

CONSIDERACIONES PARA LA MODELACIÓN MECÁNICA DE ESPUMAS DE ALUMINIO MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Juan Molina^{1}, Santiago Betancourt¹, Harish Cherukuri², Patricia Fernández-Morales³*

1: Estudiante Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

2: Bachelor Technology, Ph.D, Department of Mechanical Engineering and Engineering Science, University of North Carolina, Charlotte - USA

3: Ingeniera Metalúrgica, Ph. D, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

* Contacto: juanpablo.molina@alfa.upb.edu.co

RESUMEN

La modelación de los metales celulares mediante herramientas computacionales es considerada una valiosa forma de establecer su posible comportamiento mecánico previo a su potencial uso. Sin embargo, no es considerada una actividad fácil de abordar y es por ello que a partir del presente levantamiento bibliográfico, se determinan los parámetros y variables más relevantes a la hora de hacer una simulación computacional de su comportamiento mecánico bajo diferentes tipos de cargas. A sí mismo, se describen los diferentes procesos de fabricación y se identifican las características de la estructura propias de las espumas producidas bajo cada uno de ellos. Se encontró que para la realización de simulaciones de espumas de aluminio es necesario tener en cuenta aspectos físicos del material; así como aspectos propios de los materiales celulares, entre otros. En lo que respecta a las herramientas computacionales y métodos numéricos usados con mayor frecuencia, se reporta el uso del método de elementos finitos y de software comerciales como Abaqus para la realización de las modelaciones y simulaciones.

Palabras Clave: *Espumas metálicas, Variables de modelación, Propiedades mecánicas, Métodos numéricos.*

ABSTRACT

Modeling of cellular metals using computational tools is considered a valuable way to establish their possible mechanical behavior before their potential use. However, due to that it is not considered an easy activity to address, this bibliographical survey determining the most relevant parameters and variables when making a computer simulation of mechanical behavior under various loads, was done. Moreover, describes the different manufacturing processes and identify the characteristics of the structure of the foams produced under each of them. We found that for performing simulations of aluminum foams is necessary to consider the physical aspects of the material as well as specific aspects of cellular materials, among others. Regarding the numerical methods and computational tools frequently used, is reported the use of finite element methods and Abaqus commercial software for performing the modeling and simulations.

Keywords: *Metal foams, Modeling parameters, Mechanical behavior, Numerical methods*

1 INTRODUCCIÓN

Las espumas y esponjas metálicas tienden a ser una solución apropiada para algunos problemas o requerimientos de ingeniería. En especial las espumas de aluminio, en las cuales algunos científicos han centrado sus estudios dadas sus valiosas características. Las principales aplicaciones van desde paneles térmicos, estructuras livianas, paneles para aislamiento acústico, piezas para la absorción de energía mecánica por impacto, entre otras. Estos son algunos de sus actuales y potenciales usos [1 – 4].

Tal como se muestra en la Figura 1, las espumas metálicas pueden tener dos morfologías diferentes: espumas de poros cerrados y espumas de poros cerrados, por tanto ambas poseen diferentes propiedades. Sin embargo, existen algunas dificultades asociadas a este tipo de materiales, debido en especial a la no uniformidad en los procesos de manufactura que a su vez causa la dificultad para controlar las características estructurales del material producido [1, 5]. Lo anterior ha redundado es que se hayan desarrollado muchos estudios con la finalidad de identificar ecuaciones constitutivas más ajustadas para el modelamiento de estos sólidos celulares, a fin de describir el comportamiento de fractura bajo cargas compresivas y de tensión, así como para identificar la superficie de cedencia de las aleaciones de aluminio más comunes con las cuales se fabrican espumas metálicas [1, 3, 6 – 8].

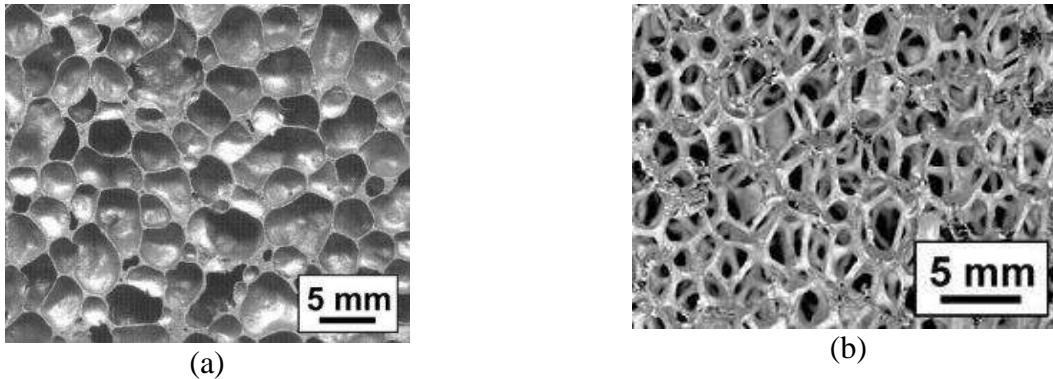


Figura 1. Estructura de espumas metálicas (a) poros cerrados, (b) poros abiertos (esponjas) [1]

En este tipo de materiales es usual encontrar correlaciones con base en la densidad relativa, la cual relaciona la densidad de la espuma y la densidad del material sólido del cual está hecha la espuma. Este valor puede ser expresado en términos de porcentaje [1, 5].

