

Síntesis y caracterización de metales celulares de Aluminio-Silicio de poro abierto

Synthesis and characterization of cellular Aluminum-Silicon metals with Open-Pore

L. E. Moreno-Montoya  ; S. Báez-Pimiento  ; J. M. Moreno-Vargas 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24775>

Artículo de investigación científica y tecnológica

Abstract—This work shows the experimental results obtained from the manufacture and characterization of cellular metals with open or interconnected pore. As a base metal we use an aluminum-silicon alloy for casting and for manufacturing we use the modified removable filler infiltration technique. As a filler material, high purity sea salt with three particle size ranges was used. The samples obtained were characterized in terms of their morphology and pore topology using Scanning Electron Microscopy. Using simple mathematical models, structural characteristics such as density, relative density and percentage of porosity were determined. Based on quasi-static compression tests, stress-strain curves were constructed and mechanical properties such as stiffness, plateau stress, densification deformation and mechanical energy absorption capacity of these materials were obtained. The results show that increasing the pore size increases density, relative density and decreases porosity and energy absorption capacity.

Index Terms— Cellular metals, compressive testing, energy absorption, infiltration of removable fillers, interconnected pore, mechanical properties.

Resumen— Este trabajo muestra los resultados experimentales obtenidos de la fabricación y caracterización de metales celulares de poro abierto o interconectado, cuyo metal base fue una aleación de aluminio-silicio para fundición, utilizando una técnica de infiltración de rellenos removibles modificada. Como material de relleno se utilizó sal marina de alta pureza con tres rangos de tamaño de partícula. Las muestras obtenidas se caracterizaron en cuanto a su morfología y topología de poro utilizando Microscopía Electrónica de Barrido. Utilizando modelos matemáticos sencillos se determinaron características estructurales tales como, densidad, densidad relativa y porcentaje de porosidad. A partir de ensayos de compresión cuasi-estática se construyeron curvas de esfuerzo-deformación unitaria y se obtuvieron propiedades mecánicas propias de estos materiales, como la rigidez, el esfuerzo de meseta, la deformación de densificación y la capacidad de absorción de energía mecánica por deformación plástica. Los

resultados muestran que al aumentar el tamaño de poro se incrementan la densidad, la densidad relativa y disminuyen la porosidad y la capacidad de absorción de energía.

Palabras clave— Absorción de energía, ensayo de compresión, infiltración de rellenos removibles, metales celulares, poro interconectado, propiedades mecánicas.

I. INTRODUCCIÓN

LA investigación en nuevos materiales es una constante en todos los campos de la ingeniería. Los investigadores enfocan sus esfuerzos en desarrollar nuevos materiales con propiedades excepcionales para nuevas aplicaciones y para avanzar en el desarrollo de nuevas tecnologías [1]. Dentro de este campo son numerosas las investigaciones que se están llevando a cabo en materiales compuestos, biomateriales, nanomateriales, materiales inteligentes y particularmente en metales celulares. Según [2,3], un metal celular es un sólido celular artificial tridimensional, formado por un cuerpo o matriz metálica y por un conjunto de pequeños compartimientos de forma poliédrica denominados células o poros. Se tiene evidencia que la primera patente con referencia a metales celulares data de 1940. Sin embargo, es a partir de 1997 que este tipo de materiales ha tenido un auge importante, puesto que, en este año aparecen las primeras publicaciones relacionadas con procesos de obtención, caracterización y posibles aplicaciones [4].

Las propiedades de los metales celulares son función del material metálico base y/o de la estructura porosa o arquitectura celular. Propiedades como la temperatura de fusión, el coeficiente lineal de dilatación térmica, resistencia a la corrosión, son aportadas por el metal o aleación base, mientras que la densidad, la conductividad térmica, la conductividad eléctrica y las propiedades mecánicas, son aportadas tanto por el metal base como por la estructura porosa [5,6,7,8]. La

Este manuscrito fue enviado el 22 de junio de 2021 y aceptado el 21 de noviembre de 2022.

L. E. Moreno-Montoya es docente de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales – Facultad de Ingeniería y Arquitectura – Departamento de Ingeniería Industrial – Grupo de Investigación en Innovación y Desarrollo Tecnológico – Laboratorio de Materiales Metálicos Avanzados (L.M.M.A). (e-mail: lemorenom@unal.edu.co).

S. Báez-Pimiento es docente de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales – Facultad de Ingeniería y Arquitectura – Departamento de

Ingeniería Industrial – Grupo de Investigación en Innovación y Desarrollo Tecnológico – Laboratorio de Materiales Metálicos Avanzados (L.M.M.A). (e-mail: sbaezp@unal.edu.co).

J. M. Moreno-Vargas es docente de la Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – Departamento de Física y Química. (e-mail: fernandez@tecnocomfenalco.edu.co).



estructura porosa o arquitectura celular a nivel meso de los metales celulares, durante las últimas décadas, se ha convertido en un campo muy amplio de investigación debido a que parámetros mesoestructurales tales como el tipo de poro (abierto, cerrado, mixto), forma de poro (regular, irregular), tamaño de poro, junto con la densidad relativa, tienen una marcada influencia sobre la respuesta mecánica, térmica, eléctrica y acústica de estos materiales [4].

