

MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A COMPRESIÓN DE ESPONJAS DE ALUMINIO

Patricia Fernández Morales^{1}, Santiago del Río², Emigdio Mendoza²*

1: Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

2: Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

*Contacto: patricia.fernandez@upb.edu.co

RESUMEN

Actualmente, se viene trabajando fuertemente en el procesado y caracterización de metales celulares, gracias a las ventajas que estos materiales brindan para potenciales aplicaciones. Sin embargo, dada su estructura porosa, algunas propiedades mecánicas de dichos materiales se consideran aún de difícil determinación. A fin de contribuir en el conocimiento de estos materiales desde el punto de vista estructural, en el presente trabajo se simuló el comportamiento mecánico a compresión de esponjas de aluminio partiendo de un modelo CAD simplificado de una estructura porosa ideal, para analizar la respuesta computacional del material modelado, haciendo uso del software COMSOL. Como un acercamiento a la estructura celular, se analizaron dos posible escenarios: i) muestra de poros esféricos y, ii) muestra con poros cúbicos. A partir de la simulación, se dio lugar a una contrastación entre la curva esfuerzo-deformación numérica con la curva esfuerzo-deformación experimental generada a partir de pruebas de compresión. Se obtuvo del modelo computacional una respuesta numérica del comportamiento mecánico a compresión de las esponjas de aluminio, lo cual contribuye a un mejor entendimiento de estos materiales previo a su aplicación, y se convierte en una herramienta de estudio para su perfeccionamiento, dado que cada metal celular difiere en su estructura en virtud del proceso de fabricación que se utilice para su obtención.

Palabras Clave: *Metales Celulares, Modelamiento, Simulación, Comportamiento Mecánico*

ABSTRACT

Currently, a hard work is has been doing around the world in the processing and characterization of cellular metals, due to the advantages that these materials provide for potential applications. However, due to its porous structure, certain mechanical properties of these materials are still considered difficult to determine. To help in the understanding of these materials from the structural viewpoint, this paper simulated the compressive mechanical behavior of aluminum sponges starting from a simplified CAD model of an ideal porous structure, in order to analyze the computational response in the patterned material, using COMSOL software. As an approach to the cell structure, two possible scenarios were discussed: i) specimen with spherical pores and ii) specimen with cubic pores. With the simulation results, a contrasting was made between the numerical stress-strain curve and the experimental stress-strain curve generated from the compression tests. A numerical answer about the compressive mechanical behavior of aluminum sponges was obtained from the computing model, which contributes to a better understanding of these materials prior to their implementation, and it becomes a study tool for improvement because each metal cell is different in structure by virtue of the manufacturing process that is

used to obtain it.

Keywords: *Cellular Metals, Modeling, Simulation, Mechanical Behavior*

1 INTRODUCCIÓN

Los materiales celulares (MC) se posicionan dentro de la sociedad moderna como un tipo de material novedoso, el cual por efecto de su estructura porosa, posee un grupo de características mecánicas particulares que lo remiten a un número de aplicaciones estructurales de alto interés en diferentes sectores. No obstante, determinar sus propiedades mecánicas se dificulta fuertemente debido a la naturaleza aleatoria de la estructura porosa otorgada por los procesos de producción existentes. A raíz de lo anterior, se han estado desarrollando modelos numéricos con el fin de validar las pruebas experimentales necesarias para conocer las propiedades mecánicas de dichos metales celulares. El reto de la simulaciones numéricas reside en la generación de un modelo CAD que permita predecir y contrastar la curva esfuerzo-deformación numérica frente a la información experimental.

En la literatura se reportan configuraciones geométricas tales como el modelo de celda, el cual consiste de un cubo hueco desprovisto de la cara superior en inferior, y en cuyo interior se encuentra una esfera. Este modelo permite generar un acercamiento entre los resultados teóricos y los experimentales [1]. Existen otros modelos los cuales llevan mejoras incorporadas, donde se contempla el uso de elipses [2] o poros elípticos [3] en lugar de esferas. Este tipo celda permite reproducir la variación en la densidad del material en todo su volumen [2]. En este trabajo se aborda la validación de pruebas experimentales a compresión realizadas sobre esponjas metálicas base aluminio de poro abierto de 2mm, partiendo desde la elaboración de un modelo CAD apropiado para obtener a compresión la curva esfuerzo-deformación numérica y compararla con la curva experimental.

