

## Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones<sup>(\*)</sup>

J.A. Gutiérrez-Vázquez\* y J. Oñoro\*

### Resumen

Las espumas de aluminio son materiales porosos que tienen una relevante combinación de propiedades físicas y mecánicas, tales como alta rigidez conjuntamente con un peso específico muy bajo. En este artículo se revisan la estructura, los procesos de fabricación y las propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como las aplicaciones de las espumas de aluminio. Los procesos de fabricación se han clasificado atendiendo al estado de agregación en el cual se procesa el metal. El aluminio fundido puede espumarse, directamente, por inyección directa de gas o por la adición de agentes espumantes. Indirectamente, puede conseguirse la espumación llevando a fusión componentes procesados por sinterizado que tienen en su interior un agente espumante. Puede conseguirse la espumación de piezas sinterizadas en estado sólido por espumación de un gas inerte mediante tratamiento térmico. También, es posible obtener espumas de aluminio por electrodeposición o por deposición en fase vapor. En la segunda parte de este trabajo se analizan las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las espumas de aluminio, así como las diferentes formas de caracterización. Por último, se detallan las aplicaciones de las espumas de aluminio, dividiéndolas en función de los diferentes sectores industriales.

### Palabras clave

Espumas de aluminio; Espumación; Precursor; Agente espumante; Porosidad.

## Aluminium foams. Manufacture, properties and applications

### Abstract

Aluminium foams are porous materials to have many interesting combinations of physical and mechanical properties, such as high stiffness in conjunction with very low specific weight. The aluminium foam structure, manufacture processes, physical, chemical and mechanical properties and applications are reviewed in this paper. The various manufacturing processes are classified according to the state of matter in which the metal is processed. Liquid aluminium can be foamed directly by injecting gas or gas-releasing blowing agents. Indirect methods include melting of powder compacts which contain a blowing agent. An inert gas entrapped in powder compacts can produce aluminium foams in solid state after heat treatment. Electro-deposition or metal vapour deposition also allow for the production of aluminium foams. Physical, chemical and mechanical properties and the various ways for characterising the aluminium foams are reviewed in second section of this paper. Finally, the various application fields for aluminium foams are discussed. They are divided into different industrial sectors.

### Keywords

Aluminium foam; Foaming; Precursor; Foaming agent; Porosity.

## 1. INTRODUCCION

El estudio de la estructura de los materiales y su relación con las propiedades está permitiendo el desarrollo de materiales y equipos con, cada vez, más altas prestaciones tecnológicas. En los últimos años, los investigadores han reconocido la existencia, en la naturaleza, de materiales y estructuras de alta eficiencia: materiales livianos y resistentes como los huesos, la caña de bambú o la madera, que nos presentan unos materiales porosos capaces de formar estructu-

ras de alta rigidez con bajo peso específico. Los materiales porosos poliméricos fabricados por el hombre tienen aplicaciones generalizadas, en todos los campos tecnológicos, que van desde el aislamiento térmico y acústico, al embalaje, la industria del mueble, automoción, etc. Por el contrario, los materiales metálicos porosos han experimentado un desarrollo mucho más lento y no ha sido, sino hasta hace pocos años, en que el desarrollo de nuevos procesos de fabricación y la obtención de productos de propiedades relativamente homogéneas y coste

(\*) Trabajo recibido el día 4 de octubre de 2007 y aceptado en su forma final el día 12 de mayo de 2008.

\* Dept. Ingeniería y Ciencia de los Materiales, ETSI Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid, España.

razonable ha permitido disponer, industrialmente, de estos nuevos materiales.

Los metales porosos son el resultado de la combinación de gases y metal, donde los gases en forma de burbujas ocupan entre un 50 % y un 90 % de la estructura total, por lo que se consiguen densidades muy bajas (entre 0,03-0,2 gr/cm<sup>3</sup>), con propiedades que son, por un lado, características del metal del que están formados y, por otro, derivadas de su peculiar estructura; el resultado es un material que brinda diversos rangos de propiedades térmicas, mecánicas y acústicas que son especialmente interesantes en aplicaciones de estructuras ultraligeras, así como sistemas de alta resistencia al impacto, elementos de disipación de calor y aislamiento acústico<sup>[1 y 2]</sup>.

