Las espumas metálicas

Metal Foams

Asdrúbal Valencia Giraldo – Ph.D.

Ingeniería de Materiales -Universidad de Antioquia
vavalen@udea.edu.co

Fecha de recepción: 20 de mayo de 2013
Fecha de aceptación: 20 de julio de 2013

Resumen

Se hace una revisión de las espumas metálicas –que son materiales caracterizados por su baja densidad en combinación con propiedades únicas–, sus características, métodos de fabricación, técnicas de caracterización, modelamiento y aplicaciones estructurales, térmicas, catalíticas y como biomateriales y electrodos porosos con múltiples usos.

PALABRAS CLAVE: Materiales porosos, espumas metálicas, absorción de energía, catalizadores, electrodos porosos.

Abstract

This a review on metallic foams –which are materials characterized by their low density combined with unique properties–, their characteristics, fabrication methods, characterization techniques, modeling and structural, thermal, catalytic applications; and as biomaterials and porous electrodes with multiple uses.

KEYWORDS: Porous materials, metallic foams, energy absorption, catalysts, porous electrodes.

1. Introducción

Las espumas metálicas son materiales que se caracterizan por su baja densidad en combinación con adecuadas propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas, lo que ha hecho que adquieran especial interés para la investigación científica y de ingeniería durante los últimos veinte años. Además, su uso se ha incrementado como nuevos materiales de ingeniería, pues reúnen algunas virtudes de los metales, con las ventajas estructurales de las espumas. Sus aplicaciones incluyen materiales resistentes al impacto, filtros, intercambiadores de calor, biomateriales, catalizadores y electrodos porosos. Existen diferentes métodos para producirlas y por ello esta revisión abordará esos temas fundamentales de las espumas metálicas.

De acuerdo con Banhart [1], la primera mención de las espumas metálicas fue la patente francesa de De Meller, en 1925 [2]. El proceso descrito en esa patente comprende ya sea, (i) la inyección de un gas inerte en un metal líquido, o (ii) la adición de un agente espumante, como carbonato, al metal líquido que se agita. En ambos casos se obtiene una espuma.

Más tarde, en 1943, Benjamin Sosnik intentó hacer espuma de aluminio tratándolo con mercurio; primero fundió una mezcla de aluminio con mercurio en una cámara cerrada bajo alta presión. Luego alivió la presión, lo que causó la evaporación del mercurio a la temperatura de fusión del aluminio, formándose una espuma [3].

En el decenio de 1950 se desarrollaron métodos menos peligrosos cuando se supo que los metales líquidos se podían espumar más fácilmente si se pretrataban para mejorar su viscosidad. Esa mejora se podía hacer oxidando el metal fundido o agregando partículas de óxido. William Elliott y Stuart Fiedler en el Laboratorio de Investigación Bjorsjten, en Madison, Wisconsin desarrollaron un método para espumar aluminio, bajo encargo de la Armada de Estados Unidos, hacia 1958. [4], [6].

Lo cierto es que en ese decenio y los dos siguientes se expidió un considerable número de patentes, pero su elevado costo de producción para la época, aunado a la escasez de información disponible sobre las mismas, retrasaron hasta la década de 1980 su estudio y producción por parte de algunos de los más importantes fabricantes que aún existen hoy en día. De este modo, fue a partir del último decenio del siglo XX que adquirió un mayor

auge el estudio de las espumas metálicas, lo cual permitió conocer algunas de sus propiedades más interesantes e inferir las aplicaciones potenciales que podrían tener.

Para entender las espumas metálicas hay que distinguir los siguientes materiales:

Metales celulares: el término más general, que se refiere a un cuerpo metálico en el cual se encuentran dispersos gaseosos vacíos de cualquier clase. La fase metálica divide el espacio en celdas cerradas que contienen la fase gaseosa (comúnmente aire).

Metales porosos: un tipo especial de metal celular restringido a vacíos redondos y aislados unos de otros.

Esponjas metálicas: metal celular con cierta morfología en que los vacíos están interconectados.

Espumas metálicas (sólidas): un caso especial de metales celulares que se originan a partir de espumas líquidas y, por tanto, tienen una morfología restringida. Las células son cerradas, redondas o poliédricas y están separadas por películas delgadas del metal, figura 1.

Esto da claridad sobre lo que significan las espumas metálicas en el contexto de los metales celulares.

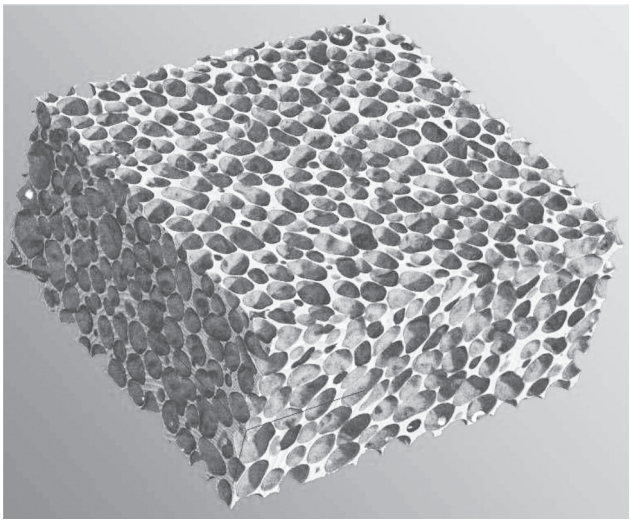

Figura 1. Estructura de una espuma metálica de ALMgCu.

FUENTE: http://Www.Metalfoam.Net/

2. Fabricación

En el sentido más general, la manufactura de los metales celulares no siempre implica métodos de espumado. A menudo, se abre primero una espuma de polímero mediante un tratamiento especial y luego se replica para dar una estructura metálica. La copia se puede hacer recubriendo con vapor metálico, galvanostegia o fundición de precisión. El resultado es una estructura con porosidades abiertas –una esponja más que una espuma–. La física del espumado no tiene que ver nada con el estado metálico porque sólo se espuma el polímero precursor. Otras estructuras se pueden usar como patrones para crear materiales celulares: materia granulada, orgánica o inorgánica, a granel o sinterizada, esferas huecas o, incluso, estructuras poliméricas regulares que se convierten en estructuras metálicas en un paso de procesamiento diseñado. En contraste, el verdadero espumado no usa un patrón para obtener una morfología especial, pues el metal se autoforma durante el espumado.

La Figura 2 es un resumen de los principales métodos para hacer espumas metálicas. Un factor que los distingue es si se usa metal fundido o polvo (aunque el espumado siempre ocurre en el estado líquido). Una segunda diferencia es la fuente del gas usado para crear la porosidad: se puede usar una fuente externa, un agente espumante se puede descomponer in situ, o se puede forzar un gas disuelto a que se precipite. Tercero, el espumado puede ser instantáneo (por ejemplo, la adición del gas lleva al espumado inmediato) o se crea un producto intermedio que puede espumar en una etapa posterior (retardado). Finalmente, los mecanismos de estabilización de la espuma son diferentes para los distintos métodos, como se verá después. Algunos métodos tienen nombre, otros tienen el nombre comercial del fabricante [7].

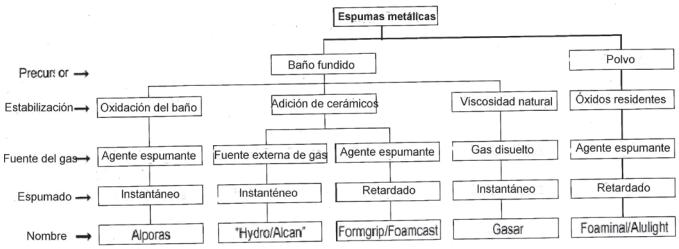

FIGURA 2. Los principales métodos para espumar metales

Fuente: Banhart, J. "Manufacturing Routes for Metallic Foams." *JOM*, Vol. 52, No 12, p. 22, 2000.

Uno de los métodos por los que se puede empezar es el espumado de las aleaciones de aluminio que es explotado por Hydro Aluminum [8] en Noruega y Cymat Aluminium Corporation [9] en Canadá. El proceso se describe esquemáticamente en la Figura 3, en él se usan partículas de SiC, Al_2O_3 o MgO para mejorar la viscosidad del metal fundido. Por consiguiente, el primer paso es la preparación del baño que contiene alguna de las sustancias mencionadas, es decir un compuesto de matriz metálica, que puede ser de varias aleaciones de aluminio. Esto requiere técnicas complejas de mezclado para asegurar una distribución uniforme de las partículas. En el siguiente paso el metal se espuma inyectándole gas (aire o argón) y usando hélices especialmente diseñadas o boquillas vibrantes. Éstas generan burbujas muy finas de gas y las distribuye uniformemente en el baño fundido. La mezcla viscosa resultante flota hacia la superficie del líquido donde se torna en una espuma líquida a medida que el metal líquido se drena. Como hay partículas cerámicas, la espuma es relativamente estable y se puede retirar de la superficie (con una banda transportadora) y dejarla enfriar y solidificar. Esta espuma es, en principio, tan larga como se quiera, tan ancha como el recipiente y de unos 10 cm de espesor.

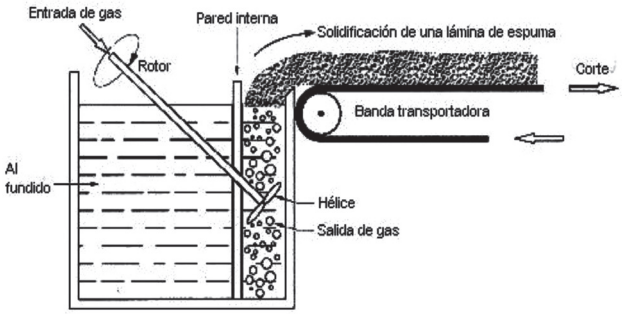

FIGURA 3. Espumado de aleaciones de aluminio (Método Hydro/Alcan) Fuente: Banhart, J. "Manufacturing Routes for Metallic Foams". JOM, Vol. 52, No. 12, p. 22, 2000.

La fracción volumétrica de partículas de refuerzo va del 10 al 20% con un tamaño entre 5 y 20 μm. La escogencia del tamaño de la partícula y el contenido se ha llevado a cabo empíricamente. Si el contenido de partículas es muy alto o muy bajo, puede haber problemas, como se muestra en la Figura 4.

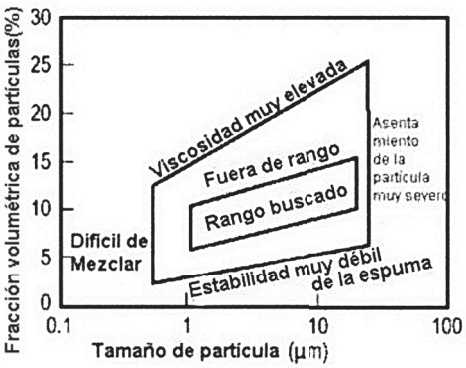

FIGURA 4. Tamaños preferibles de las partículas estabilizadores en el Método Hydro/Alcan.

Fuente: Banhart, J. "Manufacturing Routes for Metallic Foams." JOM, Vol. 52, No 12, p. 22, 2000.

Las densidades de las espumas de aluminio producidas así van de 0.069 g/cm^3 a 0.54g/cm^3, con poros de 3 a 25 mm, y espesor de pared de 50 a 85µm [10]. El tamaño de la celda está relacionado inversamente con el espesor y la densidad y se puede regular ajustando el flujo de gas, la frecuencia de vibración de la boquilla y otros parámetros.

Una consecuencia natural del drenaje inducido gravitacionalmente es evidente en los planchones de espuma, Figura 5, el gradiente en densidad, tamaño del poro y alargamiento del poro.

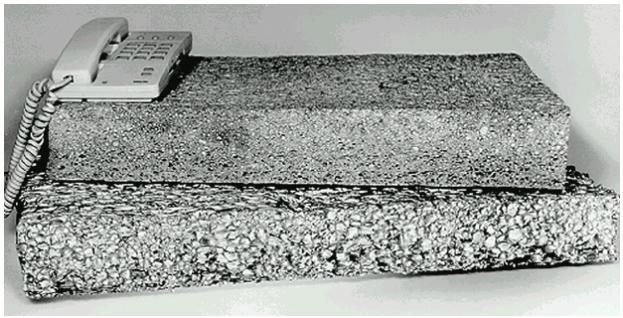

FIGURA 5. Muestras de espuma hechas por el Método Hydro/Alcan. Fuente: Banhart, J. "Manufacturing Routes for Metallic Foams." JOM, Vol. 52, No 12, p. 22, 2000.

Una variante del proceso anterior es el Formgrip/Foamcast, en el cual se incorporan partículas de hidruro de titanio directamente al baño, en vez de usar polvos para preparar el material precursor espumable. Para evitar la evolución prematura de hidrógeno el fundido se puede enfriar rápidamente por debajo del punto de fusión después de mezclar con el agente espumante, que debe pasivarse para evitar que emita gas antes de la solidificación. La técnica inicial (Foamcast) se efectuó en una máquina de vaciado en coquilla, donde el hidruro en polvo se inyectaba en la matriz junto con el metal fundido. Se usaban aleaciones normales, como la A356, sin aditivos cerámicos [11]

La fundición resultante era densa y se podía espumar refundiendo, pero es difícil obtener una distribución homogénea de los polvos de TiH_2 en la matriz. Esta ruta requiere que los polvos de TiH_2 se sometan a un ciclo de tratamientos térmicos que forman una barrera de óxido sobre cada partícula y retardan la descomposición. Entonces los polvos se añaden al baño y se pueden enfriar a tasas relativamente lentas luego de agitar, Figura 6. [12]

Los baños con SiC también se usan para obtener espumas, el proceso de espumado puede ser influido por varias tasas de calentamiento y las temperaturas finales de espumado, lo que permite producir una variedad de estructuras, figura 7 [13].

El nombre "Formgrip" es un acrónimo de *foaming of reinforced metals by gas release in precursores* (espumado de metales reforzados por liberación de gas en precursores).

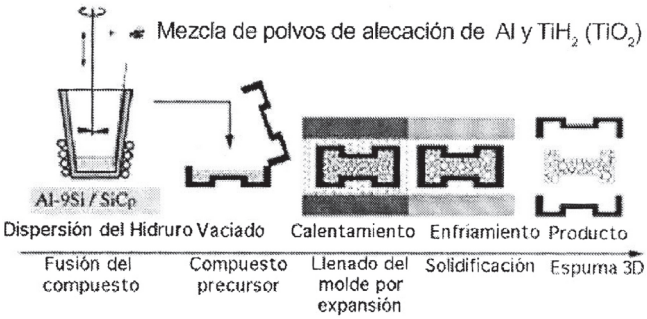

FIGURA 6. Método Formgrip/Foamcast.

