



Dr. Ignacio Alejandro Figueroa  
Instituto de Investigaciones en Materiales  
Universidad Nacional Autónoma de México  
iafigueroa@unam.mx



Ing. Mauro Velasco  
Instituto de Investigaciones en Materiales  
Universidad Nacional Autónoma de México

### Resumen

En el presente reporte se describen las características generales del proceso de fabricación y obtención de espumas de aluminio con porosidad interconectada por ruta líquida. También se describe la caracterización física de las mismas, para posteriormente relacionar los valores obtenidos con su comportamiento mecánico. Los resultados obtenidos posterior a la caracterización física, confirman una variación significativa en el módulo de Young ( $E$ ) y límite de cedencia ( $\sigma_y$ ) cuando las muestras fabricadas son sometidas a un ensayo mecánico de compresión.

### Introducción

Los componentes sólidos con estructura celular (arreglo estructural compuesto por celdas o celdillas), han sido materiales ampliamente utilizados por el ser humano a lo largo de la historia como herramienta para diversas aplicaciones funcionales, estructurales y hasta ornamentales. Su vasta disponibilidad en la naturaleza (madera, corcho, corales, huesos, etcétera) y la excelente combinación en sus propiedades tanto físicas como mecánicas, han impulsado y motivado su estudio por diversas áreas del conocimiento [1, 2]. Sin embargo, dentro de todo el conjunto de materiales con arreglo celular, ya sea cerrada o interconectada, han sido las espumas metálicas las que mayor interés han generado, principalmente como resultado de su densidad extremadamente baja (comparada con su presentación en bulto). Además de la repercusión de este último parámetro en sus múltiples propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas e incluso acústicas [3]. Su alta resistencia a los esfuerzos de compresión o elevada rigidez, combinados con su bajo peso específico, son algunas de las combinaciones que distinguen a este tipo de materiales de aquellos convencionales carentes de porosidad [4]. Ya sea porosidad interconectada o cerrada, este tipo de materiales exhiben un conjunto de comportamientos inusuales que les da gran utilidad y ventaja para diversas aplicaciones estructurales [4, 5], es decir:

Alcanzar un gran porcentaje de deformación.  
 Exhibir un comportamiento tipo "plateau" al aplicar esfuerzos de compresión.  
 Variar su coeficiente de Poisson al ser deformados.

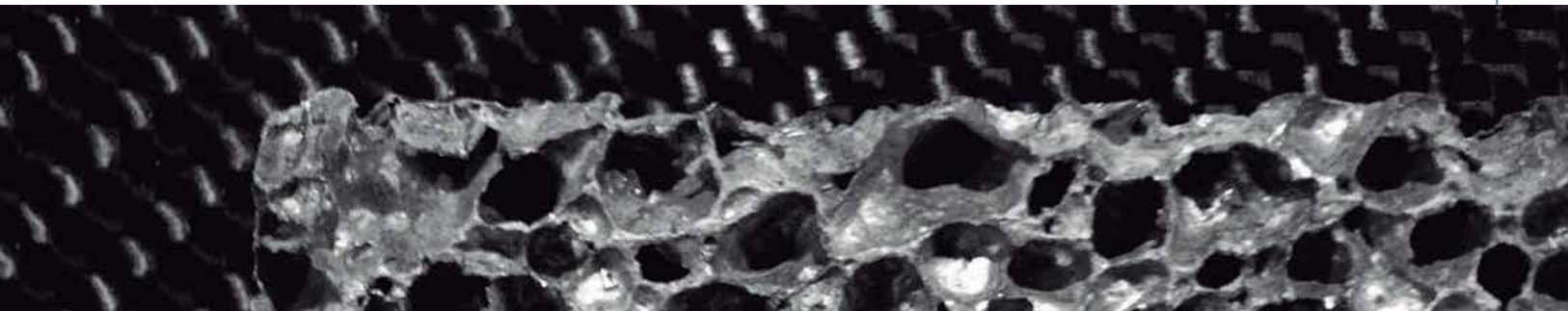
Pueden existir diversos casos donde el comportamiento mecánico en este tipo de materiales puede ser el menos efectivo, en comparación con su presentación en bulto. No obstante, las espumas metálicas pueden ofrecer un gran rendimiento y combinaciones únicas en su respuesta a esfuerzos externos [4, 5], por ejemplo:

- Alta rigidez.
- Gran capacidad de absorción de energías de impacto.
- Baja conductividad térmica.
- Baja permeabilidad magnética.
- Excelente amortiguador vibracional.