Las espumas metálicas son un caso particular de los materiales porosos o materiales celulares: cuerpos sólidos con gases dispersos en su interior<sup>[3]</sup>. El término espuma está, generalmente, referido a la dispersión de burbujas de gas en un líquido. Si la morfología de una espuma puede mantenerse después de la solidificación del líquido obtenemos una espuma sólida. El proceso de formación de espumas metálicas requiere la espumación del material desde el estado líquido o temperaturas muy próximas, para que se puedan alcanzar condiciones de fluidez que permitan la espumación. Los poros son, generalmente, redondos y aislados unos de otros. Cuando los poros forman vacíos interconectados se le denomina también esponja metálica<sup>[4]</sup>.

Se tiene conocimiento que el primer registro de espumas metálicas data de 1948, con la patente de Benjamín Sosnick<sup>[5]</sup>: "Proceso para hacer espuma con masa de metal". Su método aprovechó el disponer de fases intermedias con diferentes puntos de fusión y de ebullición para formar un sólido lleno de poros cerrados. Los usos sugeridos para este nuevo producto aprovechaban las mejoras de la resistencia al impacto de la espuma, así como las propiedades de absorción de calor y sonido. El proceso era bastante costoso y sólo produjo cantidades pequeñas de una espuma bastante irregular; quizás, por eso, no tuvo un desarrollo posterior.

En 1958 se obtuvieron las primeras espumas metálicas con poro abierto<sup>[6]</sup>. Estas espumas se obtuvieron vertiendo sobre aluminio fundido partículas de sal, que una vez disueltas, daban lugar a una estructura de espuma con poros abiertos más fiable que el método de Sosnick, pero se apreció más como curiosidad científica que como material tecnológico.

En 1959, United Aircraft Corporation desarrolló la patente de un método para hacer espumas, en el cual polvo metálico era mezclado con un producto formador de gas por descomposición a alta temperatura<sup>[7]</sup>. Esta mezcla de polvos era compactada, extruida y enfriada, para obtener un metal sólido que contenía un agente en polvo espumante. Cuando es-

te sólido se calentaba a la temperatura de fusión del metal, el agente espumante se descomponía para soltar gas en el metal fundido, creando una espuma metálica. No obstante, enfriar la espuma era un problema, utilizándose agua fría o caliente, volviéndose un desafío la producción de espumas fiables.

En 1963 Hardy y Peisker<sup>[8]</sup>, patentaron un método en el cual agregaban los agentes espumantes directamente al metal semifundido mejorando la estructura (en el caso de aluminio fundido también agregaron silicio, para aumentar su viscosidad y encapsular el gas). Esto llevó a un abaratamiento en los costos de producción en comparación a la compactación de polvo. Las espumas metálicas obtenidas a partir de metal fundido han centrado el principal interés comercial. Varios centros de investigación y empresas han trabajado en métodos alternativos para producir espumas y han desarrollado con éxito varios procesos basados en la infiltración, deposición, y otros sistemas, con una gama amplia de costos y calidad de espumas.

Las espumas metálicas debido a su multifuncionalidad y aporte científico se han convertido en un atractivo campo de investigación de nuevos materiales, creando nuevas perspectivas en las aplicaciones industriales. Las espumas metálicas tienen muchas combinaciones interesantes de propiedades físicas y mecánicas (elevada rigidez junto con un bajo peso específico o gran permeabilidad a los gases combinada con elevada resistencia mecánica), que pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones estructurales con un abanico de propiedades que en la actualidad no están cubiertas por otros materiales. Por esta razón, en los últimos quince años, la investigación sobre estos materiales se ha extendido a todos los niveles<sup>[9-11]</sup>.

