

PROPIEDADES TERMO-HIDRÁULICAS DE METALES CELULARES CON POROSIDAD ABIERTA

*Santiago Restrepo*¹, *Cesar Nieto*², *Patricia Fernández-Morales*^{3*}

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

2: Facultad de Ingeniería Aeronáutica, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

3: Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

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

RESUMEN

La conducción de calor y caída de presión asociada a esponjas de aluminio, fabricadas por el método de infiltración de preformas solubles (IPS), son estudiadas experimentalmente y relacionadas con las propiedades estructurales del material. Aplicando el método conocido como “Técnica comparativa de flujo de calor longitudinal”, fue posible hallar la conductividad térmica efectiva en las probetas ensayadas para tamaños de poro de 2, 1 y 0.5mm, respectivamente. Se realizaron pruebas en un túnel de viento para cuantificar la caída de presión al interior de las esponjas, a partir de las que se determinó la permeabilidad del medio poroso a través de la ecuación de Darcy-Forchheimer.

Palabras Clave: *Metales celulares, Aluminio, Conductividad térmica efectiva, Permeabilidad.*

ABSTRACT

The heat conduction and pressure loss associated to aluminum foams, fabricated by the replication process, are determined experimentally and related to the structural properties of the material. Applying the Guarded Comparative Longitudinal Heat Flow Technique, the effective thermal conductivity was found for 2, 1 and 0.5mm pore size samples respectively. A wind tunnel was employed for the pressure loss measurements, from which the permeability of the porous medium was calculated by means of the Darcy-Forchheimer equation.

Keywords: *Cellular metals, Aluminum, Effective thermal conductivity, Permeability*

1 INTRODUCCIÓN

Los metales celulares se caracterizan por presentar propiedades particulares que les brindan potenciales aplicaciones tanto estructurales como funcionales. En el caso de las esponjas, las cuales son metales celulares de poro abierto, las propiedades físicas son de gran importancia en virtud de las aplicaciones funcionales que estas pueden brindar, tales como: intercambiadores de calor, disipadores de calor, filtros, soportes para catálisis, emulsificadores, etc.

Debido a la gran variedad de procedimientos existentes para la fabricación de las esponjas que deriva cada uno en un producto con diferentes características [1], se hace necesario llevar a cabo estudios para identificar el comportamiento propio de dichos productos. Incluso procesándolas de la misma manera, varían las propiedades dependiendo del grupo de investigación o empresa que las elabora (debido a las materias primas, equipo empleado, etc.).

El método de producción implementado en la Universidad Pontificia Bolivariana se denomina Infiltración de Preformas Solubles (IPS). A grandes rasgos, en este proceso se funde el metal en un molde que contiene la preforma, aplicando presión para que este penetre o “moje” hasta el interior de la misma y, por último, se disuelve después de llegar nuevamente al estado sólido del metal. Para este caso, el metal utilizado es aluminio reciclado y NaCl como preforma.

Con la caracterización termo-hidráulica de los metales celulares se busca esencialmente observar el comportamiento de propiedades de transporte termo-hidráulico (ej. conductividad térmica, permeabilidad y coeficiente de convección de calor), a partir de variaciones en parámetros estructurales que definen el medio poroso, tales como la porosidad, la densidad de poro (PPI), el tamaño de poro, la densidad de superficie, entre otros. En este trabajo, se presenta el estudio realizado para caracterizar la conductividad térmica y permeabilidad de las esponjas desarrolladas, dejando el tema de convección para tratar en un trabajo posterior.

2 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA

La Conductividad Térmica Efectiva (CTE), es una propiedad que permite analizar y cuantificar el transporte térmico en esponjas metálicas [2], es generalmente medida con experimentos en estado estacionario y se refiere a la habilidad de conducir el calor simultáneamente tanto a través de la fase sólida como fluida [3]. En otras palabras, se trata de la sumatoria de los diversos caminos de tránsito de calor difusivo entre ambas fases y a través de ellas. La ley de Fourier es la base para cualquier aproximación a la conductividad térmica independiente del material en cuestión, expresada como en Incropera [4]:

$$k_e = \frac{-q/A}{dT/dx} \quad (1)$$

donde k_e es la CTE, estableciendo entonces que el calor transferido por unidad de tiempo q [W] a través de una pared plana de área A [m^2] en una dirección perpendicular a ella, es proporcional a la variación de la temperatura en el espesor de la muestra en cuestión dT/dx .