Para la obtención de metales celulares, diversas técnicas de fabricación se han desarrollado. Estas se clasifican de acuerdo con el estado inicial en que se encuentra el metal base a procesar. A partir del metal base en estado líquido, se utilizan técnicas como: espumación directa del fundido por inyección de gas, espumación directa del fundido por adición de agentes espumante, fundición de precisión e infiltración de rellenos removibles. A partir del metal base en estado sólido, particularmente en forma de polvo, se utilizan técnicas como: sinterización de esferas huecas, sinterización de polvos y fibras y atrapamiento de gas. A partir de vapor de metal o compuestos metálicos gaseosos o de una solución de iones de metal se utilizan técnicas como: deposición física o química en fase vapor o deposición electroquímica [5,6,9]. Las técnicas tradicionales y nuevas técnicas que se han desarrollado en los últimos años, presentan ventajas, desventajas y restricciones, de ahí que la investigación actual sobre la mejora en las técnicas de producción se concentra en mejorar el control de procesos para producir materiales de mayor calidad y para lograr una mejor reproducibilidad y previsibilidad de sus propiedades [10].

Dentro del amplio abanico de técnicas para la producción de metales celulares, se destaca la infiltración de rellenos removibles, la cual es apropiada para la producción de este tipo de materiales de poro abierto o interconectado, utilizando metales de bajo punto de fusión como aluminio, magnesio y sus aleaciones [11]. La técnica de infiltración de rellenos removibles convencional, consiste básicamente en cinco etapas: 1. Moldeo de preforma: partículas de un material de relleno lixiviable, generador de poros con forma específica se coloca en un molde de forma definida, 2. Sinterización de la preforma: el molde que contiene el material de relleno se coloca en el horno para sinterizarlo y de esta manera producir una preforma rígida de partículas interconectadas, 3. Fusión del metal: después de que se enfríe la preforma, el metal se coloca sobre esta y se introduce nuevamente en el horno para fundirlo, 4. Infiltración de metal fundido: el metal líquido se infiltra en la preforma rígida para llenar los espacios vacíos y producir un compacto metal-material de relleno, 5. Lixiviación de la preforma: después de que el compacto se retira del horno, el material de relleno de la preforma se lixivía con un solvente adecuado, se obtiene una espuma metálica con células interconectadas cuyo tamaño y forma es similar a los granos originales del material de relleno [12]. El material de relleno más comúnmente utilizado es el NaCl, el cual ofrece ventajas para el proceso como bajo costo, fácil manipulación y fácilmente lixiviable [5].

La técnica de infiltración de rellenos removibles convencional presenta ventajas tales como: buena calidad de los metales celulares que se obtienen, bajos costos de procesamiento, posibilidad de obtener metales celulares de tamaño de poro muy pequeño, con regiones de diferentes características y distribución de tamaño de poro controlada [13,14]. Sin embargo, entre sus desventajas están que es un proceso lento debido al número de etapas, tiempos largos en los procesos de disolución y la posibilidad de que, en el caso de emplear rellenos de NaCl se genere corrosión del metal [8]. Con el propósito de minimizar las desventajas que presenta la técnica convencional, se han venido proponiendo modificaciones. Entre estas está la propuesta por [12], que consiste en simplificar el número de etapas eliminando la sinterización del material de relleno y realizando el proceso de fundición e infiltración del metal líquido en una sola operación de calentamiento.

La mayoría de los materiales metálicos pueden ser utilizados como material base para la obtención de metales celulares, aunque la fuente habitual de metal base para la producción de metales celulares son el aluminio y sus aleaciones, debido a su baja densidad, bajo punto de fusión, no inflamabilidad, posibilidad de reciclaje, excelente resistencia a la corrosión, excelente resistencia específica, excelente trabajabilidad y alta conductividad térmica y eléctrica. En particular los de baja densidad y bajo punto de fusión [15]. Quizás una de las aplicaciones que más interés ha despertado en los investigadores es la capacidad que tienen los metales celulares de absorber energía de alto impacto, dada la capacidad de estos materiales de someterse a grandes deformaciones hasta aproximadamente el 70% bajo un esfuerzo casi constante, permitiendo la absorción de energía en forma significativa sin generar picos perjudiciales de esfuerzo [16].

Según [6], los métodos de caracterización mecánica utilizados en metales celulares son, en principio, los mismos que se aplican a materiales no celulares. Sin embargo, a veces son necesarias algunas modificaciones para tener en cuenta la naturaleza específica de tales materiales. Según el modo de aplicación de la carga, pruebas de tracción, compresión, cortante y flexión se pueden llevar a cabo, pero son las pruebas de compresión uniaxial a bajas velocidades y con bajas tasas de deformación, denominadas pruebas de compresión cuasi-estática, las que se realizan con mayor frecuencia debido principalmente a tres razones: en primer lugar, se pueden utilizar muestras de geometría sencilla, cuboides o cilindros, que no requieren ser sujetadas. En segundo lugar, es la prueba más apropiada para determinar las propiedades típicas de estos materiales como la rigidez, esfuerzo de meseta, deformación de densificación y absorción de energía y, en tercer lugar, porque es la prueba más reportada en trabajos de investigación de esta naturaleza [3,8,17,18,19].