Actualmente, gran parte de la investigación de espumas se centra en las espumas de aluminio ya que aúnan baja densidad, resistencia a la corrosión y un punto de la fusión relativamente bajo, que las hacen fáciles de manipular. La producción de espumas de níquel, hierro y plomo (los dos últimos, de calidad dudosa) están, de momento, en la fase de investigación. La aplicación exitosa no depende, únicamente, de sus propiedades termomecánicas sino, en gran medida, de atributos adicionales: costos bajos de fabricación, durabilidad medioambiental y resistencia al fuego. Debido a la diversidad de requerimientos, la disponibilidad y análisis multifuncional es el elemento esencial en la estrategia de su desarrollo tecnológico<sup>[12]</sup>. Las espumas a base de aluminio, por otra parte, compiten con los materiales compuestos aportando ventajas de alta rigidez a menor coste. Sin embargo, el mercado de las espumas metálicas todavía está limitado, debido al costo relativamente alto de producción de espumas de buena calidad. Ha habido buen progreso hasta ahora, aunque la verdadera prueba de las espumas de

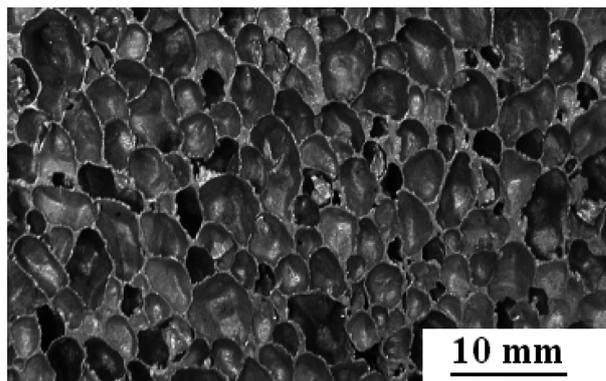
aluminio es saber si pueden ocupar el mercado actual de los materiales convencionales y en qué medida.

## 2. ESTRUCTURA DE LAS ESPUMAS DE ALUMINIO

La espuma de aluminio es un material metálico relativamente isotrópico muy poroso con una distribución aleatoria de los poros dentro de la estructura. Los poros, esencialmente esféricos y cerrados, ocupan del 50 al 90% del volumen total. Las propiedades mecánicas y físicas dependen fuertemente de la densidad, típicamente, en el rango de 0,4 a 0,8 gr/cm<sup>3</sup>. Las espumas de aluminio resultan materiales muy eficaces en la absorción de sonido, protección electromagnética, absorción de energía de impacto y vibración, no son inflamables y permanecen estables a alta temperatura<sup>[13]</sup>. La espuma de aluminio es reciclable y no contaminante, ofreciendo una combinación de propiedades físicas, mecánicas, térmicas y acústicas, características de un material homogéneo.

Las espumas se dividen en dos tipos de estructuras: de poros cerrados, que comúnmente se usa en aplicaciones estructurales, y de poros abiertos, que es utilizada por sus propiedades específicas (térmicas, superficiales, etc.)<sup>[14]</sup>. Los poros en las espumas de aluminio son, esencialmente, esféricos y parcialmente cerrados, generalmente, interconectados, aunque también puede lograrse una porosidad completamente cerrada<sup>[15]</sup>. La forma del poro se puede también describir por su geometría. Este parámetro se expresa como  $p/pc$ , donde,  $p$  es la longitud del perímetro del poro y  $pc$  es la longitud de la circunferencia que inscribe el poro (circunferencia de Cauchy). Para un poro esférico,  $p/pc$  tiene el valor mínimo de uno. No hay ningún diámetro típico de poro, no obstante, algunas muestras pueden prepararse con tamaños de poro controlado (entre 0,5-8 mm) dependiendo de la composición de la matriz o los parámetros de espumado (temperatura y tiempo). Si cambiamos la temperatura de espumado y el tiempo, con aproximadamente la misma densidad del material, podemos obtener diferentes estructuras de poro en diferentes preparados de la misma aleación.