Considerando que la conductividad de un gas puede ser de cuatro órdenes de magnitud más pequeña que la de un sólido, es posible esperar una reducción abrupta en el valor de dicha propiedad para un material bifásico como las esponjas metálicas.

Un método denominado Técnica Comparativa de Flujo de Calor Longitudinal se empleó durante los ensayos para determinar la CTE. Este método consiste en aplicar un flujo de calor unidireccional a través de un espécimen cilíndrico localizado entre dos barras con un gradiente constante de temperatura. Las mediciones se llevaron a cabo a temperaturas inferiores a 90°C, a fin de desprestigiar el efecto de la radiación.

Se emplearon cuatro muestras para cada tamaño de poro (2, 1 y 0.5 mm), teniendo un total de 12 pruebas. Los datos sobre la cantidad de poros por pulgada para todas las muestras fueron obtenidos mediante fotogrametría y se presentan en la Tabla 1. Los especímenes con diámetro de 20mm se aislaron con lana de vidrio para evitar pérdidas de calor en sentido radial.

Tabla 1. Propiedades de las esponjas examinadas

Muestras	Tamaño de poro (mm)	PPI	Densidad (g/cm ³)	Porosidad
M1P2E2	2	10	1.016	61.95%
M2P2E2	2	13	0.946	64.55%
M11P2E1	2	13	0.982	63.21%
M12P2E1	2	13	0.927	65.30%
M4P1E2	1	18	0.983	63.17%
M5P1E2	1	15	1.003	62.42%
M13P1E1	1	18	1.016	61.95%
M14P1E1	1	20	1.025	61.62%
M7P1E2	0.5	36	1.060	60.31%
M9P0E2	0.5	38	1.021	61.77%
M15P0E1	0.5	36	0.958	64.11%
M16P0E1	0.5	38	0.946	64.57%

3 PERMEABILIDAD

Esta propiedad caracteriza el flujo a través de medios porosos, indicando la facilidad con que un fluido se desplaza a través de una estructura porosa [5]. El primero en proponer este concepto fue Henry Darcy, interpretándola como una especie de “conductividad hidráulica”. Las predicciones de permeabilidad, son obtenidas a través de la aplicación de la ecuación Darcy- Forchheimer [6]:

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{K}v + \frac{F}{\sqrt{K}}\rho v^2 \quad (2)$$

donde dP/dx es la caída de presión en la dirección x , μ la viscosidad dinámica, v la velocidad de Darcy del fluido, K la permeabilidad, ρ la densidad relativa y F el coeficiente inercial. El primer

término del lado derecho de la ecuación tiene en cuenta los efectos viscosos del fluido que dominan para pequeños números de Reynolds. La adición del segundo término no lineal en el lado derecho, permite describir adecuadamente los flujos a altos números de Reynolds, considerando los efectos inerciales debidos a la velocidad [7].

Las pruebas de caída de presión se efectuaron en un túnel de viento de pequeñas dimensiones que fue diseñado cumpliendo los estándares de la norma ASHRAE. La primera prueba llevada a cabo fue de calibración sin esponja, es decir, con la sección de pruebas vacía, a fin de registrar las pérdidas propias del montaje y tenerlas en cuenta a la hora de calcular la caída de presión debida únicamente al aluminio celular.

Se empleó un anemómetro de hilo caliente *Testo 400* para las mediciones de velocidad y un tubo de *Prandtl* conectado a un manómetro de presión diferencial marca *Dwyer MS Series* que cuenta con un rango modificable de 0 a 100Pa y una precisión de $\pm 1\%$ del intervalo máximo cuando se usa en las escalas de 50 y 100Pa, o del $\pm 2\%$ del intervalo máximo en la escala de 25Pa. Se hicieron tres pruebas para la muestra de cada tamaño de poro, como se aprecia en la Tabla 2, con 10 cambios de velocidad del ventilador de los 0.04 a los 0.4m/s.

Tabla 2. Propiedades físicas y estructurales de las probetas para pruebas con aire.

Tamaño de poro [mm]	Peso [g]	Volumen [cm ³]	Porosidad	PPI
2	148.636	164.933	66.25%	11
1	143.160	144.121	62.80%	20
0.5	159.912	153.153	60.89%	37

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Conductividad térmica efectiva

La figura 1 presenta los resultados conseguidos para las pruebas de conductividad térmica sobre aluminio celular. En la gráfica izquierda de la figura 1 se observa una variación lineal de la conductividad térmica en términos de la porosidad, apreciándose como la CTE disminuye con el aumento de la porosidad (i.e. a medida que existe menos cantidad de material sólido en la muestra). El único dato que se desvía un poco del comportamiento deseado es el de la probeta de 2mm con porosidad 64.55%, error atribuible a picos en la energía de suministro.

