

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas.

Recibido: 24 de Marzo 2022 / Aceptado: 04 de Junio 2022 / Publicado: 01 de Julio 2022

Sección: Ciencias de la Ingeniería
Artículo de Investigación Original
<https://doi.org/10.55204/trc.v2i2.29>

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

Analysis of the porosity structure of open-cell aluminum metallic foams and its influence on the mechanical properties

Pablo Ernesto Sarzosa Viera¹ [0000-0002-5157-9433], Edison Patricio Abarca Pérez¹ [0000-0001-7041-4805], Eliza Verónica Sailema Sailem² [0000-0003-0578-7079]

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

² Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi, Latacunga, Ecuador

¹spablo8802@gmail.com, edison.abarca@esPOCH.edu.ec, ²evsailema@istx.edu.ec

Resumen. El ámbito de los materiales está presente en todos los aspectos de nuestra vida cotidiana y profesional, por lo que día a día se sigue creando, innovando y mejorando nuevos elementos cada vez con más frecuencia. La calidad de un material depende de varios factores y características a nivel de ingeniería, producción industrial, etc. Por estos motivos se establece el presente proyecto, que tiene como objetivo realizar el análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio obtenidas mediante el método experimental de infiltración, utilizando preformas solubles de óxido de sodio (Na₂O), a diferencia de anteriores métodos en los que se utiliza sal (NaCl). Este tipo de materiales se utiliza para absorción de energía de impacto, vibraciones y sonido, así como un aislante térmico en algunas aplicaciones. Se determina el protocolo adecuado para la generación de estas espumas, con los materiales y equipos, con sus parámetros óptimos, dimensiones y gráficas. Se realiza la caracterización del poro, con las propiedades mecánicas de compresión y absorción de impacto, para determinar la relación con el tamaño del poro mediante ensayos, ecuaciones, gráficas y tablas de valores de cada elemento. Las probetas a generar serán de dos tipos: de 3mm de tamaño de poro y de 5mm de tamaño de poro. Se concluye que la probeta de 3mm tiene mejor capacidad de absorción de energía que la probeta de 5mm.

Palabras Clave: Espumas, poros, impacto, caracterización, fundición, infiltración, óxido, sodio, compresión, absorción, preforma, soluble.

Abstract. The field of materials is present in all aspects of our daily and professional lives, so that every day we continue to create, innovate and improve new elements more and more frequently. The quality of a material depends on several factors and characteristics at the level of engineering, industrial production, etc. For these reasons the present project is established, which aims to carry out the analysis of the porosity structure of aluminum metallic foams obtained by means of the experimental infiltration method, using soluble sodium oxide (Na₂O) preforms, unlike previous ones. methods in which salt (NaCl) is used. This type of material is used for absorption of impact energy, vibrations and sound, as well as a thermal insulator in some applications. The appropriate protocol for the generation of these foams is determined, with the materials and equipment, with their optimal parameters, dimensions and graphics. The characterization of the pore is carried out, with the mechanical properties of compression and impact absorption, to determine the relationship with the pore size through tests, equations, graphs and tables of values of each element. The specimens to be generated will be of two types: 3mm pore size and 5mm pore size. It is concluded that the 3mm specimen has better energy absorption capacity than the 5mm specimen.

Keywords: Foams, pores, impact, characterization, casting, infiltration, oxide, sodium, compression, absorption, preform soluble.

Como Citar (APA): Sarzosa Viera, P. E., Abarca Pérez, E. P., & Sailema Sailema, E. V. (2022). Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas. *Tesla Revista Científica*, 2(2), 116–139. <https://doi.org/10.55204/trc.v2i2.29>



INTRODUCCIÓN

La importancia de los materiales en desarrollo de la humanidad ha sido resaltada de manera significativa, en donde el avance de las tecnologías para la obtención natural y fabricación de materiales ha determinado la evolución de las sociedades. De manera general, existen materiales para cada aplicación desde elementos utilizados en la vida cotidiana hasta aplicaciones más específicas.

A pesar de los espectaculares progresos en el conocimiento y en el desarrollo de los materiales en los últimos años, el permanente desafío tecnológico requiere materiales cada vez más sofisticados y especializados. Desde la perspectiva de los materiales se pueden comentar algunos extremos (Callister, 1995). Se pueden mencionar algunos campos como la generación de energía mediante fuentes nuevas y económicas. También la preservación de la calidad del medioambiente requiere la obtención y producción de materiales para el control de contaminación y una mínima degradación del entorno de donde se extraen. En el caso del transporte, los materiales cumplen un rol muy significativo, además del consumo de energía de cualquier tipo. Por eso se busca optimizar la construcción mediante la utilización de materiales que tengan buenas propiedades de resistencia con baja densidad, así como la disipación de calor, para que estos vehículos tengan un rendimiento adecuado.

Las espumas metálicas son sólidos celulares artificiales que emulan microestructuras relativamente comunes en la naturaleza. Las espumas metálicas, especialmente las de célula abierta, son de amplia aplicación en la industria aeroespacial, naval, ferroviaria, deportiva y militar por su alta resistencia mecánica en relación al peso (Ashby, y otros, 2000).