Fuente: Gegerly, V., D. C. Curran and T. W. Clyne. "The FormGrip Process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors". *Adv. Eng., Mat*, Vol. 2, p. 175, 2000.

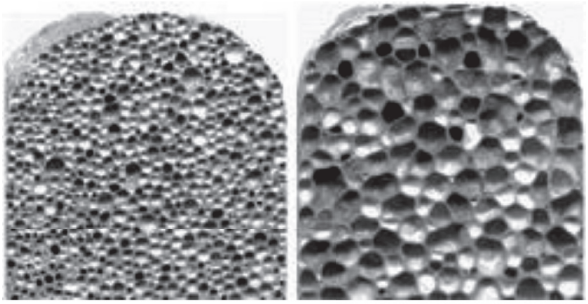

FIGURA 7. Dos muestras de espuma de Al/SiC

Fuente: Gegerly, V., D. C. Curran and T. W. Clyne, "The FormGrip Process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors". *Adv. Eng., Mat.*, Vol. 2, p. 175, 2000.

De otro lado, el método Alproas consiste en agregar directamente gas al metal fundido mediante un agente espumante que, al descomponerse a una determinada temperatura, libera el gas que genera la espuma metálica. Usando un agente espumante sólido es posible dispersar el gas más uniformemente en el metal fundido, con un mayor control de la localización y tamaño de los poros [14].

La principal diferencia con el proceso Formgrip es la adición de 1.5% de Ca o Mg a una fundición de aluminio a 680°C, Figura 8; el metal se agita durante varios minutos, y la viscosidad aumenta continuamente, hasta por un factor de 5, debido a la formación de CaO, ($CaAl_2O_4$), o quizás Al_4Ca, que espesan el metal líquido, Figura 9 [15]. Luego de que la viscosidad alcanza el valor deseado, se añade 1.6% en peso de TiH_2, que sirve como espumante liberando hidrógeno en el metal viscoso caliente, que empieza a expandirse y gradualmente llena el recipiente de espumado, el proceso ocurre a presión constante.

Después de enfriar el recipiente por debajo del punto de fusión de la aleación, la espuma líquida se torna en espuma sólida y se puede retirar del recipiente para el procesamiento posterior. El proceso de espumado se toma unos quince minutos para un lingote de 2,050 mm x 650 mm x 450 mm [14].

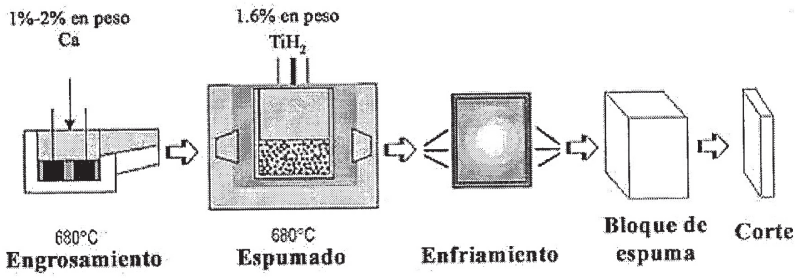

FIGURA 8. Proceso Alporas

Fuente: Torres Vela, Ismael. "Desarrollo y análisis de un modelo numérico para el estudio de elementos tubulares sometidos a impacto". Trabajo de fin de carrera, Universidad Carlos III, Madrid, p. 46.

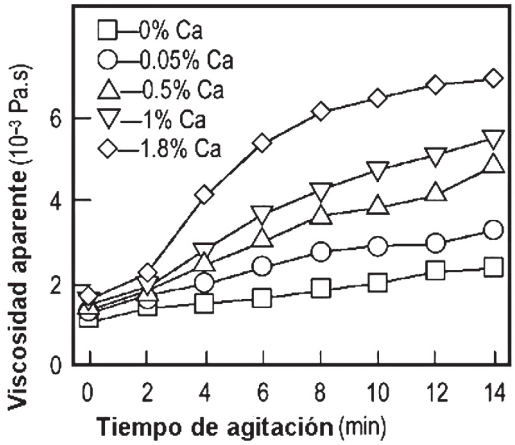

FIGURA 9. Variación de la viscosidad con el tiempo de agitación

Fuente: Ma, L. Q. and Z. L. Song. "Cellular structure control of aluminium foams during foaming process of aluminium melt". *Scripta. Materialia,* Vol. 39, No. 11, p. 1523, 1998.

Se ha encontrado que un ajuste cuidadoso de los parámetros produce espumas homogéneas, Figura 10. En efecto, las espumas producidas de esta manera –método Alporas– parecen ser las más homogéneas [16, 17].

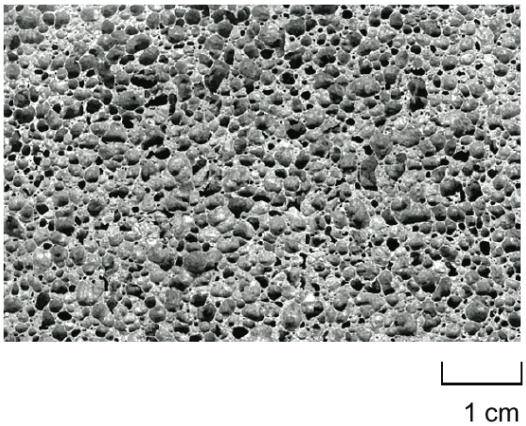

FIGURA 10. Estructura de los poros de una espuma obtenida por el método alporas

FUENTE: MIYOSHI,T., M. ITOH, S. AKIYAMA AND A. KITAHARA. "ALUMINUM FOAM, «ALPORAS»: THE PRODUCTION PROCESS, PROPERTIES AND APPLICATIONS". MRS PROCEEDINGS, VOL. 521, p. 133, 1998.

Desde 1969, en la Academia Estatal de Metalurgia de Ucrania, se empezó a desarrollar el método que se conoce como Gasar, que es un acrónimo en ruso que significa «gas reforzado». Se basa en el hecho de que algunos metales líquidos forman sistemas eutécticos con el hidrógeno [18]. Si uno de esos metales se funde en una atmósfera de hidrógeno bajo alta presión (hasta 50 atmósferas), el resultado es un baño homogéneo cargado con hidrógeno. Si se disminuye la temperatura, el baño experimentará una transición eutéctica a un sistema heterogéneo de dos fases (sólido + gas). Si la composición del sistema está suficientemente cercana a la eutéctica, ocurrirá una reacción de segregación a cierta temperatura. A medida que el metal solidifica, se precipitan poros de gas que quedan atrapados en el metal, figura 11. Las morfologías de los poros estarán determinadas por el contenido de hidrógeno, la presión sobre el baño, la dirección y tasa de remoción del calor y la composición química del baño [19], [20].

Generalmente se forman poros alargados en la dirección de solidificación, Figura 12, cuyos diámetros van de 10 µm a 10 mm y longitudes de 100 a 300 µm; la porosidad es de 5 a 75%, pero su distribución no es uniforme.

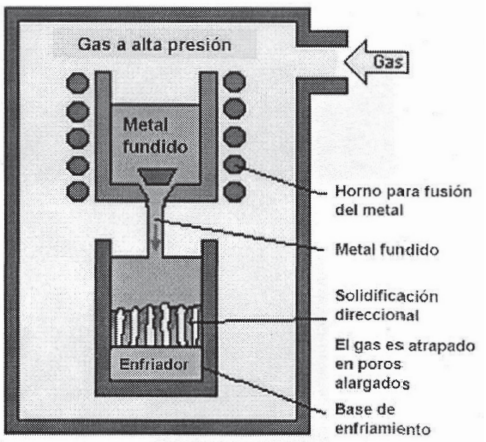

FIGURA 11. Proceso Gasar

Como se ha anotado, las espumas de metales también se pueden preparar a partir de polvos, como en el proceso Foaminal/Alulight [21], [22]. El proceso empieza con la mezcla de los polvos metálicos –de metal elemental, de aleaciones, o mezclas– con un agente espumante, después de lo cual la mezcla se compacta para dar un producto denso, semiacabado, Figura 13 [23].

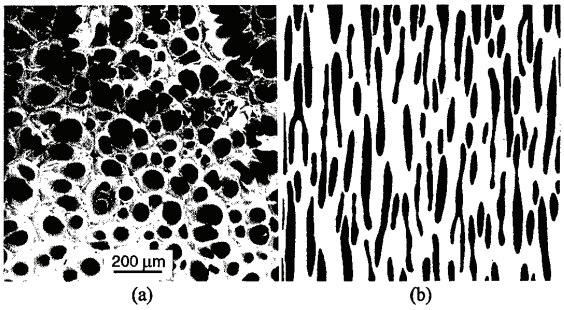

FIGURA 12. Estructura típica del la espuma obtenida por el método gasar; (a) sección normal a los poros; (b) sección longitudinal.

FUENTE: SHAPOVALOV, V. "FORMATION OF ORDERED GAS – SOLID STRUCTURES VIA SOLIDIFICATION IN METAL-HYDROGEN SYSTEMS". POROUS AND CELLULAR MATERIALS FOR STRUCTURAL APPLICATIONS, D.S. SCHWARTZ ET AL (EDS.). MRS, WARRENDALE, PA, VOL. 521, 1998, p. 282.

FIGURA 13. PROCESO FOAMINAL/ALULIGHT.

FUENTE: BAUMGÄRTNER, F., I. DUARTE, AND J. BANHART, "INDUSTRIALIZATION OF POWDER COMPACT FOAMING PROCESS". ADV. ENG. MATER., VOL. 2, p. 168, 2000.

La compactación se puede lograr con cualquier técnica en la cual el agente espumante queda embebido en la matriz metálica sin mucha porosidad abierta residual. Ejemplos de estos métodos pueden ser la compresión

uniaxial o isostática, la extrusión o la laminación. Pero este precursor se debe manufacturar cuidadosamente porque la porosidad residual u otros defectos llevarán a malos resultados en el procesamiento posterior. El próximo paso es el tratamiento térmico cerca del punto de fusión del metal. El agente espumante, que está distribuido homogéneamente dentro de la matriz, se descompone y los gases liberados forzan al material precursor a expandirse, formando su estructura altamente porosa. El tiempo necesario para la expansión completa depende de la temperatura y el tamaño del precursor y va de unos pocos segundos a varios minutos; el estaño, el zinc, el latón, el plomo y el oro, son algunos de los metales y aleaciones que se pueden espumar con agentes adecuados y parámetros particulares.

En realidad, continuamente se buscan nuevos métodos para reducir los costos de producción, como producir espumas sintácticas de elevada resistencia por infiltración del baño usando microburbujas de vidrio que se sinterizan para obtener preformas porosas que finalmente se llenan de aluminio con una máquina de fundición convencional de alta presión. Otro método empieza con aleaciones de magnesio que contienen aleantes capaces de formar hidruros si se recuecen bajo una atmósfera de hidrógeno. En fin, se propone usar un aluminio granulado reciclado como material de inicio en vez del polvo, con la consiguiente reducción de costos [24].

3. Caracterización

Las espumas metálicas se pueden caracterizar de muchas maneras y el objetivo es obtener datos mecánicos o físicos característicos del material investigado o llevar a cabo caracterizaciones tecnológicas de un componente que contiene una espuma metálica. Hay dos maneras de mirar una espuma metálica: desde el punto de vista atómico es una construcción que consiste en una multitud de puntales, membranas u otros elementos que en sí mismos tienen las propiedades mecánicas de algún material masivo. Por consiguiente, el ensayo del material celular es equivalente a ensayar un componente ingenieril. Desde el punto de vista macroscópico, la espuma es un material y el ensayo dará las propiedades correspondientes al material. Adoptando este punto de vista la espuma se considera un medio homogéneo que se representa con parámetros materiales efectivos (o promedio).

Se mencionarán a continuación algunos de los principales métodos para la caracterización de las espumas metálicas. En general se puede hablar de ensayos destructivos no destructivos.

Entre los no destructivos que se han usado con estos materiales se pueden mencionar, las medidas de densidad usando el principio de Arquímedes, los líquidos penetrantes, radiografía y radioscopía con rayos X, tomografía computarizada con rayos X, corrientes superficiales, medidas acústicas, análisis vibracional, porosimetría y permeametría, dispersión de ángulo bajo con rayos X y neutrones, espectroscopia de ondas difusivas, ultrasonido.

En resumen, las espumas metálicas se caracterizan estructuralmente según su topología de celdas (celda abierta, celda cerrada), densidad relativa, tamaño y forma de celda y anisotropía.

Entre los ensayos destructivos la microscopía óptica es de utilidad para la caracterización de las espumas metálicas, siempre que la espuma sea sometida a una preparación metalográfica, de acuerdo con el procedimiento convencionalmente empleado para los metales. Igualmente útil es la microscopía electrónica de barrido, aunque puede presentar información un tanto confusa en el caso de las espumas de celda cerrada, que complica la medición de la forma y tamaño de celda.

No hay protocolos establecidos para el ensayo de corrosión de las espumas y se usan normas aplicadas para otros componentes.

En cuanto a los ensayos mecánicos de las espumas metálicas, estos son requisito para cualquier aplicación estructural. Los datos son necesarios para la evaluación de aplicaciones específicas o, de manera más general, para construir bases de datos necesarias para su modelamiento.

La caracterización se hace, en principio, con los mismos métodos usados con otros tipos de metal, pero debe tenerse en cuenta que, por su estructura celular las espumas metálicas requieren de precauciones especiales para su ensayo y caracterización. Sus propiedades mecánicas dependen del tamaño de las probetas y de la relación que guarda el mismo con su tamaño de celda; además, suelen estar influenciadas por el acabado superficial y la forma de sujeción que tengan. Por esta razón, las probetas deben ser suficientemente grandes y tener una preparación superficial previa.