Es importante mencionar que todo este conjunto de cualidades es repercusión directa del tipo de porosidad (morfología, tamaño, distribución, etcétera). Actualmente, este vínculo es un amplio tema de estudio para discernir la relación entre el comportamiento mecánico y el arreglo estructural en este tipo de materiales, con lo cual se pretende manipular totalmente los conceptos anteriores para posteriormente poder adaptarlos en los diferentes procesos de fabricación y su posible aplicación para diversas tareas, tanto funcionales como estructurales [6]. En la figura 1.1 se muestra un esquema gráfico de la variación entre los tipos de aplicación, (estructural y/o funcional) que pueden desempeñar los materiales con estructura celular, en función del tipo de porosidad.



Figura 1.1. Aplicación de materiales con estructura celular en función del tipo de porosidad [4]



El proceso de fabricación por el método de colado por infiltración, también reportado como acción de replicado, consiste en la producción del negativo de un recipiente o molde refractario a partir de un metal en estado líquido [4]. Dicha técnica tiene como enfoque principal la fabricación de materiales con estructura celular completamente interconectada, lo cual inicia con la selección apropiada del material de sacrificio, ya que dicho material o sustancia determinará el tipo de porosidad y arquitectura final de la misma espuma. Por lo tanto, la morfología y tamaño de partícula implementados, tendrán un efecto significativo para lograr la obtención del producto final. El proceso de infiltración se espera suceda sólo por efecto de gravedad. Sin embargo, en la práctica existe un límite en el tamaño de partícula implementado como material de sacrificio para lograr dicho fenómeno, el cual no debe ser menor a 4 milímetros [4]. De lo contrario, una fuerza adicional debe ser aplicada para lograr la completa infiltración y distribución uniforme del metal fundido a través de los intersticios generados por las diversas partículas utilizadas como material de sacrificio. La eliminación de este último depende básicamente de sus propiedades físicas y químicas, siendo el cloruro de sodio (NaCl) el material de sacrificio por excelencia, debido a su relativa facilidad de remoción en medio acuoso [4]. En la figura 1.2 se muestra un esquema del proceso de colado por infiltración.

En el presente trabajo de investigación se fabricaron espumas de aluminio con porosidad interconectada para evaluar posteriormente el efecto de la densidad relativa, tamaño de poro y porcentaje de porosidad en su resistencia a esfuerzos mecánicos de compresión.

### Procedimiento experimental

Durante la presente investigación, se fabricaron espumas de aluminio (Al) (99.99%, Alfa Aesar) con tres diferentes tamaños de poro por el método de colado por infiltración (fundición-infiltración-replicado) [4, 7], para lo cual se utilizaron tres diferentes tamaños de partícula de cloruro de sodio (NaCl) (99.99%, Sigma Aldrich) con morfología irregular como material de sacrificio. Las condiciones experimentales para llevar a cabo el proceso de fundición fueron: una temperatura de 750 °C con una presión de 0.5 bar por tiempo de 1 hora. Posteriormente, la etapa de infiltración se realizó con la misma temperatura, pero con una presión de 1.5 bar por tiempo de 15 min. El proceso de lixiviación del NaCl se realizó en solución de agua desionizada, para evitar la pronta saturación del medio por los iones disueltos. Los tamaños de partícula se clasificaron con respecto al siguiente intervalo: 500-710, 710-1000 y 1000-2000 micras ( $\mu\text{m}$ ), para lo cual, se utilizaron tamices de laboratorio para realizar análisis granulométricos de la serie Tyler. Posteriormente, la medición del tamaño de poro y densidad real (preal), se realizaron mediante técnicas de microscopía óptica (Microscopio Óptico Olympus XSZ 107 BN) y picnometría con atmósfera de helio (He) (Picnómetro Ultrapyc 1200e). Los ensayos mecánicos de compresión se realizaron en una máquina universal Instron 5500R con una velocidad de desplazamiento del cabezal de 0.5 mm/s, que corresponde a una relación de deformación nominal de  $2.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