El objeto de este trabajo es reportar la fabricación de metales celulares de poro interconectado a partir de una aleación de aluminio-silicio, mediante una técnica de infiltración de

rellenos removibles modificada, en la cual se utilizó NaCl como material de relleno, con tres rangos de tamaño de partícula diferente que oscilan entre 3,35 mm y 8,7 mm. Los materiales obtenidos fueron sometidos a pruebas de compresión cuasi-estática para determinar propiedades mecánicas tales como rigidez, esfuerzo de meseta, deformación de densificación y absorción de energía mecánica por deformación plástica. Además, se determinaron características tales como densidad, densidad relativa y porcentaje de porosidad a través de modelos matemáticos. Así mismo, se evaluaron algunas muestras por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), para observar la forma del poro y la interconexión entre estos. A partir de los resultados se determinaron relaciones como la influencia del tamaño de poro sobre la densidad, densidad relativa, porosidad y capacidad de absorción de energía. De igual manera se relacionaron propiedades mecánicas en función de la densidad relativa y el porcentaje de porosidad.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales y equipo

Fueron dos los materiales más importantes que se utilizaron en la obtención de los metales celulares objeto de este trabajo. Como metal base se utilizó una aleación de aluminio-silicio para fundición, comercialmente denominada AlSi7Mg, la cual corresponde a la aleación A356.0 según la designación de la AA (*Aluminium Association*). La aleación fue suministrada en forma de lingotes por la empresa Propulsora S.A. Contiene 7% de silicio como aleante principal del aluminio, además de otros metales como: hierro, cobre, magnesio, manganeso y zinc con un porcentaje aproximado de 1,9% en total. La densidad es 2,7 g/cm³ y la temperatura de fusión oscila entre 675°C y 790°C. Para fabricar la preforma de relleno removible se utilizó sal marina de alta pureza (99% de NaCl), con tres rangos de tamaño de grano: rango I (4 - 3,35 mm), rango II (6,3 - 4,75mm), rango III (8,7 - 6,3 mm). Este material fue suministrado por la empresa Aquasal. La densidad reportada es de 2,17 g/cm³ y su temperatura de fusión de 801 °C.

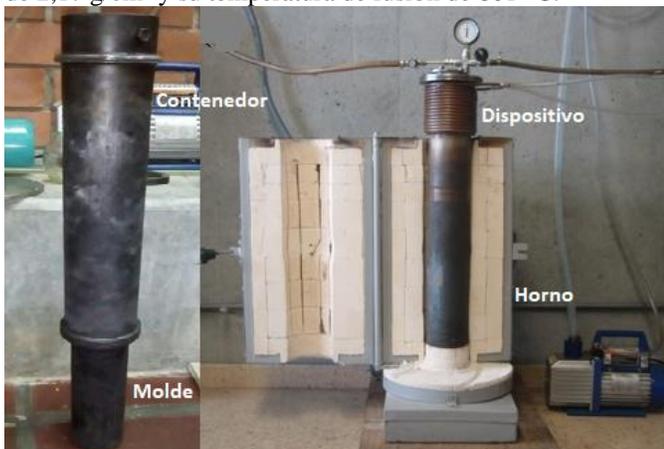


Fig. 1. Molde para contener la sal, contenedor de metal y dispositivo de atmósfera controlada dentro del horno.

El equipamiento básico utilizado fue un molde para depositar las partículas de sal, un contenedor para depositar el metal, un dispositivo de atmósfera controlada y un horno de resistencia eléctrica para llevar a cabo la fusión del metal base. Este equipamiento se muestra en la Fig. 1.

B. Proceso de obtención de metales celulares

El proceso utilizado en la obtención de metales celulares a partir de la aleación AlSi7Mg es una modificación al proceso convencional de infiltración de rellenos removibles descrito en la introducción. Este proceso fue desarrollado y patentado por Báez, Rodríguez y Palomar [20]. La secuencia de actividades de obtención de las muestras utilizando este proceso se representa en el diagrama de flujo de proceso (DFP), tal como se muestra en la Fig. 2.

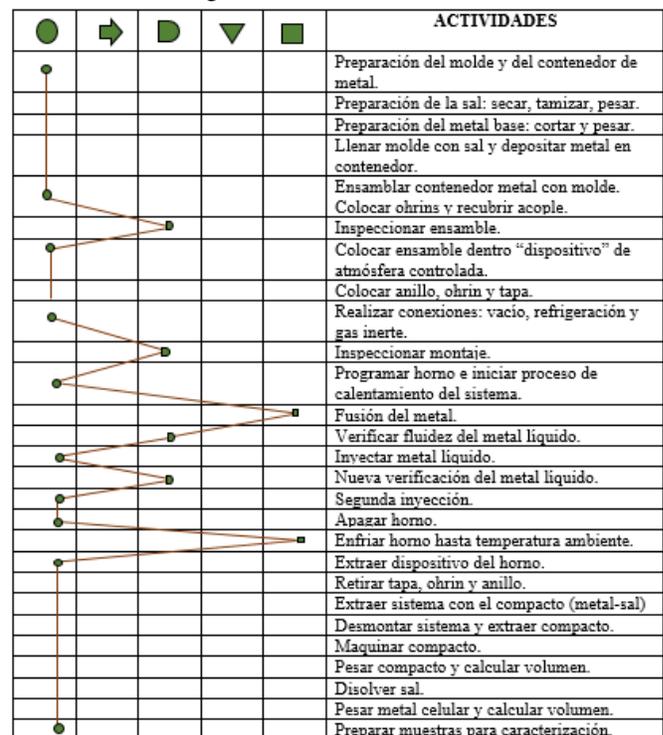


Fig. 2. Diagrama de flujo de proceso de las actividades realizadas para la obtención de metales celulares de Al-Si7Mg de poro abierto.

