

Caracterización estadística de una espuma de aluminio utilizando ensayos de compresión

Melissa Alpizar-Arce¹, Bruno Chinè², Francisco Rodríguez-Méndez³, Marcela Meneses-Guzmán⁴

¹ Maestría en Ingeniería de Dispositivos Médicos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Email: melialpizararce@gmail.com

² Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Email: bchine@tec.ac.cr

³ Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Email: frarodriguez@tec.ac.cr

⁴ Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Email: mameneses@tec.ac.cr

Resumen

En este trabajo se estudia la respuesta mecánica de probetas de espuma de aluminio mediante ensayos de compresión siguiendo la norma ISO13314. Para este propósito, y a partir de un solo bloque rectangular de espuma, se extraen 36 probetas con dos geometrías, cilíndrica y paralelepípedica, cerca del borde de la muestra y de su parte central. Con el fin de comprobar si la geometría de las probetas y la zona de su extracción influyen las propiedades mecánicas, se plantean seis hipótesis, las cuales son analizadas por métodos estadísticos. Los diagramas de tensión-deformación obtenidos señalan tres comportamientos esperados de los materiales celulares: la zona elástica, la zona de Plateau y la zona de densificación. Se observa que, independientemente de la forma y ubicación de las probetas, las densidades y propiedades mecánicas (esfuerzo de Plateau, esfuerzo máximo de compresión, módulo de Young y capacidad de absorción de energía) son estadísticamente similares.

Palabras clave: espuma aluminio, test de compresión, propiedades mecánicas, representatividad estadística.

Abstract

In this work, the mechanical behavior of aluminum foam specimens is studied through compression tests following the ISO13314 standard. For this purpose, and from a single rectangular block of foam, 36 specimens with two geometries, cylindrical and parallelepiped, are extracted near the edge of the cellular structure and its central part. To verify whether the geometry of the specimens and the area of their extraction influence the mechanical properties, six hypotheses are proposed, which are then analyzed by statistical methods. The stress-strain diagrams obtained show the three expected regions for cellular materials: the elastic zone, the Plateau zone, and the densification zone. It is observed that, regardless of the shape and location of the samples, the densities, and the mechanical properties (Plateau stress, maximum compression stress, Young's modulus and energy absorption capacity) are statistically similar.

Keywords: aluminum foam, compression test, mechanical properties, statistical analysis.

1. Introducción

Banhart [1] define una espuma metálica como: “una clase especial de metales celulares que se originan a partir de espumas de metal líquido y, por lo tanto, tienen una morfología restringida; las células son cerradas, redondas o poliédricas y están separadas entre sí por películas delgadas de material”. En las últimas décadas se han desarrollado una gran cantidad de investigaciones en torno a las espumas metálicas debido a sus características únicas. Por ejemplo, su baja

densidad combinada con una alta rigidez, baja conductividad térmica y buena capacidad para absorber impactos y ruidos, han favorecido su uso en diversas aplicaciones tecnológicas como estructuras de soporte y protección en edificios, automóviles, aviones, barcos e incluso satélites, o como materiales biocompatibles para prótesis médicas o, también, intercambiadores de calor en sistema de refrigeración, entre otras. Dichas propiedades dependen del metal de la matriz, la topología de la celda (si esta es abierta o cerrada), y el tamaño y la forma de los poros internos [2]; factores

que están relacionados con el método de procesamiento y fabricación de este material [3].

Específicamente, las espumas metálicas se pueden manufacturar mediante diferentes métodos [2] [4] [5], como inyección de un gas (aire, nitrógeno o argón) en un metal fundido, la formación de espuma mediante la introducción de un agente generador de burbujas de gas (1-2% TiH₂, por ejemplo) o también al precipitar un gas previamente disuelto en el metal fundido bajo presión. En particular, la técnica de espumado a partir de un precursor manufacturado con metalurgia de polvos, brindando materiales de interés en el sector mecánico, es la que origina las muestras de espuma metálica utilizadas durante esta investigación. Esta técnica se basa en dos etapas principales, resumidas a continuación.

1. La aleación metálica y el agente expansor, en polvos, se compactan aplicando extrusión en caliente. El resultado de este proceso es un material precursor, denso y capaz de espumarse, que puede ser moldeado en láminas y perfiles utilizando métodos tradicionales de conformado de metales.
2. Los precursores son expuestos al calor y se expanden, desarrollando una estructura interna muy porosa constituida por células cerradas, rodeadas por superficies metálicas delgadas.

En general, estos procesos de espumado producen materiales celulares no homogéneos, con presencia de gradientes de densidad, células con formas aleatorias, e imperfecciones estructurales, como la variación en el tamaño de poros, espesor entre celdas no uniforme, y fracturas y grietas en las paredes celulares [6]. Estos “defectos” comprometen las propiedades mecánicas de la espuma metálica y causan gran dispersión en los valores experimentales.

Por esta razón, una caracterización de estos materiales luego de su manufactura cobra relevancia, pues se debe asegurar su estabilidad e integridad mecánica en cualquier punto de su estructura, independientemente de la distribución interna o espacial de estos defectos. Habitualmente, para determinar el comportamiento y propiedades mecánicas de las espumas metálicas, se traza una curva experimental de tensión-deformación bajo esfuerzos de compresión [6] [7] [8]. La Figura 1 brinda un diagrama típico de tensión-deformación de una espuma metálica tras aplicar una fuerza de compresión. En este diagrama, la zona I se relaciona con la región elástica inicial, donde las paredes de las celdas se doblan elásticamente con pequeñas deflexiones. Los defectos de la espuma generados durante el proceso de fabricación, como paredes celulares faltantes o fracturadas, proporcionan los centros de nucleación de las bandas de deformación. Además, las celdas con geometría elíptica y uniones de pared celular en forma de T, junto con los poros con paredes no planas, son los primeros en fallar. Por esto, las células vecinas se ven obligadas a deformarse para