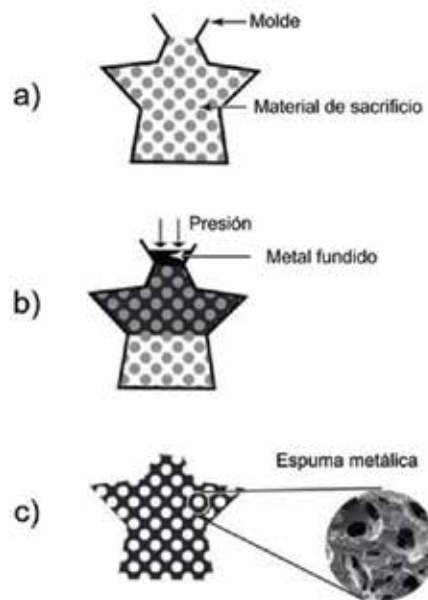


Figura 1.2. Esquema general del proceso de producción por el método de colado por infiltración para fabricar espumas metálicas con porosidad completamente interconectada: a) preparación de preforma (metal sólido + material de sacrificio), b) proceso de fundición e infiltración y c) espuma libre de material de sacrificio posterior a la remoción del mismo [4].



## Análisis y discusión

En la figura 1.3 se muestra la sección transversal de las probetas cilíndricas maquinadas mecánicamente y posterior al proceso de lixiviación del material de sacrificio.

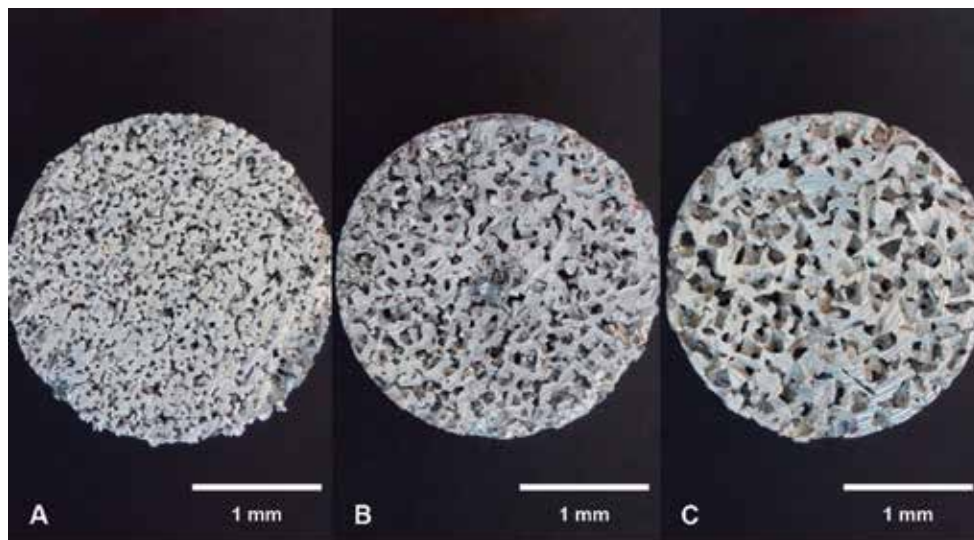


Figura 1.3. Espumas de Al con porosidad interconectada, fabricadas por el método de colado por infiltración. Muestra A (500-710  $\mu\text{m}$ ), muestra B (710-1000  $\mu\text{m}$ ) y muestra C (1000-2000  $\mu\text{m}$ ).