Los métodos de sintetización de estas espumas metálicas constituyen un reto para obtener procesos sistematizados para la obtención de este material. El objetivo de este proyecto es obtener espumas metálicas de aluminio, en donde se pueda controlar el tamaño de la porosidad, para que el material tenga una constitución mayormente homogénea. También se necesita establecer los elementos de control en todas las etapas del proceso, para realizar una sistematización y poder replicar a futuro con el objeto de realizar ensayos y pruebas que permitan determinar la influencia de la estructura en la porosidad sobre las propiedades mecánicas de compresión estática y dinámica.

METODOLOGÍA

A. Tipo y diseño de investigación

<https://tesla.puertomaderoeditorial.com.ar/>

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

El tipo de investigación será experimental y bibliográfica, ya que se pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula a través de la experimentación con la ayuda de bibliografía de referencia como punto de partida para la aplicación de conceptos en la práctica. Los experimentos manipulan tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre otras variables (las dependientes) en una situación de control (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010).

B. Método experimental

En la presente investigación se sintetizan espumas de aluminio de celda abierta mediante el método de infiltración utilizando preformas solubles (óxido de sodio). En este método el metal fundido se infiltra entre las preformas solubles, siendo el proceso simple en el cual se puede controlar de manera regular la estructura final de la porosidad. Todo esto se coloca en un molde de fundición que será llevado a un horno de mufla, necesario para poder elevar la temperatura hasta el punto de fusión del aluminio (660°C), empezando la infiltración alrededor de los granos de óxido de sodio. Estos granos al tener un punto de fusión más elevado (1132°C), no tendrán ningún problema al poder resistir hasta que el aluminio fundido infiltre alrededor de la preforma. Al final, la preforma se disuelve mediante agua, obteniendo una probeta solamente de aluminio con una estructura porosa. Para realizar todo el proceso, adicionalmente al molde de fundición, la preforma y el horno de mufla, se necesitan otros materiales y equipos como un tanque de argón, una bomba de vacío, tuberías de acero inoxidable, válvulas y manómetros.

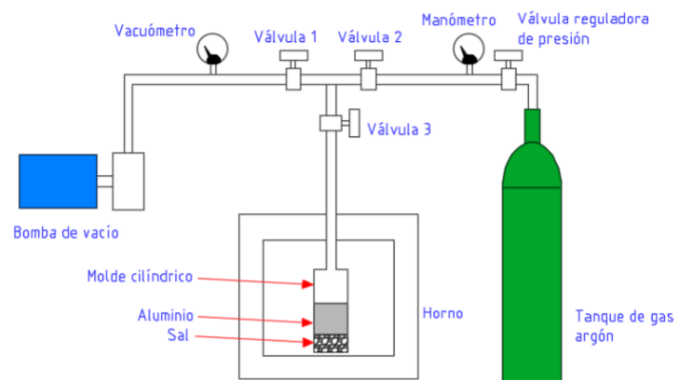


Figura 13. Esquema del equipo para obtener espumas metálicas de celda abierta

Elaborado por: Los Autores

C. Materiales y equipos.

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

Los materiales y equipos utilizados para la obtención de las espumas de aluminio por el método de infiltración a base de preformas de óxido de sodio se detallan a continuación.

Aluminio

El metal utilizado para la infiltración es aluminio al 99% de pureza, de 50mm de diámetro y 30mm de longitud, verificando su composición en el espectrómetro con los siguientes resultados:

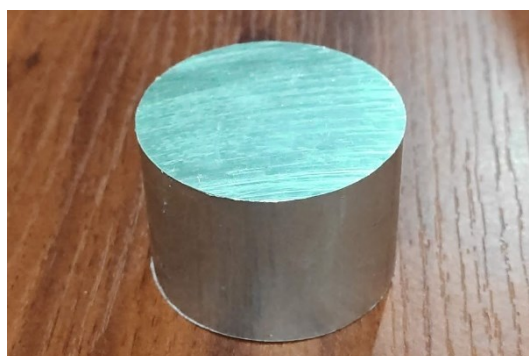


Figura 14. Aluminio de alta pureza
Elaborado por: Los Autores

Tabla 5.
Composición del aluminio

Elemento	Porcentaje	Promedio
Si	%	0.218
Fe	%	0.225
Cu	%	0.238
Mn	%	0.0095
Mg	%	0.048
Cr	%	0.0032
Ni	%	0.013
Zn	%	0.024
Ti	%	0.0057
Pb	%	<0,050
Sn	%	0.007
V	%	< 0,0030
Sr	%	0.003
Zr	%	< 0,0020
Cd	%	< 0,0050
Co	%	< 0,0030
B	%	< 0,0010
Ag	%	< 0,0010
Bi	%	< 0,0060
Ca	%	0.030
Al	%	99.14

Elaborado por: Los Autores

Preforma

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

La preforma a utilizar es óxido de sodio (Na_2O), en forma de granos esféricos con dimensiones de 3mm y 5mm. Los datos de la preforma y el fabricante son:

Tabla 6.