Las probetas de espuma metálica pueden mecanizarse empleando varias técnicas conocidas. Para minimizar el daño de las celdas es recomendable hacer el corte con disco de diamante, electroerosión por hilo u otro quipo de EDM (Electric discharge machining: mecanizado por descarga eléctrica), fresado químico, o chorro de agua a alta presión. El corte convencional con sierra de cinta provee una superficie más deteriorada que la obtenida con los procesos anteriores. Los valores de rigidez y resistencia a compresión estimados para una espuma de aluminio de celda cerrada cortada con disco de diamante y con electroerosión suelen ser idénticos, pero al ser cortada con sierra de cinta se hacen inferiores. A este respecto, Ashby *et al.* señalan disminuciones de hasta 15% en el módulo de Young y hasta 7% en la resistencia a compresión. Así pues, es importante realizar una preparación superficial [25].

4. Modelamiento

De otro lado, las espumas se han modelado de diferentes maneras para distintos propósitos, así, para la solidificación y el drenaje, esto se ha hecho suponiendo que el baño burbujeado se ha expandido totalmente. La representación matemática se basa en la bien conocida ecuación para el drenaje, que se ha ensayado extensivamente y verificado para espumas acuosas [26], [29]. Esta ecuación parcial no lineal describe la variación de la fracción líquida de una espuma con la posición y el tiempo. Esto se combina con las ecuaciones de conducción de calor, para describir el movimiento de los frentes que solidifican [30].

Las dos ecuaciones diferenciales parciales se hacen adimensionales y se resuelven simultáneamente, usando una representación en diferencias finitas. Las condiciones de borde en el líquido son: que no hay flujo en los bordes de la muestra y que el perfil de densidad relativa es uniforme inicialmente –es decir, la espuma tiene la misma humedad por todas partes–. Las condiciones en la temperatura son: que es igual a la temperatura de fusión en toda la masa y fina a cierta temperatura de enfriamiento en los bordes.

La Figura 14 muestra la distribución relativa de densidad en un cubo de espuma metálica. El líquido se ha perdido desde la parte superior, lo que aumenta la densidad relativa de la parte inferior. Debe tomarse nota de las regiones triangulares de espuma homogénea. En general, el volumen de la espuma uniforme se puede aumentar cambiando la relación de aspecto de

la muestra, es decir el lado más largo de la muestra con la dirección de la gravedad [31].

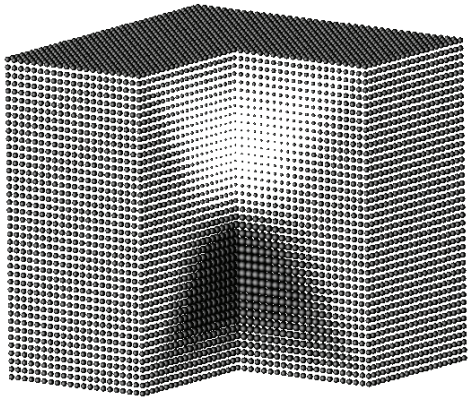

FIGURA 14. UN CUBO DE ESPUMA SOLIDIFICADA DEL QUE SE HA REMOVIDO UN SEGMENTO DE UN CORTADO PARA MOSTRAR LA DISTRIBUCIÓN DE DENSIDAD RELATIVA, QUE ARBITRARIAMENTE SE DENOTA CON EL TAMAÑO DE LAS ESFERAS.

FUENTE: WEAIRE, D., S. J. COX AND J. BANHART, "METHODS AND MODELS OF METALLIC FOAM FABRICATION." PROC. 8TH ANN. INTL. CONF. COMPOSITES ENGNG., D. HUI (ED), TENERIFE, 2001, p. 977.

Para otras aplicaciones son fundamentales la reactividad y las propiedades de transporte, que son procesos de percolación. De modo que los conceptos de la teoría de la percolación, junto con los constructos de computador y el modelamiento matemático proporcionan herramientas poderosas para entender el papel de la morfología irregular en los procesos de reacción transitoria y los procesos de difusión en los compuestos desordenados. Esto incluye difusión, combustión y catálisis en medios porosos y conducción en medios celulares [32].

Esto es así porque las espumas metálicas han visto aumentar su aplicación en control de flujo y mejora de la transferencia de calor. Ejemplos de ello son: el procesamiento de semiconductores donde el ataque seco y la CVD requieren control preciso del flujo de gas y un campo de plasma ionizado y; mejora de la transferencia de calor en una cámara de combustión con propulsión de

chorro líquido, que se ha visto que es más efectiva en este sentido. El excelente desempeño de las espumas metálicas en esas aplicaciones se atribuye a las intricadas geometrías interfaciales que se encuentran en ellas, las que crean una trayectoria de flujo altamente tortuosa con una disrupción de la hidrodinámica establecida y capas térmicas límites. En el caso de la espuma de aluminio, el buen contacto térmico con la espuma soldada a un sustrato de aluminio se combina con la buena conductividad del aluminio. El desempeño óptimo en flujo de las espumas metálicas depende de los parámetros del fluido, como viscosidad, densidad, y los parámetros geométricos como tamaño y distribución de los poros. Todo esto ha aumentado el interés por el desarrollo de modelos para predecir, entre otros parámetros, la caída de presión en las espumas metálicas [33]. Algunos investigadores usaron la analogía entre el flujo a través de una espuma y el que ocurre a través de un banco de cilindros para derivar una expresión analítica para la caída de presión. Unos han definido un coeficiente friccional, que se calibra experimentalmente, para aplicarlo a una espuma de un tamaño y porosidad específicos [34]. La expresión analítica de los otros tiene en cuenta el tamaño y la porosidad pero todavía depende de la calibración experimental de un factor geométrico para aplicación general [35]. Los distintos procedimientos han mostrado que el modelamiento puede predecir con precisión los gradientes de presión.

Sin embargo, ha sido el comportamiento mecánico el que más se ha modelado porque, como señala Ashby [36] la respuesta plástica de las espumas metálicas defiere significativamente de la que tienen los metales completamente densos (macizos), puesto que las mismas se compactan al ser comprimidas y el criterio de fluencia depende de la componente hidrostática del tensor de tensiones.

Se han reportado pocos modelos de homogeneización para el comportamiento plástico local de las espumas metálicas. Algunos de estos modelos han sido implementados en códigos computacionales comerciales. En un trabajo desarrollado por Hanssen *et al*. [37] se validó la aplicabilidad que tenían los modelos constitutivos más importantes que existen para sólidos celulares, cuyas superficies de fluencia se comparan en la Figura 15, en el modelamiento de una espuma de aluminio sometida a diferentes estados de carga [37], [41] Se ve que el más ajustado es el de Deshpande y Fleck.

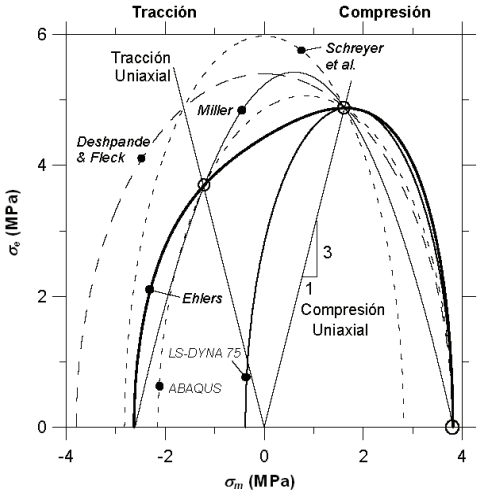

FIGURA 15. COMPARACIÓN DE SUPERFICIES DE FLUENCIA DE MODELOS CONSTITUTIVOS DE ESPUMAS METÁLICAS.

FUENTE: HANSEN, A. *et al.*, "VALIDATION OF CONSTITUTIVE MODELS APPLICABLE TO ALUMINIUM FOAMS", INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCES, VOL. 44, 2002, p. 359

Estos modelos para espumas isotrópicas han sido ampliados a espumas anisotrópicas [42] y, además los hay que predicen la respuesta en comprensión [43], [45], la localización de la deformación unitaria [46], [47], la fractura [48] y el comportamiento dinámico [49].

5. Aplicaciones estructurales

En las espumas metálicas los poros representan entre el 65 y el 90% del volumen total, pero el proceso de espumado no afecta las propiedades del material de las paredes de las celdas. Sin embargo, esto produce una distribución espacial única del metal, que proporciona propiedades muy diferentes a las del material masivo. La estructura celular genera así propiedades que no se pueden obtener con los tratamientos convencionales. Es obvio que las propiedades de las espumas dependen significativamente de su porosidad [50], por esa razón, manipulando la densidad se pueden obtener los perfiles deseados de propiedades [51]. La estructura anisotrópica o de gradiente de poros permite la distribución de un material portante de carga de la mane-

ra más conveniente de acuerdo con las condiciones de carga (simulando la estructura ósea), sin necesidad de aumentar el peso o el volumen total del componente [52]. La espuma es aplastable, lo que permite convertir la energía cinética (impacto) en calor, con tensiones ajustables. Esas son características atractivas de este notable material.

Algunas de las propiedades de la espuma metálica, como el módulo de elasticidad, tensión de colapso plástico, conductividades térmica y eléctrica, etc., se pueden estimar a partir de la densidad aparente del componente espumado de acuerdo con relaciones de escalamiento como

$$\frac{K}{K_S} = z\left(\frac{\rho}{\rho_S}\right)^t$$

Donde K y ρ son la propiedad y la densidad aparente de la espuma y K_S y ρ_S son la propiedad y la densidad del sólido de la pared de la celda y "z" y "t" son constantes que dependen de la estructura y la propiedad que se considere [53], [54]. De otro lado, algunas propiedades como la expansión térmica, calor específico, etc., no dependen de la porosidad y son los mismos que para el material masivo. Debe anotarse que las relaciones de escalamiento, desarrolladas originalmente para las espumas de polímeros, que asumen estructura celular uniforme al menos macroscópicamente. Sin embargo, las espumas metálicas son demasiado diferentes de las espumas poliméricas que generalmente tienen una microestructura regular, en tanto que las metálicas están fuertemente desordenadas con una amplia dispersión de tamaño y forma de las celdas. Más aún, existen muchas imperfecciones en la estructura de la celda, como grietas y huecos, corrugaciones, etc. Si esas características no se tienen en cuenta y las propiedades de la espuma se caracterizan solamente en relación con la densidad aparente, se puede esperar una mayor dispersión de las propiedades. Por tanto, las propiedades de la espuma se deben predecir por métodos estadísticos, usando funciones adecuadas de distribución [55].

De hecho, la mayoría de las propiedades se pueden lograr también con otros materiales, algunas veces de una manera más eficiente. Sin embargo, las espumas metálicas pueden ofrecer combinaciones únicas (a veces contradictorias) de propiedades que no se pueden lograr con un material convencional.

Algunas otras propiedades de las espumas metálicas son las siguientes:

- Son resistentes al fuego y no son inflamables ni emanan humos tóxicos en un fuego
- Son completamente reciclables o sea ambientalmente amigables
- Tienen elevada capacidad para absorber todo tipo de energía, incluida la de impacto, como ya se mencionó
- Tienen baja conductividad térmica
- Tienen permeabilidad magnética
- Son eficientes en atenuación de todo tipo de vibraciones incluido el sonido
- Son adecuadas para el blindaje electromagnético

Así, las principales aplicaciones de las espumas metálicas son:

- Estructuras que requieran características de soporte de cargas y para ahorrar peso y como estructuras que absorben impactos en los vehículos
- Para absorción de la vibración y el sonido
- Para la filtración y la catálisis a temperatura elevada
- Para los intercambiadores de calor
- Para aparatos médicos y prótesis
- Para filtración y atenuación

Por las razones anteriores, son materiales que se usan en muchos tipos de industrias, Figura [16], [56].

Unas de las principales aplicaciones de las espumas metálicas es en las estructuras, por ello es conveniente detenerse un poco en las propiedades mecánicas de estos materiales, así la Figura 17 muestra la curva tensión deformación para una espuma de una aleación de aluminio ($AlCu_4$), con una porosidad inicial del 83%: casi lineal al principio, colapso plástico y densificación final [57]. Sin embargo, no basta con conocer estas propiedades, porque el comportamiento de un componente cuando se carga depende del mecanismo mediante el cual se deforma. Una viga cargada transversalmente se puede flexionar elásticamente; puede ceder plásticamente; se puede deformar por fluencia lenta; y se puede fracturar de una manera frágil o dúctil. La ecuación que describe la respuesta del material se conoce como una ecuación constitutiva, que difiere para cada mecanismo. La ecuación constitutiva contiene una o más de la

propiedades del material, generalmente el módulo de Young, E, y relación de Poisson, υ; la dureza H, entra en los problemas de contacto; la tenacidad JIC, entra para la fractura frágil [58], [65]. Las ecuaciones constitutivas comunes para la deformación mecánica se presentan en la Tabla 1. En cada caso se da primero la ecuación para la carga de tracción uniaxal, debajo está la eacuación para carga multiaxial con los esfuerzos principales σ1, σ2, σ3. Estas son las ecuaciones básicas que determinan la respuesta mecánica [66].

Por estas razones las espumas se pueden usar en aplicaciones como los paneles livianos para soportar carga (planos o conformados, Figura 18), que se pueden usar para divisiones (paredes, pisos), en varios equipos tecnológicos (vitrinas, mesas), contenedores portátiles, muebles, vagones de ferrocarril, tranvías y barcos, o como paneles de recubrimiento para interiores y fachadas. Los paneles hechos de espuma metálica –en particular de espuma de aluminio– se usan en esas aplicaciones por sus elevados valores de los parámetros E /ρ3 and σ_c /ρ_2 (E –módulo de elasticidad, ρ –densidad aparente, σ_c –tensión de inestabilidad plástica), que caracterizan el comportamiento del material en flexión, respecto al peso mínimo [67].

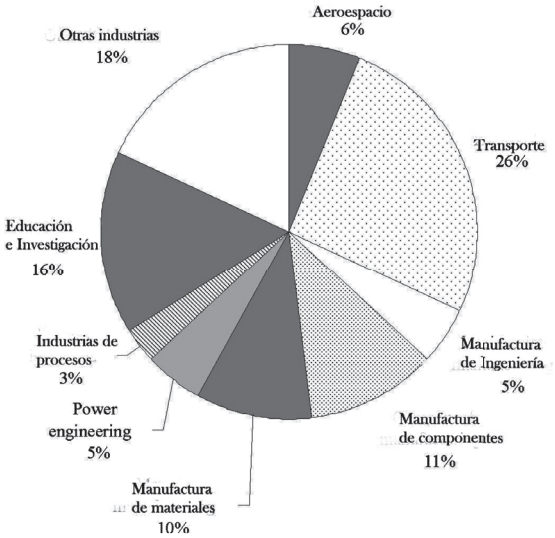

FIGURA 16. REQUERIMIENTOS INDUSTRIALES DE LAS ESPUMAS METÁLICAS

FUENTE: SRIVASTAVA, V. C. AND K. L. SAHOO, "PROCESSING, STABILIZATION AND APPLICATIONS OF METALLIC FOAMS. ART OF SCIENCE". *MATERIALS SCIENCE-POLAND*, VOL. 25, NO. 3, p. 733, 2007.