2 SIMULACIÓN DE LA ESPONJA METÁLICA

2.1. Fabricación de las muestras y ensayo mecánico de las mismas

Se fabricaron esponjas de aleación de aluminio A356 mediante el proceso de infiltración de preformas solubles (IPS), utilizando preformas de NaCl. Se obtuvieron esponjas con tamaños de poros de 0.5, 1.0 y 2.0 mm, densidades relativas promedio de 0.35 y 65% de porosidad (ver figura 1a). Sobre las esponjas se realizaron ensayos a compresión bajo norma ASTM E9 en una máquina Universal de ensayos marca INSTRON 5582 a una velocidad de 0.5mm/s aplicando la carga hasta alcanzar un 70% de la deformación.

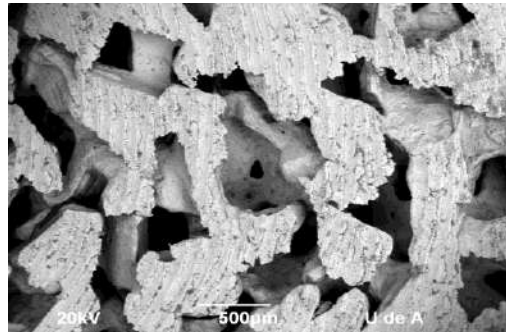


Figura 1. Estructura celular de esponjas obtenidas por IPS usando preformas de sal

La estructura porosa de las esponjas metálicas difiere de la que poseen las espumas, por lo que es evidente el uso de configuraciones distintas para su simulación, tal como cuerpos cúbicos simples y cuerpos centrados los cuales emulan los “struts” o bordes de celda que caracterizan las esponjas metálicas [4]. En términos generales, dependiendo de la calidad del resultado que se desee obtener, se pueden emplear agrupaciones de diferentes celdas para obtener el comportamiento de MC a partir de configuraciones tetraédricas, prisma triangular, prisma rectangular, entre otros [5].

2.2. Modelo CAD de la estructura celular

La figura 2 ilustra los dos modelos CAD elaborados en el software *Autodesk Inventor*. Estos comprenden una estructura porosa abierta conformada por cubos y esferas los cuales poseen un patrón de repetitividad particular distribuido a lo largo y ancho de cada probeta. Las celdas cubicas fueron diseñadas con cubos de 3mm, mientras que las celdas esféricas con un diámetro de 2.5mm. Con el fin de evaluar el efecto de orientación las estructuras fueron rotadas un ángulo de 45°. El proceso de mallado al cual se sometió a cada modelo CAD fue realizado con elementos triangulares y se necesitó un mayor número de elementos finitos al girar la estructura a 45°. Con el fin de disminuir los requerimientos computacionales, se decidió establecer una malla relativamente burda en los discos sólidos que generan la compresión de la esponja, dando prioridad al refinamiento de la estructura porosa comprendida entre ellos.

