

Obtención de aleaciones superligeras Magnesio-Aluminio

Alberto Sandoval-Jiménez^{1a,2}

Luis Zamora-Rangel^{1b}

Jesús Barragán-Villafán^{1a}

José Luis Iturbe-García^{1c}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares,

^aDepartamento de Aceleradores,

^bDepartamento de Tecnología de Materiales,

^cDepartamento de Química,

Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa,
Ocoyoacac, México, CP 52750.

²Instituto Politécnico Nacional,

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Unidad Culhuacán.
MÉXICO.

Teléfonos: Tel. 53297200 ext. 2253; fax 53297329.

Correo electrónico: alberto.sandoval@inin.gob.mx
asandovalj@correo.unam.mx

Recibido el 18 de noviembre de 2008; aceptado el 24 de junio de 2009.

1. Resumen

Aleaciones porosas magnesio-aluminio (Mg-Al) se obtuvieron por el método de infiltración. Las aleaciones de partida con composiciones Mg-25Al% peso y Mg-10Al % peso se prepararon en un horno de inducción bajo atmósfera de argón con elementos 99.8% puros. Posteriormente estas aleaciones se fundieron en un horno de atmósfera libre y vaciaron en un molde conteniendo partículas de NaCl de distinto tamaño, por lo que se obtuvieron aleaciones con poros de diferentes tamaños. La relación de área específica de la aleación compacta a porosa Mg-25Al es de 1:1000. La densidad experimental de la aleación compacta es 1.86 g/cm³ y la densidad relativa de la aleación porosa es 1.108 g/cm³.

Palabras clave: aleación porosa magnesio-aluminio superligera, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, densidad relativa.

2. Abstract (Obtainment of Super-light Magnesium-Aluminum Alloys)

By infiltration-method, magnesium-aluminum (Mg-Al) porous alloys were obtained. The originals compact alloys with Mg-25 %wt. Al and Mg-10% wt. Al compositions were prepared with 99.8 % pure elements under argon atmosphere by using an induction furnace. For obtain the porous alloys, the Mg-Al compact alloys were melting into a free atmosphere furnace and casting in a NaCl matrix with different particle size. The ratio compact-porous specific area of the Mg-25Al alloy is 1:1000; experimental density is 1.86 g/cm³ for the compact alloy and 1.108 g/cm³ relative density for porous alloy.

Key words: magnesium-aluminium super-light porous alloy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, relative density.

3. Introducción

En la naturaleza existen sólidos celulares, también conocidos como sólidos porosos, por ejemplo madera, corcho, esponjas y coral. Las necesidades tecnológicas obligan a desarrollar nuevos productos. Los sólidos porosos son estructuras no fluidas que están constituidos por una parte sólida y otra hueca, a ésta última se le denomina en forma genérica como poros. Los materiales porosos son cerámicos, polímeros, madera, y metales y aleaciones [1, 2, 3].

Los metales porosos son materiales de uso tecnológico y continuamente se adicionan productos los cuales se desarrollan para satisfacer determinadas necesidades; las propiedades específicas dependen de la práctica de la manufactura, de la estructura, de las propiedades de los materiales de origen y de las aplicaciones del producto poroso. La estructura de los metales porosos puede ser descrita por parámetros como son la cantidad de porosidad, tamaño promedio de poros, forma de los poros, orientación de los poros, grado de interconexión de poros, distribución de poros en macro y microregiones, distribución de tamaño de poros y área específica. Existen varios métodos para la fabricación de materiales porosos, entre ellos metalurgia de polvos, deposición química y electroquímica, por transformación gas-eutéctico y por colada [1-3].

Los materiales metálicos porosos, especialmente los basados en metales de baja densidad o ligeros, tienen combinaciones interesantes de sus propiedades, tales como alta rigidez en conjunción con un peso específico bajo, o alta resistencia a la compresión combinado con buenas características de absorción de energía. Uno de los elementos más usados para obtener materiales porosos es el aluminio [1, 4].

Los usos de los materiales porosos son muy amplios, y depende de su origen. Se usan en aislamiento térmico, en los convertidores catalíticos de los sistemas de salida de los automóviles, en filtros en operaciones de colada de metales, aislantes de sonido, catalizadores de reacciones químicas, sumideros de calor en componentes electrónicos, intercambiadores de calor, reductores de vibraciones, núcleos de paneles de estructuras de alta resistencia para alas de aeronaves [1, 3, 5, 6].