C. Caracterización físico-mecánica

A las muestras de metales celulares obtenidas, se le determinaron características morfológicas tales como: tamaño e interconexión entre poros, utilizando Microscopía Electrónica de Barrido. Este análisis se realizó en el Laboratorio de materiales del SENA Regional Caldas. Parámetros tales como la densidad, la densidad relativa y el porcentaje de porosidad se obtuvieron analíticamente utilizando (1), (2) y (3).

$$\delta = \frac{m}{v} \quad (1)$$

$$\delta_R = \frac{\delta_{m.c}}{\delta_{m.b}} \quad (2)$$

$$\%P = (1 - \delta_R) \times 100 \quad (3)$$

En las anteriores ecuaciones: δ es la densidad, m es la masa, v es el volumen, δ_R es la densidad relativa, $\delta_{m.c}$ es la densidad del metal celular, $\delta_{m.b}$ es la densidad del metal base y $\%P$ es el porcentaje de porosidad.

En cuanto a la caracterización mecánica, muestras de metales celulares fabricados fueron sometidas a pruebas de compresión cuasi-estática. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de Colombia Sede Manizales, utilizando una máquina de ensayo universal multiparámetro marca MTS. A partir de los datos obtenidos y utilizando el software Origin-8.5, se obtuvieron curvas de esfuerzo deformación unitaria, las cuales sirvieron de soporte para determinar propiedades típicas de estos materiales, como son: la rigidez, el esfuerzo de meseta, la deformación de densificación y capacidad de absorción de energía.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de la aplicación de la técnica de Infiltración de Rellenos Removibles Modificada se obtuvieron tres muestras de metales celulares de la aleación de aluminio silicio de diferente tamaño de poro, tal como se muestra en la Fig. 3.

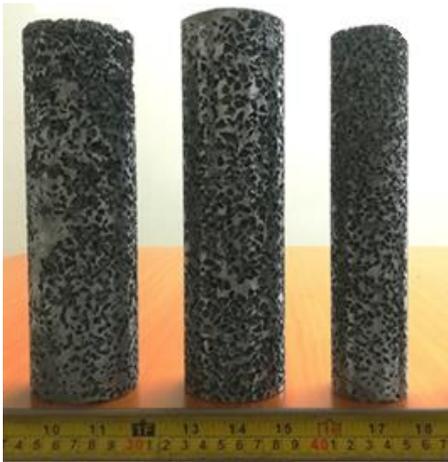


Fig. 3. Muestras de metales celulares de Al-Si con diferente tamaño de poro. De derecha a izquierda, las muestras corresponden a M3, M2 y M1, respectivamente.

Aplicando Microscopía Electrónica de Barrido a algunas de las muestras obtenidas, se obtuvieron imágenes como la mostrada en la Fig. 4.

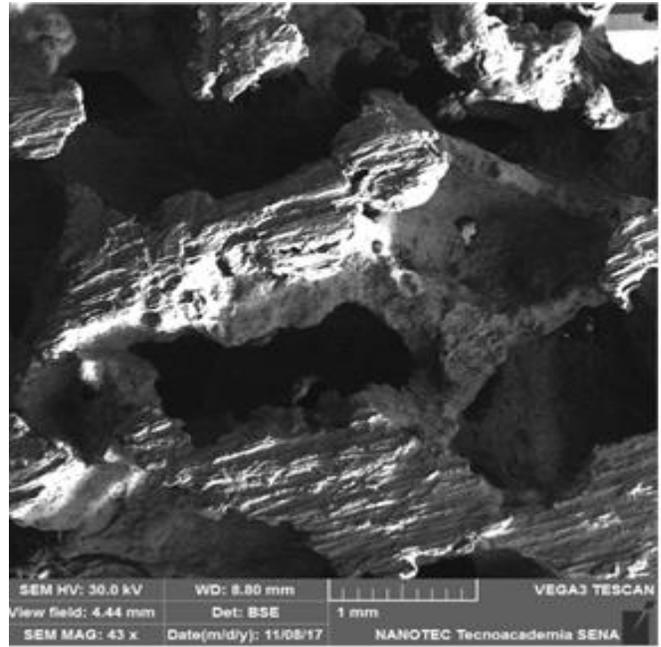


Fig. 4. Micrografía SEM de una muestra de Al-Si celular.

En la fig. 4 se observa que los poros son de forma irregular, puesto que son una réplica de las partículas de sal utilizadas. Además, se puede observar que estos poros están interconectados, es decir, es un metal celular de poro abierto [14].

Después de la etapa de lixiviación o disolución de la sal utilizada como material de relleno y posterior secado, a las muestras obtenidas se les midió el diámetro y la longitud, además, fueron pesadas en una balanza electrónica marca Prometalicos, referencia Prow-SS. A partir de los datos obtenidos y utilizando las ecuaciones anteriormente citadas, se calcularon los valores de parámetros estructurales que se resumen en la tabla I.