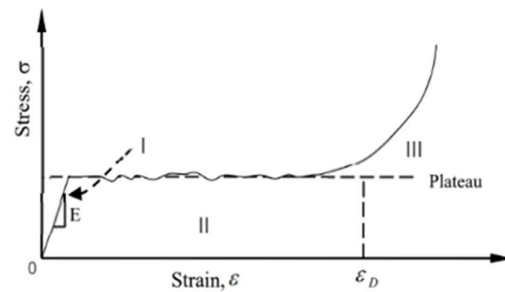


Figura 1. Diagrama característico de esfuerzo-deformación por compresión para espumas metálicas.
Fuente: tomado/modificado de [6]

adaptarse a estas imperfecciones. También, a medida que continúa la deformación macroscópica, el colapso de las paredes celulares disminuye la tensión macroscópica. Ahora, cuando las paredes de las celdas dentro de una misma banda de deformación entran en contacto entre sí, la tensión macroscópica vuelve a aumentar [3] [7] [8]. Sucesivamente, para el comportamiento de la zona II o región de Plateau se observa un colapso mayor de las células. La caída de las bandas de deformación produce oscilaciones en la curva tensión-deformación, donde el aire atrapado dentro de las células aumenta el estrés de Plateau, lo que permite, además, que la espuma absorba energía. Este colapso de las celdas se describe por diferentes mecanismos de falla: pandeo elástico, colapso plástico (flexión de la pared celular) o fractura quebradiza. En general, los dos primeros aparecen bajo las cargas de compresión, mientras que el tercero es causado por fluctuaciones en la tensión de Plateau. Por último, una mayor compresión conducirá a la compactación (zona III), proceso que también se denomina deformación por densificación. En esta región, al compactarse la estructura, las paredes de las celdas se cierran y entran en contacto; la espuma se consume en estas bandas y comienza la densificación, lo que produce que la tensión aumente exponencialmente [3] [4] [5].

La Tabla 1 muestra un resumen de algunos trabajos fundamentales en los cuales se han realizado pruebas experimentales en compresión, para algunas espumas metálicas fabricadas mediante diferentes procesos [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15]. Dicha tabla presenta una comparación entre la forma y densidad de las probetas, los parámetros utilizados durante las pruebas, y los valores obtenidos para el módulo de Young, límite elástico, tensión de Plateau y energía absorbida. Es importante señalar que las propiedades mecánicas de materiales porosos de aluminio han sido ampliamente estudiadas en los últimos años. Nisa et al. [6] da una revisión de la caracterización mecánica de espumas metálicas de aluminio, mostrando que la densidad relativa, el tamaño de los poros internos y la composición del material juegan un papel importante para determinar el comportamiento mecánico de estos

Tabla 2. Lista de geometrías de probetas y parámetros de prueba de compresión reportadas en literatura.

Método de Manufactura	Geometría de probeta (P) y parámetros prueba de compresión	Densidad [kg/m ³]	Módulo de Young [MPa]	Límite elástico en compresión [MPa]	Tensión Plateau [MPa]	Energía Absorbida	Ref.
Metalurgia de polvos. Diámetro medio de poro: 2.65 mm	P. cilíndricas de 25.32 mm diámetro y 23.08 mm altura; Velocidad de ensayo de 0.1 mm/s. (ISO 13314:2011).	628-713	5023.8	5-22	-	13.4 [J/g] al 50% de deformación, 29.27 [J/g] al 77% de deformación.	[9]
Duralcan F3S.20S Espumado directo con adición de un agente espumante.	P. cúbicas de 14.5×14.5× 14.5 mm; Velocidad 8.7 mm/min. (ISO 13314 standard)	627-717	500-1295	7-10	7-8	-	[10]
Espuma aluminio estilo sándwich, unida a láminas de aluminio sólido.	Celda de carga de 100 kN. Velocidad de ensayo 1.5 mm/min. (estándar ASTM C393).	-	-	88-320	-	13-60 J/m ³	[11]
Espuma de Aluminio	P. cilíndrica de 28 mm de diámetro con 29 mm de altura. Velocidad de ensayo de 0.1 y 284 mm/s. (ISO 13314:2011)	690-760	54-85	10-15	-	15 MJ/m ³	[12]
Espumado con polvos de TiH ₂ como aditivo en el metal fundido, tamaño de celda promedio de 2 mm Espesor de la pared celular entre 80 y 100 mm	P. rectangulares de 100x100x15 mm, con una celda de carga de 10 kN. Velocidad de ensayo constante de 0.5 mm/s. (estándar ASTM C365-05).	243	23.8	1.19	1.12	-	[13]
Mezcla de aluminio con polvo de TiH ₂ , proporción de la mezcla 99 wt % Al (ALCOA) y 1 wt % TiH ₂	Tasa de deformación $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. La compresión fue llevada a cabo en la misma dirección de crecimiento de la espuma.	587-601	-	8-15	-	-	[14]
Fundición de espuma Alporas, Alcan, y Alulight	Probetas cuboides de 25x25x50 mm y 50x50x150 mm Velocidad de ensayo 20 mm/s.	216	105 700 (ALCAN)	1-1.5	-	-	[15]

Fuente: elaboración propia.