Características de la preforma

Fórmula	Na_2O
Peso molecular	61.97
Apariencia	Yellow Crystalline Solid
Punto de fusión	1,132° C (2,070° F)
Punto de ebullición	1,950° C (3,542° F)
Densidad	2.27 g/cm ³
Solubilidad in H₂O	N/A
Masa molar	61.974453 g/mol

Elaborado por: Los Autores

Molde de fundición

Para la generación de la espuma de aluminio de celda abierta se necesita un molde que contenga la preforma y el aluminio, con la principal característica de poder contener de manera hermética los elementos durante la fundición e infiltración del metal. Para este efecto se establece un molde fabricado en acero inoxidable AISI 304, cuyas propiedades cumplen con la misión para este proceso.



Figura 15. Molde de fundición.

Elaborado por: Los Autores

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

Horno eléctrico de mufla

Un tocho extraído de la barra cilíndrica de aluminio de alta pureza (previamente generada por moldeo), se funde dentro del molde cilíndrico, para lo cual se utiliza un horno mufla eléctrico con control digital especialmente fabricado para este proyecto. Se elige este tipo de horno debido a que permite tener un alto grado de control de la temperatura en el proceso.



Figura 16. Horno eléctrico de mufla modelo 4-9 Samothermal
Elaborado por: Los Autores

Tabla 7.

Características del horno

Descripción	Detalle
Medidas internas de cámara del horno	Alto 23 cm; Ancho 18 cm; Profundidad 18 cm.
Medidas externas del horno	Alto 35 cm; Ancho 30 cm; Profundidad 30 cm.
Material de cámara interna	Ladrillos refractarios de alta alúmina
Temperatura máxima de trabajo	1200 °C
Temperatura continua de trabajo	1100 °C
Voltaje	220 V (bifásico)
Amperaje	15 A
Potencia	3300 W
Número de fases	1
Tipo de termocupla	Tipo K con revestimiento cerámico
Controlador de temperatura	Model K

Elaborado por: Los Autores

Bomba de vacío

Dentro del método experimental se requiere que dentro del molde se genere un vacío, para permitir la infiltración adecuada del metal fundido entre los granos de óxido de sodio. Para el efecto se usa una bomba de alto vacío.

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas



Figura 17. Bomba de vacío QUALITY Model QVP 800.
Elaborado por: Los Autores

Tanque de gas argón

Para que la infiltración dentro del método experimental funcione, se debe agregar gas argón para generar una presión positiva dentro del molde de fundición y de este modo el metal fundido pase a ocupar el espacio entre los granos de óxido de sodio.

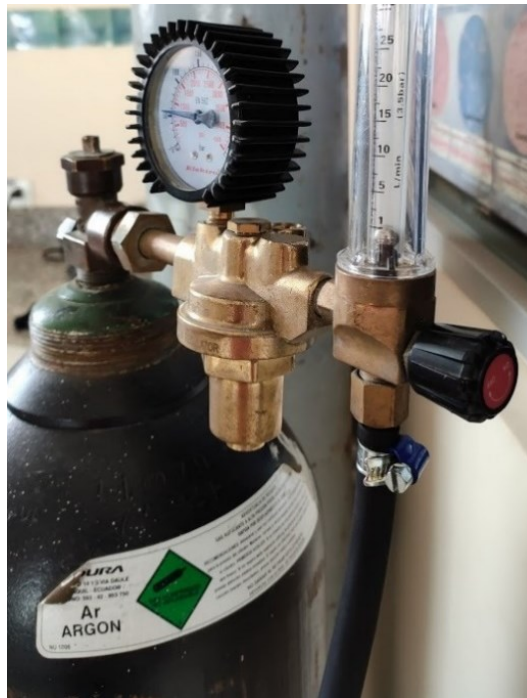


Figura 18. Tanque de gas argón.
Elaborado por: Los Autores

Sistema de válvulas

Para generar el vacío mediante la bomba y también para introducir el gas argón dentro del molde de fundición se necesita un sistema de válvulas para la apertura y cierre del paso de cada proceso. La válvula 1 va conectada a la bomba de vacío, la válvula 2 va conectada

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

directamente a la entrada del molde entre la válvula 1 y válvula 3, y la válvula 3 va conectada al tanque de gas argón.

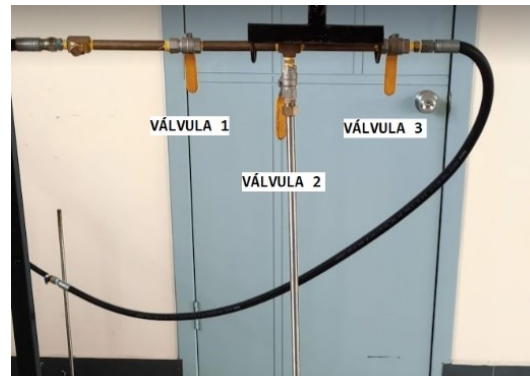


Figura 19. Sistema de válvulas
Elaborado por: Los Autores

Láminas de grafito

Las láminas de grafito mantienen el molde de fundición sellado y hermético, siendo su característica principal conjuntamente con su capacidad de soportar elevadas temperaturas, resistente a la corrosión y apto para presiones de vacío.