TABLA I.
CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LOS METALES CELULARES FABRICADOS.

| Muestra # | Rango (mm) | Densidad (g/cm ³) | Densidad Relativa | Porosidad (%) |
|-----------|------------|-------------------------------|-------------------|---------------|
| M1 | 4 - 3,35 | 0,9 | 0,363 | 66,7 |
| M2 | 6,3 - 4,75 | 0,97 | 0,359 | 64,1 |
| M3 | 8,7 - 6,3 | 0,98 | 0,363 | 63,7 |

En las Fig. 5 y 6 se muestran gráficas de la densidad y el porcentaje de porosidad en función del tamaño de poro.

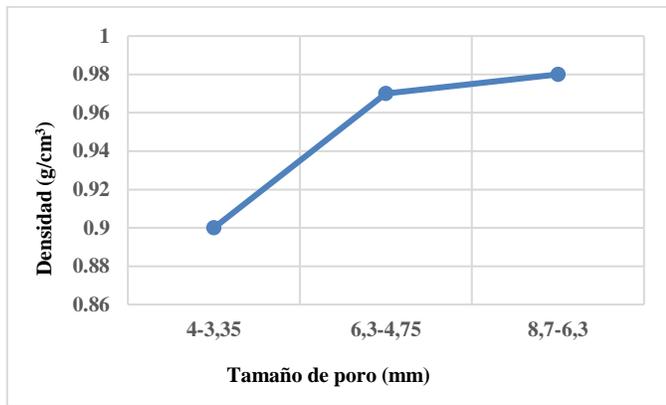


Fig. 5. Relación entre la densidad y el tamaño de poro.

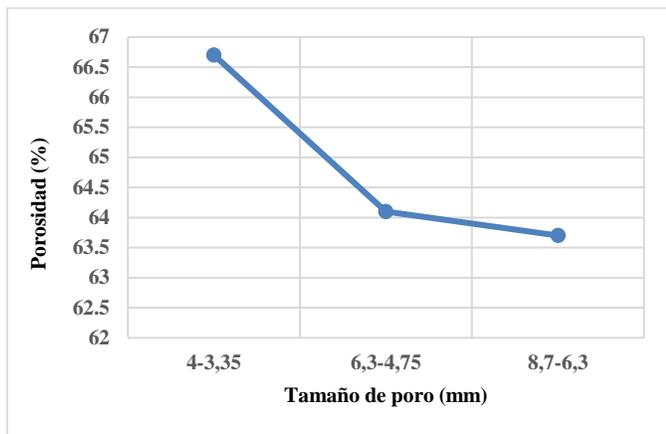


Fig. 6. Porosidad en función del tamaño de poro.

Como se puede observar, en la Fig. 5, la densidad aumenta con el tamaño de poro. Este aumento se puede explicar a partir de los datos tomados durante el experimento, especialmente a partir de la masa de sal utilizada para cada muestra. Los datos registrados muestran que a mayor tamaño de poro fue necesario utilizar menos masa de sal, por tanto, al disolver el material de relleno queda mayor masa de metal y esto contribuye a que aumente la densidad. Este mismo comportamiento se presenta en la densidad relativa, pues esta se calcula dividiendo la densidad del metal celular entre una constante que es la densidad del metal base. El porcentaje de porosidad tiene un comportamiento contrario tal como se muestra en la Fig. 6, debido a que este valor es la diferencia entre la unidad y la densidad relativa. Además, porque a menor tamaño de poro se requiere más masa de sal y al disolverla, la porosidad aumenta. A continuación, se presentan los principales resultados de la caracterización mecánica. La Fig. 7 relaciona curvas de esfuerzo-deformación unitaria obtenidas del ensayo de compresión cuasi-estática, una vez procesados los datos.

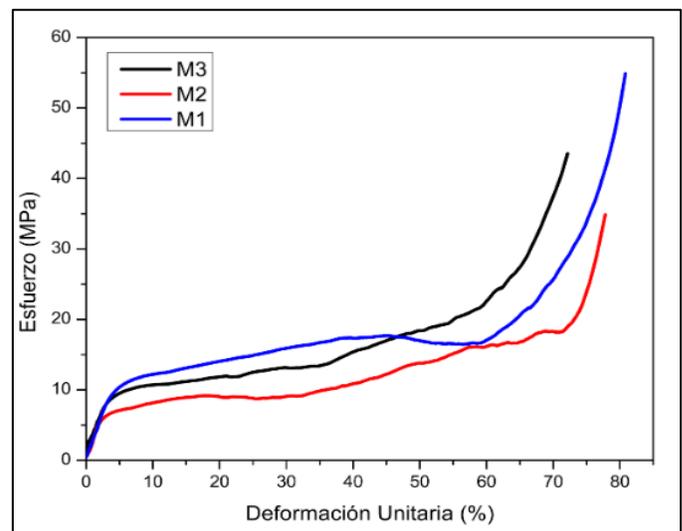


Fig. 7. Curvas esfuerzo-deformación de metales celulares fabricados, obtenidas a partir del ensayo de compresión cuasi-estática.

Las curvas esfuerzo deformación que se observan en la Fig. 7 son típicas de este tipo de materiales [16,21], en razón a que, en ellas se pueden observar tres regiones bien diferenciadas, una región elástica inicial, una región plástica prolongada o meseta de deformación y la región de densificación del material.