Las aleaciones Mg-Al se clasifican como ligeras [7]. En este artículo se presentan los resultados de las investigaciones para la obtención de aleaciones Mg-Al porosas con una densidad relativa menor que las aleaciones compactas originales.

4. Desarrollo

De elementos magnesio (Mg) y aluminio (Al) de pureza 99.8% se obtuvieron lingotes compactos de aleaciones con composición Mg-25Al% peso y Mg-10Al% peso. En adelante se denominarán Mg-25Al y Mg-10Al. La fundición de los elementos para obtener las aleaciones se realizó en atmósfera de argón en un horno de inducción.

A partir de los lingotes compactos se obtuvieron las aleaciones porosas con distinto tamaño de poro. La matriz para generar los poros fue NaCl comercial, mezclando distintos tamaños de partículas, desde tamaño comercial hasta partículas de tamaño reducido; estas últimas preparadas por molienda de NaCl comercial usando un molino para aleado mecánico. La elección del NaCl fue por su punto de fusión, mayor al de las aleaciones Mg-Al y por la fácil eliminación por disolución.

Las aleaciones porosas se prepararon por fundición de los lingotes compactos en crisol de grafito usando un horno Carbolite de atmósfera libre. En el mismo horno se introdujo una lingotera de acero al carbón conteniendo la matriz para generar los poros. De acuerdo al diagrama de fases Al-Mg [8], la temperatura de fusión de la aleación Mg-25Al es de 783 K, para inducir fluidez al fundido y lograr infiltración total en la matriz la temperatura de vaciado fue 873 K. La temperatura de fusión de la aleación Mg-10Al es de 868 K y la temperatura de vaciado fue de 970 K. Previo a la operación

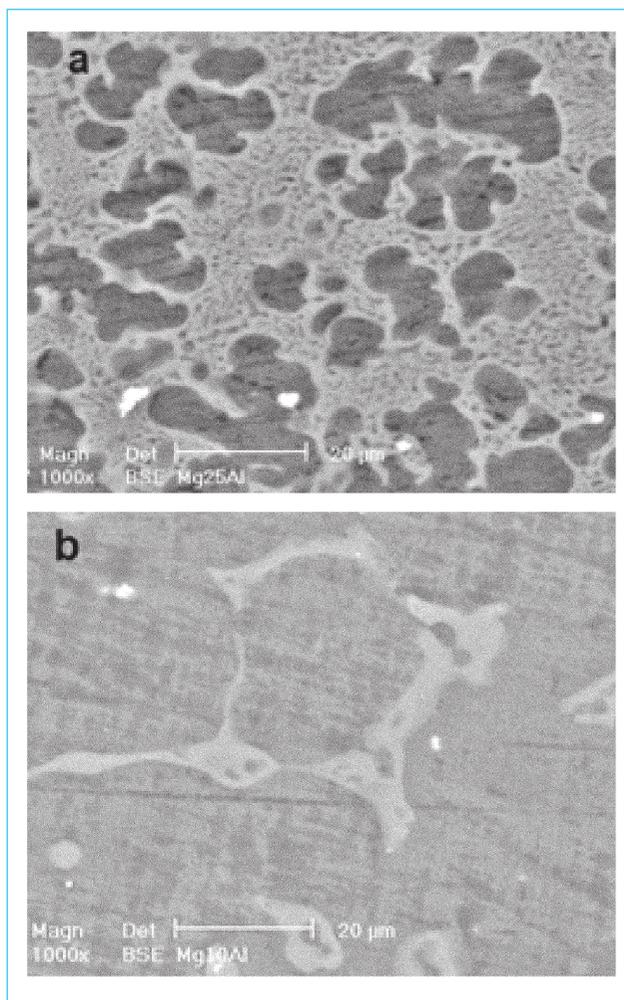


Fig. 1. Micrografías de MEB: a) Aleación compacta Mg-25Al. Las zonas oscuras son fase δ rica en Mg, las zonas claras son fase γ . b) Aleación Mg-10Al, matriz rica en Mg (fase δ) y segunda fase (γ) de morfología dendrítica con precipitados de Al.

de vaciado, para evitar reacción de la aleación con el medio ambiente, se adicionó un fundente (CaF). Una vez solidificada la aleación, la matriz de partículas de NaCl se eliminó por dilución en H₂O caliente. La microestructura de las aleaciones se analizó con un microscopio electrónico de barrido Phillips XL30, los estudios de difracción de rayos-X se realizaron con un difractómetro Siemens D5000 con radiación K y filtro de Cu con un intervalo de 0.3°. La determinación de área específica de las aleaciones compactas y porosas se hizo con un equipo Gemini 2360 V3.03. Los resultados de la densidad son experimentales y determinados por desplazamiento de volumen.