Respecto a la cantidad de poros por pulgada, se puede apreciar en la gráfica derecha de la figura 1 como la conductividad incrementa a medida que la esponja presenta una mayor densidad de poro.

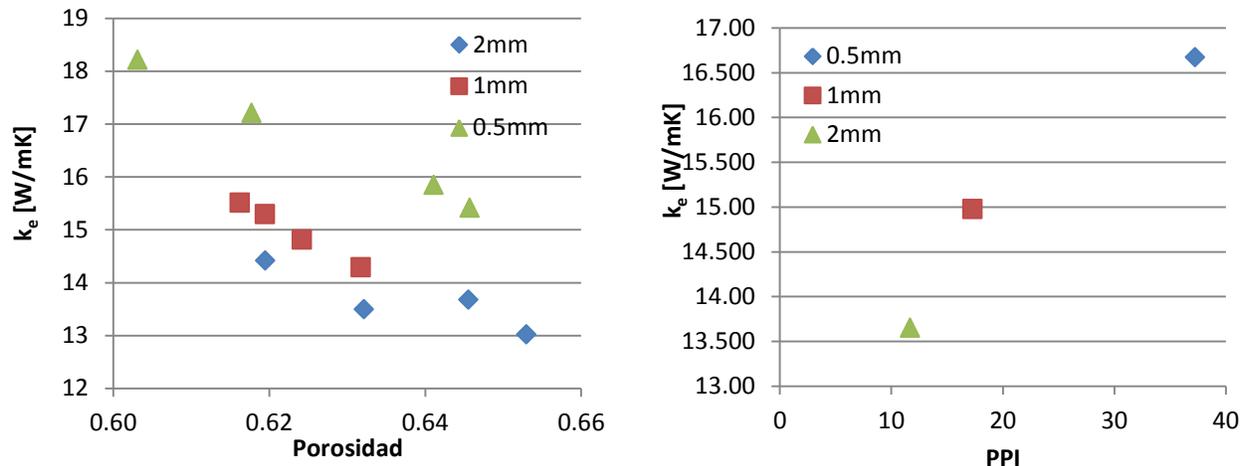


Figura 1. Gráfica de CTE como función de (izq.) la porosidad y (der.) la densidad de poro

En ambas gráficas se puede observar la influencia del tamaño de poro, siendo posible concluir que las esponjas con menor tamaño de poro (0.5mm) presentan la mayor conductividad térmica, valor que va disminuyendo hasta un mínimo para las esponjas con mayor tamaño de poro (2mm), al igual que lo revelan los resultados obtenidos por Zhao et. al [2].

4.2 Caída de presión

La tabla 3 y figura 2 ilustran los resultados experimentales de caída de presión obtenidos al insertar medios porosos en un conducto con aire como fluido intersticial. Se observa en dicha tabla que a mayor porosidad menor es la caída de presión.

Tabla 3. Caída de presión por unidad de longitud en función de la velocidad del aire

2mm-11PPI- 66.25%Porosidad		1mm-20PPI- 62.80%Porosidad		0.5mm-37PPI- 60.89%Porosidad	
Vel [m/s]	dp [kPa/m]	Vel [m/s]	dp [kPa/m]	Vel [m/s]	dp [kPa/m]
0,09	0,064	0,05	0,070	0,04	0,210
0,115	0,095	0,07	0,094	0,05	0,244
0,14	0,122	0,09	0,127	0,06	0,282
0,155	0,145	0,11	0,158	0,08	0,346
0,17	0,179	0,13	0,203	0,095	0,377
0,18	0,221	0,15	0,255	0,11	0,456
0,2	0,267	0,165	0,278	0,12	0,510
0,215	0,290	0,175	0,288	0,177	0,789
0,25	0,360	0,185	0,340	0,22	1,069
0,333	0,600	0,26	0,604		
0,41	0,910	0,33	0,951		