Figura 20. Láminas de grafito
Elaborado por: Los Autores

Pirómetro

En este método experimental utiliza un horno de mufla a temperaturas de hasta 700°C, considerando que la termocupla del horno mide la temperatura dentro del mismo, sin embargo, esa temperatura no es igual a la del molde de fundición. Para poder controlar la temperatura interna del molde, se utilizará el pirómetro para medir esa temperatura, tratando de iterar la temperatura alcanzada por el horno y el molde para lograr una infiltración adecuada del metal entre los espacios de los granos del óxido de sodio.

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas



Figura 21. Pirómetro para la medición de la temperatura del molde
Elaborado por: Los Autores

D. Protocolo experimental

En este método experimental se deben considerar las siguientes etapas: preparación de la preforma y molde, precalentamiento del horno, infiltración, solidificación, maquinado, lixiviación, obtención de la espuma metálica.

Preparación de la preforma y el molde

Para la preparación de la preforma dentro del molde se coloca una lámina de grafito en la base del molde, con el objetivo de sellar la parte inferior. Posteriormente, se colocan los granos de óxido de sodio dentro del molde de fundición a una altura de 3 a 4 centímetros, verificando que la preforma quede uniformemente distribuida.



Figura 22. Lámina de grafito en la base
Elaborado por: Los Autores

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas



Figura 23. Preparación de la preforma en el molde
Elaborado por: Los Autores

Se coloca el cilindro de aluminio encima de la preforma, nivelado en la parte superior. En la tapa del molde, se coloca una lámina de grafito con el objetivo de obtener un sellado completo. La tapa se coloca en la parte superior del molde, ajustando los 4 pernos para el efecto lo suficientemente apretado para que no existan fugas durante la infiltración. Se utiliza la bomba de vacío para verificar que exista un sellado adecuado en el sistema.



Figura 24. Colocación del aluminio en el molde
Elaborado por: Los Autores



Figura 25. Sellado del molde
Elaborado por: Los Autores

Pre calentamiento del horno

Se coloca el molde dentro del horno de mufla con el sistema de válvulas conectada, manteniendo abiertas la válvula 1 y válvula 3 para que mientras el horno se precalienta hasta los 400°C, el óxido de sodio pueda perder humedad. Posterior a alcanzar esa temperatura, se realiza el cierre de las válvulas anteriormente abiertas para continuar con el proceso.



Figura 26. Pre calentamiento del horno
Elaborado por: Los Autores

Infiltración

Para esta etapa, después del pre calentamiento del horno se calibra la velocidad de calentamiento a 10°C/min, colocando también una temperatura constante cuando alcance los 780°C durante 1 hora. Posterior a eso, se realiza la infiltración abriendo la válvula 3 que está conectada al tanque de gas argón, e inmediatamente se abre la válvula 2 que va directamente al molde de fundición durante unos 30 segundos.

Solidificación

Se debe extraer el molde del horno de mufla desconectando el sistema de válvulas, para realizar un enfriamiento del sistema. Generalmente ese enfriamiento tarda unos 30 minutos a temperatura ambiente para que el molde pueda ser manipulado y la probeta pueda ser extraída del molde.

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas



Figura 27. Extracción del molde
Elaborado por: Los Autores



Figura 28. Enfriamiento del molde
Elaborado por: Los Autores

Maquinado

Para esta etapa, la probeta extraída del molde debe cortarse para poder obtener un cilindro uniforme de un diámetro de 55mm de diámetro y 35mm de longitud.

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

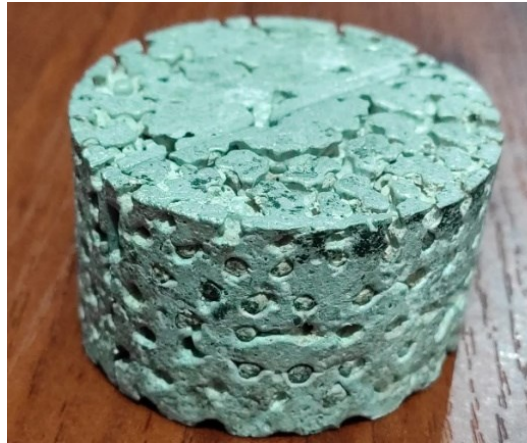


Figura 29. Probeta extraída y maquinada
Elaborado por: Los Autores

Lixiviación y espuma metálica

La probeta extraída en la etapa anterior aun contiene la preforma soluble, por lo tanto, deberá colocarse en un recipiente de agua y calentarlo para que el óxido de sodio pueda disolverse y obtener la probeta de espuma de aluminio de celda abierta.



Figura 30. Espumas de aluminio de celda abierta de 3mm de tamaño de poro
Elaborado por: Los Autores



Figura 31. Espumas de aluminio de celda abierta de 5mm de tamaño de poro
Elaborado por: Los Autores

RESULTADOS

<https://tesla.puertomaderoeditorial.com.ar/>

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

Después de obtener las probetas de espumas de aluminio de celda abierta, se procede a realizar el análisis de la forma estructural del poro, el ensayo de compresión y el ensayo dinámico de compresión para determinar las características del material. Las espumas de aluminio obtenidas fueron de 3mm y 5mm de diámetro, en un total de 4 probetas de cada medida. Posteriormente se determina el módulo de elasticidad del material, así como la energía absorbida mediante ensayos de compresión dinámica.