elementos. El autor concluye que, al optimizar parámetros y seleccionar el método de formación adecuado, la compresión específica máxima puede alcanzar una resistencia alrededor de los 27,5 kN·m/kg. Es importante recordar que, en la literatura, es común encontrar que los diferentes ensayos de compresión realizados siguen estándares como el ISO 13314: 2011, ASTM C393 o ASTM C365-05. Como caso interesante, Ramamurty y Paul [16] demostraron que, al aumentar la altura de los especímenes, las tensiones disminuyen. Además, determinaron que existe una

interdependencia entre la altura de la muestra y la energía absorbida por ella. También, Grilec et al. [17] mostraron que la forma de la sección transversal de la muestra no influye en su capacidad de absorción de energía. Llama la atención la variedad reportada de geometrías y tamaños de las probetas, así como las diversas configuraciones usadas durante los ensayos y la cantidad de muestras estadísticamente reducida (5 repeticiones, según los diferentes estándares). La diferencia encontrada en los tipos de espumas utilizadas y la variabilidad en los parámetros de los

ensayos detallados hace interesante y necesaria una caracterización experimental, con un enfoque que asegure la significatividad estadística de los datos obtenidos. Por esta razón, la contribución principal de este trabajo es brindar resultados de caracterización mecánica por compresión basados en experimentos estadísticamente representativos, utilizando probetas con dos geometrías diferentes extraídas de una sola pieza de espuma de aluminio. Es decir, las probetas no se fabrican una a una, sino que se cortan de una sola pieza manufacturada. Con esta representatividad numérica de muestras, las cuales han sido tomadas de diferentes posiciones dentro de la matriz de la espuma metálica, se quiere responder a la hipótesis de si la geometría y zona de extracción de los especímenes afecta su respuesta y las características mecánicas obtenidas mediante pruebas de compresión.

2. Metodología

2.1. Preparación de probetas

La pieza original de una espuma de aluminio, con dimensiones de 166x155x40 mm, se manufacturó mediante el proceso de espumado en polvo, al utilizar precursores de una aleación AlSi10 mezclada con polvo de hidruro de titanio (TiH₂) al 0.80% en peso. Estos elementos fueron fabricados por la empresa austriaca Aluligh® GmbH (Ranshofen, Austria), siendo luego espumados en un horno de convección de laboratorio marca Nabertherm® GmbH (Lilienthal, Germany) En esta fase de espumado en horno, los elementos precursores son colocados dentro un molde con su cara XY perpendicular a la dirección de la gravedad, donde se debe regular posteriormente la temperatura y la velocidad de calentamiento hasta alcanzar un valor de 680°C. En la Figura 2 se brinda el

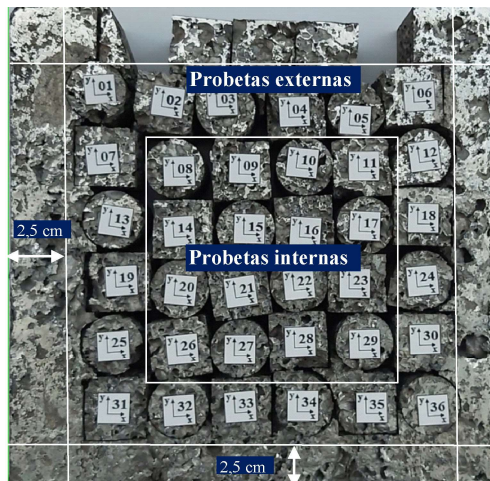


Figura 2. Vista superior de la pieza de espuma de aluminio utilizada y las diferentes probetas cortadas.
Fuente: elaboración propia.

componente de espuma con las probetas cortadas; se muestran los dos ejes XY, donde la dirección Z de la gravedad es perpendicular al mismo plano XY. De acuerdo con la ISO 13314 [18], se pueden utilizar probetas con geometría cilíndrica o paralelepédica para aplicar los ensayos de compresión; por esto, se extrajeron 18 especímenes de cada forma cortándolos con el método de mecanizado por descarga eléctrica (EDM, por sus siglas en inglés). Siempre la Figura 2 ilustra un diagrama espacial de las muestras cortadas, donde se ha descartado un sector de 2,5 cm de amplitud, tanto en el ancho como en el largo de la zona de corte de la espuma. Esto con el fin de evitar el efecto del aumento de la densidad cerca de los bordes, consecuencia del bajo crecimiento de los poros, causado por el proceso de enfriamiento del molde desde el exterior. Las dimensiones de las muestras cilíndricas corresponden a 2 cm de diámetro y 4 cm de longitud, mientras las probetas con forma de paralelepípedo son de 2x2x4 cm, siguiendo las indicaciones de la norma ISO antes mencionada. Las muestras extraídas de la región central en la Figura 2 son aquellas de la zona interna de la espuma, por lo que son llamadas probetas internas (PI), mientras que las delimitadas por los dos cuadros blancos son llamadas probetas externas (PE). Cada espécimen se identifica con un número que le da trazabilidad basado en su forma y posición.

2.2. Planteamiento de hipótesis

Las hipótesis están planteadas para responder a la pregunta de si la geometría de las probetas y la zona de extracción de ellas afectan las propiedades mecánicas

Tabla 2. Hipótesis para características mecánicas.

Hipótesis (H)	Planteamiento
1. P.E: Cilíndrico - Paralelepípedo	Las características mecánicas de las PE son independientes de la geometría
2. PI: Cilíndrico - Paralelepípedo	Las características mecánicas de las PI son independientes de la geometría
3. Cilíndricas: PE-PI	Las características mecánicas de probetas cilíndricas son independientes de zona de extracción
4. Paralelepípedo: PE-PI	Las características mecánicas de las probetas paralelepípedos son independientes de zona de extracción
5. Geometría	Las características mecánicas de toda probeta varían por geometría, son independientes de la zona de extracción
6. Ubicación	Las características mecánicas varían según zona de extracción, denotando con 1: PE, 2: PI, independientes de la forma

Fuente: elaboración propia.

obtenidas mediante las pruebas de compresión. La Tabla 2 muestra la totalidad de estas posibilidades. Sucesivamente, con los diversos datos experimentales recolectados, se utiliza la prueba estadística t-Student para comparar medias y se verifican las hipótesis de normalidad con prueba de Anderson Darling y comparación de varianzas con prueba F.