Tabla 1. Análisis químico elemental por EDS de la aleación Mg-25Al% peso.

Elemento	Análisis por microsonda integrada al MEB					
	Análisis general		2ª Fase (zona clara)		Matriz (zona oscura)	
	% peso	% atómico	% peso	% atómico	% peso	% atómico
Mg	55.29	52.27	36.43	31.20	51.16	48.93
Al	28.20	24.02	26.25	20.25	33.63	28.98
O	16.49	23.70	37.30	48.53	15.19	22.07

Tabla 2. Análisis químico elemental por EDS de la aleación base Mg-10Al% peso.

Elemento	Análisis por microsonda integrada al MEB					
	Análisis general		2ª Fase (zona clara)		Matriz (zona oscura)	
	% peso	% atómico	% peso	% atómico	% peso	% atómico
Mg	74.55	71.38	77.61	79.37	77.65	73.57
Al	14.18	12.23	22.38	20.62	9.78	8.35
O	11.25	16.37			12.55	18.07

En las tablas 1 y 2 se presentan las composiciones químicas de las aleaciones Mg-25Al y Mg-10Al. La alta electronegatividad de los elementos los induce a ser muy reactivos o ávidos de oxígeno, a ello se debe la alta concentración de este último elemento.

La figura 2a es una imagen de la aleación porosa Mg-25Al, y la figura 2b corresponde a la aleación Mg-10Al; se obtuvieron con cámara fotográfica digital. La porosidad generada en ambas aleaciones es uniforme.

En las imágenes de MEB de la aleación Mg-25Al se observan poros de diversos tamaños, desde el orden de milímetros, figura 3a-b, hasta menores de 1 μm de diámetro, figuras 3c-d, formando redes de enlaces entre los poros mayores.

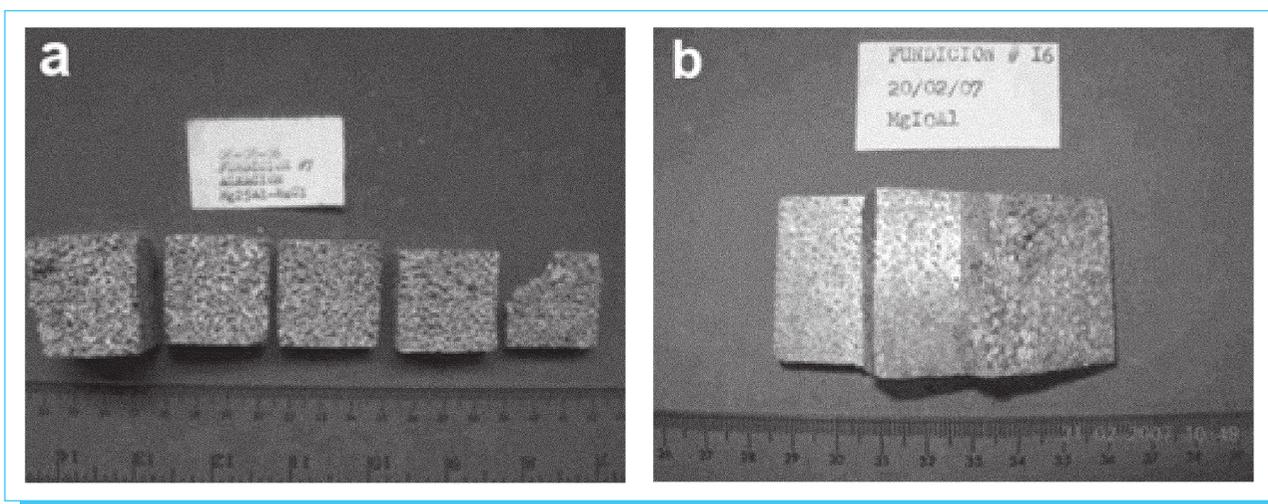
5. Resultados y discusión

5.1. Metalografía

La aleación Mg-25Al está formada por una matriz rica en Mg (fase δ) con Al en solución y una segunda fase Mg-Al (fase γ) de morfología globular-irregular y distintos tamaños con distribución uniforme en la matriz, figura 1a. La aleación Mg-10Al está formada por la matriz rica en Mg con Al en solución y una segunda fase γ de morfología dendrítica, figura 1b.