- Poros cerrados: Las espumas de aluminio de poros cerrados se caracterizan por tener una gran rigidez y gran aislamiento acústico (Fig. 1). Pueden obtenerse por inyección directa de gases al metal fundido o mediante el uso de un agente espumante o un precursor espumable con el material en el intervalo sólido-líquido.
- Poros abiertos: Las espumas de aluminio de poros abiertos tienen especiales propiedades



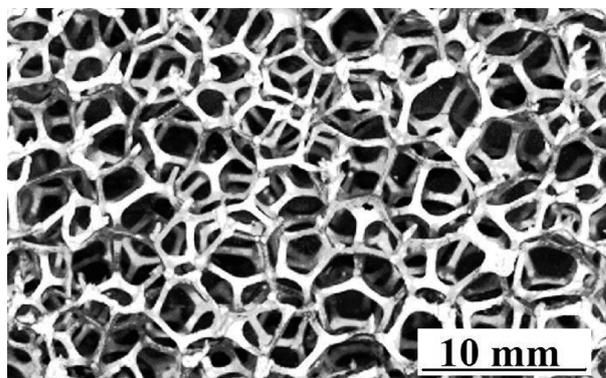
**Figura 1.** Espuma de aluminio de poro cerrado.

*Figure 1. Closed cell aluminium foam.*

térmicas que habilitan aplicaciones para la disipación de calor, recuperación de elementos, filtros y catalizadores (Fig. 2). A diferencia de las espumas de poro cerrado, la fabricación de espumas de poro abierto está principalmente basada en la utilización de materiales de relleno que luego son eliminados. Este tipo de estructuras se pueden fabricar partiendo del estado líquido, pulvimetalurgia, deposición química, etc.

## 3. OBTENCION DE ESPUMAS

La fabricación de espumas de aluminio se ha conseguido implementando diferentes tecnologías.



**Figura 2.** Espuma de aluminio de poro abierto fabricada en molde de yeso por infiltración de aluminio fundido en una espuma polimérica.

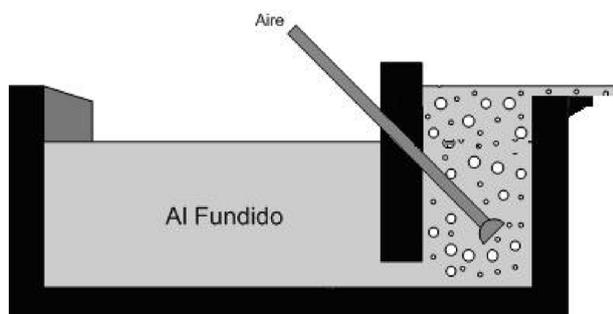
*Figure 2. Open cell aluminium foam manufactured in mould of plaster by melt aluminium infiltration in polymeric foam.*

### 3.1. Obtención de espumas por inyección de gas en el metal fundido

Los metales líquidos, en determinadas condiciones, pueden dar lugar a espumas por la introducción de burbujas de gas que quedan atrapadas en el interior del líquido. Las burbujas de gas formadas en un metal líquido tienden muy rápidamente a alcanzar la superficie debido a su menor densidad. Un aumento de la viscosidad del metal fundido y una adecuada modificación de las condiciones de presión y temperatura pueden dificultar la migración del gas y estabilizar temporalmente su permanencia dentro de un metal fundido hasta conseguir su solidificación.

#### 3.1.1. El Proceso Hydro/Alcan

El metal líquido, cuya viscosidad ha sido incrementada por la adición de partículas cerámicas (carburo de silicio, alúmina o magnesia), es espumado por la inyección de gases (aire, nitrógeno o argón) utilizando impulsores rotatorios o soplantes vibratorios, que producen una mezcla viscosa que flota en la superficie del líquido formando una masa uniforme de burbujas de gas en el líquido (Fig. 3). La presencia de las partículas cerámicas en el líquido hace que la espuma sea relativamente estable. La extracción y solidificación de la espuma permite obtener planchas continuas de la longitud deseada y espesores variables, habitualmente, de 10 cm. La fracción de partículas cerámicas está en un intervalo del 10 al 20 %, con tamaños de partícula entre 5 y 20  $\mu\text{m}$ . La densidad del aluminio producido está en el intervalo de 0,07 a 0,54  $\text{gr}/\text{cm}^3$ , con tama-



**Figura 3.** Fabricación de espuma de aluminio por adición directa de gas a la fundición con viscosidad reforzada.

*Figure 3. Production of aluminium foam by direct addition of gas to the melt with reinforced viscosity.*

ños de poro de 3 a 25 mm y espesores de pared de 50 a 85  $\mu\text{m}$ . Los tamaños de poros y la densidad del producto se pueden modificar variando los parámetros operacionales.