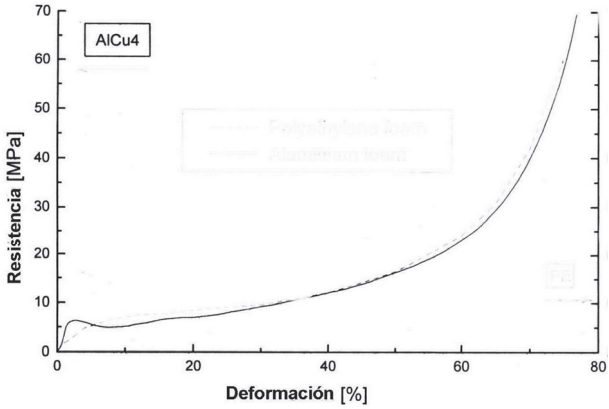

FIGURA 17. CURVA TENSIÓN DEFORMACIÓN PARA UNA ESPUMA DE ALUMINIO.

FUENTE: *YU, C. – J. AND J. BANHART, " MECHANICAL PROPERTIES OF METALLIC FOAMS", PROCEEDINGS OF THE FRAUNHOFER USA SYMPOSIUM ON METALLIC FOAMS, J. BANHART AND H. EIFERT (EDS.), MIT-VERLAG, BREMEN, 1998, p. 37

De otro lado, los absorsores de energía son una clase de productos que generalmente absorben energía mecánica comprimiéndose o flexionándose a una tensión constante sobre una distancia extendida, y sin rebote. Los resortes ejercen una función similar, pero rebotan, y por tanto son aparatos para almacenar energía y no absorsores de energía.

Los materiales para este propósito deben tener una curva tensión deformación, como la de la Figura 19 que, como se ve, coincide con la de las espumas metálicas, Figura 17.

FIGURA 18. PANELES DE ESPUMA METÁLICA, EN SANDUCHE Y REFORZADOS CON MALLA DE ACERO

FUENTE: SIMANCIK, F., "METALLIC FOAMS – ULTRA LIGHT MATERIALS FOR STRUCTURAL APPLICATIONS". *INZYNIERIA MATERIALOWA*, NO.5, P. 823, 2001.

TABLA 1. ECUACIONES CONSTITUTIVAS PARA LA RESPUESTA MECÁNICA

Sólidos isotrópicos: deformación elástica	
Uniaxial	$\varepsilon_1 = \dfrac{\sigma_1}{E}$
General	$\varepsilon_1 = \dfrac{\sigma_1}{E} - \dfrac{\nu}{E}(\sigma_2 + \sigma_3)$
Sólidos isotrópicos: comportamiento plástico	
Uniaxial	$\sigma_1 \geqslant \sigma_y$
General	$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y \quad (\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3)$ (Tresca)
	$\sigma_e \geqslant \sigma_y$ (Von Mises) con
	$\sigma_e^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$
Espumas: deformación elástica	
Uniaxial General	Como los sólidos isotrópicos aunque algunas espumas son anisotrópicas
Espumas: deformación plástica	
Uniaxial	$\sigma_1 \geqslant \sigma_y$
General	$\hat{\sigma} \geqslant \sigma_y$
	con $\hat{\sigma}^2 = \dfrac{1}{(1 + (\alpha/3)^2)}[\sigma_e^2 + \alpha^2\sigma_m^2]$
	y $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$
Propiedades del material	
E = Módulo de elasticidad	σ_y = Resistencia a la cedencia
ν = Relación de Poisson	α = Constante de cedencia

FUENTE: ASHBY, M. F. *et al.*, METAL FOAMS: A DESIGN GUIDE, BUTTERWORTH-HEINEMANN, BOSTON, 2000, p. 63

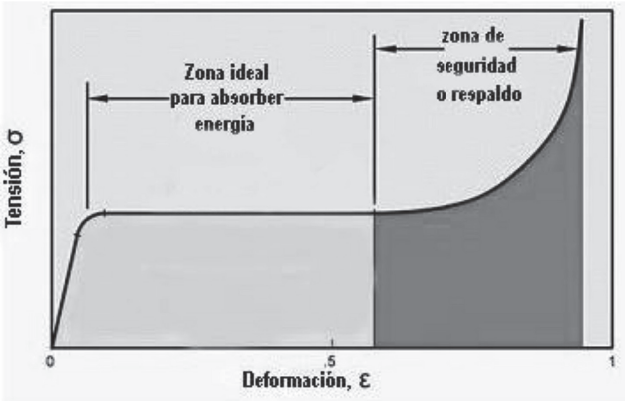

FIGURA 19. CURVA TENSIÓN DEFORMACIÓN PARA UN MATERIAL ABSORSOR DE ENERGÍA.

FUENTE: HTTP://WWW.ERGAEROSPACE.COM/ENERGY-ABSORBTION.HTML

Una vez la tensión excede la meseta de colapso plástico, zona ideal de la Figura 19, la espuma empieza a comprimirse a una tensión más o menos estable hasta una deformación de 50–70%. Esta sección extendida de la curva define el comportamiento de un absorsor ideal. En esta zona, el área bajo la curva representa el trabajo por unidad de volumen.

Es decir, que el trabajo que se hace comprimiendo una espuma es equivalente a la energía cinética de una masa que puede impactar ese bloque. Por ello si se diseña con el espesor adecuado, una espuma puede absorber toda la energía de una masa que la impacta. Más importante, la estructura a la cual se une la espuma (y protege) nunca experimentará una fuerza superior a la de aplastamiento de ésta. Esta es la idea para usar estos materiales en los parachoques de los vehículos, Figura 20.

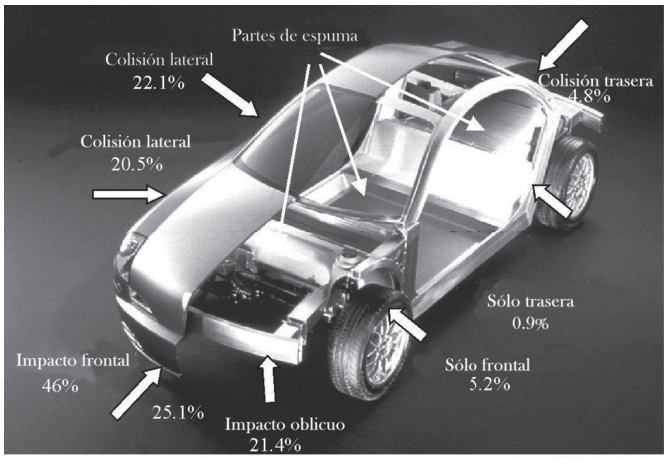

FIGURA 20. PARTES DE UN AUTO KARMANN HECHAS CON ESPUMA DE ALUMINIO. TIPOS DE IMPACTOS Y COSTO DE LOS DAÑOS.

FUENTE: SRIVASTAVA, V. C. AND K. L. SAHOO, "PROCESSING, STABILIZATION AND APPLICATIONS OF METALLIC FOAMS. ART OF SCIENCE". *MATERIALS SCIENCE-POLAND*, VOL. 25, NO. 3, p. 749, 2007.

Las aplicaciones estructurales de las espumas metálicas se resumen en la Tabla 2.

TABLA 2. APLICACIONES ESTRUCTURALES DE LAS ESPUMAS METÁLICAS.

Aplicación	Comentario
Estructuras livianas	Excelente relación rigidez/peso cuando se cargan en flexión
Atenuación mecánica	La capacidad de atenuación de las espumas es hasta diez veces la de los metales sólidos
Control de la vibración	Los paneles de espuma tienen frecuencias flexurales naturales más elevadas
Absorción acústica	Las espumas tienen capacidad de absorber el sonido
Manejo de la energía	Las espumas metálicas absorben energía a presión casi constantes

Aplicación	Comentario
Habilidad de empaquetamiento	Absorben los impactos a carga constante, y tienen estabilidad térmica a temperaturas superiores a la ambiente
Manejo del calor	Las espumas metálicas no son inflamables; la oxidación de las caras de las celdas de las espumas de aluminio parece dar resistencia excepcional a la llama directa

FUENTE: ASHBY, M. F. ET AL., METAL FOAMS: A DESIGN GUIDE, BUTTERWORTH-HEINEMANN, BOSTON, 2000, p. 73.

6. Aplicaciones térmicas

El uso de medios porosos para extender el área de transferencia de calor, mejora la conductividad térmica, la mezcla del flujo de fluidos y este es un tema constante en el campo de la ingeniería térmica. De acuerdo con la conexión interna de los poros, estos materiales se pueden clasificar como consolidados o no consolidados. Para propósitos térmicos los medios porosos consolidados son más atractivos porque su resistencia de contacto es mucho más baja. En el caso de las espumas metálicas, Figura 21, estas exhiben, excelente desempeño térmico debido a sus muchas ventajas únicas, como baja densidad relativa, alta resistencia, elevada área superficial por unidad de volumen; alta conductividad térmica del sólido y buena capacidad de mezcla de fluidos [68]. Es decir, estos materiales se pueden usar en muchas aplicaciones para la mejora de la transferencia de calor [69].

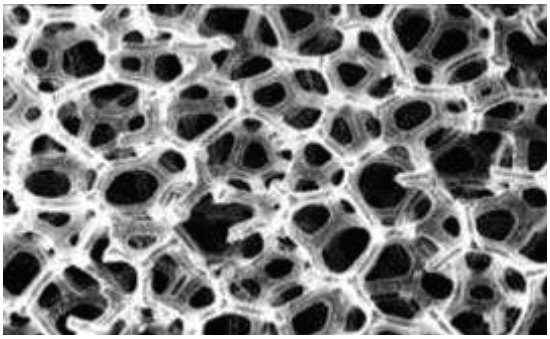

FIGURA 21. ESPUMA DE COBRE VISTA EN EL SEM

FUENTE: QU, Z. G., "THERMAL TRANSPORT IN METALLIC POROUS MEDIA." HEAT TRANSFER – ENGINEERING APPLICATIONS, VYACHESLAV VIKHRENKO (ED.), INTECH, RIJEKA, CROATIA, 2011, p. 172.

Debe recordarse que la conductividad térmica aparente de una estructura porosa tiene cuatro contribuciones: además de la conductividad térmica de la pared sólida de la celda, también cuenta la conductividad del gas atrapado y los efectos de convección y radiación. A temperaturas más elevadas las conductividades térmicas decrecen debido a que la radiación es muy elevada (radiación ~ T^4). En general, las espumas de celda abierta exhiben una conducción de 1 a 5% de la del material de la matriz. Las medidas experimentales han determinado una relación funcional entre la conductividad térmica de estas y la densidad como $\lambda_s \rho_r^{1.8} < \lambda_f < \lambda_s \rho_r^{1.65}$, donde ρ_r es la densidad relativa de la red, λ_f la conductividad de la red y λ_s la conductividad del sólido [70]. Una mayor conductividad del material está asociada con mayores densidades. Por otro lado, las estructuras con celdas mayores exhiben una conductividad un poco menor[71]. Como las estructuras en redes tienen distribuciones de masa casi isotrópicas, la conductividad térmica de tales materiales también es muy isotrópica.

El coeficiente de transferencia de calor de una estructura en red está influido por el diámetro de la celda y la porosidad. Por una parte, los poros menores dan mejor capacidad de transferencia de calor y por la otra, la permeabilidad de las estructuras con poros menores decrece. En cuanto a la densidad, las estructuras con tamaños de celdas 0.5 mm y una porosidad de 85% exhiben una mayor capacidad de transferencia de calor que otras con diámetros de 1.8 a 2 mm y porosidad de 90% [72].

Por las razones anteriores las espumas metálicas se están usando en diferentes aplicaciones, por ejemplo, gracias a la técnica de cosinterización, la resistencia térmica de los medios metálicos porosos es muy alta, lo que satisface la transferencia de calor demandada por muchas aplicaciones de ingeniería, como el enfriamiento de los aparatos electrónicos. La convección natural en estos medios fue estudiada por Z. G. Qu *et al*. [73], con un montaje como el que se ve en la Figura 22.

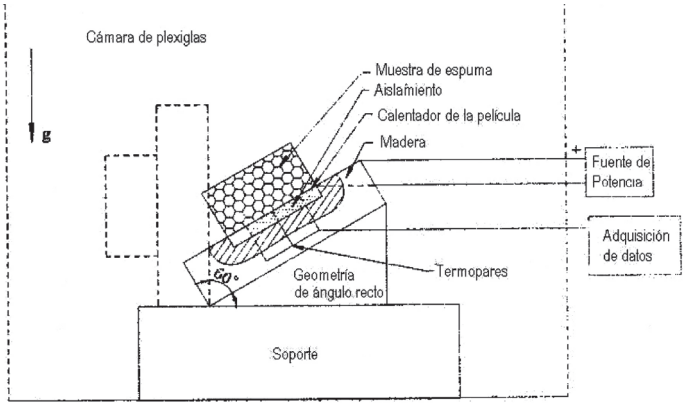

FIGURA 22. MONTAJE PARA MEDIR LA CONVECCIÓN NATURAL EN UNA SUPERFICIE INCLINADA SINTERIZADA CON ESPUMAS METÁLICAS.

FUENTE: QU, Z. G., "THERMAL TRANSPORT IN METALLIC POROUS MEDIA". HEAT TRANSFER – ENGINEERING APPLICATIONS, VYACHESLAV VIKHRENKO (ED.), INTECH, RIJEKA, CROATIA, 2011, p. 172.

Se encontró que estos materiales tienen gran potencialidad pero por la característica caída de la presión, aquellos con elevada porosidad y baja densidad de los poros son considerablemente más atractivos, en vista de la reducción de la pérdida de presión. Para la transferencia de calor forzada por convección, otra manera de disminuir la caída de presión es llenar el ducto parcialmente con medio metálico poroso. En este experimento se encontró que la convección natural en espumas metálicas tiene un efecto moderado en la mejora de la transferencia de calor.