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad relativa, ρ^* es la densidad de la espuma y ρ_s es la densidad del material base.

El tamaño del poro también es un parámetro importante para tener en cuenta cuando se habla de esponjas metálicas. Este puede ser definido por el espesor de la pared de la celda, la longitud de las esquinas y la característica de la esponja al ser de poros abiertos o poros cerrados. Al igual que con la densidad relativa, estos parámetros definirán la forma de la celda y las propiedades de

la espuma, las cuales son muy importantes para la predicción del comportamiento de cada espuma bajo diferentes tipos de carga [5, 9, 10]. No obstante, existen otros factores que deben ser considerados para la correcta modelación de esta clase de materiales. El presente trabajo se centró en comprender el efecto de los procesos de manufactura y las consideraciones propias de los modelos computacionales con los cuales se pueden efectuar modelaciones del comportamiento de esta clase de materiales.

2 PROCESOS DE MANUFACTURA

Los procesos de manufactura para la fabricación de espumas metálicas se dividen en tres tipos: los procesos por vía líquida, los procesos por vía sólida y la deposición de metales [11 – 12]. Cada uno de los procesos otorga a las espumas diferentes propiedades que deben ser tenidas en cuenta a la hora de analizarlas, puesto que las propiedades pueden variar con respecto a la alteración de alguno de los parámetros involucrados en cada uno de los procesos de manufactura [13]. En este caso, lo más relevante con respecto al tipo de proceso de manufactura es la identificación de los parámetros finales de la espuma, es decir, qué procesos generan espumas de poros abiertos y cuáles de poro cerrado. A continuación, algunos de los procesos más importantes son descritos brevemente.

2.1 Infiltración de Preformas Solubles (IPS)

Las espumas metálicas de poros abiertos (esponjas) pueden ser fabricadas mediante la infiltración de una espuma polimérica de celdas abiertas (p.e. poliuretano) con un material de alta resistencia térmica. El polímero se removerá cuando el calor se aplique al sistema y luego la fundición del metal líquido será depositada dentro del molde cerámico poroso. Este proceso es muy común para espumas de aluminio. El metal tomará la forma y alcanzará la solidificación cuando el calor sea retirado [1, 11].

2.2 Proceso Alcan

Las espumas Alcan, de poro cerrado, son producidas en estado líquido. En este caso, se inyecta un gas al interior de la aleación de aluminio fundido, mezclado con partículas cerámicas utilizadas para estabilizar la espuma (normalmente SiC o Al₂O₃). Normalmente, la fracción volumétrica de estas partículas cerámicas está entre el 5% y 15% [1, 2]. El tamaño de poro de las espumas producidas bajo este proceso oscila entre los 3 y 30 μ m [2].

2.3 Proceso Alporas

Las espumas Alporas, de poro cerrado, son producidas bajo un proceso en estado líquido, el cual consiste en añadir calcio en polvo desde 0.2 hasta 8% e hidruro de titanio en polvo entre 1 y 3% del porcentaje en peso del aluminio fundido en una cámara que permanece a presión constante. El calcio ayuda a incrementar la viscosidad de la fundición, mientras que el hidruro de titanio provee el hidrógeno gaseoso, el cual causa que la fundición se expanda como una espuma. Este proceso es capaz de producir espumas con tamaños de poro entre 2 y 10 μ m [2]. Estas espumas son las más estudiadas debido a que el resto de procesos por los cuales se obtienen las espumas metálicas presentan mucha similitud con los descritos anteriormente, sin embargo, procesos

como la fundición con un agente de expansión, soplado de gas al interior de cámaras de fundición, uso de preformas removibles y deposición de metal dentro de un precursor polimérico, son algunos de tantos métodos utilizados a nivel industrial y académico [6, 11, 12].

El procesamiento de esta clase de materiales ejerce un factor importante en el modelamiento de las espumas metálicas ya que le otorga al material características geométricas (tamaño de poros, espesores de pared, entre otras) que a su vez determinan las propiedades finales del mismo, propiedades que son parámetros de los modelos computacionales. En la tabla 1 se puede observar la clasificación de las espumas metálicas más comunes con respecto a sus características microestructurales principales.