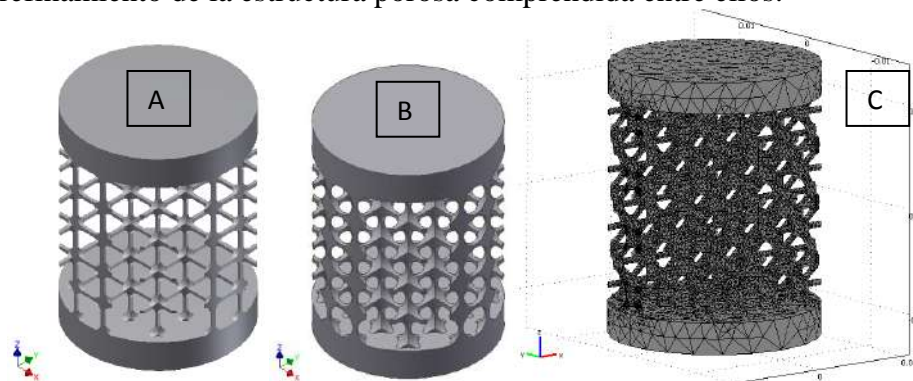


Figura 2. Modelos CAD: a) Probeta de celdas cubicas de 3mm, b) Probetas de celdas esféricas de 2.5mm de diámetro y c) mallado de la estructura de cubos a 45°.

2.3 Parametrización de la de las condiciones de simulación

Dentro del proceso de simulación de los modelos CAD, es necesario conocer algunos datos específicos relacionados con el metal matriz de la esponja, los cuales se listan en la tabla 1 y se constituyen en las propiedades mecánicas del material empleadas como información de entrada para el software COMSOL.

Tabla 1. Propiedades Mecánicas del material

Propiedad	Valor
Material	A356-T6
Módulo de Young	6.2 GPa
Módulo de Tangencia	687 MPa
Esfuerzo de Fluencia	160 MPa
Densidad	2700 kg/m ³

Entre los datos presentados en la tabla anterior, el módulo de tangencia es una variable crítica, ya que determina el comportamiento del material en la zona plástica. Matemáticamente, representa la pendiente sobre cada punto de la curva en dicha zona, por tal motivo, su valor debe cambiar en función de la deformación [6]. Sin embargo, determinarlo implica hacer uso de los modelos matemáticos reportados en la literatura, destacándose las ecuaciones de Ramberg Osgond y Rusch modificado, los cuales se ubican como los más adecuados para su cuantificación [7-8]. No obstante, para efectos de la simulación se decidió adoptar una función lineal representada por el valor de 687 MPa, el cual fue extraído de la curva esfuerzo-deformación experimental del material base de la esponja metálica, la cual puede ser visualizada en la figura 3 [9].

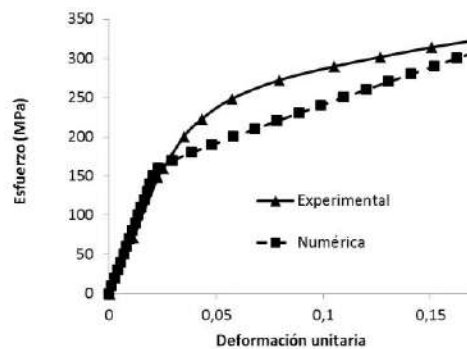


Figura 3. Curva esfuerzo-deformación a compresión del material completamente sólido para la aleación de aluminio A356-T6

La tabla 2, ilustra las condiciones de frontera que fueron utilizadas en la simulación de cada uno de los casos simulados. El factor de carga (f) es un parámetro definido dentro de la simulación el cual determina la variación de la carga.

Tabla 2. Condiciones de frontera

Restricciones de movimiento	
Cara superior del cilindro	AntisymmetryPlane
Cara inferior del cilindro	Fixed
Superficie restante	Free
Condición de Carga	
Cara superior	$F_{\text{compresión}} = (-30[\text{MPa}])(f)$
	Factor de Carga (f)
Cilindro Sólido	0: 0,05: 0,4
Cilindro con esferas	0: 0,05: 0,4
Cilindro con cubos	0: 0,05: 0,4
Cilindro plano esferas 45°	0: 0,02: 0,2
Cilindro plano cubos 45°	0: 0,02: 0,12

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4 se muestran los resultados experimentales de los ensayos de compresión para tres tipos de porosidades, observándose el comportamiento típico de compresión en un material celular caracterizado por tres zonas: i) zona elástica: el material a bajas cargas se comporta similar al material sólido, ii) región de meseta: donde disminuye significativamente la pendiente, tendiendo a un comportamiento horizontal debido a la falla de los *strut* y, iii) por último, nuevamente un comportamiento de material sólido, debido a la densificación del material.