2.3. Equipo y caracterización de probetas

La composición química de la espuma fue obtenida mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS, por sus siglas en inglés, “Energy-dispersive X-ray Spectroscopy”). La masa de las probetas utilizadas fue medida con una balanza analítica, mientras que su altura y diámetro con el uso de un Vernier. A partir de estos datos, se obtuvo la densidad de cada muestra (ρ_{Espuma}) y la densidad relativa ($\rho_{Relativa}$) usando la siguiente relación

$$\rho_{Relativa} = \frac{\rho_{Espuma}}{\rho_{Material}} \quad (1)$$

donde $\rho_{Material}$ es la densidad del material sólido que conforma la espuma, en este caso, aluminio. Posteriormente, el porcentaje de porosidad de cada probeta (% Porosidad) fue obtenido por medio de la ecuación

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{\rho_{Material} - \rho_{Espuma}}{\rho_{Material}} * 100 \quad (2)$$

Las pruebas de compresión se realizaron en un equipo marca MTS Bionix (Eden Prairie, MN, USA) con una celda de carga de 25 kN, a una velocidad de $0.1 \frac{mm}{s}$, y una precarga de 150 N, y siguiendo la norma estándar ISO 13314 [18].

Los especímenes se ensayaron aleatoriamente para minimizar el error. La fuerza y el desplazamiento fueron medidos por la máquina y, a partir de ellos, se trazaron las curvas de tensión-deformación para cada muestra. Para identificar visualmente las bandas de deformación, y sabiendo que durante el proceso de compresión se da una reacción exotérmica en el material debido a la deformación plástica, las pruebas se filmaron tanto con una cámara normal, como con un sistema termográfico FLIR I50 (Wilsonville, OR, USA) con una emisividad de 0,96 [12] [19] [20].

La capacidad de absorción de energía EA de la espuma es igual al área bajo la curva del diagrama de esfuerzo-deformación (Figura 1), y se puede calcular como sigue

$$EA = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

donde ϵ_1 y ϵ_2 son los valores de deformación en un intervalo interés, y $\sigma(\epsilon)$ es la respuesta en tensión o esfuerzo del material, y que es dependiente de la deformación.

3. Resultados y discusión

La Tabla 3 resume la composición química obtenida para la pieza de espuma de aluminio.

Tabla 3. Composición química de la espuma metálica.

Elemento	Al	O	Cu
Porcentaje	63.4	35.8	0.9

Fuente: elaboración propia.

Se descartaron 9 de las 36 probetas: la 1, 15, 34 y 36 con forma cilíndrica, y los paralelepípedos 2, 14, 16, 31 y 33. El principal motivo de esta eliminación obedeció al hecho de que las propiedades mecánicas de estas probetas no se lograron calcular siguiendo la norma ISO 13314, pues el comportamiento obtenido para la curva tensión-deformación no contaba con las fases adecuadas. Probablemente, los resultados de algunas de estas muestras fueron influenciados por defectos internos de la espuma, mientras otras tantas ya presentaban una deformación previa al ensayo, como fue el caso de la probeta número 15 y 33.

Las densidades de las 36 probetas se muestran en Figura 3, cuya media es de $0,4256 \text{ g/cm}^3$, sin embargo, la densidad media de las 27 muestras restantes, luego del proceso de descarte, es de $0,4144 \text{ g/cm}^3$ con una desviación estándar media de $0,0104 \text{ g/cm}^3$.

Mediante la prueba t-Student para dos muestras se compararon las densidades medias para ambas geometrías, arrojando un resultado del valor p de 0,932, por lo que la densidad de probetas con geometría paralelepípedo es estadísticamente igual a la densidad de la geometría cilíndrica. Esta misma conclusión se obtiene al comparar las probetas de las zonas interna y externa de la muestra de espuma, con valor p de 0,238; en ambos casos las muestras tienen un comportamiento normal y varianzas estadísticamente equivalentes.

La Figura 4 ilustra la deformación de una probeta tipo paralelepípedo durante el ensayo de compresión. Se puede notar que las primeras bandas de deformación se dan en la parte superior de la muestra (Figura 4.a,

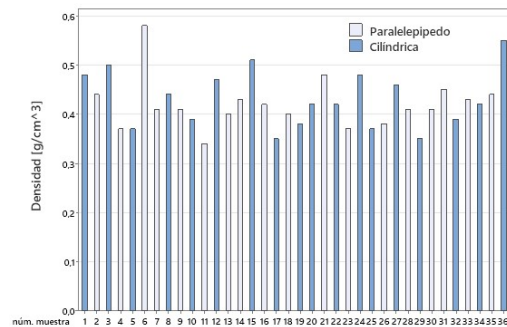


Figura 3. Densidad media de las 36 probetas.

Fuente: elaboración propia.

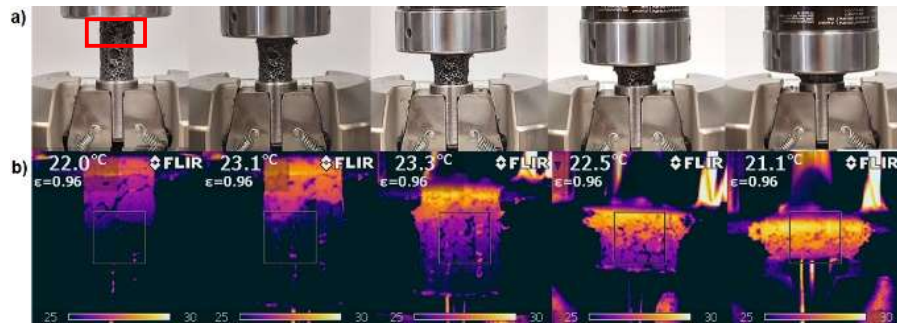


Figura 4. Deformación de probeta de espuma de aluminio registrada en **a)** cámara normal, y **b)** cámara termográfica.
Fuente: elaboración propia.

recuadro en rojo), y son consecuencia directa de los defectos antes comentados. A partir de las imágenes IR (Fig. 4.b), se logra confirmar que la mayoría de las bandas de deformación se presentan en la parte superior de la muestra, cerca de la carga aplicada.