Densidad relativa

La densidad relativa es una propiedad que permite establecer el tipo de material, siendo un sólido poroso cuando esta cantidad es mayor a 0.3, mientras que si el valor es menor a 0.3 se consideran como sólidos celulares. La ecuación que permite calcular la densidad relativa es:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_s}$$

Donde ρ es la densidad del material celular, y ρ_s es la densidad del material base. Considerando que la densidad de la espuma obtenida es 1.78g/cm³ y la densidad del aluminio es 2.7g/cm³, reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$\rho_r = \frac{1.78g / cm^3}{2.7g / cm^3}$$
$$\rho_r = 0.66$$

Esto quiere decir que el material es un sólido poroso.

Estructura y tamaño de poro

Para realizar el análisis de la estructura y tamaño del poro se realizó un seccionamiento de manera longitudinal en una probeta de cada tamaño de poro. Para este seccionamiento se debe tener mucho cuidado, ya que, al utilizar herramientas de corte, se debe precautelar que la estructura de la espuma metálica de celda abierta no sufra daños significativos.



Figura 32. Probeta seccionada de 3mm de tamaño de poro
<https://tesla.puertomaderoeditorial.com.ar/>

Elaborado por: Los Autores



Figura 33. Probeta seccionada de 5mm de tamaño de poro
Elaborado por: Los Autores

Para el análisis morfológico se toma en cuenta las macrografías obtenidas de las probetas de 3mm y 5mm seccionadas, considerando su diámetro medio, determinando un promedio de sus mediciones y considerando la desviación estándar de las cantidades.

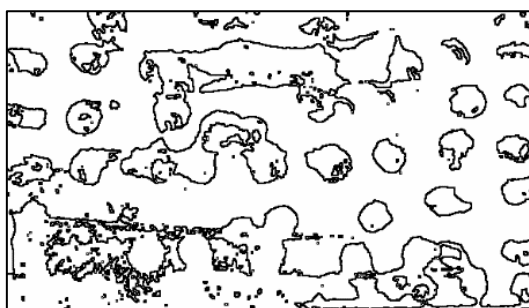


Figura 34. Macrografías probeta 3mm de tamaño de poro
Elaborado por: LosAutores

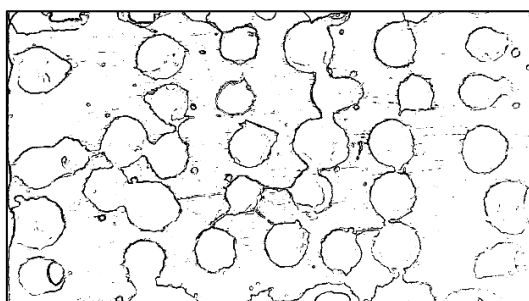


Figura 35. Macrografías probeta 5mm de tamaño de poro
Elaborado por: Los Autores

Tabla 8. *Diámetro de las espumas de aluminio*

3mm de tamaño de poro		5mm de tamaño de poro	
Perímetro (mm)	Diámetro medio (mm)	Perímetro (mm)	Diámetro medio (mm)
9.32	2.93	16.45	5.24
10.79	3.39	14.57	4.64
10.22	3.21	17.04	5.42
8.94	2.81	14.80	4.71
9.76	3.07	14.23	4.53
9.19	2.89	15.86	5.05

<https://tesla.puertomaderoeditorial.com.ar/>

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

10.06	3.16	16.75	5.33
8.76	2.75	15.48	4.93
9.35	2.94	15.10	4.81
10.34	3.25	15.27	4.86
9.91	3.11	14.81	4.71
10.78	3.39	14.47	4.61
9.44	2.96	15.48	4.93
9.03	2.84	17.04	5.42
9.33	2.93	14.68	4.67
10.34	3.25	16.53	5.26
Media	3.055	Media	4.945
Desviación estándar	0.203	Desviación estándar	0.304
CV	6.648	CV	6.148

Elaborado por: Los Autores

También se determinó el espesor del ligamento mediante la medición al azar de los poros que están mejor configurados, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 9.
Espesor de ligamentos de las espumas de aluminio

Tamaño Nº	3mm de tamaño de poro		5mm de tamaño de poro	
	Espesor axial (mm)	Espesor radial (mm)	Espesor axial (mm)	Espesor radial (mm)
1	3.38	2.49	1.22	4.79
2	2.75	2.06	1.17	3.28
3	2.06	1.42	0.55	2.82
4	1.72	1.42	0.94	4.18
5	2.75	3.12	1.77	4.8
6	1.78	2.13	0.78	3.84
7	3.29	1.96	0.94	3.51
8	2.94	3.64	1.55	4.14
9	2.74	3.29	0.93	5.69
10	3.87	2.94	1.11	4.96
11	2.98	1.78	0.77	6.96
12	2.67	2.48	1.32	5.72
13	2.88	3.02	1.61	5.53
14	1.9	3.46	1.41	6.4
15	2.59	2.58	0.81	3.55
16	3.38	2.96	0.96	4.94
Media	2.73	2.547	1.115	4.694
Desviación estándar	0.615	0.7	0.343	1.168
CV	22.524	27.485	30.803	24.88