TABLA II.
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS METALES CELULARES FABRICADOS, OBTENIDAS A PARTIR DE LAS CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN UNITARIA.

| Muestra # | Módulo de Elasticidad (MPa) | Esfuerzo de Meseta (MPa) | Deformación de densificación (%) | Absorción de Energía (MJ/m³) |
|-----------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| M1 | 610 | 16,3 | 74,5 | 10,2 |
| M2 | 440 | 12,1 | 73,8 | 9,0 |
| M3 | 260 | 12,0 | 61,5 | 7,9 |

En la tabla II se resumen las propiedades mecánicas obtenidas del análisis de las curvas esfuerzo-deformación unitaria. Como puede apreciarse en la tabla mencionada, todas las propiedades obtenidas disminuyen a medida que aumenta el tamaño de poro. En las fig. 8 y 9 se muestran gráficas del comportamiento del módulo de elasticidad y el esfuerzo de meseta en función de la densidad relativa. En ambos casos, se observa una disminución de ambas propiedades al aumentar la densidad relativa. Este resultado es contrario al obtenido en otros trabajos [17,18], y contrario a las relaciones de escala propuestas por [2]. Sin embargo, en los trabajos experimentales citados, condiciones tales como: metal base, técnica utilizada y los tamaños de poro obtenidos, son diferentes a las de este trabajo. De otra parte, las leyes de escala fueron obtenidas a partir de celdas ideales y ajustadas con base en datos experimentales obtenidos de metales celulares comerciales. Podría pensarse, entonces, que este comportamiento se debe a que la distribución del metal base dentro del metal celular no es homogénea y además, pueden haber defectos celulares que inciden en tales propiedades [19].

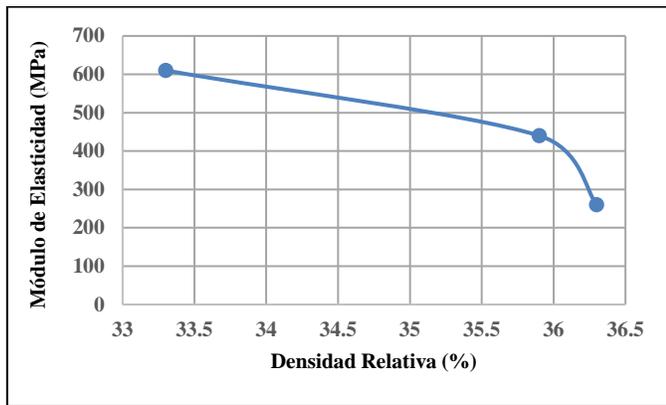


Fig. 8. Comportamiento del módulo de elasticidad en función de la densidad relativa.

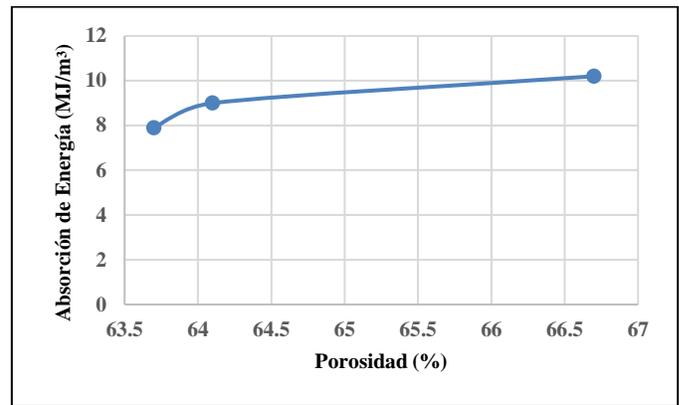


Fig. 11. Variación de la absorción de energía en función del porcentaje de porosidad.

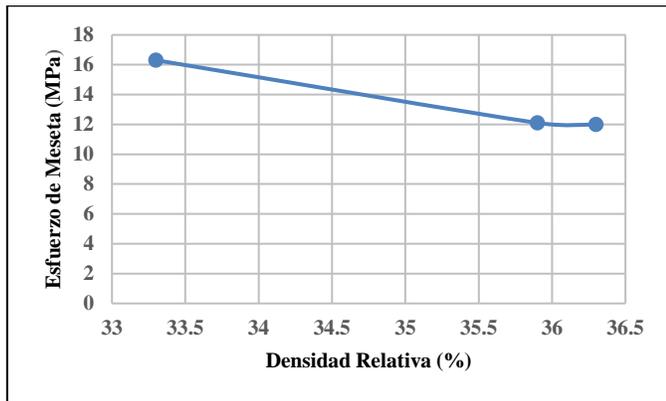


Fig. 9. Comportamiento del esfuerzo de meseta en función de la densidad relativa.

Las Fig. 10 y 11 muestran el comportamiento de la capacidad de absorción de energía por deformación plástica en función del tamaño de poro y del porcentaje de porosidad. Para analizar este comportamiento es conveniente tener en cuenta que la capacidad de absorción de energía de un metal celular se determina calculando el área bajo la curva esfuerzo deformación, entre una deformación del 0% y la deformación de densificación [22]. A partir de esta definición y relacionando las curvas de esfuerzo deformación de la Fig. 7 con los valores de la deformación de densificación de la tabla

II, se puede concluir que este comportamiento es lógico, es decir, a menor tamaño de poro mayor área bajo la curva esfuerzo-deformación a medida que se incrementa el porcentaje de porosidad y por ende mayor capacidad de absorción de energía mecánica. Si se analiza la Fig. 12, en la cual se muestra la capacidad de absorción de energía para diferentes porcentajes de deformación, se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de deformación, la capacidad de absorción de energía tiende a aumentar a medida que disminuye el tamaño de poro. Por tanto, este comportamiento ratifica lo expuesto anteriormente.