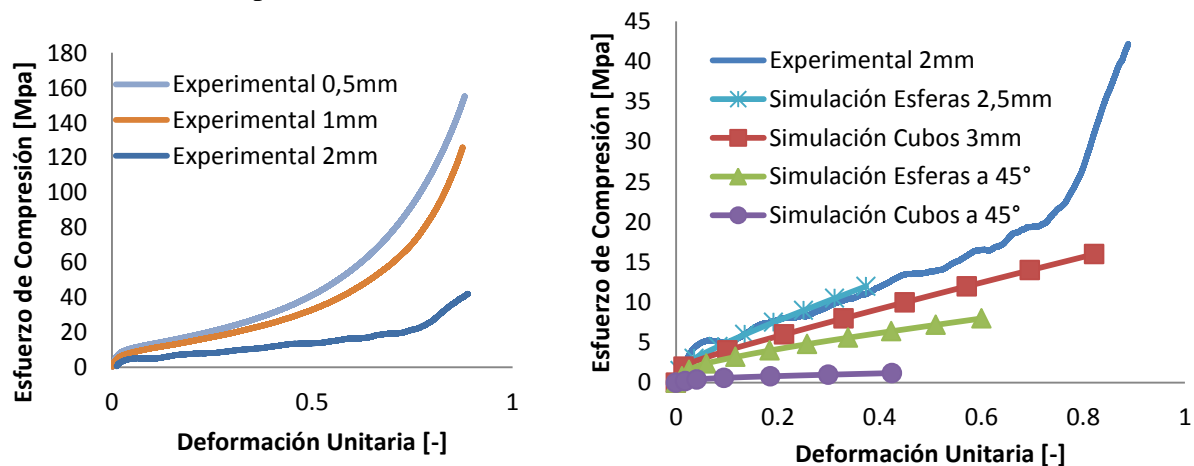


Figura 4. Curvas esfuerzo-deformación a compresión a) experimentales y b) simulación.