En dicha imagen se confirma la completa interconectividad y distribución homogénea de la porosidad en el volumen completo de las espumas. Además, se determinó que la geometría y tamaño de poro son equivalentes a la morfología de las partículas de NaCl implementadas como material de sacrificio. En la tabla 1.1 se muestra el valor promedio de las mediciones realizadas para determinar el tamaño de poro, densidad real ( $\rho_{\text{real}}$ ), densidad relativa ( $\rho_{\text{relativa}}$ ) y porcentaje de porosidad (%Pr). Cabe destacar que la densidad del aluminio (Al) se consideró con un valor de 2.7  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Además, para determinar la  $\rho_{\text{relativa}}$  y %Pr se consideraron las siguientes expresiones, siendo la segunda de las mismas, la ecuación propuesta en la literatura para materiales con estructura celular abierta:

$$\rho_{\text{relativa}} = \frac{\rho_{\text{real}}}{\rho_{\text{metal}}}$$

$$\%Pr = (1 - \rho_{\text{relativa}}) \times 100$$

Tabla 1.1. Propiedades físicas de las espumas de aluminio con porosidad interconectada.

| Muestra | Tamaño de poro ( $\mu\text{m}$ ) | $\rho_{\text{real}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | $\rho_{\text{relativa}}$ | %Pr |
|---------|----------------------------------|---|--------------------------|-----|
| A       | 590 $\pm$ 15                     | 1.05  | 0.39                     | 61  |
| B       | 940 $\pm$ 40                     | 0.86  | 0.32                     | 68  |
| C       | 1650 $\pm$ 65                    | 0.73  | 0.27                     | 73  |

De los resultados anteriores, se observa que la densidad real es inversamente proporcional al tamaño de poro, lo cual es completamente razonable, ya que, a mayor magnitud de este último, existe menor espacio ocupado por el aluminio y, por ende, menor cantidad del mismo presente en el volumen de la probeta. En la figura 1.4 se muestran las curvas esfuerzo-deformación como resultado de un ensayo mecánico de compresión.

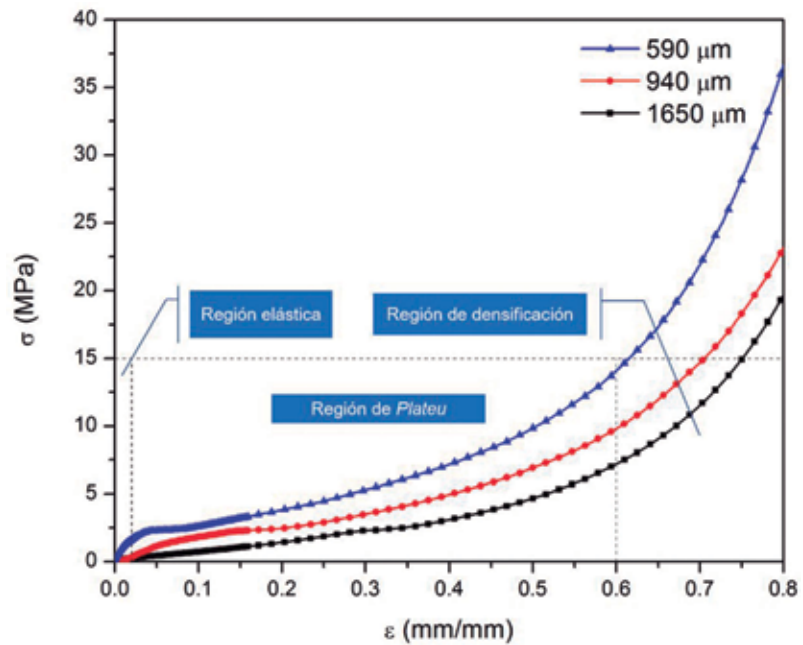


Figura 1.4. Curva esfuerzo-deformación obtenidas a partir de ensayos mecánicos a compresión.