También, se observan diferentes bandas de deformación, orientadas paralelas a la carga, y distribuidas en la espuma. Posteriormente, a medida que se comprime más y más el espécimen, la estructura porosa de la muestra colapsa capa por capa, lo cual se atribuye a la continua evolución de las bandas de deformación ya existentes y la formación de otras nuevas [6].

En la Figura 5 se presentan los diagramas de tensión-deformación obtenidos para las probetas con forma cilíndrica (Figura 5.a) y con forma de paralelepípedo (Figura 5.b). Se logra apreciar en estas curvas las tres regiones de comportamiento esperadas para este tipo de materiales: la zona elástica, la zona de Plateau y la zona de densificación. El límite elástico resultante es, en promedio, de 240 MPa. Este valor es menor en comparación con los reportados en trabajos previos

(ver Tabla 1), lo cual se debe a la baja densidad de las espumas utilizadas en este estudio (entre 0,3 y 0,6 g/cm³). La región elástica de las espumas es pequeña debido a la estructura celular anisotrópica, irregular y heterogénea. Esto determina una distribución desigual de esfuerzos y deformación, con deformación plástica local aun a bajas cargas [21] [22]. Después de sobrepasar la región elástica inicial, las paredes celulares comienzan a doblarse y combarse dando como resultado la tensión de Plateau. Esta región es la responsable de la alta capacidad de absorción de energía que muestran los materiales celulares [23] [24]. Por último, conforme aumenta la deformación, las paredes celulares se fracturan y luego colapsan gradualmente, generando la densificación de la estructura celular.

La Figura 6 traza la capacidad de absorción de energía EA para las probetas cilíndricas (Figura 6.a) y para las muestras en forma de paralelepípedo (Figura 6.b). Se observa que los especímenes con forma de paralelepípedo presentan una mayor capacidad de EA que las probetas de forma cilíndrica.

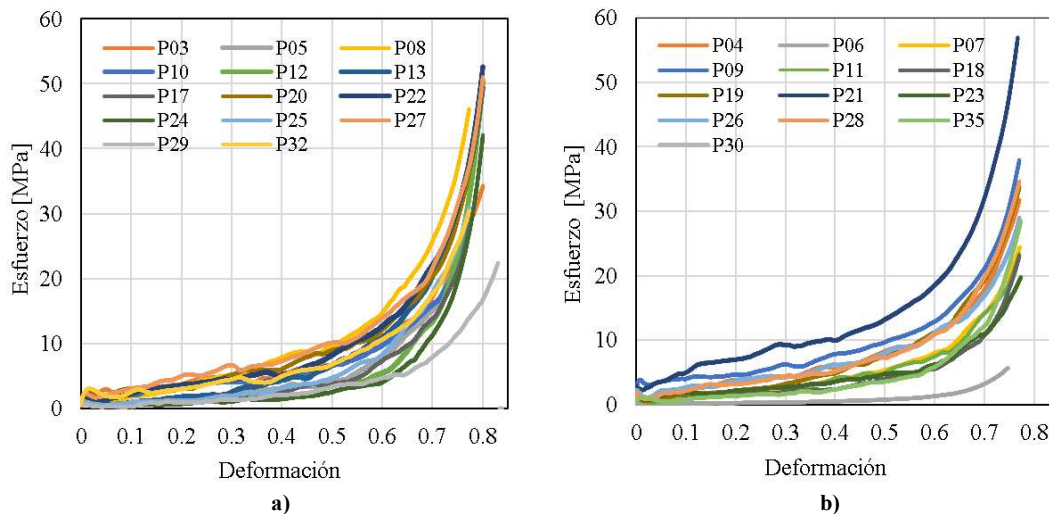


Figura 5. Diagramas de esfuerzo-deformación para las probetas de espuma con forma **a)** cilíndrica, y **b)** paralelepípedo.
Fuente: elaboración propia.

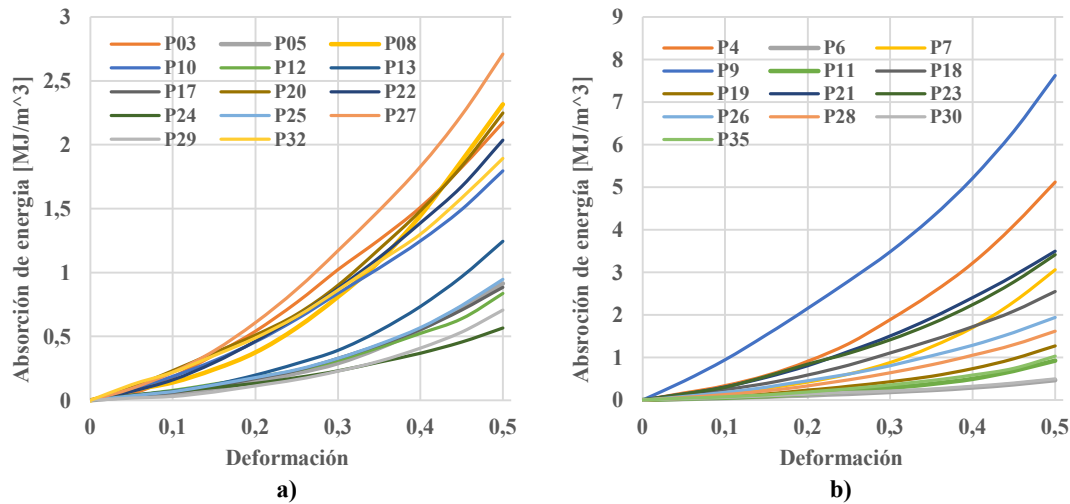


Figura 6. Capacidad de absorción de energía para las probetas de espuma con forma **a)** cilíndrica, y **b)** paralelepípedo. Fuente: elaboración propia.