Tabla 1. Clasificación y propiedades básicas de las espumas metálicas de acuerdo a los principales procesos de manufactura

Proceso	Tipo de Material	Estructura de Celda	Tamaño de Poro	Densidad Relativa	Referencia
IPS	Al - Otros	Abierta	*	0.025 – 0.5	[11, 13]
Alcan	Al	Cerrada	3 – 30 mm	0.08 – 0.38	[2, 11]
Alporas	Al	Cerrada	2 – 10 mm	0.08 – 0.24	[2, 11, 13]
Alulight	Al	Cerrada	4.2 mm	0.1 – 0.35	[2, 13]
Cymat	Al	Cerrada	3.4 – 25 mm	0.05 – 0.55	[11, 13]
Pulvimetalurgia	Al - Otros	Cerrada	0.5 – 8 mm	~ 0.2	[12]

**Depende del material de la preforma*

3 CONSIDERACIONES PARA LA MODELACIÓN COMPUTACIONAL

Como las propiedades de las espumas están gobernadas por la respuesta de su estructura interna [7], la mayoría de los estudios se han ocupado en describir su comportamiento mecánico bajo diferentes cargas y en cómo modelar una unidad constitutiva de las espumas.

Aún cuando los productores de espumas metálicas garantizan una cantidad determinada de poros por pulgada (ppi), la mayoría de las espumas no cumplen ese requisito. Por esto, se ha planteado generar un modelo generalizado de una celda constitutiva y posteriormente extrapolar el comportamiento a la espuma completa [5]. Un modelo consistente en un poro Tetracaidecaédrico es comúnmente usado para modelar las redes de espuma [8, 13]. Este tipo de celda tiene 14 caras distribuidas en 6 caras cuadradas y 8 caras hexagonales. La mayoría de los modelos para la simulación de espumas de aluminio están basadas en esta geometría, pero no es aplicable para todo tipo de metales [7, 8]. De igual manera, la definición del material base es importante para la modelación computacional. Esto dado que a partir del proceso de manufactura y las propiedades básicas de la espuma, es posible obtener gran cantidad de propiedades mecánicas basadas en correlaciones experimentales [14].

Existen diferentes problemas que deben ser resueltos para la modelación exitosa de las espumas metálicas. Algunos de ellos están relacionados con la forma geométrica de las celdas, ya que la aleatoriedad del proceso de manufactura no permite tener control directo y total sobre las diferentes variables de las espumas [5, 15]. La definición geométrica de las dimensiones de los

poros en las espumas, tal como los espesores de pared que varían en grandes proporciones de acuerdo al método de fabricación y a la localización relativa dentro de la espuma, las longitudes de las esquinas, los tamaños de poros y la selección de los modelos matemáticos que describen el comportamiento mecánico de las mismas [16]. Sin embargo, es posible calcular gran cantidad de propiedades de cada una de las espumas en específico (debido a que es técnicamente imposible que dos espumas sean iguales) a partir de las propiedades básicas [13]. A continuación se muestra la forma general:

$$\frac{P}{P_s} = \alpha \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n \quad (2)$$

Donde P es la propiedad buscada de la espuma, P_s es la propiedad del material del cual está hecha la espuma, α y n son constantes que dependen de varios factores constitutivos de la espuma como tamaño de celda, espesor de pared, etc. Y ρ^*/ρ_s es la densidad relativa de la espuma [13].

Las microtomografías computacionales mediante rayos-X (XRCMT) han sido utilizadas ampliamente para la generación de modelos en tres dimensiones que representan la estructura interna de una espuma [14]. Para realizar simulaciones bajo esta metodología es necesaria la construcción geométrica del modelo. Para poder crear una malla de elementos finitos a partir de imágenes tomográficas, es necesario primero realizar la binarización de la imagen tomográfica para mejorar la resolución de la misma y lograr diferenciar entre la fase sólida y la fase gaseosa. Posteriormente, definir geoméricamente la frontera sólida mediante caras triangulares. Finalmente, se debe realizar el mallado del volumen sólido mediante tetraedros [14]. Los elementos de segundo orden generan una aproximación mayor que los elementos de primer orden cuando se trata de solucionar problemas relacionados con campos complejos de esfuerzos. Este tipo de elementos son muy efectivos en problemas en los cuales el esfuerzo dominante es de flexión (típico en problemas de compresión) [14].