Otra aplicación de las espumas metálicas es como un elemento de pared abierta en las cámaras de combustión. La Figura 23 muestra el montaje de Reutter *et al.* [74], para estudiar la caída de presión en espumas de aleaciones de níquel.

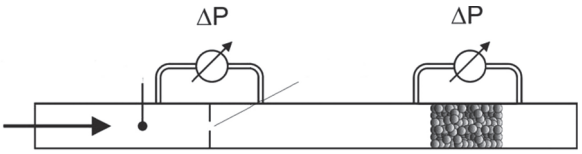

FIGURA 23. MONTAJE PARA MEDIR LA CAÍDA DE PRESIÓN

FUENTE: REUTTER, O. *et al.*, "CHARACTERIZATION OF AIR FLOW THROUGH SINTERED METAL FOAMS". *JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING,* VOL. 130, pp. 051201-1, 2008.

Se encontró que es clara la tendencia de que a mayor densidad menor permeabilidad, lo que corresponde a la conocida dependencia de la permeabilidad con la porosidad, estudiada en otras estructuras [75]. Los resultados mostraron que para la misma porosidad, los distintos materiales tienen diferentes permeabilidades, además que en la dirección de espumado la caída de presión es más elevada que en la transversal. Por encima de 70% de porosidad los poros primarios forman una red y estas medidas permiten crear espumas con las características deseadas de caída de presión y se puede mejorar el diseño de elementos funcionales, como las paredes de las cámaras de combustión en las turbinas de gas.

En otro experimento [76], cuyo montaje se muestra en la Figura 24, se obtuvo la relación

$N_u = 1.2R_e^{0.43} P_r^{1/3}$

Donde N_u = número de Nusselt

R_e = número de Reynolds

P_r = número de Prandtl

Que se parece a la relación semiteórica encontrada en la literatura

$N_u = 0.9R_e^{0.4}P_r^{1/3}$

Que es una correlación para la transferencia de calor en el flujo a través de bancos de tubos, a bajos números de Reynolds, lo que da una idea de la uniformidad de los vacíos en las espumas y permite modelarlas como un arreglo de cilindros.

Experimentos similares han mostrado que:

1. Los sumideros de calor de espuma metálica, comparados con los disponibles comercialmente, tiene menor resistencia térmica.
2. El coeficiente de convección aumenta de 13 a 3%.
3. Se logra una reducción de peso del orden de 50%
4. El área transversal se reduce en más de 70% [77]

La misma idea se ha aplicado a la refrigeración de las paredes de las cámaras empuje de los cohetes con buenos resultados [78].

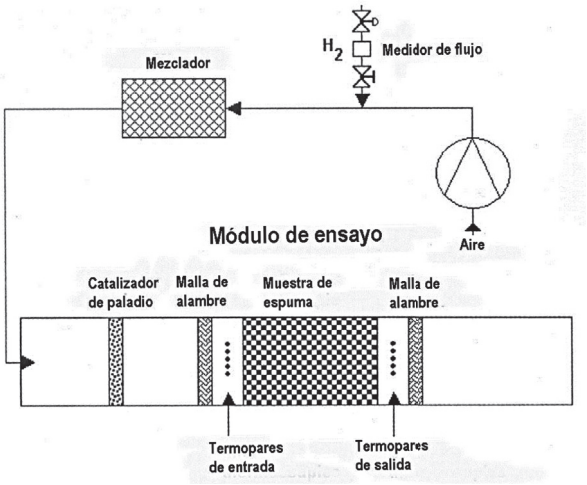

FIGURA 24. MONTAJE PARA MEDIR LA TRANSFERENCIA DE CALOR

FUENTE: GIANI, LEONARDO, GIANPIERO GROPPI, AND ENRICO TRONCONI, "HEAT TRANSFER CHARACTERIZATION OF METALLIC FOAMS." *IND. ENG. CHEM. RES,* VOL.44, p. 9078, 2005.

También se han determinado las propiedades térmicas de las espumas compactadas, en la Figura 25 se observa el material usado en una experimentación donde la espuma se comprimió por un factor de 4 [79]. En la Figura 26 se observa el montaje para medir las características térmicas e hidráulicas de los intercambiadores de espuma de aluminio comprimida con la intención de usarlas como disipadores de calor en aparatos electrónicos, que disipan grandes cantidades de calor.

Se usaron varios métodos comunes de evaluación de intercambiadores de calor a los datos reunidos con este montaje donde se hicieron muchas pruebas, incluida la caracterización hidráulica, el comportamiento de transferencia de calor, y la eficiencia, para determinar la configuración del mejor intercambiador de espuma. Se encontró que la espuma comprimida se desempeña bien no sólo en la mejora de la transferencia de calor comparada con varios intercambiadores de calor comerciales, operando bajo condiciones casi idénticas. Los intercambiadores de espumas dismi-

nuyeron la resistencia térmica cerca a la mitad cuando se comparan con los intercambiadores conocidos diseñados para la misma aplicación.

Lo cierto es que el flujo unidireccional a través de canales porosos da una diferencia de temperatura relativamente elevada a lo largo de la dirección de flujo sobre la superficie del sustrato. Para los modernos microprocesadores de alta velocidad, la confiabilidad de los transistores y la velocidad de operación están influidas no sólo por la temperatura promedio sino también por la uniformidad de la temperatura en la superficie del sustrato. Por consiguiente, en el diseño térmico, es imperativo mantener la uniformidad de la distribución de la temperatura en la matriz por debajo de ciertos límites. El flujo oscilante a través de un canal poroso producirá una distribución de temperatura más uniforme debido a la presencia de dos regiones de entrada para el flujo oscilante. Guo *et al.* [80], investigaron el flujo oscilante y las características de transferencia de calor en un tubo circular parcialmente lleno con medio poroso y examinaron la mejora. Así mismo Leong y Jin [81] estudiaron la transferencia de calor en un canal lleno con espuma metálica, y sometido a flujo oscilante. Sus resultados mostraron que el comportamiento de transferencia de calor en un canal se puede mejorar sustancialmente insertando un medio poroso sometido a un flujo oscilante. La relación entre un número cinético de Reynolds y una tasa total de transferencia de calor sugiere que un flujo oscilante a una frecuencia relativamente baja tiene un efecto sustancial en la mejora de la transferencia de calor en un sumidero de calor hecho de espuma metálica. Los resultados indican que las tasas de transferencia de calor en un flujo oscilante pueden ser hasta 1.4 veces más elevadas que en un flujo estable [82].

Otras aplicaciones de estos materiales es en las celdas de combustible, como en las de membrana de intercambio de protones, donde la información sobre el campo de temperatura y las tasas asociadas de transferencia de calor son particularmente importantes al diseñar estrategias de manejo del agua. Un modelo diseñado y experimentado por Sadeghi muestra que

las predicciones están de acuerdo con todos los datos experimentales para un rango de porosidades entre 30 y 80%. También se investigaron diferentes cargas y se encontró que el modelo funcionaba bien para tensiones de compresión entre 0.2 y 1.5 MPa [83].

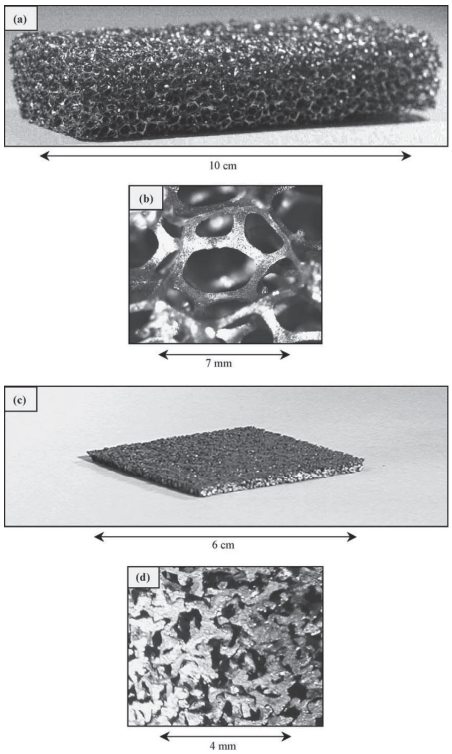

FIGURA 25. 1. (A) ESPUMA DE ALEACIÓN T–6106 ALUMINIO CON UNA POROSIDAD DE 92% Y POROS DE UNOS 6 MM DE DIÁMETRO; (B) VISTA EN EL MICROSCOPIO DE TAL ESPUMA; (C) ESPUMA COMPRIMIDA POR UN FACTOR DE 4; (D) VISTA EN EL MICROSCOPIO DE LA ESPUMA COMPRIMIDA, CON LAS CELDAS ALTERADAS.

FUENTE: BOOMSMA, K. D. POULIKAKOS AND F. ZWICK, "METAL FOAMS AS COMPACT HIGH PERFORMANCE HEAT EXCHANGERS". *MECHANICS OF MATERIALS*, VOL. 35, p. 1161, 2003.

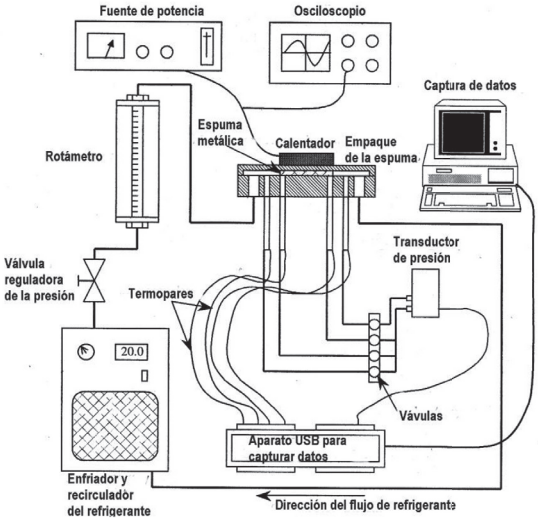

FIGURA 26. MONTAJE PARA MEDIR LAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS E HIDRÁULICAS DE LOS INTERCAMBIADORES DE ESPUMA DE ALUMINIO COMPRIMIDA.

FUENTE: BOOMSMA, K. D. POULIKAKOS AND F. ZWICK, "METAL FOAMS AS COMPACT HIGH PERFORMANCE HEAT EXCHANGERS". *MECHANICS OF MATERIALS*, VOL. 35, p. 1161, 2003.

7. Aplicaciones como catalizadores

Los sistemas catalíticos basados en soportes estructurados son de mucho interés por las significativas mejoras que ofrecen en los procesos químicos, principalmente en catálisis ambiental y combustión [84]. Los reactores convencionales basados en catalizadores de lecho fijo tienen varios inconvenientes, como un acceso no homogéneo a la superficie catalítica y una caída de presión muy grande. El desarrollo de los llamados soportes estructurados ha sido impulsado por la búsqueda de otros sistemas que eviten esos problemas. Estos son sistemas que permiten separar las funciones catalíticas de las físicas y mecánicas, puesto que comprenden un material que da las necesarias propiedades físicas y una capa de soporte catalítico donde se ubican las especies químicas activas. Los soportes estructurados

son estructuras rígidas, tridimensionales con canales o macroporos que permiten una baja caída de presión y que tienen una gran superficie lateral donde se puede aplicar una delgada capa de catalizador. Los soportes estructurados se pueden clasificar en varios grupos: monolíticos de canales paralelos, espumas, catalizadores de membrana, fibras y paños catalíticos [85], [86].

Entre los soportes estructurados más usados están los monolitos o colmenas que se hacen de canales paralelos longitudinales de pequeño diámetro separados por paredes delgadas donde se aplican los catalizadores. Pero, en general, los monolitos ofrecen un canal de estructura estrecha donde ocurre el flujo laminar, y esto implica limitaciones en la transferencia de masa de la fase gaseosa a la capa de catalizador de la pared [87]. Para aumentar la transferencia de masa a la pared, así como la temperatura radial y homogeneidad de la composición, se puede usar la mezcla de flujo entre los canales, que llevará a un aumento de la turbulencia. Esto se puede lograr con diseños especiales en los monolitos metálicos y usar espumas de porosidad abierta (85–90%) [88]. Estas últimas exhiben una trayectoria tortuosa al flujo que, a pesar de una mayor caída de presión permite aumentar la turbulencia y la mezcla radial. Las espumas metálicas empiezan a aplicarse en catálisis por su baja densidad y alta resistencia mecánica que permiten la manufactura de productos livianos y rígidos.

Por ejemplo, los catalizadores de espuma de aluminio mostraron resultados excelentes en la oxidación completa del tolueno. El aumento en la densidad de la porosidad de la espuma (disminución del tamaño del poro) produjo un aumento en la caída de presión, pero mejoró la efectividad del Pt usado, pues requirió menos cantidad, debido probablemente a las mejores propiedades de transporte [89].

Otros ejemplos de aplicaciones donde se han usado espumas metálicas en catálisis heterogéneas son la combustión catalítica del metano [90], la producción de hidrógeno por reacción de desplazamiento en el agua [91], la purificación de los gases en los exostos de los automóviles [92], la oxidación de amoníaco para la producción de ácido nítrico [93], la oxidación parcial del metanol [94], la oxidación profunda de hidrocarburos [95], la reforma del dióxido de carbono [96], y la síntesis de Fischer- Tropsch synthesis [97].

En general, se ha encontrado que hay una interrelación entre la caída de presión y la transferencia de masa que indica que las espumas metálicas exhiben ventajas marcadas sobre los lechos empacados, pero como soportes de catalizadores en reacciones rápidas no superan a los monolitos [98].

Como ejemplo de estas aplicaciones en la Figura 27 se ve un montaje para estudiar la reforma solar del metano con CO, usando un absorsor irradiado directamente, sometido a niveles de flujo solar entre 180 y 250 kW/m^2. Este proceso termoquímico solar puede mejorar el valor calorífico del suministro de metano en un 17% para producir hidrógeno vía reacción de desplazamiento en agua. Se encontró que el absorsor de espuma metálica de Ni – Cr – Al tiene un desempeño térmico superior a otros materiales [99].

En fin, otra aplicación de las espumas metálicas es como filtro, por ejemplo en la separación de las partículas de los gases calientes. Se ha encontrado que en ese sentido son efectivas, con una superficie adaptada, la retención puede ser total. La regeneración opera con ácido por un tiempo muy corto, de menos de diez minutos. Además, el modelamiento da una buena adecuación con los resultados experimentales y permiten transferir el modelo a escala industrial [100].