Este proceso desarrollado por Alcan International y CYMAT Corporation, tiene como principales ventajas el ser una técnica de fabricación continua, por lo que pueden hacerse cantidades grandes, y ser un proceso económico y relativamente sencillo<sup>[16]</sup>. Los inconvenientes son las dificultades para controlar la dispersión de gas y el tamaño de los poros, que pueden ser muy grandes (bajas propiedades mecánicas). Además, el proceso sólo produce planchas de espuma; la superficie es irregular; necesita mezclar partículas cerámicas y no pueden obtenerse todas las aleaciones (algunas no son bastante viscosas).

#### 3.1.2. El Proceso Alporas

Consiste en agregar gas al metal fundido mediante un agente espumante o compuesto que, al descomponerse a una determinada temperatura, emite un gas que inicia el proceso de espumado. Usando un agente espumante sólido es posible dispersar el gas más uniformemente a lo largo del metal fundido, dando lugar a un mayor control sobre la localización y tamaño de los poros de forma que pueden obtenerse de tamaño más pequeño y con una distribución más uniforme. El proceso requiere aumentar la viscosidad del metal fundido para impedir que las burbujas de gas floten, se unan o escapen al exterior. Esto, puede lograrse mezclando polvos o fibras en el metal fundido. La Compañía de Alambre Shinko desarrolló el método Alporas®, mezclando aproximadamente 1,5 % de Ca o Mg en una fundición de aluminio a 680 °C, para aumentar su viscosidad. Después de que la viscosidad alcanza el valor deseado se agrega 1,6 % de  $\text{TiH}_2$ , el cual libera gas (hidrógeno) y titanio que entra en solución sólida. Esto provoca la espumación del aluminio fundido con porosidades entre 84 y 95 %, tamaños de poro promedio de 2 a 10 mm y densidades típicamente entre 0,18 y 0,24  $\text{g}/\text{cm}^3$ , fabricándose piezas de dimensiones 2050 × 650 × 450 mm, de un peso superior a 160 kg.

Entre las ventajas del proceso Alporas se pueden señalar: un tamaño celular uniforme, con poro más pequeño y más homogéneo que la espuma Alcan; además, no requiere la adición de partículas de carburo de silicio. El proceso es fácil de hacer, pero es más costoso debido a los aditivos y no produce espumas con la geometría específica (el espumante no puede ser agitado y mezclado adecuadamente en moldes complejos).

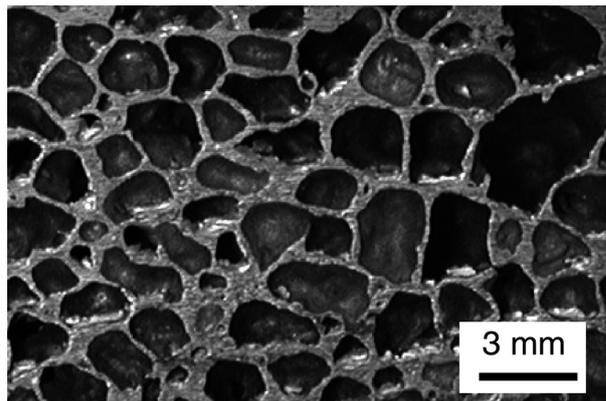
### 3.1.3. El Proceso Formgrip (dos etapas)