Elaborado por: Los Autores

Resultados del ensayo de compresión uniaxial

De la realización de los ensayos de compresión uniaxial en la máquina universal se obtuvo las siguientes gráficas:

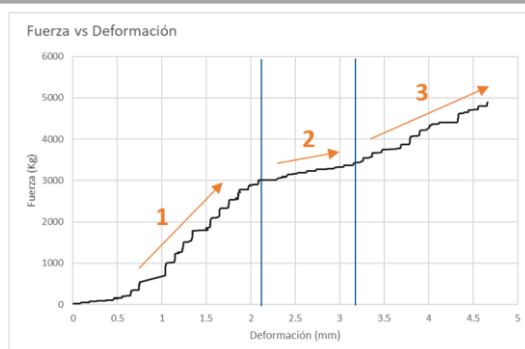


Figura 36. Curva de fuerza – deformación para la probeta de 3mm de tamaño de poro
Elaborado por: Los Autores

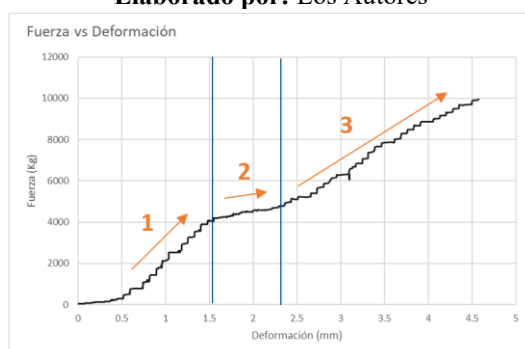


Figura 37. Curva de fuerza – deformación para la probeta de 5mm de tamaño de poro
Elaborado por: Los Autores

De la realización de los ensayos de compresión uniaxial en la máquina universal se obtuvieron las gráficas de fuerza – deformación anteriores, identificando una curva con 3 zonas principales: la zona 1 identifica la región lineal del material con comportamiento elástico, la zona 2 corresponde al límite de cedencia del material en donde comienza el comportamiento plástico, y llegando a la zona 3 se produce un endurecimiento por deformación del material, debido a que esa deformación genera el acomodamiento y densificación de la espuma de aluminio, aumentando su resistencia.

Los datos de los ensayos de compresión realizados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10.

Resistencia a la compresión de las probetas

Número de ensayo	Fuerza soportada Probeta de 3mm de porosidad (Kg)	Fuerza soportada Probeta de 5mm de porosidad (Kg)
1	3063.023	4250.237
2	3175.435	4002.519
3	2920.124	3990.124
Promedio	3052.861	4080.96
Desviación estándar	127.959	146.729
CV	4.191	3.595

Elaborado por: Los Autores

<https://tesla.puertomaderoeditorial.com.ar/>

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

Después de realizar los ensayos se llegó a determinar que la probeta de 3mm de tamaño de poro llegó a soportar hasta 3 toneladas antes de iniciar una falla. Luego en la probeta de 5mm de tamaño de poro, se llegó a determinar una resistencia de 4 toneladas, antes de iniciar una falla debido a su rigidez.

Tomando en cuenta el análisis de la morfología de las espumas de aluminio y los datos del ensayo de compresión en las probetas de espuma de aluminio de celda abierta, considerando que los poros se generan aleatoriamente, se identifica el comportamiento de la resistencia del nuevo material generado con los datos de la siguiente tabla:

Tabla 11.
Morfología y resistencia de las espumas

Probeta	Poro		Ligamento		Resistencia
	Perímetro promedio (mm)	Diámetro promedio (mm)	Espesor axial promedio (mm)	Espesor radial promedio (mm)	Límite proporcional (Kg)
Probeta de 3mm	9.72	3.06	2.73	2.55	3052.861
Probeta de 5mm	15.54	4.94	1.12	4.69	4080.96

Elaborado por: Los Autores

De acuerdo a estos resultados se puede identificar que la espuma de aluminio de 3mm de diámetro de poro tiene una morfología uniforme en el espesor del ligamento tanto axial como radial, en comparación de la espuma de aluminio de 5mm de diámetro en donde el espesor del ligamento es menor en sentido axial. La uniformidad de los ligamentos es favorable para poder Por este motivo, aunque esta última espuma tuvo mayor resistencia, se produjo una falla catastrófica por falta de uniformidad.

Resultados del ensayo de impacto Charpy

Para complementar los resultados de las propiedades mecánicas de las probetas, se realizaron ensayos de impacto Charpy para determinar la cantidad de energía absorbida durante la flexión por impacto de la espuma de aluminio, realizados en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero, con los resultados mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 12.
Energía absorbida mediante ensayo Charpy en probeta de 3mm de poro

Número de ensayo	Energía absorbida (J)
1	1.33
2	1.33
3	1.33
Promedio	1.330
Desviación estándar	0.000
CV	0.000

Elaborado por: Los Autores

<https://tesla.puertomaderoeditorial.com.ar/>

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

Tabla 13. *Energía absorbida mediante ensayo Charpy en probeta de 5mm de poro*

Número de ensayo	Energía absorbida (J)
1	4.69
2	4.14
3	4.91
Promedio	4.580
Desviación estándar	0.397
CV	8.660

Elaborado por: Los Autores



Figura 38. Probetas de 3mm y 5mm de tamaño de poro para ensayo Charpy

Elaborado por: Los Autores

Ensayo de compresión dinámica

En el ensayo de compresión dinámica se establece un péndulo de impacto para determinar la cantidad de energía absorbida por las probetas de espumas de aluminio de celda abierta. El proceso realizado fue mediante el péndulo, soltado a una altura de 30° con respecto a la vertical, para poder determinar el ángulo de rebote del mismo.