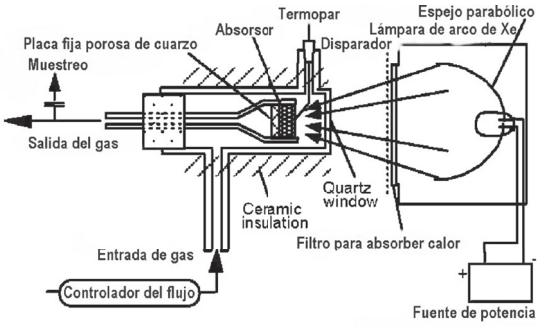

FIGURA 27. MONTAJE PARA ESTUDIAR LA REFORMA SOLAR DEL METANO CON CO SOBRE UN ABSORSOR DE ESPUMA METÁLICA DE NI – CR – AL.

FUENTE: KODAMA, T. *et al*. "SOLAR METHANE REFORMING USING A NEW TYPE OF CATALYTICALLY- ACTIVATED METALLIC FOAM ABSORBER". *TRANSACTIONS OF THE ASME*, VOL. 126, p. 808, 2004.

8. Aplicaciones como biomateriales

De manera general, los materiales metálicos usados en aplicaciones biomédicas, como las prótesis ortopédicas, los aparatos de osteosíntesis o los implantes dentales, deben poseer propiedades mecánicas similares a las del hueso, además de buena resistencia a la corrosión, bioadhesión y biocompatibilidad [101].

Las superficies de los implantes metálicos –que cumplen parcialmente con las condiciones anteriores– se han tratado para lograr un buena fijación con el hueso, sin el uso de cemento de acrílico, ya sea sinterizando polvos sobre ellas o recubriéndolas por rociado con plasma [102], [103]. Es por ello que entre las muchas posibilidades de aplicación de las espumas metálicas están los implantes biocompatibles porque su estructura porosa abierta permite el crecimiento hacia adentro de los nuevos tejidos del hueso y el transporte de los fluidos del cuerpo [104], [105]. Además, como ya se ha anotado, es muy atractivo que con el ajuste de la porosidad se pueda lograr que el módulo de Young de la espuma metálica sea similar al del hueso.

Sin embargo, la investigación y desarrollo de estos materiales no se ha completado, al principio se utilizaron espumas de titanio puro con alrededor de 80% de porosidad, que exhibieron un buen módulo de elasticidad, pero no eran lo suficientemente resistentes comparadas con el hueso cortical [106], por ello se han continuado desarrollando aleaciones para estos propósitos.

Es decir, las mejores propiedades biológicas debidas a la mayor porosidad se comprometen con la disminución de la resistencia mecánica, lo cual define el límite superior del tamaño del poro y la porosidad. Las concentraciones de tensiones iniciales en los poros decrecen la resistencia flexural, disminuyen la resistencia a la fatiga y aumentan el desgaste [107], [108]. Los estudios han mostrado que las aleaciones Co – Cr y Ti – 6Al – 4V experimentan drásticas disminuciones en la resistencia a la fatiga cuando se fabrican como recubrimientos porosos sobre núcleos de estructuras sólidas [109], [112].

Sin embargo, se han desarrollado tratamientos para mejorar esas condiciones y se reconoce que hay tres tipos distintos de implantes porosos:

- Sustratos sólidos recubiertos de material parcial o totalmente poroso
- Materiales totalmente porosos
- Segmentos porosos unidos a una parte metálica sólida

Y hay varias aplicaciones que pueden usar los dos primeros tipos:

- Aparatos de fijación espinal
- Placas de fractura
- Alambres, pasadores y tornillos
- Implantes para la unión de ligamentos artificiales
- Implantes cráneo facial
- Implantes maxilofaciales
- Injertos óseos para llenar defectos de tumores

Los implantes con núcleos sólidos y recubrimientos porosos son más apropiados cuando el metal poroso sólo no proporciona suficiente resistencia mecánica para soportar las cargas fisiológicas, como en:

- Implantes dentales
- Implantes en uniones autoplásticamente [113]

En realidad, las espumas metálicas hacen parte de la tercera generación de biomateriales, que aparecieron aproximadamente al mismo tiempo que los andamios o matrices para las aplicaciones en la ingeniería de tejidos que empezaba a desarrollarse. Esto porque uno de los problemas más devastadores que puede enfrentar un paciente es la pérdida de un órgano o de tejido. Una de las soluciones para el reemplazo de tejido, llamada neomorfogénesis, es remover las células de los pacientes o de un pariente cercano y expandirlas en una matriz polimérica porosa. Esto es parte de lo que se ha denominado ingeniería de tejidos y órganos, también llamada medicina regenerativa, que actualmente es un disciplina biomédica nueva que abarca a la Biología, la Medicina, la Química, la Ciencia de los Materiales y la Informática o en términos más generales, a la Ingeniería en todas sus manifestaciones.

El objetivo de la ingeniería de tejidos es reparar tejidos reproduciendo los mecanismos que intervienen en la renovación de las células del organismo. Es una alternativa al trasplante tradicional de órganos que no siempre es posible tanto por la falta de donantes como por el riesgo de que el paciente rechace el órgano recibido.

La ingeniería de tejidos se basa en el uso, de forma conjunta o separada, de tres elementos:

1. **Células** cultivadas o modificadas genéticamente en el laboratorio.
2. **Moléculas** que actúan como señales químicas sobre esas células haciendo que, por ejemplo, comiencen a multiplicarse.
3. **Estructuras tridimensionales** que pueden imitar la estructura de un órgano. Sirven para reemplazar parte de un órgano dañado que ha dejado de desarrollar su función o como vehículo para transportar células y moléculas en su interior hasta el tejido u órgano.

Esta ingeniería es una especialidad que aplica los principios de la Ingeniería y las ciencias de la vida a la fabricación de sustitutos biológicos que mantengan, mejoren o restauren la función de órganos y tejidos en el cuerpo humano. De naturaleza eminentemente interdisciplinaria, la ingeniería de tejidos incluye conceptos de ramas tan diversas como la biología celular, la microfabricación, la robótica y la ciencia de los materiales para diseñar partes de reemplazo del cuerpo humano.

El término ha sido también aplicado a los esfuerzos de diseño de funciones bioquímicas usando células junto con sistemas de soporte creados artificialmente (por ejemplo, un páncreas artificial o hígado artificial).

La matriz extracelular (MEC) es el ambiente estructural natural que se encuentra en los tejidos para la organización tridimensional y el soporte de las células. Se han usado varias estrategias para imitar la MEC, lo que ha dado como resultado matrices para la migración y proliferación de las células. Las MEC naturales son aquellas compuestas de moléculas biológicas y se pueden dividir en aquellas que se derivan de las descelulización del tejido y las que se construyen a partir de moléculas biológicas. El tejido acelular es el que permanece después que se han removido todas las células, el cual retiene muchas propiedades del tejido original y tiene una respuesta inmune reducida.

Las espumas metálicas se han encontrado especialmente adecuadas porque con ellas se puede, con relativa facilidad, construir una matriz porosa, pero es más difícil encontrar las propiedades correctas de la superficie, el diseño y el tamaño de los poros requeridos por las células para proliferar y diferenciarse con el fenotipo correcto.

Esto es así porque el objetivo principal de la matriz no es darle al tejido cultivado en laboratorio la misma forma que el tejido del cuerpo humano que se busca reemplazar, sino conseguir que funcione como si lo fuera. Si el tejido

en cuestión es el músculo cardíaco, que sepa contraerse, que lata, y si el tejido pertenece a un islote pancreático, pues entonces que produzca insulina. Estructura y no forma es la idea; estructura y con ello, función.

Para que un tejido cultivado *in vitro*, y luego de trasplantado adquiera y no pierda en ningún momento dicha funcionalidad, hay que resolver más de un problema. Que las células que han de conformar el tejido deseado crezcan en forma ordenada y coordinada es uno de los obstáculos más difíciles que diariamente deben sortear quienes se dedican a la ingeniería de tejidos; que esas mismas células puedan respirar y alimentarse en forma adecuada es otro.

Es decir, para que estas células se mantengan con vida, se reproduzcan y conformen un tejido funcional, es necesario un medio de cultivo que sea realmente acogedor. Y esto no es sencillo, pues el primer problema que surge en los cultivos de células es que éstas se mueren, y si no se mueren se despegan y no llegan a adherirse, por lo que no se logran las tres dimensiones que caracterizan a un tejido. Y si no se mueren y tampoco se despegan, muchas veces al subirse una célula arriba de otra el conjunto pierden funcionalidad. Es por ello que uno de los mayores desafíos que actualmente enfrenta la ingeniería de tejidos es que, al ir creciendo y conformando el tejido, las células que anidan en la matriz desarrollen la funcionalidad que caracteriza al tejido [114], [115].

Las espumas metálicas se han usado, sobre todo, en el desarrollo de matrices porosas en la ingeniería de tejidos óseos, Figura 28 [116], [121].

FIGURA 28. CRECIMIENTO DEL HUESO HACIA EL INTERIOR DE LOS PROS DE UNA MATRIZ ORTOPÉDICA POROSA, LO QUE PROPORCIONA UNA FIJACIÓN ESTABLE.

FUENTE: NOURI, A., P. D. HODGSON AND C. WEN, "BIOMIMETIC POROUS TITANIUM SCAFFOLDS FOR ORTHOPEDIC AND DENTAL APPLICATIONS". BIOMIMETICS LEARNING FROM NATURE, AMITAVA MUKHERJEE (ED.), INTECH, 2010.

En resumen, la investigación sobre las aplicaciones de las espumas metálicas, sean aleaciones de titanio, como las Ti – Zr [122], Ti - 6Al – 4V [123], Ti – Mg [124], u otras sigue en plena actividad [125], [126]. Uno de los materiales que ha sido objeto de investigaciones intensivas son las espumas de magnesio [127] y sus aleaciones [128], [129] pues sus propiedades mecánicas lo califican como un excelente candidato para estos propósitos [130].

9. Los electrodos porosos

Otra aplicación de las espumas metálicas es en los electrodos porosos, que se pueden usar en baterías, celdas de combustible, electrólisis y tratamientos de purificación del agua. Esto es así porque con estos materiales aumentan la superficie del electrodo activo, disminuyen el sobre voltaje con la misma entrada de corriente (en los electrolizadores) o la salida (en celdas de combustible), aumentan la densidad de potencia (celdas galvánicas). Mejoran la capacidad de almacenamiento y disminuyen la carga de catalizador aumentando la superficie activa.

En las baterías los electrodos porosos han mostrado beneficios como las mayores tasas, mejores ciclos de vida y las ventajas gravimétricas. Esas características hacen que los electrodos porosos sean ventajosos en los vehículos eléctricos o híbridos con baterías de litio, aparatos electrónicos portátiles y almacenamiento estacionario de energía eléctrica. Por ello se han investigado las espumas metálicas en estas aplicaciones y la influencia de los poros y la arquitectura de las paredes, la interconectividad, el acceso a la superficie, la morfología de las partículas. Uno de los materiales más utilizados han sido las espumas de níquel, que están disponibles en el mercado desde finales del siglo XX. Se usan sobre todo en las baterías de Ni – Cd y Ni – HM (hidruro metálico), y en las de litio [131]. También se han usado espumas de cobre [123], de cobre – estaño [133] y de cobre – aluminio [134], para las baterías de litio [135]. También se utiliza el magnesio [136].

Estos electrodos también han hallado ocupación en las celdas de combustible. Debe indicarse que una celda de combustible es una pila en la que la energía química del combustible es convertida directamente en energía eléctrica. La celda más sencilla era una en la que el hidrógeno era oxidado para formar agua sobre electrodos porosos de níquel sinterizado. Se suministra

hidrógeno a un compartimiento que contiene el cátodo poroso y oxígeno a otro que contiene ánodo poroso; los electrodos están separados por un tercer compartimiento, que contiene un electrolito alcalino caliente, como hidróxido de potasio. Los electrodos son porosos para permitir que los gases reaccionen con el electrolito mientras el níquel de los electrodos actúa como catalizador. En el cátodo el hidrógeno forma agua y libera electrones que son tomados por el oxígeno en el ánodo para formar iones hidróxido. Los electrones fluyen del cátodo al ánodo por medio de un circuito eléctrico en forma de corriente eléctrica. Es decir, que con el combustible (los gases) se produce electricidad y a diferencia de una batería donde los electrodos reaccionan y cambian según cómo esté de cargada o descargada, en una celda de combustible los electrodos son catalíticos y relativamente estables.

En la Figura 29 se ve el montaje de una celda combustible de metanol directo, donde se usaron espumas de aluminio, con gran éxito [137].

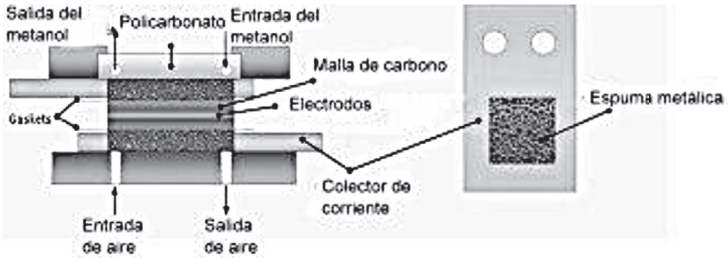

FIGURA 29. CELDA DE COMBUSTIBLE DE METANOL DIRECTO

FUENTE: ARISETTY, S., PRASAD A.K., AND ADVANI S.G. "METAL FOAMS AS FLOW FIELD AND GAS DIFFUSION LAYER IN DIRECT METHANOL FUEL CELLS". *JOURNAL OF POWER SOURCES*, VOL. 165, p. 49, 2007.

Además, los electrodos porosos en contacto con soluciones acuosas [138], [141] se encuentran en muchas aplicaciones tecnológicas como el almacenamiento de energía eléctrica (doble capa electrostática), supercondensadores [142], [145], desionización capacitiva para la desalinización del agua [146], [156] y el proceso inverso, es decir la extracción capacitiva de energía a partir de la diferencia de salinidad entre las corrientes de agua, por ejemplo un río, y el agua del mar [157], [158].

10. Conclusión

Este breve resumen muestra las realidades y potencialidades de las espumas metálicas y se espera que sea un estímulo para aquellos que apenas van a empezar a investigar en estos campos.

11. Referencias

[1] J. Banhart. "Light-metal foams – history of innovation and technological challenges". *Advanced Engineering Materials*, vol. 15, pp. 56-99, Mar. 2013.