El proceso espumado desarrollado en Composites and Coatings Group ha sido denominado Formgrip (Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor), o espumado de un metal reforzado por la liberación de un gas precursor. El proceso utiliza el metal fundido para producir un material espumable (precursor), donde el hidruro de titanio, al elevar la temperatura, produce una capa de óxido de titanio en la superficie, que limita la permeabilidad al hidrógeno. El hidruro es, entonces, mezclado en el aluminio fundido (agregando las partículas de carburo de silicio para aumentar la viscosidad); la capa de óxido en las partículas del hidruro actúa como una barrera para retardar la descomposición del hidruro de titanio dentro del metal líquido durante un tiempo suficiente para permitir dispersar el hidruro de titanio dentro de la fundición. Esto, produce un precursor ligeramente poroso hecho de metal, agente espumante, y carburo de silicio que puede ser cortado y almacenado<sup>[17]</sup>. En un segundo paso, el precursor se coloca en un molde (de cualquier forma) y se calienta a una temperatura ligeramente superior a la temperatura de fusión de la aleación de aluminio, típicamente, a 680 °C. El hidruro de titanio se descompone, emite hidrógeno y forma una espuma que expande el precursor hasta llenar el molde. Ajustando el tiempo de producción, se pueden obtener espumas con porosidades entre 50 y 95 %, con tamaños de poro entre 1 y 10 mm y piel exterior sólida.

Las espumas producidas presentan una estructura homogénea y controlada. Pueden fabricarse piezas con geometría variada puesto que el precursor puede calentarse dentro de cualquier molde complejo para producir dimensiones muy exactas. La desventaja principal del proceso es la restricción de los materiales usados (en particular la necesidad de agregar partículas cerámicas o de SiC) en el metal fundido para reforzar la viscosidad, lo que aumenta el costo del proceso y hace espumas más quebradizas<sup>[18]</sup>.

### 3.1.4. Precursor espumable producido por técnicas de metalurgia de polvos (Alulight)

Este método es utilizado por Alulight International para producir espumas de aleación de aluminio con porosidades entre 63 y 89 % y tamaños de poros del orden de milímetros (Fig. 4). La técnica también se ha utilizado para producir espumas de acero, y estructuras tipo *sandwich* espumadas en un



**Figura 4.** Espuma de aluminio obtenida mediante un precursor espumable producido por pulvimetalurgia (Alulight).

*Figure 4. Aluminium foam obtained by a foamable precursor produced by powder metallurgy techniques (Alulight).*

solo paso. El proceso consiste en producir un precursor espumable resultado de mezclar partículas metálicas con un agente espumante y un elemento reforzante para aumentar la viscosidad del metal fundido. El secreto para producir un precursor conveniente es comprimir los polvos mezclados en un bloque relativamente sólido, para que cuando tenga lugar el espumado, el gas no escape del material. Esto, puede lograrse por compactación de una mezcla de polvos, seguida por una extrusión en frío. La fricción entre las partículas durante la extrusión destruye las capas de óxido y las une. Alternativamente, la mezcla de polvo puede estar compactada en caliente a una temperatura por debajo de la que provoca la descomposición del agente espumante. En algunos casos, es posible compactar el polvo a la temperatura de descomposición del agente espumante, el cual es atrapado en el metal (que está por debajo de la temperatura de fusión) y la descomposición es inhibida por la alta presión. En un paso siguiente, el precursor se funde dentro de un molde y se calienta a la temperatura de descomposición del agente espumante. La estructura celular de la espuma producida con estos precursores es estrechamente dependiente de la temperatura, la presión, el tiempo de cocción y la aleación usada.

Esta técnica se ha usado para producir espumas de aluminio, bronce y cobre, con 0,5 y 1 % de hidruro de titanio o bicarbonato sódico como agentes espumantes. La desventaja principal es su costo relativamente alto debido, principalmente, a la necesidad de producir, mezclar y manejar los polvos de metal finos.