Figura 39. Péndulo de impacto para ensayo de compresión dinámica

Elaborado por: Los Autores

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas



Figura 40. Colocación del péndulo a 30°
Elaborado por: Los Autores

Se puede medir la cantidad de energía absorbida por cada probeta, visualizando el ángulo de rebote del péndulo. Posterior a cada uno de los ensayos en las probetas de las espumas de aluminio, se determinó que la probeta de 3mm de tamaño de poro generó un rebote de 10 grados, mientras que en la probeta de 5mm de tamaño de poro generó un rebote de 15 grados aproximadamente. Se puede verificar en las probetas ensayadas que la de 3mm de tamaño de poro absorbió más energía que la de 5mm de tamaño de poro.



Figura 41. Probeta ensayada 3mm tamaño de poro
Elaborado por: Los Autores



Figura 42. Probeta ensayada 5mm tamaño de poro
Elaborado por: Los Autores

<https://tesla.puertomaderoeditorial.com.ar/>

Cantidad de energía absorbida en el ensayo de compresión dinámica

El péndulo de impacto se utilizó para cuantificar la energía absorbida por las probetas, en el ensayo de compresión dinámica. Aquí se utiliza la ley de la conservación de la energía mecánica y las consideraciones del péndulo simple, en donde se van a tener 3 escenarios o etapas en el ensayo. El primer escenario es en donde se mide el ángulo inicial del péndulo, para calcular la energía potencial inicial. En el siguiente escenario, antes de que el péndulo impacte a la probeta, se calcula la velocidad antes del choque. Y en el último escenario, después del impacto se puede identificar que el péndulo regresa a una cierta inclinación.

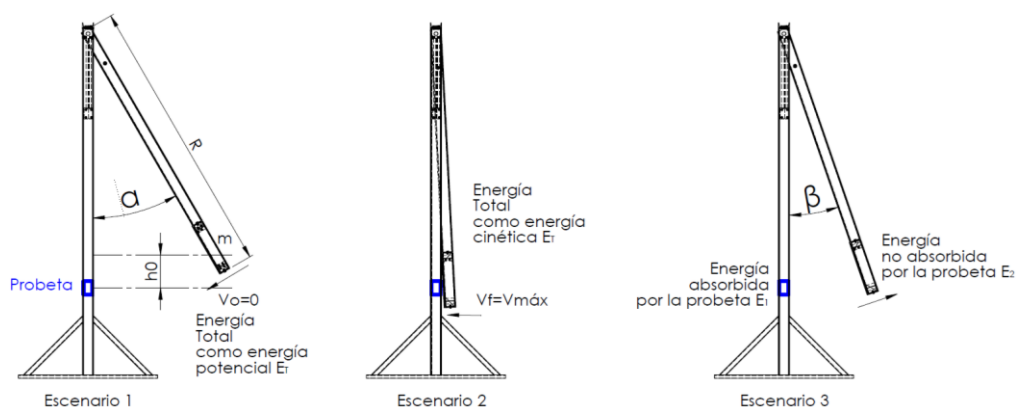


Figura 43. Esquema del ensayo con el péndulo de impacto
Elaborado por: Los Autores

El proceso realizado fue mediante el péndulo, soltado a una altura de 30° con respecto a la vertical, para poder determinar el ángulo de rebote del mismo. Se puede medir la cantidad de energía absorbida por cada probeta, visualizando el ángulo de rebote del péndulo.

Tabla 14.

Ángulo de rebote mediante ensayo a compresión dinámica

Número de ensayo	Ángulo de rebote β Probeta de 3mm de porosidad	Ángulo de rebote β Probeta de 5mm de porosidad
1	17.745	19.144
2	17.701	19.236
3	17.612	18.891
Promedio	17.686	19.090
Desviación estándar	0.068	0.179
CV	0.383	0.936

Elaborado por: Los Autores

Posterior a todos los ensayos en las probetas de las espumas de aluminio, se determinó que la probeta de 3mm de tamaño de poro generó un rebote de 17.686 grados, mientras que en la probeta de 5mm de tamaño de poro generó un rebote de 19.090 grados. Con la siguiente

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

ecuación se puede obtener la cantidad de energía absorbida por la probeta, ingresando los ángulos de inclinación inicial y final, α y β , respectivamente.

$$E_1 = m g R(\cos \beta - \cos \alpha)$$

Es así que mediante la aplicación de la ecuación para la energía absorbida se determinaron los siguientes resultados:

Tabla 15.