En la tabla 1.2 se muestran los valores de módulo de Young ( $E$ ) y límite de cedencia ( $\sigma_y$ ) alcanzados por las espumas de aluminio fabricadas.

| Muestra | relativa | Módulo de Young ( $E$ ) (MPa) | Límite de cedencia ( $\sigma_y$ ) (MPa) |
|---------|----------|-------------------------------|---|
| A       | 0.39     | 121.17                        | 0.41                                    |
| B       | 0.32     | 23.53                         | 0.05                                    |
| C       | 0.27     | 9.21                          | 0.02                                    |

Los resultados indican que a mayor porcentaje de porosidad, disminuye tanto el módulo de Young como el límite de cedencia, lo cual se atribuye a la mayor distribución de esfuerzos que tiene lugar en las diferentes vigas y/o entrecruzamientos dentro de la red estructural porosa. Por otro lado, la técnica implementada permite fabricar espumas de aluminio con una densidad mucho menor en comparación con su presentación en bulto o teórica. Sin embargo, es importante mencionar que el efecto de la densidad relativa coincide con resultados previamente reportados en espumas de magnesio, ya que dicho parámetro tiene una relación directamente proporcional con el módulo de Young y límite de cedencia. [8]. Con el presente análisis se plantea que la técnica utilizada permite producir espumas metálicas desde pequeñas muestras hasta ejemplares de varias decenas de milímetros. Por lo tanto, su facilidad de producción abre diversas oportunidades y campos de aplicación, tanto estructurales como funcionales, para los materiales con estructura celular abierta. En la figura 1.5 se muestran ejemplares con diferente tamaño de poro, producidos por la misma técnica y la misma matriz metálica, pero con dimensiones mayores a las reportadas en el presente trabajo de investigación. Además, se debe destacar que la metodología y condiciones experimentales implementadas, permiten fabricar espumas con arreglo estructural completamente uniforme, homogéneo, sin defectos e imperfecciones.

### Conclusiones

La técnica implementada para fabricar espumas de aluminio permitió obtener muestras con porosidad totalmente interconectada y sin defectos que involucren su pronta fragmentación por la presencia de imperfecciones estructurales (zonas



Figura 1.5. Espumas de aluminio con porosidad interconectada y diferente tamaño de poro, fabricadas por el método de colado por infiltración

donde no hubo infiltración). Por otro lado, se determinó que variables como el tamaño de poro y densidad relativa tienen un efecto significativo en las propiedades mecánicas de las espumas, siendo la espuma con menor porcentaje de porosidad la que alcanzó los valores más altos de módulo de Young y límite elástico. Desde un punto de vista ingenieril, las espumas fabricadas tienen las características físicas y mecánicas adecuadas que abren la posibilidad de poder implementarlas como materiales estructurales, para ser aplicados como andamios y absorbedores de energía de impacto. Además, el tipo de porosidad permite que algunas aplicaciones funcionales puedan considerarse viables, para su eficiente implementación como filtros, soportes catalíticos e intercambiadores de calor.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto UNAM-DGAPA-PAPPIT (No. IN101016) por financiar el presente trabajo. Además, se agradece al cuerpo de Técnicos Académicos del IIM-UNAM por su contribución y asesoría técnica: G. A. Lara, O. Novelo, J. M. García, F. García, F. Silvar, R. Reyes, A. Tejeda, A. López-Vivas, J. Romero, C. Flores, E. Hernández y C. Ramos.

### Referencias

1. Gibson, L.J. and M.F. Ashby, Cellular Solids Structure and Properties. 2nd ed. 1999: Cambridge University Press.
2. Clyne, T.W. and F. Simancik, Metal Matrix Composites and Metallic Foams. 2000: Wiley-VCH.
3. Goodall, R. and A. Mortensen, Porous Metals, in Physical Metallurgy. 2014, Elsevier Inc.
4. Degischer, H.P. and B. Kriszt, Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications. 2002: Wiley-VCH.
5. Banhart, J., Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams. Progress in Materials Science, 2001. 46: p. 559-632.
6. Lefebvre, L.P., J. Banhart, and D.C. Dunand, Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. Advanced Engineering Materials, 2008. 10(9): p. 775-787.
7. Trinidad, J., et al., Processing of Magnesium Porous Structures by Infiltration Casting for Biomedical Applications. Advanced Engineering Materials, 2014. 16(2): p. 241-247.
8. Osorio-Hernández, J.O., et al., Manufacturing of open-cell foams by replication process and mechanical properties. Materials & Design, 2014. 64: p. 136-141.