### 3.2. Métodos que aprovechan sistemas de aleación específicos

#### 3.2.1. Sistemas de aleación con una fase volátil

Es el primer método reseñado para la fabricación de una espuma metálica. Desarrollado en 1948, el proceso involucra una expansión rápida del metal fundido a alta presión y temperatura, en presencia de un metal volátil (mercurio, magnesio, zinc o cadmio). El proceso se muestra esquemáticamente en la figura 5. Durante el calentamiento, los dos metales permanecen dentro de un vaso a presión (1) y se calientan por encima de la temperatura de vaporización del componente más volátil. El mercurio se vaporiza totalmente debido a la presión dentro del vaso. El calentamiento continúa a la temperatura de fundición del metal, una vez fundido el aluminio queda atrapado el gas del mercurio (2). La masa fundida es removida del vaso a presión, y el mercurio se vaporiza totalmente y se expande dentro del metal fundido, para producir una espuma (3) que se enfría y solidifica. La velocidad del proceso de espumado hace difícil obtener una estructura celular uniforme o reproducible.

#### 3.2.2. Solidificación direccional en metales fundidos saturados de gas

El proceso GASAR (desarrollado en la Academia Estatal de Metalurgia de Ucrania, en 1993, significa reforzado con gas) aprovecha que algunos metales líquidos forman un sistema eutéctico con el hidrógeno; estos metales son fundidos en una atmósfera de hidrógeno bajo alta presión (por encima de 5 MPa) y el

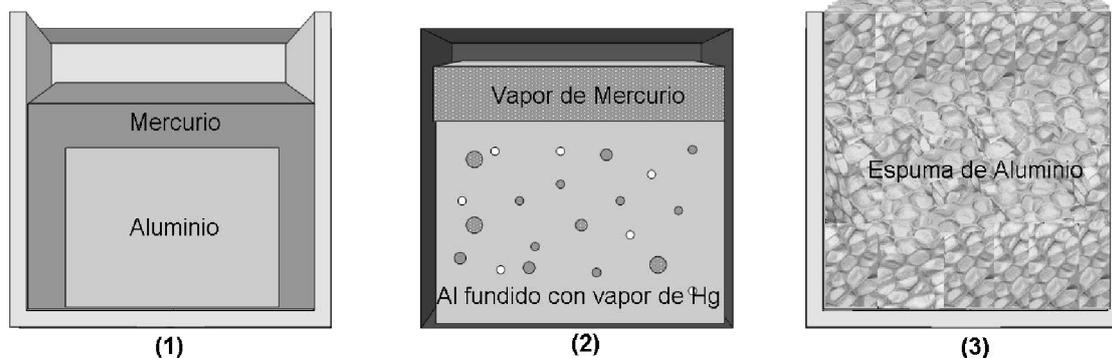
resultado es una fundición homogénea cargada de hidrógeno. Si la temperatura baja, la fundición sufrirá una transición eutéctica a un sistema heterogéneo de dos fases (sólido+gas). Cuando la fundición solidifica gradualmente, en una base fría del crisol (entre 0,05 y 5 mm/s), el gas formado en la transformación eutéctica es atrapado en el metal en forma de poros largos y paralelos alineados en la dirección del enfriamiento, estando su morfología determinada por la dirección del enfriamiento, la presión del gas, el metal o la aleación usada, la presencia de inclusiones no disueltas y la temperatura de fusión<sup>[19]</sup>.

Se han fabricado espumas usando aluminio, níquel, cobre, hierro, magnesio y otras aleaciones, con porosidades entre 5 y 75 %, diámetros de poro entre 10 µm y 10 mm y longitudes de poro de 100 µm a 300 mm. La uniformidad de los poros es variable, tendiendo a ser mejor en la primera parte del metal solidificado (cerca de la base enfriada del crisol) que en las partes superiores. Este proceso produce espumas de baja porosidad y baja calidad, donde los niveles de porosidad máximos no son particularmente altos. La forma final solo puede reproducirse para formas simples, la fabricación es lenta y difícil a escala industrial y el proceso es complejo y costoso.

### 3.3. Métodos basados en la unión de materiales

#### 3.3.1. Sinterización de polvos de metal y fibras sin consolidación

El método utiliza la sinterización parcial de polvos de metal produciendo espumas con porosidades



**Figura 5.** La producción de espuma de aluminio por la incorporación de una fase volátil. Se funde el metal bajo presión, y al bajar la presión bruscamente se produce la espumación.