A pesar de que las espumas metálicas están siendo muy utilizadas en diferentes campos de la ingeniería, no ha sido muy abundante el trabajo en modelos constitutivos para su simulación bajo diferentes cargas. Existen software comerciales que incluyen rutinas especiales para el análisis de este tipo de problemas, en especial bajo cargas compresivas. Tal es el caso de ABAQUS, que incluye dos modelos útiles para el estudio de las espumas metálicas. Modelos basados en endurecimiento volumétrico, caracterizado principalmente por un criterio de plastificación dependiente de la tensión equivalente de Von Mises y la tensión hidrostática con comportamiento no simétrico tracción-compresión y un endurecimiento en la zona plástica gobernado por la deformación volumétrica plástica a compresión; al igual que modelos basados en endurecimiento isotrópico, caracterizados principalmente por un criterio de plastificación dependiente de la tensión equivalente de Von Mises y la tensión hidrostática con comportamiento simétrico tracción-compresión y un endurecimiento en la zona plástica gobernado por la deformación plástica equivalente acumulada. [13]. La elección del modelo dependerá de la necesidad del usuario. Algunas características en el modelo de endurecimiento volumétrico pueden ser mejores que en el del modelo de endurecimiento isotrópico y viceversa.

4 CONCLUSIONES

Es clave el desarrollo de modelos constitutivos que representen de manera integral el comportamiento de las espumas metálicas bajo diferentes cargas, especialmente bajo cargas compresivas dadas las aplicaciones de este tipo de materiales. Sin embargo, la aleatoriedad en las variables de los procesos de fabricación de las espumas metálicas hace que todas sean diferentes y por ende las unidades constitutivas sean también diferentes. Por otra parte, algunas soluciones que facilitan la modelación de las mismas consisten en la realización de modelos estadísticos para la predicción de la forma geométrica que tienen las celdas de las espumas metálicas acorde a su método de fabricación, de tal manera, estadísticamente podría determinarse cuáles son las unidades repetitivas y en qué proporciones se podrían encontrar al interior de las espumas. El uso de técnicas combinadas como la microtomografía computacional, en asocio con el procesamiento digital de imágenes se perfila también como una solución eficiente para disminuir los errores que plantea los métodos estadísticos.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. E. Andrews, W. Sanders, and L. J. Gibson, "Compressive and tensile behaviour of aluminum foams," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 270, No. 2, 113–124, 1999.
2. A. E. Simone and L. J. Gibson, "Aluminum foams produced by liquid-state processes," *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 9, pp. 3109–3123, 1998.
3. G. Gioux, T. McCormack, and L. Gibson, "Failure of aluminum foams under multiaxial loads," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, No. 6, pp 1097–1117, 2000.
4. T. Mukai, H. Kanahashi, T. Miyoshi, M. Mabuchi, T. G. Nieh, and K. Higashi, "Close-celled aluminum foam under dynamic loading," Vol. 40, No. 8, pp. 921–927, 1999.
5. S. V Raj and J. A. Kerr, "Effect of Microstructural Parameters on the Relative Densities of Metal Foams," 2010.
6. O. B. Olurin, N. a. Fleck, and M. F. Ashby, "Deformation and fracture of aluminium foams," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 291, No. 1–2, pp. 136–146, 2000.
7. D. Ruan, G. Lu, L. Ong, and B. Wang, "Triaxial compression of aluminium foams," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 6, pp. 1218–1234, 2007.
8. S. V. Raj, "Microstructural characterization of metal foams: An examination of the applicability of the theoretical models for modeling foams," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 15, pp. 5289–5295, 2011.
9. R. E. Cooke, "Finite element modeling of metal foam structures subject to compressive loading," Naval Postgraduate School, Monterrey, California, 2001.
10. J. L. Grenstedt, "Effective elastic behavior of some models for 'perfect' cellular solids," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, pp. 1471–1501, 1999.
11. P. Fernandez, L. J. Cruz, J. Coletto, "Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I: Procesos por vía líquida", *Revista de Metalurgia*, Vol. 44, No. 6, 2009.
12. P. Fernandez, L. J. Cruz, J. Coletto, "Procesos de fabricación de metales celulares. Parte II: Vía sólida, deposición de metales, otros procesos", *Revista de Metalurgia*, Vol. 45, No. 2, 2009.
13. J. M. Jaramillo, "Modelización del comportamiento mecánico de una espuma metálica," Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

14. S. Youssef, E. Maire, and R. Gaertner, Finite element modelling of the actual structure of cellular materials determined by X-ray tomography, *Acta Materialia*, Vol. 53, No. 3, pp. 719–730, 2005.
15. C. Xiao-qing, W. Zhi-hua, M. Hong-wei, Z. Long-mao, and Y. Gui-tong, “Effects of cell size on compressive properties of aluminum foam,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 16, No. 90205018, pp. 351–356, 2006.
16. M. De Giorgi, a. Carofalo, V. Dattoma, R. Nobile, and F. Palano, “Aluminium foams structural modelling,” *Computers & Structures*, Vol. 88, No. 1–2, pp. 25–35, 2010.