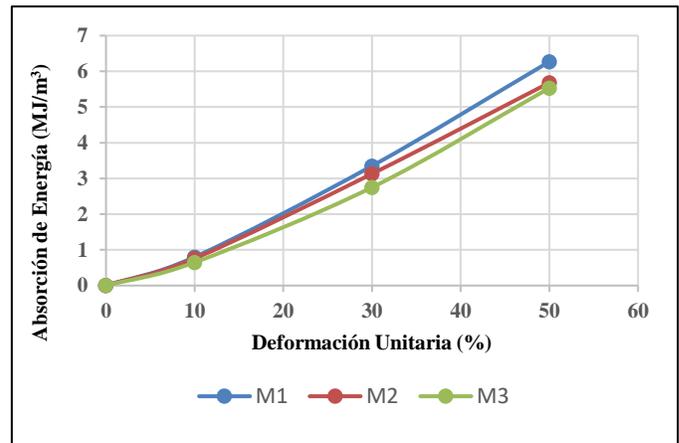


Fig. 12. Capacidad de absorción de energía como función del porcentaje de deformación unitaria.

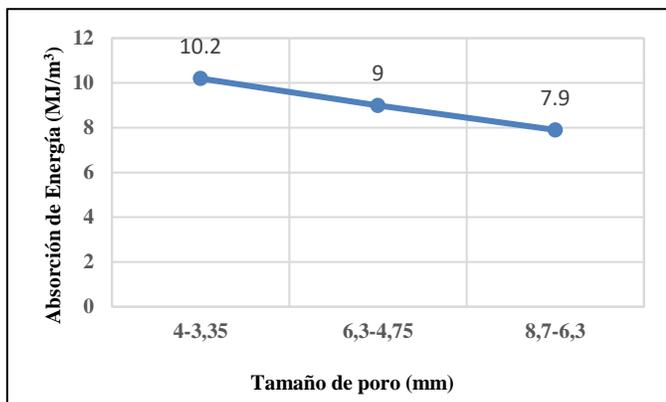


Fig. 10. Variación de la absorción de energía en función del tamaño de poro.

IV. CONCLUSIONES

Fue posible, no solo implementar la técnica de infiltración de rellenos removibles introduciendo ciertas modificaciones respecto a la técnica convencional, sino también fabricar muestras de metales celulares en tres tamaños de poro diferentes.

Se pudo comprobar que los metales celulares producidos presentan poros de forma irregular, los cuales son una réplica de las partículas del material de relleno utilizado, además, que

estos poros presentan interconexiones entre sí lo cual conduce a aseverar que son metales celulares de poro abierto.

A partir de la medición de dimensiones y masas de las muestras obtenidas y con la aplicación de ecuaciones sencillas se obtuvieron características estructurales de los metales celulares fabricados, vale decir, densidad, densidad relativa y porcentaje de porosidad. Al aumentar el tamaño de poro del metal celular, tanto la densidad como la densidad relativa aumentan, mientras que el porcentaje de porosidad y la capacidad de absorción de energía mecánica disminuyen.

Sometiendo muestras de los metales celulares a ensayos de compresión cuasi-estática, se pudieron obtener curvas de esfuerzo-deformación unitaria y a partir de ellas se determinaron propiedades mecánicas relevantes de tales materiales, tales como: rigidez, esfuerzo de meseta, deformación de densificación y capacidad de absorción de energía mecánica.

Tanto la rigidez como el esfuerzo de meseta disminuyen a medida que se incrementa la densidad relativa, es decir, a medida que aumenta el tamaño de poro. Este comportamiento puede deberse a diferencias en la distribución del metal base en el metal celular y a defectos celulares.

RECOMENDACIONES

Se hace necesario producir y caracterizar mecánicamente muestras con tamaño de poro más pequeño, a fin de determinar si estos comportamientos continúan o se presentan algunos cambios en las tendencias tal como se reporta en otros trabajos.

Igualmente es necesario someter a ensayos un número de probetas más significativo para obtener valores de propiedades mecánicas más representativos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan los más sinceros agradecimientos al personal técnico y administrativo de los diferentes laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales y del SENA Regional Caldas, en los cuales se llevaron a cabo los diferentes ensayos.

