0.85 mm (M30) durante el proceso de deformación, lo cual se traduce en la densificación por compactación de las celdas colapsadas, lo que proporcionó mayor capacidad de absorción de energía de deformación. Este comportamiento es reportado por Brothers y Dunand [8] y Wang Zhihua, et al. [9].

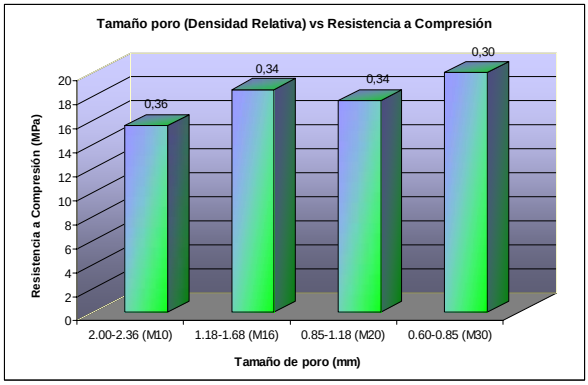


Figura 5. Gráfico Tamaño de poro (Densidad Relativa) vs Resistencia a la compresión

3.3. Influencia de la geometría de la probeta

Uno de los aspectos que deben ser mencionados con respecto a la elaboración de las probetas para compresión, es precisamente la dificultad que representa su corte y maquinado debido primordialmente a su macroestructura. A fin de no estropear lo poros o desintegrar las esponjas durante el proceso de corte y maquinado, este procedimiento debe ser llevado a cabo previamente a la disolución de la sal, lo cual acarrea otro problema y es la necesidad de trabajar en seco, sin lubricantes que generen la disolución de la sal y que, por ende, pueden promover la aparición de corrosión en el equipo utilizado.

Para los ensayos de compresión de esponjas metálicas se utilizan comúnmente dos tipos de probetas: cilíndricas y paralepípedas. Como parte de este estudio se ha querido visualizar si existe algún tipo de efecto en los valores de compresión debidos a la geometría de las probetas. Para ello, se han sometido a ensayo probetas cilíndricas y probetas

cúbicas con dimensiones aproximadamente similares, esto es; 20 mm de diámetro y 20 mm de altura, para las primeras y, 20 mm de lado para las segundas. En ambos casos, las probetas fueron obtenidas por infiltración por gravedad.

Los resultados muestran que en promedio, los valores de compresión obtenidos para las probetas cilíndricas es muy similar al obtenido para las cúbicas, 25.7 MPa y 25.9 MPa, respectivamente. Sin embargo, la desviación estándar para los datos obtenidos durante el ensayo de las probetas cúbicas es mayor al obtenido con las cilíndricas. Esto significa un comportamiento más homogéneo para las probetas cilíndricas a través de todo el ensayo de compresión como se muestra en la figura 6. Adicionalmente, con respecto al comportamiento a la falla; en ambos casos se observó falla por aplastamiento plano con desintegración parcial de las probetas y presencia de partículas de sal, como se mencionó anteriormente.

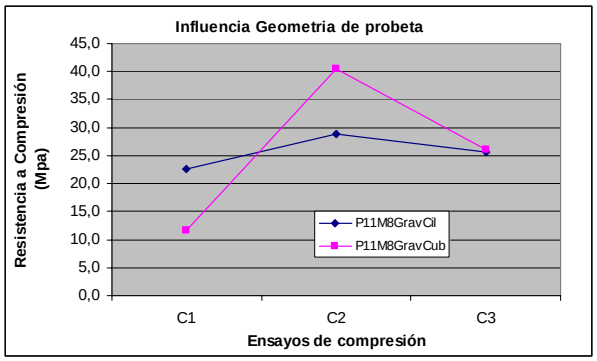


Figura 6. Influencia de la geometría de la probeta de esponja metálica en la resistencia a la compresión

4. CONCLUSIONES

Una de las conclusiones de mayor relevancia de este trabajo, esta dada por el nivel de mejoramiento logrado en la calidad de las esponjas de aluminio fabricadas mediante presión de vacío. Los ensayos de compresión realizados permitieron identificar un comportamiento a la deformación mucho más homogéneo y con valores de resistencia que no difieren mucho entre ellos para una misma serie de probetas obtenidas por infiltración con vacío. Este comportamiento homogéneo a la deformación es prueba de una estructura más uniforme de las probetas infiltradas por vacío que la estructura de aquellas infiltradas por gravedad.

Aunque ha sido evidenciada por otros autores la influencia del tamaño de los poros de las esponjas en diferentes propiedades tanto físicas como mecánicas, en el estudio presentado se ha podido observar que el intervalo de resistencia a la compresión es bastante cerrado para las probetas ensayadas con diferentes tamaños de poro y densidades relativas muy próximas. Cabe resaltar que las probetas con menor tamaño de poros (0.6-0.85 mm) presentó el mejor comportamiento con respecto a la absorción de energía de deformación, debido prácticamente al alto grado de acomodamiento que sufrió la estructura durante la aplicación de los esfuerzos de compresión. El uso de probetas cilíndricas resulto ser más confiable en lo que a la curva de esfuerzo vs. deformación se refiere, pues los valores obtenidos muestran menores desviaciones estándar que para las probetas cúbicas. Durante la prueba de compresión es importante el análisis del comportamiento de las esponjas metálicas, lo cual se infiere del análisis directo de la curva esfuerzo vs. deformación. Es así como aún teniendo esponjas de aluminio con densidades relativas similares o casi iguales, su comportamiento mecánico a compresión puede ser diferente en función de la existencia de micro-imperfecciones en las celdas o bordes de los poros y de la densidad diferencial a través de la misma esponja.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Centro Integrado para el Desarrollo de la Investigación CIDI por la financiación del proyecto interno 054A-05/07-18 y a Colciencias por la financiación de la beca doctoral de la Ing. Fernández.

5. REFERENCIAS

[1] Ashby, M.F. et al. H.N.G. *Metal foams: a design guide*, Oxford, (Inglaterra): Butterworth-Heinemann, 2000, 251 pp.

[2] Banhart, J. *Progress in Materials Science*, 46, (2001) 559-632.

[3] Gaillard, C., Despois, J.F. and Mortensen, A. *Materials Science and Engineering A*; 374 (2004) 250–262.

[4] Fernández M., P. et al. *Revista Scientia et Technica*. Vol. 8, Sept. 2007. U. Tecnológica de Pereira.

[5] Gibson, L. and Ashby, M. *Cellular Solids: Structure and Properties.* 2nd. Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[6] San Marchi, C., Mortensen, A. *Acta mater.* 49 (2001) 3959–3969.

[7] Cao, X. et al. *Trans. Nonferrous Met. SOC. China*. 16(2006) 351-356.
[8] A.H. Brothers, D.C. Dunand. *Acta Materialia*, vol. 53, pp. 4427–4440, 2005
[9] Wang Zhihua, et al. *Scripta Materialia*, 54 (2006) 83–87