Ahora, en la Figura 7 se presenta la influencia de la densidad del material en la capacidad de absorción de energía de las espumas de aluminio. Ambas muestras tienen una tendencia de aumentar el valor de EA cuando se incrementa la densidad de la espuma. Este comportamiento se evidencia en la ecuación de regresión, primero para las probetas cilíndricas, la cual es $-0,75 + 5,50\rho$, y sucesivamente para los especímenes paralelepípedos, donde corresponde a $1,47 + 3,1\rho$, pero con una variabilidad muy alta. Esta inestabilidad de los datos se ve reflejada al notar que la probeta P9 es la que reporta mayor y mejor capacidad de absorción con valores de $7,63 \text{ MJ/m}^3$, pero con una densidad de $0,410 \text{ g/cm}^3$. En la literatura se encuentra que la capacidad de absorción de energía es de entre $0,9\text{-}13 \text{ MJ/m}^3$ para espumas de aluminio con porosidades entre 40 y 80% [12] [17] [23], lo cual concuerda con los resultados obtenidos.

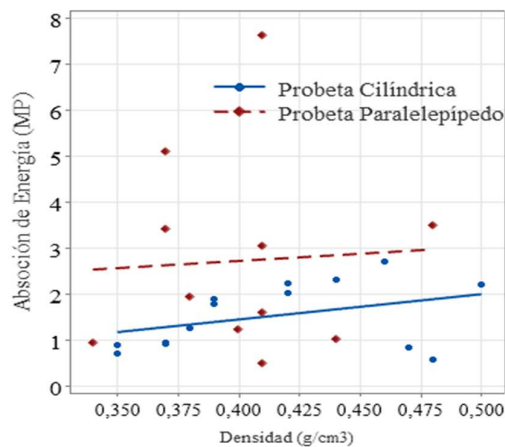


Figura 7. Relación entre capacidad de absorción de energía y densidad de probetas. Fuente: elaboración propia.

La Figura 8 muestra el módulo de Young para ambas geometrías de muestra. Se observa que la mayoría de los valores están por encima de 50 MPa y por debajo de 400 MPa. Las probetas cilíndricas presentan valores más consistentes que las probetas con forma de paralelepípedo. Teóricamente, cuanto mayor es la densidad, mayor es la rigidez de la muestra, por lo tanto, mayor es el módulo de Young. Sin embargo, la probeta 6 presenta alta densidad y un módulo de Young muy bajo, mientras que las probetas 21 y 25 arrojan baja densidad y alto módulo de Young.

En la Figura 9 se observa la relación entre el módulo de Young y la densidad. Debido a la alta inestabilidad que aportaban las probetas 6, 7, 21, 25, 30 y 35 se decidió excluirlas de este análisis de regresión. Para las probetas de forma cilíndrica, hay una ligera tendencia del módulo de Young a aumentar, lo cual se comprueba al obtener su ecuación de regresión, que sigue la relación $82 + 341\rho$, mientras que para las probetas

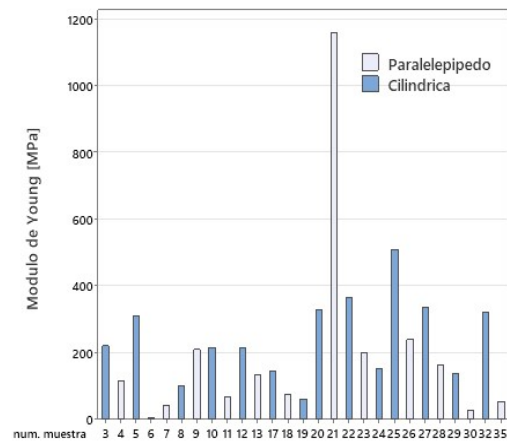


Figura 8. Módulo de Young para cada probeta. Fuente: elaboración propia.

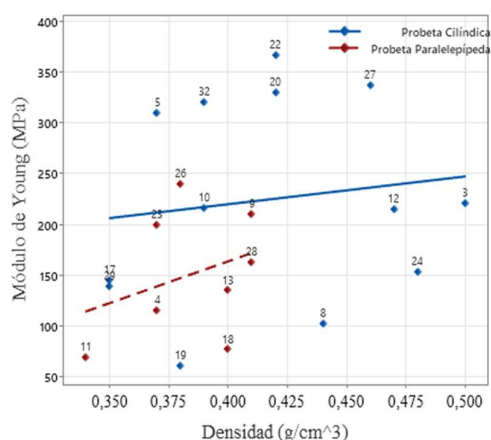


Figura 9. Relación entre el Módulo de Young y la densidad de las probetas. Fuente: elaboración propia.

tipo paralelepípedos es de $19 + 342\rho$, ambas con una pendiente similar.

La Tabla 4 resume la media y la desviación estándar de la media para las probetas de aluminio ensayadas y según las hipótesis analizadas. En la Tabla 5 se muestran los valores p de las pruebas estadísticas de normalidad, homogeneidad en varianza e igualdad en media. La normalidad que no supera la prueba de Anderson Darling es evaluada con la prueba de Ryan Joiner (RJ). Los valores p resultantes son contrastados contra un error tipo I de 0,05. Para la propiedad del módulo de Young, las muestras ubicadas en la zona externa con forma cilíndrica (H1) muestran 190 unidades más de este indicador que las de tipo

paralelepípedo, obteniendo un rechazo de la hipótesis de medias iguales. La H6 también rechaza que el módulo de Young sea el mismo para probetas de ambas geometrías, independiente de la zona de extracción.

El límite elástico a compresión para probetas paralelepípedos en H5 son diferentes de acuerdo con la zona de extracción; se obtiene el mismo resultado comparando el límite elástico de probetas ubicadas en ambas zonas, H6, independiente de la forma. En todas las hipótesis, los valores medios de las densidades se presentan dentro del rango de 0.4 a 0.43g/cm³, con valores moderados de desviación estándar. Se aprecia que las muestras con geometría de paralelepípedo y cercanas al borde poseen mayor densidad que las muestras cilíndricas y centradas, pues durante el proceso de fabricación, los poros se van compactando cerca de los bordes por efecto de la solidificación que procede desde el exterior, lo que produce un aumento de la densidad de la espuma en estos lugares [24]. Finalmente, para la zona Plateau, en general, las probetas internas y externas, independientemente de la geometría, tiene una tensión de Plateau diferente, de acuerdo con H6; H1 sugiere que las probetas de ambas geometrías con valores de tensión diferentes son las de la zona externa.