REFERENCIAS

[1]. Gutiérrez Vásquez, J. A., & Oñoro, J. "Espumas de aluminio: fabricación, propiedades y aplicaciones". *Revista de metalurgia*, pp. 457-476, 2008. DOI: 10.3989/revmetalm.0751

[2]. Gibson LJ, Ashby MF. "Cellular Solids: Structure and Properties." *Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press*, 2nd ed, 1997. DOI: 10.1017/CBO9781139878326

[3]. Vesenjok, M., Sulong, M. A., Krstulovik-Opara, L., Borovinsek, M., Mathier, V., & Fiedler, T. "Dynamic compression of aluminium foam derived from infiltration casting of salt dough". *Mechanics of Materials*, pp. 96-108, 2016. DOI: 10.1016/mechmat.2015.10.012

[4]. Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. "Metal foams: A design guide". U.S.A: Planta Tree, 2000. DOI: 10.1115/1.1421119

[5]. Fernández, P., Cruz, L. J., & Coletto, J. "Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I: Procesos por vía líquida". *Revista de metalurgia*, pp. 540-556, 2008. DOI:10.3989/revmetalm.0767

[6]. Banhart, J. "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metals foams". *Progress in Materials Science*, pp. 559-632, 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5

[7]. Baumeister, J.; Banhart, J.; Weber, J. "Aluminium foams for transport industry". *Materials & Design*, Vol. 18, Nos. 4r6, pp. 217]220, 1997. DOI: 10.1016/S0261-3069(97)00050-2

[8]. Irausquín Castro, I. A. "Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía". *Tesis doctoral*. Madrid, 2012.

[9]. Fernández, P., Cruz, L., & Coletto, J. "Procesos de fabricación de metales celulares. Parte II. Vía sólida, deposición de metales, otros procesos". *Revista de Metalurgia*, pp. 124-142, 2009. DOI:10.3989/revmetalm.0806

[10]. Jiang, B., Wang, Z., & Zhao, N. "Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminum foams". *Scripta materialia*, pp. 169-172, 2007. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2006.08.070

[11]. Gaillard, C., Despois, J., & Mortensen, A. "Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams". *Materials Science and Engineering*, p.p 250-262, 2004. DOI: 10.1016/j.msea.2004.03.015

[12]. Báez P, S., Hernández R, M., & Palomar P., M. "Processing and characterization of open-cell aluminum foams obtained through infiltration processes". *Procedia Materials Science*, pp. 54-61, 2014. DOI: 10.1016/j.mspro.2015.04.007

[13]. San Marchi, C., & Mortensen, A. "Deformation of open-cell aluminum foam". *Acta Materialia*, pp. 3959-3969, 2001. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00294-4

[14]. Goodall, R., Marmottant, A., Salvo, L., & Mortensen, A. "Spherical pore replicated microcellular aluminium: Processing and influence on properties". *Materials Science and Engineering*, pp. 124-135, 2007. DOI: 10.1016/j.msea.2007.02.002

[15]. Nemecek, J., Kralik, V., & Vondrej, J. "A two-scale micromechanical model for aluminium foam based on results from nanoindentation". *Computers and Structures*, pp. 136-145, 2013. DOI: 10.1016/j.compstruc.2013.07.007

[16]. Gibson, L. J. "Mechanical behavior of metallic foams". *Annual Reviews Materials Science*, pp. 191-227, 2000. DOI: 10.1146/annurev.matsci.30.1.191

[17]. Hasan Bafiq and Ali Habibolahzadeh. "Compressive properties of aluminum foam produced by powder-Carbamide spacer route" *Materials & Design*, Vol. 52, pp. 404-411, 2013. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.043

[18]. Bhasker, S., Somnath B. "Evaluation of mechanical properties under quasi-static compression of open-cell foams of 6061-T6 Al alloy fabricated by pressurized salt infiltration casting method" *Materials Characterization* 130. Pp. 198-203, 2017. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.06.008

[19]. Linul, E., Marsavina, L., Kovacic, J., Sadowsky, T. "Dynamic and quasi-static compression test of closed-cell aluminium alloy foams". *Proceedings of the Romanian Academy-Seria A*, pp. 361-369, 2017.

[20]. Baez Pimiento, S., Hernández Rojas, M., & Palomar Pardavé, M. México Patente N° *Request patent* 2013014443, 2013. DOI: 10.1016/j.mspro.2015.04.007

[21]. R. Surace, L.A.C. De Filippis, A.D. Ludovico, G. Boghetich. "Influence of processing parameters on aluminium foam produced by space holder technique". *Materials and Design* 30, pp. 1878-1885, 2009. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.09.027

[22]. Bhasker, S., Somnath B. "Development of Al foams by a low-cost salt replication method for industrial applications". *Materials Today: Proceedings* 2, pp. 1886 - 1891, 2015. DOI: 10.1016/j.matpro.2015.07.140



Luis Edgar Moreno Montoya es Ingeniero Industrial y Magíster en Ciencias: Física. Títulos obtenidos en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Actualmente realiza estudios de Doctorado en la misma Universidad. Es docente del Departamento de Ingeniería Industrial y su área de desempeño a nivel docente y de investigación es la Ciencia e Ingeniería de

Materiales.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5647-6142>



Sandro Báez Pimiento es Ingeniero Metalúrgico de la Universidad Industrial de Santander, UIS. Realizó estudios de Maestría y Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales en la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Su experiencia profesional incluye la realización de estancias posdoctorales en la UNAM y la Universidad Autónoma

Metropolitana de México, UAM, así como actividades de docencia e investigación en la Universidad Nacional de Colombia, UN. Sus áreas de interés incluyen la fabricación de metales porosos y aleaciones amorfas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7747-6280>



Jhoan Mauricio Moreno Vargas es Ingeniero Físico y Magíster en Ciencias: Física. Títulos obtenidos en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Actualmente realiza estudios de doctorado en Ciencias: Física. Se desempeña como docente ocasional en la Universidad Nacional Sede Manizales en las áreas de física e ingeniería de materiales.

Su área de interés es la síntesis y caracterización de materiales para ingeniería.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7638-3229>