[2] M.A.; De Meller. "Produit métallique pour l'obtention d'objets laminés, moulés ou autres, et procédés pour sa fabrication". 1925. French Patent 615 147, 1926.

[3] B. Sosnick. "Process for Making Foamlike Mass of Metal". U.S. Patent 2 434 775, 1948.

[4] Bjorksten Laboratories. Internet: www.bjorksten.com, [Oct. 15, 2012].

[5] J.C., Elliott. "Method of producing metal foam". U.S. Patent 2 751 289, 1956.

[6] J.C., Elliott. "Metal foaming process". U.S. Patent 3 005 700, 1960.

[7] J. Banhart. "Manufacturing Routes for Metallic Foams". JOM, Vol. 52, p. 22, Dec. 2000

[8] Hydro. Internet: www.hydro.com

[9] Cymat. Internet: www.cymat.com

[10] L.D., Kenny. "Mechanical Properties of Particle Stabilized Aluminum Foam". *Mater. Sci. Forum,* Vols. 217-222. 1996.

[11] J.J., Banhart, A., Baumeister, M., Melzer, G., Weber. German Patent 19813176.

[12] V.D.C., Gegerly, and T..W., Clyne. "The Form Grip Process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors". *Adv. Eng., Mat.*, Vol. 2. p. 175. 2000.

[13] V.I., Torres. "Desarrollo y análisis de un modelo numérico para el estudio de elementos tubulares sometidos a impacto". p. 46, Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica, Universidad Carlos III, Madrid, 2011.

[14] J. Banhart. "Production Methods for Metallic Foams", in *Metal Foams/Fraunhofer USA Symposium «Metal Foam»*, Stanton Delaware, 1998, pp. 7-8.

[15] Q.L., Ma, and Z.L., Song**.** "Cellular structure control of aluminium foams during foaming process of aluminium melt". *Scripta***.** *Materialia***,** Vol. 39, No. 11, p. 1523, 1998.

[16] T.M., Miyoshi, S. Itoh. Akiyama and A. Kitahara, "Aluminum Foam, «Alporas»: The Production Process, Properties and Applications". *MRS Proceedings*, Vol. 521, p. 133. 1998.

[17] K. Kadoi. "Methodology for the In Situ Observation of Alporas Foams using X – Ray Radioscopy", 2007. *Porous Metals and Metallic Foams, FoamMet,* L. P. Lefevre, J. Banhart and D. C. Dunand (eds.), DESTech Publications, Lancaster. p. 111, 2007.

[18] V. Shapovalo. "Formation of Ordered Gas – Solid Structures Via Solidification in Metal-Hydrogen Systems". *Porous and Cellular Materials for Structural Applications,* D.S. Schwartz et al (eds.). MRS, Warrendale, PA, Vol. 521, p. 281, 1998.

[19] J.M., April. "Gasar Porous Metals Process Control". *Porous and Cellular Materials for Structural Applications,* D.S. Schwartz *et al*. (eds.). MRS, Warrendale, PA, Vol. 521, p. 291, 1998.

[20] C.J., Paradies, A., Tobin and J. Wolla. "The Effect of Gasar Processing Parameters on Porosity and Properties in Aluminum alloy". *Porous and Cellular Materials for Structural Applications,* D.S. Schwartz *et al.* (eds.). MRS, Warrendale, PA, Vol. 521, p. 297, 1998.

[21] Kennedy, Andrew. "Porous Metals and Metal Foams Made from Powders". *Powder Metallurgy*, K. Kondoh (ed.), InTech Books, Rijeka, Croatia, 2012, p. 31.

[22] Duarte, Isabel and Mónica Oliveira. "Aluminium Alloy Foams: Production and Properties". *Powder Metallurgy*, K. Kondoh (ed.), InTech Books, Rijeka, Croatia, 2012, p. 47.

[23] Baumgärtner, F., I. Duarte, and J. Banhart. "Industrialization of powder compact foaming process". *Adv. Eng. Mater,* Vol. 2, p. 168, 2000.

[24] Baumeister, J. et al. "Investigations on 4 New Methods for Aluminum Foam Production". *Porous Metals and Metallic Foams, FoamMet 2007,* L. P. Lefevre, J. Banhart and D. C. Dunand (eds.), DESTech Publications, Lancaster, PA, 2007, p. 11

[25] Ashby, M. F. et al, *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann, Boston, 2000, p. 29.

[26] Verbist, G. and D. Weaire, "A Soluble Model for Foam Drainage", *Europhys. Lett.* Vol. 26, 1994, p. 631.

[27] Verbist, G., D.Weaire and A.M. Kraynik, "The foam drainage equation". *J. Phys.: Condensed Matter*, Vol. 8, p. 3715, 1996.

[28] Weaire, D. and S. Hutzler, "The Physics of Foams. Clarendon Press." P. 75, Oxford, 1999.

[29] Cox, S. J., et al., "Applications and generalizations of the foam drainage equation". *Proc. R. Soc.Lond. A*, Vol. 456, p. 2441, 2000.

[30] Cox, S. J., G. Bradley and D. Weaire, "Metallic foam processing from the liquid state: The competition between solidification and drainage". *Euro. J. Phys: Applied Physics*, Vol. 14, p. 87, 2001.

[31] Weaire, D., S. J. Cox and J. Banhart, "Methods and Models of metallic Foam Fabrication". *Proc. 8th Ann. Intl. Conf. Composites Engng*., D. Hui (ed.), p. 977, Tenerife, 2001.

[32] Mohanty, K. K., J.M. Ottino and H.T. Davis, "Reaction and transport in disordered composite media: Introduction of percolation concepts". *Chemical Engineering Science*, Vol. 37, p. 905, 1982.

[33] Fourie, J. G. and J. P. DuPlessis, "Pressure drop modelling in cellular metallic foams". *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, p. 2781, 2002.

[34] Lu, T. J., Stone, H. A. and& Ashby, M. F., "Heat transfer in open-cells metal foams". *Acta Materialia*, Vol. 46, p. 3619, 1998.

[35] Bastawros, A. F., Evans, A. G. and Stone, H. A, "Evaluation of cellular metal heat transfer media". *Report MECH 325*, Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, MA, 1998.

[36] Ashby, M. F. et al, *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann, Boston, 2000, p. 80.

[37] Hansen, A. et al., "Validation of constitutive models applicable to aluminum foams". *International Journal of Mechanical Sciences,* Vol. 44, p.359, 2002.

[38] Deshpande, V., and N., "Isotropic constitutive models for metallic foams". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48, p. 1253, 2000.

[39] Miller., "A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behavior of foamed metals". *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, p. 729, 2000.

[40] Schreyer, H., Zuo, Q. and A. Maji, "Anisotropic plasticity model for foams and honeycombs". *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 120, No. 9, p. 1913, 1994.

[41] Ehlers, W. *Metalsch]aume-metal foams*. Report 99-II-6, Institut für Mechanik, Universität Stuttgart. Sttugart. 1999.

[42] Tagariellia, V. L. et al., "A constitutive model for transversely isotropic foams, and its application to the indentation of balsa wood". *International Journal of Mechanical Sciences, Vol.* 47, p. 666, 2005.

[43] Irausquin Castro, Ignacio Alejandro. "Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía". Tesis doctoral, Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III, Madrid, 2012, p. 42.

[44] Onck, P. R., "Application of a continuum constitutive model to metallic foam DEN-specimens in compression". *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, p. 2947, 2001.

[45] Chen, C. and T. J. Lu, "A Phenomenological Framework of Constitutive Modeling for Incompressible and Compressible Elasto-Plastic Solids". *Intl. J. Solid. Struct*., Vol. 37, p. 7769, 2000.

[46] Forest, S. "Continuum modeling of strain localization phenomena in metallic foams." *J. Mat. Sc*., Vol. 40, p. 5903, 2005.

[47] Meguid S. A., S.S. Cheon and N. El-Abbasi, "FE modelling of deformation localization in metallic foams". *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 38, p. 631, 2002.

[48] Reyes, A. *et al*., "Implementation of a Constitutive Model for Aluminum Foam, Including Fracture and Statistical Variation of Density". 8th International LS – *DYNA Users Conference*, Strasbourg, 2011, pp. 6–11.

[49] Yu Jilin**,** Wang Erheng and Guo Liuwei, "A Theoretical and Experimental Study on the Dynamic Constitutive Model of Aluminum Foams". *Materials Science Forum,* Vols. 638-642, p. 1878, 2010.

[50] Fleck, N. A. *et al*. "The effect of hole size upon the strength of metallic and polymeric foams". *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 49, p. 2015, 2001.

[51] Zhu, Aiyu and· Tianyou Fan. "The effects of relative density of metal foams on the stresses and deformation of beam under bending". *Acta Mech Sin*, Vol. 23, p. 409, 2007.

[52] Ramamurty, U. and A. Paul, "Variability in mechanical properties of a metal foam". *Acta Materialia*, Vol. 52, p. 869, 2004.

[53] Gibson, L. J. and Ashby, M. F. *Cellular Solids*, Pergamon Press, Oxford, 1988.

[54] Kováčik, J. and Simančík F., "Aluminium foam - modulus of elasticity and electrical conductivity according to percolation theory". *Scripta Mater*., Vol. 39, No. 2, p. 239, 1998.

[55] Schwartz, D. S., et al., "Development and scale up of the Low-Density- Core process for Ti-64". *MRS Symposium Proceedings*, D.S. Schwartz *et al*. (eds.), Vol. 521, Materials Research Society, Warrendale, Pennsylvania, 1998, p. 225.

[56] Srivastava, V. C. and K. L. Sahoo, "Processing, stabilization and applications of metallic foams. Art of science". *Materials Science-Poland,* Vol. 25, No. 3, p. 733, 2007.

[57] Yu, C. – J. and J. Banhart, "Mechanical Properties of Metallic Foams". *Proceedings of the Fraunhofer USA symposium on metallic foams*, J. Banhart and H. Eifert (eds.), MIT-Verlag, Bremen, 1998, p. 37.

[58] Imatani, S., "Numerical Evaluation of Compressible Plasticity Behaviour of Metal Foams". *Tecnnische Mechanick*, Vol. 32, Nos. 2-5, p. 265, 2012.

[59] Simancik, F., "Metallic foams – ultra light materials for structural applications". *Inzynieria Materialowa,* No. 5, p. 823, 2001.

[60] Simone, A. E. and L. J. Gibson, "Effects of Solid Distribution on the Stffness and Strength of Metallic Foams". *Acta Mater*, Vol. 46, No. 6, p. 2139, 1998.

[61] Simone, A. E. and L. J. Gibson, "The Effects of Cell Face Curvature and Corrugations on the Stiffness and Strength of Metallic Foams". *Acta Mater*, Vol. 46, No. 11, p. 3929, 1998.

[62] Motz, C. and R. Pippan, "Fracture behaviour and fracture toughness of ductile closed cell metallic foams". *Acta Materialia,* Vol. 50, p. 2013, 2002.

[63] Chen, C. and N.A. Fleck, "Size effects in the constrained deformation of metallic foams". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 50, p. 955, 2002.

[64] Andrews, E., W. Sanders, L.J. Gibson, "Compressive and tensile behaviour of aluminum foams". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 270, p. 113, 1999.

[65] Koza, E., "Compressive strength of aluminium foams". *Materials Letters*, Vol. 58, p. 132, 2003.

[66] Ashby, M. F. *et al*., *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann, Boston, 2000, p. 63.

[67] Ashby, M. F., "The mechanical properties of cellular solids." *Metall. Trans.*, Vol. 14 A, p. 1755, 1983.

[68] Xu, H.J.; Qu, Z.G. & Tao, W.Q., "Thermal Transport Analysis in Parallel-plate Channel Filled with Open-celled Metallic Foams". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.38, No.7, p. 868, Aug. 2011.

[69] Qu, Z. G. "Thermal Transport in Metallic Porous Media." *Heat Transfer – Engineering Applications*, Vyacheslav Vikhrenko (ed.), Intech, Rijeka, Croatia, 2011, p. 172.

[70] Ashby, M.F. et al., *Metal foams: A design guide*, Butterworth-Heinemann, Boston, 2000, p. 181.

[71] Hunt, M. L. and C. J. Tien, "Effects of thermal dispersion on forced convection in fibrous media". *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31p. 301, 1988.

[72] Haack , D. P. *et al*. "Novel Lightweight Metal Foam Heat Exchangers", *Proceedings ASME Int. Mechanical Engineering Congress Expo 2001*, New York, 2001, p. 1.

[73] Qu, Z. G. "Thermal Transport in Metallic Porous Media". *Heat Transfer – Engineering Applications*, Vyacheslav Vikhrenko (ed.), Intech, Rijeka, Croatia, 2011, p. 172.

[74] Reutter, O. *et al.*, "Characterization of Air Flow Through Sintered Metal Foams". *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130, pp. 051201-1, 2008.

[75] Bohn, D., 2002, "New Materials and Cooling Systems for High Temperature, Highly Loaded Components in Advanced Combined Cycle Power Plants". Seventh Liege Conference on "Materials for Advanced Power Engineering, Liege, Belgium, Sept. 30–oct. 02.

[76] Giani, Leonardo, Gianpiero Groppi, and Enrico Tronconi, "Heat Transfer Characterization of Metallic Foams". *Ind. Eng. Chem. Res.,* Vol. 44, p. 9078, 2005. he

[77] Álvarez Hernández, Ángel R., "Combined Flow and Heat Transfer Characterization of Open Cell Aluminum Foams". MSc. Thesis, Mechanical Engineering, University of Puerto Rico, Mayagüez, 2005.

[78] Avenall, Ryan Jeffrey, "Use of Metallic Foams for Heat Transfer Enhancement in the Cooling Jacket of a Rocket Propulsion Element". MSc. Thesis, University of Florida, Gainesville, 2004.

[79] Boomsma, K. D. Poulikakos and F. Zwick. "Metal foams as compact high performance heat exchangers". *Mechanics of Materials*, Vol. 35, p. 1161, 2003.

[80] Guo, Z. X., S. Y. Kim, and H. J. Sung. "Pulsating flow and heat transfer in a pipe partially filled with a porous medium". *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 40, pp. 4209-4218, 1997.

[81] K. C. Leong and L. W. Jin. "An experimental study of heat transfer in oscillating flow through a channel filled with an aluminum foam". *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 48, pp. 243-253, 2005.

[82] Jin, L. W. and K. C. Leong. "Heat Transfer Performance of Metal Foam Heat Sinks Subjected to Oscillating Flow". *Trans Comp Packaging Techn.* Vol. 29, No. 4, p. 856, 2006.