En general, los resultados relacionados con las características mecánicas de elasticidad, resistencia a la deformación en compresión, densidad, tensión de Plateau, son estadísticamente independientes de la forma y la ubicación de la muestra. Esto indica que existe una cierta homogeneidad de las propiedades mecánicas de una pieza de espuma metálica, a pesar de que tenemos las excepciones de las hipótesis H1 y H6,

Tabla 4. Propiedades mecánicas de la espuma de aluminio obtenidos por medio de ensayos de compresión.

H	Geometría/ Localización	Modulo de Young [MPa]		Límite elástico a compresión [MPa]		Densidad [g/cm³]		Plateau [MPa]	
		media	error estándar de la media	media	error estándar de la media	media	error estándar de la media	media	error estándar de la media
1	C	255,900	54,100	1,360	0,305	0,420	0,022	2,500	0,480
PE	P	64,800	17,600	0,910	0,151	0,430	0,026	4,580	2,670
2	C	233,600	41,500	1,770	0,250	0,400	0,016	3,990	0,650
PI	P	176,2*	29,500	2,150	0,420	0,400	0,02	3,980	0,880
3	PE	255,900	54,100	1,360	0,310	0,420	0,022	2,500	0,480
C	PI	233,600	41,500	1,770	0,250	0,400	0,016	3,990	0,650
4	PE	64,800	17,600	0,910	0,150	0,430	0,026	4,580	2,670
P	PI	340,000	165,000	2,150	0,420	0,400	0,02	3,980	0,880
5	C	244,800	32,900	1,560	0,200	0,410	0,013	3,250	0,440
G	P	191,700	83,100	1,480	0,270	0,420	0,017	4,300	1,440
6	PE	160,400	38,100	1,130	0,180	0,430	0,016	3,540	1,340
U	PI	282,600	77,100	1,940	0,230	0,400	0,012	3,990	0,510

H: Hipótesis, PE: Probeta Externa, PI: Probeta Interna, C: Cilíndrica, P: Paralelepípedo, G: Geometría, U: Ubicación.

*Se eliminó un punto considerado anómalo

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Valores p para pruebas de normalidad con test Anderson Darling, test F de igualdad de varianzas y test t para igualdad de medias, para las 6 hipótesis establecidas.

		Modulo de Young [MPa]			Límite elástico a compresión [MPa]			Densidad [g/cm³]			Plateau [MPa]		
H	Geometria/ Localización	normal	igualdad varianza	igualdad medias	normal	igualdad varianza	igualdad medias	normal	igualdad varianza	igualdad medias	normal	igualdad varianza	igualdad medias
1	C	0,658	0,015	0,006	0,010*	0,110	0,212	0,054	0,067	0,837	0,221	0,001	0,047
PE	P	0,756			0,100*			0,010*					
2	C	0,195	0,000	0,561	0,142	0,313	0,435	0,440	0,778	0,817	0,367	0,429	0,987
PI	P	0,010*			0,906			0,513			0,563		
3	PE	0,685	0,535	0,750	0,010*	0,636	0,322	0,054	0,486	0,507	0,221	0,491	0,089
C	PI	0,195			0,142			0,440			0,367		
4	PE	0,756	0,000	0,096	0,376	0,040	0,013	0,010*	0,436	0,367	0,010	0,020	0,844
P	PI	0,010*			0,906			0,513			0,563		
5	C	0,510	0,136	0,003	0,017	0,355	0,807	0,391	0,502	0,932	0,100	0,000	0,476
G	P	0,531**			0,084			0,011			0,01*		
6	PE	0,114	0,187	0,318	0,010*	0,399	0,009	0,035	0,239	0,238	0,518	0,189	0,010
U	PI	0,520*			0,591			0,837			0,749		
*test RJ	** eliminación de un dato anómalo												

Fuente: elaboración propia.

donde los valores en el módulo de Young son estadísticamente diferentes; mientras que los límites elásticos a compresión son diferentes para las H5 y H6.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un estudio estadístico del comportamiento mecánico y de las propiedades de una espuma de aluminio, realizando ensayos experimentales de compresión con muestras representativas de dos geometrías de probetas, extraídas de una sola pieza de material celular. Se observa que, independientemente de la geometría y ubicación de los ejemplares ensayados, las densidades son estadísticamente iguales.

Según las imágenes IR, la mayoría de las bandas de deformación se presentan en la parte superior de la muestra, y cercanas a la carga aplicada, mientras que las restantes se encuentran distribuidas a lo largo de la espuma, y orientadas de manera paralela a la carga de compresión.

Los diagramas de tensión-deformación muestran las tres zonas esperadas para materiales celulares: la zona elástica, la zona de Plateau y la zona de densificación. Las diversas propiedades mecánicas estudiadas, como el módulo de Young y la capacidad de absorción de energía, son proporcionales a la densidad del material para tanto probetas cilíndricas como especímenes tipo paralelepípedos. Se demuestra, además, que las probetas ensayadas poseen una buena capacidad de absorción de energía entre 1-9 MJ/m³.

Los valores medios del módulo de Young, el límite elástico a la compresión, la densidad y la tensión de

Plateau son de 244,8 MPa, 0,2 MPa, 0,41 g/cm³ y 3,25 MPa para las probetas cilíndricas, respectivamente; y de 191,7 MPa, 1,48 MPa, 0,42 g/cm³ y 4,3 MPa para los especímenes con forma de paralelepípedo, respectivamente.