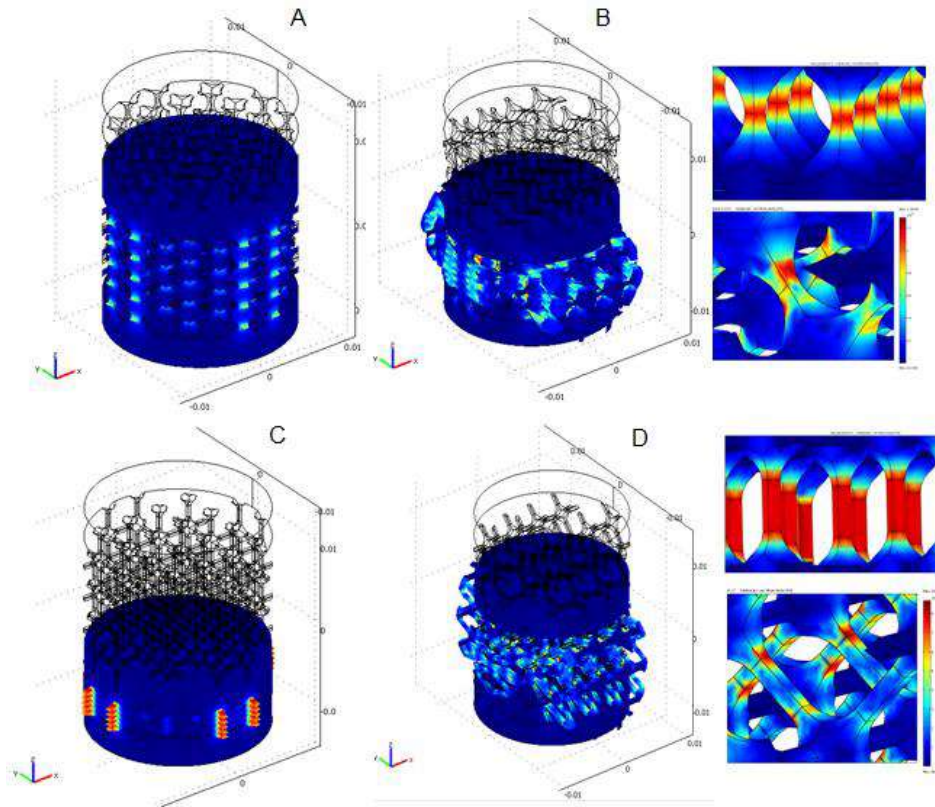


Figura 5. Simulación computacional: a) y b) celdas esféricas axiales y a 45°, c) y d) celdas cubicas axiales y a 45°.

Un análisis comparativo entre los resultados experimentales y la simulación, revela que los modelos analizados tienen un comportamiento a compresión similar a las esponjas con tamaños de poro mayor, mostrando una zona de meseta a esfuerzos similares que los experimentales. Al analizar el volumen del material sólido simulado (figura 5), se observa que en las estructuras con celda cubica los esfuerzos se distribuyen homogéneamente en los *struts*, mientras que en las estructuras con celdas esféricas, estos esfuerzos se concentran en el centro del *strut*. Cuando se analizan estas mismas geometrías rotadas a 45°, en los *struts* se generan esfuerzos cortantes que hacen más débil la estructura celular.

4 CONCLUSIONES

Se pudo observar que los resultados de la simulación de materiales celulares con geometrías idealizadas como lo son esferas y cubos, muestran propiedades similares al comportamiento a compresión de esponjas metálicas fabricadas por IPS. Se encontró que COMSOL permite obtener resultados computacionales acordes con los experimentales, pero en sistemas celulares con niveles altos de deformación se obtienen para bajos valores de cargas, lo que limita los resultados de las deformaciones obtenidas solo a la zona de meseta, para refinar esta modelación computacional, se hace necesario trabajar un poco más en la construcción de los modelos para evitar zonas que exijan un enmallado muy fino y así el software pueda registrar mayores niveles de deformación de la estructura durante la simulación.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan sus agradecimientos al CIDI-UPB por la financiación del proyecto Rad. 910A-01/12-18.

6 REFERENCIAS

1. Castro, I.A., Caracterización Mecánicas de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía, [Digital], Leganés, 2012, http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/15003/1/Tesis_Ignacio_Alejandro_Irausquin_Castro.pdf.
2. Maguid, S.A., FE modeling of deformation localization in metallic foams, Finite Elements in Analysis and Design, No. 38, 631-643, 2001.
3. Konstantinidis, I.Ch., Model for determining mechanical properties of aluminum closed-cell foams, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, No. 43, 157-167, 2005.
4. Woesz, A., Cellular Solids beyond the Apparent Density-an Experimental Assessment of Mechanical Properties”, Adv. Eng. Materials, No. 3, 157-167, 134-138, 2004.
5. Jarillo, J.M., Modelización del Comportamiento Mecánico de una espuma Metálica, Leganés, 2012, http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/8064/1/PFC_Julian_20_Martin_Jarillo.pdf
6. Software Comsol Multiphysics, Nonlinear Structural Materials Module: User`s Guide, 2012, <http://hpc.mtech.edu/comsol/pdf/nsm/NonlinearStructuralMaterialsModuleUsersGuide.pdf>
7. Wieland, B., Handout: Plasticity and Hardening, <http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/uzwr/mmsm/mmsm1-ws1213/mmsm1-handout-plasticity.pdf>
8. Avalue, M., Mechanical Models of Cellular Solids, Parameters Identification from Experimental Tests, Torino Italy, <<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv19/05-0438-W.pdf>>
9. Yaw, L., Nonlinear Static – 1D Plasticity – Various Forms of Isotropic Hardening, [En línea], Washington USA, 2012, <<http://people.wallawalla.edu/~louie.yaw/plasticitypublications/1Dplasticity.pdf>>