Energía absorbida a compresión dinámica

Tamaño	Probeta de 3mm de porosidad	Probeta de 5mm de porosidad
Número de ensayo	Energía absorbida E_1 (J)	Energía absorbida E_1 (J)
1	1112.415	1012.950
2	1115.425	1006.155
3	1121.492	1031.477
Promedio	1116.444	1016.861
Desviación estándar	4.623	13.106
CV	0.414	1.289

Elaborado por: Los Autores

Se puede identificar que mientras más amplitud tenga el rebote luego del impacto, menos cantidad de energía es absorbida por la probeta. Esto se puede comprobar en la tabla anterior, utilizando la ecuación de la energía 1, para calcular la cantidad de energía absorbida por cada probeta, en donde la probeta de 3mm de diámetro de poro, absorbe más cantidad de energía que la probeta de 5mm de diámetro de poro.

DISCUSIÓN

Las espumas metálicas de aluminio de celda abierta pueden ser obtenidas teniendo como referencia tamaños de porosidad de 3mm y 5mm de diámetro, considerando que se debe utilizar aluminio de alta pureza (99% de aluminio) y la preforma soluble de óxido de sodio, sustituyendo así la de sal que tenía la limitante de un menor punto de fusión y la sinterización producida por la humedad, especificada en algunas investigaciones aquí mencionadas.

Se establecieron todos los elementos necesarios para la ejecución del proceso experimental como la preforma soluble, el metal no ferroso (aluminio de alta pureza), el molde de fundición para colocar la preforma y el aluminio, los elementos adicionales como las láminas de grafito que sirven para sellar herméticamente el molde, la bomba de vacío para verificar el sellado del molde, el tanque de gas argón para inducir la infiltración del metal en

la preforma soluble y el horno eléctrico de mufla que es el más adecuado para el control de temperatura.

CONCLUSIONES

Para la obtención de las espumas metálicas de aluminio de celda abierta se requieren de varios factores o condiciones importantes como el control de la temperatura durante el proceso de precalentamiento e infiltración, esto debido a que el horno eléctrico de mufla tenía la posibilidad de programar una temperatura de precalentamiento y de fundición que se mantenía constante durante el tiempo que se requería. En otros tipos de hornos tendrían las limitaciones de no poder mantener la temperatura constante o de no ser tan eficientes como uno eléctrico.

La estructura de la porosidad es homogénea en la espuma de aluminio de 3mm de diámetro de porosidad, pero en el de 5mm de diámetro de porosidad la estructura no fue homogénea, generando ligamentos delgados en dirección radial de acuerdo al análisis de morfología. En los ensayos de compresión, debido al espesor de los ligamentos, la probeta de 3mm de porosidad con ligamentos homogéneos obtuvo una resistencia de 3 toneladas hasta antes de la falla, mientras que la probeta de 5mm de porosidad con ligamentos no homogéneos obtuvo una resistencia de 4 toneladas. Debido a que el proceso es experimental y se puede mejorar a futuro, ubicando elementos de control más precisos, teniendo en cuenta también la forma del molde, ya que, si tuviera un desahogo de metal en la parte inferior, la infiltración sería mucho más homogénea. También la variación se debe a la densidad y temperatura del proceso, los granos de óxido de sodio tienden a tratar de reubicarse o flotar, lo que hizo que se separaran un poco los poros.

La relación existente entre el tamaño de poro y las propiedades mecánicas de compresión y absorción de impactos se establece mediante la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos, donde la probeta con un tamaño de poro menor tiene una mejor absorción de energía, mientras que la de tamaño mayor, tiende a ser más rígido, por lo que la falla en este último llega a ser similar a la de un material frágil.

REFERENCIAS

Abarca Pérez, E. P. (2017). *Síntesis de espumas metálicas de aluminio de celda abierta*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas

- Ashby, M., Evans, T., Fleck, N., Hutchinson, J., Wadey, H., & Gibson, L. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*.
- Askelnad, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. México: Thomson Editores.
- Callister, W. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Elizondo Luna, E. M., Barari, F., Woolley, R., & Goodall, R. (2014). Casting Protocols for the Production of Open Cell Aluminum Foams by the Replication Technique and the Effect on Porosity. *Journal of Visualized Experiments*.
- Gutiérrez-Vázquez, J. A., & Oñoro, J. (2008). Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. *Revista de metalurgia*.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- Irausquín Castro, I. A. (2012). *Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Shakelford, J. (2005). *Introducción a la ingeniería de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Ucar, M., & Cengiz, A. (2010). "Crash Pendulum" Energy Absorption Test System. Kocaeli.
- Vallejo, C., Chicaisa, D., & Sotomayor, O. (2017). Un Nuevo Método para la Fabricación de Espumas Metálicas Aleatorias de Célula Abierta con Regularidad Controlada. *Revista Politécnica*.

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los Autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Autor	Sarzosa Viera, P. E.,	Abarca Pérez, E. P.,	Sailema Sailema, E. V.
Participar activamente en:			
Planificación y diseño			X
Adquisición de fondos			X
Administración del proyecto			X
Redacción –borrador original	X	X	
Redacción –revisión y edición	X	X	
Interpretación y validación de resultados	X	X	X
La discusión de los resultados	X	X	X
Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.	X	X	X

RECONOCIMIENTO A REVISORES:

La revista reconoce el tiempo y esfuerzo del editor de sección Cristian Rocha Jácome, y de revisores anónimos que dedicaron su tiempo y esfuerzo en la evaluación y mejoramiento del presente artículo.