[83] Sadeghi, Eshan. "Thermal Transport in Porous Media with Application to Fuel Cell Diffusion Media and Metal Foams". Ph.D. Thesis, University of Victoria, Victoria, 2010.

[84] Twigg, M. V. and D. E, Wbster, "Metal and coated-metal catalysts". *Structured Catalysts and Reactors,* A. Cybulski, ans J.A. Moulijn, (eds.), Marcel Dekker Inc., New York, p. 59, 1998.

[85] Gryaznov, V. M. and N. V. Orekhova, "Reactors with Metal and etal-Containing Membranes". *Structured Catalysts and Reactors*, A. Cybulski, and J.A. Mouljin (eds.), Marcel Dekker, Inc., New York, p. 435, 1998.

[86] Matatov-Meytal, Yu. and M. Sheintuch. "Catalytic fibers and cloths". *Applied Catalysis A: General*, Vol. 231, No. 1-2, p. 1, 2002.

[87] Voecks G. E., "Unconventional utilization of monolithic catalysts for gas-phase reactions". *Structured Catalysts and Reactors*, A. Cybulski, J.A. Moulijn (eds.), Marcel Dekker Inc., New York, 1998, p. 179.

[88] Buciuman, F. C. and B. Kraushaar-Czarnetzki, "Preparation and characterization of ceramic foam supported nano-crystalline zeolite catalysts". *Catal. Today*, Vol. 69, 2001, p. 337.

[89] Sanz, Oihane *et al*., "Aluminium foams as structured supports for volatile organic compounds (VOCs) oxidation". *Applied Catalysis A: General*, Vol. 340, p. 125, 2008.

[90] Podyacheva, O. Yu. *et al*. "Metal Foam Supported Perovskite Catalysts". *React. Kinet. Catal. Lett*., Vol. 60, p. 243, 1997.

[91] Wang, Y., and Tonkovich, A. L. Y., "Catalysts Reactors and Methods of Producing Hydrogen via the Water-Gas Shift Reaction". U.S. Patent 6 652 830, Nov. 25, 2003.

[92] Pestryakov, A. N. *et al.*, "Foam Metal Catalyst for Purification of Waste Gases and Neutralization of Automotive Emissions". *Catal. Today,* Vol. 29, p. 67, 1996.

[93] Campbell, L. E., "Catalyst for the Production of Nitric Acid by Oxidation of Ammonia". U.S. Patent 5 256 387, Oct. 26, 1993.

[94] Pestryakov, A. N. *et al.,* "Selective Oxidation of Alcohols over Foam-Metal Catalysts". *Appl. Catal., A: Gen.*Vol. 227, p.125, 2002.

[95] Pestryakov, A. N. *et al*., "Metal Foam Catalyst with Supported Active Phase for Deep Oxidation of Hydrocarbons". *React. Kinet. Catal. Lett*. Vol. 54, p. 167, 1995.

[96] Richardson, J. T., Garrait, M. and Hung, J. K., "Carbon Dioxide Reforming with Rh and Pt-Re Catalysts Dispersed on Ceramic Foam Supports". *Appl. Catal., A: Gen.*, Vol. 255, p. 69, 2003.

[97] Wang, Y. *et al.,* "Catalyst Structure and Method of Fischer-Tropsch Synthesis". U.S. Patent 6 660 237, Dec. 9, 2003.

[98] Giani, Leonardo, Gianpiero Groppi, and Enrico Tronconi, "Mass-Transfer Characterization of Metallic Foams as Supports for Structured Catalysts". *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 44, p. 4993, 2005.

[99] Kodama, T. *et al*., "Solar Methane Reforming Using a New Type of Catalytically Activated Metallic Foam Absorber". *Transactions of the ASME*, Vol. 126, p. 808, 2004.

[100] Ghidossi, Rémy et al., "Separation of particles from hot gases using metallic foams". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, p. 3859, 2009.

[101] Barbucci, R., *Integrated Biomaterial Science*, Hingham, MA, USA, Kluwer Academic Publishers, 2002.

[102] Pilliar, R. M., "Powder metal-made orthopedic implants with porous surfaces for fixation by tissue ingrowth". *Clin Orthop Rel Res*, Vol. 176, p. 42, 1983.

[103] Pilliar, R. M., "Porous-surfaced metallic implants for orthopedic applications". *J. Biomed Mater Res*, Vol. A1, p. 1, 1987.

[104] Zardiackas, L. D. *et al*. "Structure, metallurgy, and mechanical properties of a porous tantalum foam". *J. Biom. Mat. Res.,* Vol. 58, No. 2, p. 180, 2001.

[105] Clemow, J. T. *et al*., **"**Interface mechanics of porous titanium implants". *J. Biom. Mat. Res.,* Vol. 15, p. 73, 1981.

[106] Wen, C. E., Y. Yamada and P. D. Hodgson, "Fabrication of novel metal alloy foams for biomedical applications". *Materials Forum*, Vol. 29, p. 274, 2005.

[107] McCabe, J.F. and Ogden, A.R., "The relationship between porosity, compressive fatigue limit and wear in composite resin restorative materials". *Dent. Mater,* Vol. 3, p. 9, 1987.

[108] Huysmans, M.C. et Al., "The influence of simulated clinical handling on the flexural and compressive strength of posterior composite restorative materials". *Dent. Mater*, Vol. 12, p.116, 1996.

[109] Yue, S., R. M. Pilliar and G. C. Weatherly, "The fatigue strength of porous-coated Ti-6% Al-4% V implant alloy". *J. Biomed. Mater. Res.*, Vol. 18, p. 1043, 1984.

[110] David, H. K. and Paul, D., "A parametric study of the factors affecting the fatigue strength of porous coated Ti-6A1-4V implant alloy". *J. Biomed. Mater. Res.,* Vol. 24, p. 1483, 1990.

[111] Crowninshield, R. D., "Mechanical properties of porous metal total hip prostheses". *Instr. Course Lect.*, Vol. 35, p. 144, 1986.

[112] Manley, M.T., *et al*., "Effects of repetitive loading on the integrity of porous coatings". *Clin. Orthop. Relat Res.*, Vol. 217, p. 293, 1987.

[113] Ryan, Garrett *et al*. "Fabrication methods of porous metals for use in orthopedic applications", *Biomaterials,* Vol. 27, p. 2651, 2006.

[114] Lanza, Robert, Robert Langer and Joseph P. Vacanti, *Principles of Tissue Engineering*, Academic Press, New York, 2000.

[115] Saltzman, Mark W., *Tissue Engineering: Engineering Principles for the Design of Replacement Organs and Tissues*, Oxford University Press, New York, 2004.

[116] Assad, M, *et al*. "Porous titanium–nickel for intervertebral fusion in a sheep model: part 1. Histomorphometric and radiological analysis". *J. Biomed. Mater. Res.,* 64B, pp. 107–120, 2003.

[117] Li, J. P. *et al.*, "Preparation and characterization of porous titanium". *Key Eng. Mater.*, Vols. 218–220, p. 51, 2002.

[118] Li, J. P. *et al.,* "Porous Ti6Al4V scaffold directly fabricating by rapid prototyping: preparation and in vitro experiment". *Biomaterials.* Vol. 27, p. 1223, 2006.

[119] Li, J. P. *et al.*, "Bone ingrowth in porous titanium implants produced by 3D fiber deposition". *Biomaterials,* Vol. 28, p. 2810, 2007.

[120] Yeh, C.L. and Sung, W.Y., "Synthesis of NiTi intermetallics by self-propagating combustion". *J. Alloy Comp.,* Vol. 376, p.79, 2004.

[121] Stevens, M. M., "Biomaterials for bone tissue engineering". *Mater. Today*, Vol. 11, p. 18, 2008.

[122] Wen, C. E., Y. Yamada and P. D. Hodgson, "Fabrication of novel metal alloy foams for biomedical applications". *Materials Forum*, Vol. 29, p. 274, 2005.

[123] Esen, Z., E. Tarhan Bor and S. Bor, "Characterization of loose powder sintered porous titanium and Ti6Al4V". *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, Vol. 33, p. 207, 2009.

[124] Wen, C. e. *et al.*, "Processing of Biocompatible Porous Ti and Mg". *Scripta Materialia*, Vol. 45, p. 1147, 2001.

[125] Navarro, M., *et al.*, "Biomaterials in Orthopedics". *J. R. Soc. Interface,* Vol. 5, No. 27, p. 1137, 2008.

[126] Mour, Meenakshi. "Advances in Porous Biomaterials for Dental and Orthopaedic Applications**".** *Materials*, Vol. 3, p. 2947, 2010.

[127] Nguyen, T. L. "Synthesis of Topologically Ordered Porous Magnesium". Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Canterbury, 2011.

[128] Seyedraoufi, Z. S., Mirdamadi Sh., "Synthesis, microstructure and mechanical properties of porous Mg -Zn scaffolds". *J. Mech Behav Biomed Mater.* Vol. 21, p. 1, 2013.

[129] Tan, Lili et Al. "Study on compression behavior of porous magnesium used as bone tissue engineering scaffolds". *Biomedical Materials*, Vol. 4, p. 1, 2009.

[130] Kaya, M., "A Study on Microstructure and Fabrication of Porous Mg-10Al Alloy". *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27, No. 6, p. 605, 2011.

[131] Paserin, Vladimir *et al.*, "The chemical vapor deposition technique for Inco nickel-foam production–manufacturing benefits and potential applications". *Cellular Metals and Metal Foaming Technology,* J. Banhart, N.A. Fleck (eds.), p. 31, MIT-Verlag, Berlin 2003.

[132] Shin, Heon-Cheol and Meilin Liu, "Copper Foam Structures with Highly Porous Nanostructured Walls". *Chem. Mater.*, Vol. 16, No. 25, p. 5460, 2004.

[133] Shin, Heon-Chol and Meilin Liu, "Three Dimensional Porous Copper – Tin Alloy for Rechargeable Lithium Batteries". *Advanced Functional Materials*, Vol. 15, No. 4, p. 582, 2005.

[134] Wang, John S. *et al*., "Formulation and characterization of ultra-thick electrodes for high energy lithium-ion batteries employing tailored metal foams". *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 20, p. 8714, 2011.

[135] Vu, Anh, Yuqiang Qian and Andreas Stein. "Porous Electrode Materials for Lithium-Ion Batteries – How to Prepare Them and What Makes Them". *Special Advanced Energy Materials*, Vol. 2, No. 9, p. 1056, 2012.

[136] Arisetty, S., Prasad A.K., and Advani S.G., "Metal foams as flow field and gas diffusion layer in direct methanol fuel cells". *Journal of Power Sources*, Vol. 165, p. 49, 2007.

[137] Zheng, Wei-wei, "Preparation of porous Mg electrode by electrodeposition". *Trans Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 21, p. 2099, 2011.

[138] Newman, J. and C.W. Tobias, **"**Theoretical Analysis of Current Distribution in Porous Electrodes". *J. Electrochem. Soc*., Vol. 109, **p.** 1183, 1962.

[139] Johnson, A. M. and J. Newman, "Desalting by Means of Porous Carbon Electrodes". *J. Electrochem. Soc.,* Vol. 118, p. 510, 1971.

[140] Newman, J. and W. Tiedemann, "Porous-electrode theory with battery applications", *AIChE J.,* Vol. 21, p. 25, 1975.

[141] Newman, J. and K.E. Thomas-Alyea. *Electrochemical Systems*, p. 203, Wiley, New York, 2004.

[142] Conway, B. E., "Electrochemical supercapacitors". Kluwer, New York, 1999.

[143] Dunn, D. and J. Newman, "Predictions of specific energies and specific powers of double-layer capacitors using a simplified model". *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 147, p. 820, 2000.

[144] Kotz, R. and M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors". *Electrochimica Acta*, Vol. 45, p. 2483, 2000.

Vol'fkovich, Y.M. and T.M. Serdyuk, "Electrochemical Capacitors". *Russ. J. Electrochem.,* Vol. 38, p. 935, 2002.

[145] Verbrugge, M.W. and P. Liu, "Microstructural Analysis and Mathematical Modeling of Electric Double-Layer Supercapacitors". *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 152, p.D79, 2005.

[146] A.M. Johnson and J. Newman, "Desalting by Means of Porous Carbon Electrodes". *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 118, p. 510, 1971.

[147] Murphy, G.W. and D.D. Caudle, "Mathematical theory of electrochemical demineralization in flowing systems". *Electrochimica Acta*, Vol. 12, p. 1655, 1967.

[148] Oren, Y.and A. Soffer, "Water Desalting by Means of Electrochemical Parametric Pumping: I. The Equilibrium. Properties of a Batch Unit Cell". *J. Appl. Electrochem.,* Vol. 13, p.473, 1983.

[149] Farmer, J. C. *et al*., "Capacitive deionization of NH_4ClO_4 solutions with carbon aerogel electrodes". *J. Appl. Electrochem.,* Vol. 26, p.1007, 1996.

[150] Spiegler, K. S. and Y.M. El-Sayed, "The Energetics of Desalination Processes". *Desalination*, Vol. 134, p. 109, 2001.

[151] Gabelich, C. J., T.D. Tran, and I.H. Suffet, "Electrosorption of inorganic salts from aqueous solution using carbon aerogels". *Environm. Sci. Techn.*, Vol. 36, p. 3010, 2002.

[152] Welgemoed, T. J. and C.F. Schutte, "Capacitive Deionization Technology: An alternative desalination solution." *Desalination,* Vol. 183, p.327, 2005.

[153] Biesheuvel, P. M., "Thermodynamic cycle analysis for capacitive deionization". *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 332, p. 258, 2009.

[154] Biesheuvel, P.M., B. van Limpt, and A. van der Wal, "Dynamic adsorption/desorption process model for Capacitive Deionization". *J. Phys. Chem. C*., Vol. 113, p. 5636, 2009.

[155] Levie, R. de. "On porous electrodes in electrolyte solutions: I. Capacitance effects". *Electrochimica Acta*, Vol. 8, No. 10, p. 751, 1963.

[156] Brogioli, D., "A prototype cell for extracting energy from a water salinity difference by means of double layer expansion in nanoporous carbon electrodes". *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 103, p.058501, 2009.

[157] Biesheuvel, P.M. and M.Z. Bazant, "Nonlinear Dynamics of Capacitive Charging and Desalination by Porous Electrodes". *Physical Review E*, Vol. 81, p. 031502, 2010.