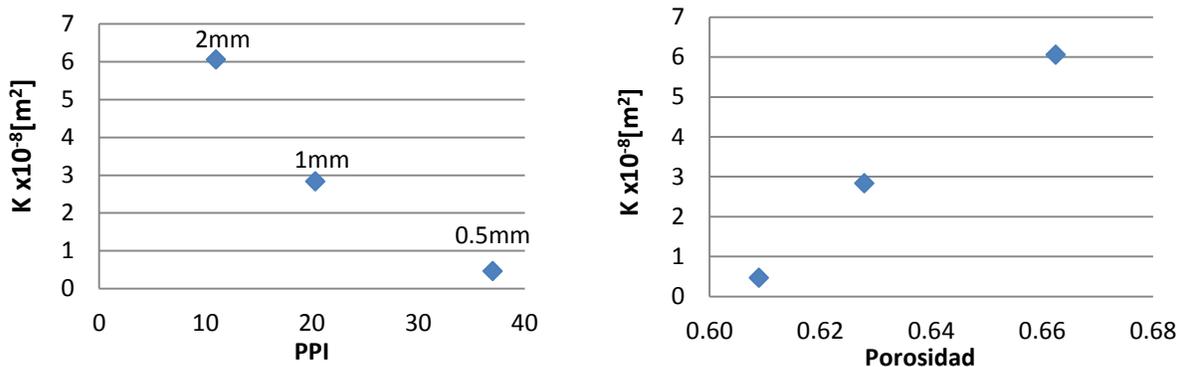


Figura 2. Gráfica del comportamiento de la permeabilidad con aire según (izq.) densidad de poro y (der.) porosidad

En la figura 2 se puede observar la variación de la permeabilidad en función de la densidad de poro (izq.) y la porosidad (der.), respectivamente. Las permeabilidades obtenidas se encuentran en la misma escala de magnitud. Se puede observar que la permeabilidad, K , disminuye con el incremento de la densidad de poro, lo cual es físicamente razonable pues, a medida que aumenta el PPI, el número de bordes de celda se incrementa creando una mayor resistencia al flujo. A medida que la porosidad se acerca al 100%, la permeabilidad tenderá al infinito.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo fue analizado el comportamiento termo-hidráulico del aluminio celular producido mediante la técnica de infiltración de preformas solubles, interpretando la relación entre la estructura porosa del material y sus propiedades a partir de los resultados experimentales de pruebas de conductividad térmica y caída de presión.

Para aplicaciones térmicas donde la caída de presión no sea un factor excluyente, por ejemplo sumideros de calor en componentes electrónicos, radiadores, entre otros, queda claro que las esponjas con tamaño de poro igual a 0.5mm ofrecen la mejor respuesta dado que poseen la conductividad térmica efectiva más alta entre las muestras ensayadas.

De la caracterización sobre caída de presión se encuentra que la matriz porosa sigue correctamente el modelo Darcy-Forchheimer. Los gradientes de presión aumentan con la velocidad de flujo. Las esponjas con menor densidad de poro presentan las permeabilidades más altas. Se observó que la permeabilidad disminuye con el incremento del PPI, debido a la mayor resistencia al flujo generada por el crecimiento en el número de bordes de celda. Es decir la presencia de una mayor cantidad de bordes de celda da lugar a un incremento en el área superficial, generando una fricción adicional con el fluido. En general la tendencia indica que disminuir la porosidad se traduce en un aumento de la caída de presión.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J. Banhart, "Manufacture , characterisation and application of cellular metals and metal foams," *Progress in Materials Science*, vol. 46, pp. 559-632, 2001.
2. C. Y. Zhao, T. J. Lu, H. P. Hodson, and J. D. Jackson, "The temperature dependence of effective thermal conductivity of open-celled steel alloy foams," vol. 367, pp. 123-131, 2004.
3. W. H. Hsieh, J. Y. Wu, W. H. Shih, and W. C. Chiu, "Experimental investigation of heat-transfer characteristics of aluminum-foam heat sinks," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 5149-5157, 2004.
4. F. Incropera, DeWitt, Bergman, and Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. Michigan, 2007, p. 997.
5. D. Edouard, M. Lacroix, C. Pham, and F. Luck, "Pressure drop modeling on solid foam : State-of-the art correlation," vol. 144, pp. 299-311, 2008.
6. J. F. Liu, W. T. Wu, W. C. Chiu, and W. H. Hsieh, "Measurement and correlation of friction characteristic of flow through foam matrixes," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 30, pp. 329-336, 2006.
7. K. Vafai, *Handbook of porous media*. Boca Raton, CRC Press, 2005.