La aleación porosa Mg-10Al retiene la microestructura de la aleación compacta. En los poros milimétricos exteriores se observa el enlace con poros de menor diámetro, figura 4a. Las dendritas formadas en la aleación compacta conservan su morfología, figura 4b. La matriz es granular equiaxial con fronteras de grano definidas, la segunda fase γ contiene precipitados de Al, figura 4c. En la figura 4d se observan poros de diámetro micrométrico, algunos menores a 1 μm .

De acuerdo al diagrama de fases Al-Mg [8], la región de las aleaciones objeto de esta investigación corresponde al campo

**Fig. 2.** Lingotes porosos: a) Aleación Mg-25Al; b) Aleación Mg-10Al.

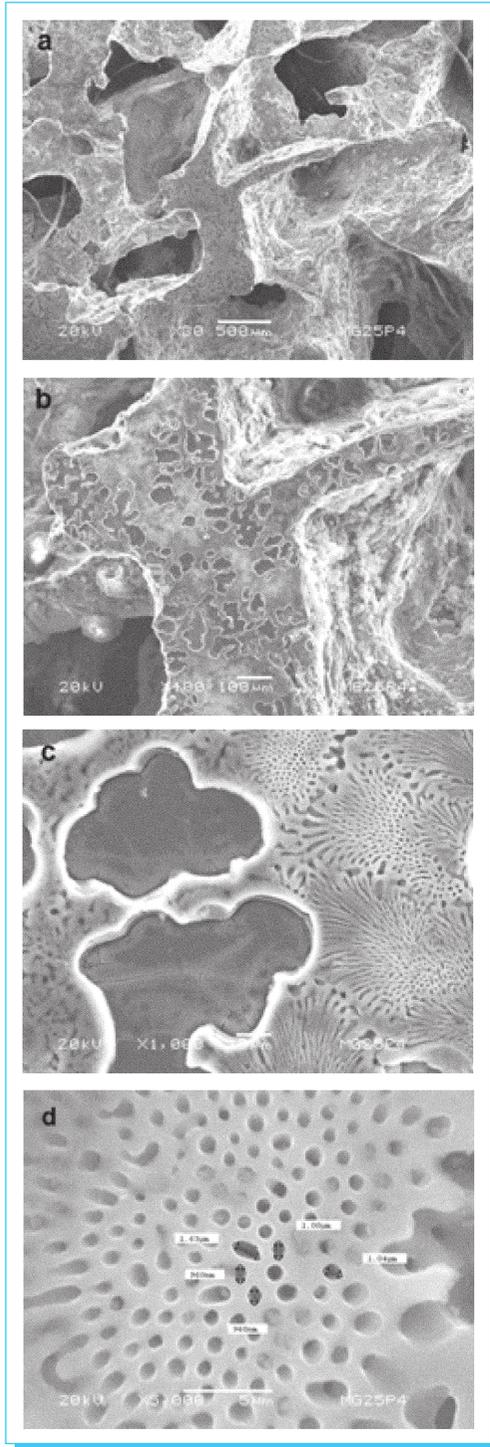


Fig. 3. Micrográficas de MEB de la aleación porosa Mg-25Al: a) Poros milimétricos; b) Fases con distribución homogénea en poros de distintos tamaños; c) Microestructuras granular y de placas con poros micrométricos; d) Poros micrométricos con diámetro de distintos tamaños.