Los resultados de las pruebas estadísticas brindan diferencias estadísticamente significativas para módulo de Young en relación con la forma de la probeta y límite elástico a compresión con relación a la ubicación; mientras que para el resto de los indicadores las pruebas son estadísticamente independientes de la forma y la ubicación de la muestra. Concluimos que existe una cierta homogeneidad de las propiedades mecánicas de una pieza de espuma metálica, que son en general independientes de la forma de la probeta y de la ubicación de su extracción.

Durante el proceso de corte de las probetas y posterior ejecución de las pruebas de compresión, se observa que es necesario descartar ciertos especímenes por razones relacionadas a defectos en su estructura, fallas súbitas durante el ensayo o resultados de indicadores inusuales que no pueden ser utilizados como valores confiables en un análisis estadístico. Esto revela que la cantidad de muestras que el investigador debe considerar y fabricar para el diseño y desarrollo de sus experimentos requiere de una mayor atención que la señalada por la norma ISO 13314:2011. Por ejemplo, solo durante esta investigación, el 25% de las probetas tuvieron que ser descartadas por las razones antes descritas. Esto indica que la cantidad de probetas debe siempre asegurar la representatividad del proceso y la confianza de que los resultados obtenidos pueden ser tomados como referencia.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, a través del proyecto 5402-1351-2301.

6. Referencias

- [1] J. Banhart, «Manufacturing Routes for Metallic Foams», *JOM*, vol. 52, n° 12, pp. 22-27, 2000.
- [2] I. Polmear, D. StJohn, N. Jian-Feng y M. Qian, *Light Alloys - Metallurgy of the Light Metals*, UK: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [3] O. Faruk, J. Tjong y M. Sain, *Lightweight and Sustainable Materials for Automotive Applications*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- [4] C. Ji, H. Huang, T. Wang y Q. Huang, «Recent advances and future trends in processing methods and characterization technologies of aluminum foam composite structures: A review», *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 93, pp. 116-152, 2023.
- [5] M. Madgule, C. G. Sreenivasa y A. Borgaonkar, «Aluminium metal foam production methods, properties and applications - a review», *Materials Today: Proceedings*, vol. 77, pp. 673-679, 2023.
- [6] S. Nisa, S. Pandey y P. Pandey, «A review of the compressive properties of closed-cell aluminum metal foams», *Journal of Process Mechanical Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E*, vol. 237, n° 2, pp. 531-545, 2023.
- [7] A. G. Hanssen, A. Reyes, O. S. Hopperstad y M. Langseth, «Design and finite element simulations of aluminium foam-filled thin-walled tubes», *Journal Vehicle Design*, vol. 37, pp. 126-155, 2005.
- [8] K. R. Mangipudi, «Multiscale Modelling of Deformation and Fracture in Metal Foams», University of Groningen, 2012.
- [9] N. Novak, M. Vesenjaj, I. Duarte, S. Tanaka, K. Hokamoto, L. Krstulović-Opara, B. Guo, P. Chen y Z. Ren, «Compressive Behaviour of Closed-Cell Aluminium Foam at Different Strain Rates», *Rev. Materials*, vol. 12, n° 24, 2019.
- [10] T. Mankovits, T. Antal, S. Manó y I. Kocsis, «Compressive Response Determination of Closed-Cell Aluminium Foam and Linear-Elastic Finite Element Simulation of μ CT-Based Directly Reconstructed Geometrical Models», *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 64, n° 2, pp. 105-113, 2018.
- [11] N. Endut, M. A. Hazza, A. Sidek, E. Adesta y N. Ibrahim, «Compressive Behaviour and Energy Absorption of Aluminium Foam Sandwich», *Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 290, n° 1, 2018.
- [12] I. Duarte, M. Vesenjaj y L. Krstulović-Opara, «Compressive behaviour of unconstrained and constrained integral-skin closed-cell aluminium foam», *Composite Structures*, vol. 154, pp. 231-238, 2016.
- [13] X. Wang y Z. Guangtao, «The static compressive behavior of aluminum foam», *Journal of Advanced Materials Science*, vol. 33, pp. 316-321, 2013.
- [14] F. Haag, A. Galio y L. SchaeVer, «Uniaxial compression tests of aluminium foams», *Journal of Engineering Manufacture, part B. IMechE*, vol. 216, n° 4, 2001.
- [15] Y. Sugimura, J. Meyer, M. He, H. Bart-Smith y J. A. Evans, «On the mechanical performance of closed cell AL alloy foams», *Acta Materialia*, vol. 45, n° 12, pp. 5245-5259, 1997.
- [16] U. Ramamurty y A. Paul, «Variability in mechanical properties of a metal foam», *Acta Materialia*, vol. 52, pp. 869-876, 2004.
- [17] K. Grilec, G. Maric y J. Suzana, «A Study On Energy Absorption of Aluminium Foam», *Berg-Und Huttenmannische Monatshefte*, vol. 155, n° 5, pp. 231-234, 2010.
- [18] International Organization for Standardization, «ISO 13314:2011 - Mechanical testing of metals Ductility testing Compression test for porous and cellular metals», 2011.
- [19] FLIR, «FLIR i50 (2010 model)», 2010. [En línea]. Available: [http://userequip.com/files/specs/5593/FLIR%20i50%20\(2010%20model\).pdf](http://userequip.com/files/specs/5593/FLIR%20i50%20(2010%20model).pdf).
- [20] FLIR, «The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals», 2015. [En línea]. Available: <https://vault.flir.com/file/asset/18320/original?token=8df9f33c-ebf4-43ce-897e-4fdeb4672a18>.
- [21] L. J. Gibson y M. F. Ashby, *Cellular solids: Structure and Properties*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [22] H. P. Degischer y B. Kriszt, *Metallic Foams: Their production, Properties and Applications*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2002.
- [23] S. Hassan y M. Sadek, «Aluminum Foam Sandwich with Adhesive Bonding: Computational Modelling», Universidad de Porto, Portugal, 2016.
- [24] C. Koerner, *Integral Foam Molding of Light Metals: Technology, Foam Physics and Foam Simulation*, Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2008.