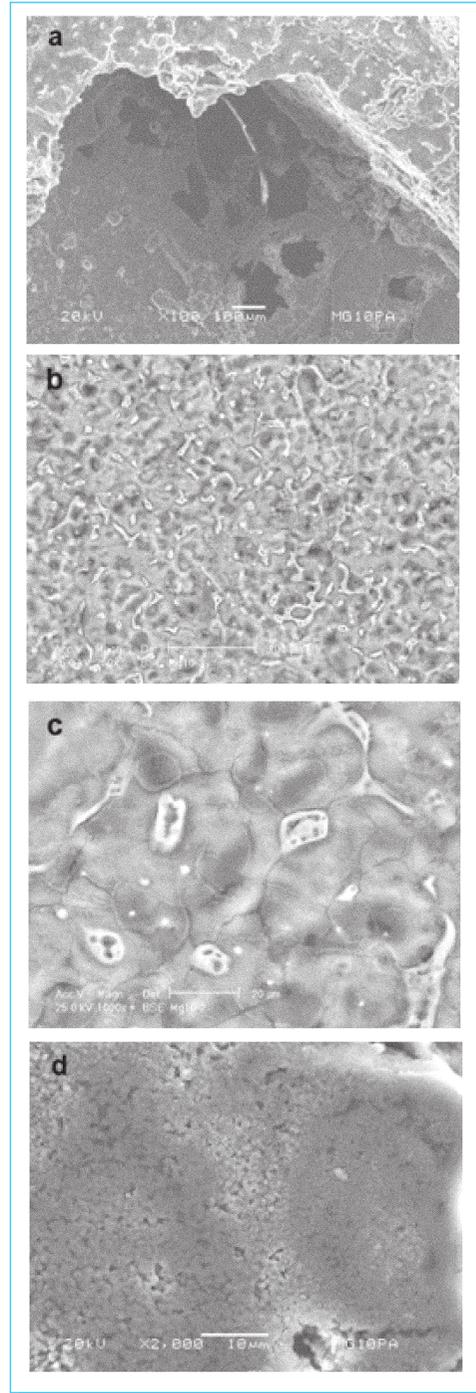


Fig. 4. Micrográficas de MEB de la aleación Mg-10Al porosa: a) Poros micrométricos comunicados con poros milimétricos; b) Microestructura granular de la matriz rica en Mg con dendritas de la segunda fase γ , las dendritas conservan la morfología de la aleación compacta; c) Detalle de la microestructura de la matriz granular y segunda fase γ con morfología globular y dendrítica con precipitados de Al; d) Microporos.

de las fases $\gamma + \delta$. La matriz corresponde a la fase δ rica en Mg con Al en solución; la segunda fase es γ (Mg-Al).

En la aleación Mg-25Al la segunda fase está uniformemente distribuida con una densidad de distribución mayor que la segunda fase de la aleación Mg-10Al. El menor contenido de Al en la aleación Mg-10Al se refleja en la distribución más espaciada de la segunda fase con morfología dendrítica.

5.2. Difracción de rayos-X

Los difractogramas de las aleaciones Mg-25Al (figura 5a) y Mg-10Al (figura 5b), muestran las reflexiones de los elementos Mg (fase δ), Al y Mg-Al (fase γ). En el difractograma de la aleación Mg-10Al se señalan explícitamente las reflexiones.

5.3. Área específica

Uno de los objetivos de las aleaciones porosas es la generación de una mayor área específica. Las áreas específicas de las aleaciones compactas son $0.2977 \text{ m}^2/\text{g}$ para Mg-10Al y $0.0022 \text{ m}^2/\text{g}$ para Mg-25Al.

Para las aleaciones porosas las áreas específicas son $2.3009 \text{ m}^2/\text{g}$ para Mg-25Al y $0.5625 \text{ m}^2/\text{g}$ para Mg-10Al. El aumento de área específica es mayor para la aleación Mg-25Al con una relación de áreas de 1:1000. La mayor área específica de la aleación Mg-25Al se debe a la formación de microporos generados por la salida de gases durante la solidificación de la fundición.

El área específica de la aleación porosa Mg-25Al es mayor en 400% al área específica de la aleación porosa Mg-10Al, lo que indica que la primera es más porosa, por consiguiente la densidad relativa de la aleación Mg-25Al es menor.

La porosidad a nivel macro en ambas aleaciones es del mismo orden. La generación de microporos de menor tamaño en la aleación Mg-25Al es mayor a la producida en la aleación Mg-10Al. Los microporos se forman por la salida de burbujas de aire durante la solidificación de las fundiciones.

5.4. Densidad relativa

La densidad de los elementos puros es $\rho_{\text{Al}} = 2.702 \text{ g/cm}^3$ y $\rho_{\text{Mg}} = 1.74 \text{ g/cm}^3$ [9]. La densidad experimental de la aleación compacta Mg-25Al es $\rho_{\text{MgAl}} = 1.86 \text{ g/cm}^3$. La densidad relativa de la aleación porosa Mg-25Al es $\rho_{\text{R}} = 1.108 \text{ g/cm}^3$. La densidad relativa depende de la composición de la aleación y de la porosidad.

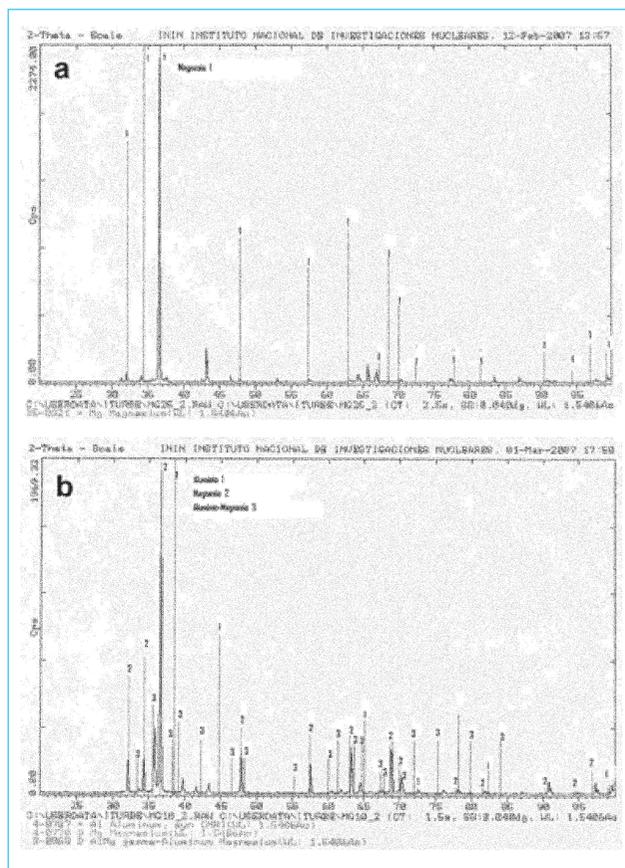


Fig. 5. Difractogramas de R-X: a) Aleación Mg-25Al; b) Aleación Mg-10Al: 1-Al; 2-Mg; 3-Al-Mg.

Se observa una relación entre área específica, porosidad y densidad relativa, a mayor porosidad, mayor área específica y por consiguiente, menor densidad relativa.

6. Conclusiones

El método de infiltración para la obtención de aleaciones porosas no requiere equipo sofisticado y es económico. Los factores importantes a considerar para la obtención de las aleaciones porosas son:

- La fluidez del fundido, lo cual se logra haciendo el vaciado a una temperatura superior al punto de fusión, considerando el descenso de temperatura por contacto con el medio ambiente, y
- La temperatura de la matriz, la cual debe permitir la infiltración del metal fundido.

7. Referencias

- [1] Banhart, J., *Metal Foams- from Fundamental Research to Applications*, Frontiers in the Design of Materials, CRC Editor Balder Raj, 2007, pp. 279-290.
- [2] Vladimir, S., Porous Metals, *MRS Bulletin*, abril 1994, pp. 24-28.
- [3] Nieh, T. G.; Kinney, J. H., and Wadsworth, J., «Morphology and Elastic Properties of Aluminum Foams Produced by a Casting Technique», *Scripta Mater.* Vol. 38 (10), 1998, pp. 1487-1494.
- [4] Sugimura, Y.; Meyer, J.; He, M. Y.; Bart-Smith, H.; Grendstedt J. and Evans, A. G., «On the Mechanical Performance of Closed Cell Al Alloy Foams», *Acta Mater.* Vol. 45 (12), 1997, pp. 5245-5259.
- [5] Huang, J.S. & Gibson, L. J., «Fracture Toughness of Brittle Honeycombs», *Acta Metall. Mater.* Vol. 39 (7), 1991, pp. 1617-1626.
- [6] Huang, J. S. & Gibson, L. J., «Fracture Toughness of Brittle Foams», *Acta Metall. Mater.* Vol. 39 (7), 1991, pp. 1627-1636.
- [7] King, F., *El Aluminio y sus aleaciones*, Limusa Noriega editores, 1992.
- [8] Murray, J. L., *Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys*, ASM International, 1988, pp. 17-34.
- [9] *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 69TH Edition 1988-1989, pp. B68 y B10.

Latindex

Sistema Regional de Información en
Línea para Revistas Científicas
de América Latina, el Caribe,
España y Portugal.

www.latindex.unam.mx