*Figure 5. Production of aluminium foam by the addition of a volatile phase. The metal is melting under pressure, and suddenly lowering the pressure to allow foaming.*

relativamente bajas, típicamente entre 30 % y 50 % y poro abierto. La porosidad puede incrementarse incorporando un material de relleno que se evapore o desintegre durante el proceso de sinterización. Sustituyendo los polvos de metal total o parcialmente por fibras cortas, puede obtenerse un rango más alto de porosidad (por encima del 96 o 98 %) y el material obtenido puede utilizarse para filtros de alta permeabilidad. Las espumas producidas de fibras tienen ductilidad y resistencia significativamente más alta que aquéllas hechas de polvos metálicos<sup>[20]</sup>. Las fibras de metal producen espumas con porosidad más alta, pero producirlas y manejarlas es costoso. La resistencia de las espumas está limitada por los pequeños puntos de contacto entre los granos de polvo o las fibras; por lo cual, la resistencia mecánica es pobre. No obstante, puede fabricarse, con esta técnica, una amplia gama de metales y aleaciones, y las espumas pueden obtenerse con las dimensiones finales requeridas, evitando la necesidad de corte y mecanizando de las piezas.

### 3.3.2. Sinterización de esferas huecas de metal

Las espumas son fabricadas por sinterización de esferas huecas de metal, en lugar de polvos. Las espumas producidas no contienen una proporción grande de metal sólido, por lo que pueden obtenerse densidades muy bajas. Las esferas con diámetros entre 500 y 6.000  $\mu\text{m}$ , con espesor de pared entre 5 y 400  $\mu\text{m}$ , pueden, fácilmente, concentrarse en agrupaciones regulares. La sinterización de las esferas, fundiéndose en los puntos de contacto, ha producido espumas de acero y otros materiales con densidades relativas, entre 80 % y 87 %, con buenas propiedades mecánicas<sup>[21]</sup>. La desventaja principal de esta técnica es el costo, ya que es relativamente difícil a escala industrial, además del gran número de pasos requerido para su fabricación.

### 3.3.3. Producción a partir de polvo, disolviendo una parte soluble

Las primeras espumas metálicas de poro abierto se realizan llenando un molde impregnado de grafito con una mezcla de polvos de aluminio y granos de NaCl (de 4 mm de ancho). El conjunto, una vez compactado y sinterizado a una temperatura por encima del punto fusión del aluminio, se convierte en una preforma sólida densa de dos fases. Esta preforma se introduce en agua donde la sal se separa por dilución

de la espuma de aluminio. Debido a la necesidad de asegurar una red continua de aluminio, la porosidad máxima recomendada es del 85 %; de la misma forma, la porosidad mínima deberá ser del 50 % para evitar atrapar el NaCl en la estructura final, que podría corroer al aluminio durante su vida en servicio. Las espumas tienen tamaños de poro entre 50  $\mu\text{m}$  y 10 mm. El tamaño de los poros se controla escogiendo el tamaño adecuado del NaCl. No hay restricción en las aleaciones utilizadas. La geometría de los polvos utilizados debe ser suficientemente simple para permitir una fácil compactación. El proceso permite obtener las espumas con la forma final. Las espumas obtenidas son de poro abierto de alta calidad, con gran reproducibilidad de propiedades, pero el proceso es relativamente costoso debido al manejo de polvos finos. La disolución de NaCl es un paso importante en la producción de muestras grandes debido al largo tiempo que toma disolver toda la sal<sup>[15]</sup>. La calidad de las espumas producidas usando este método es muy alta, pero es un proceso difícil a escala industrial.

## 3.4. Usando como molde una estructura celular

### 3.4.1. Preforma soluble en agua

Desarrollado en el Instituto Federal de Tecnología Suizo, consiste en llenar un molde con un material de bajo costo que formará los poros (rocas de sal) se agita y mezcla hasta obtener una densidad estable. Se sinteriza al aire y se enfría. Al fundir los granos de sal en los puntos de contacto se produce un bloque rígido de sal con la forma del molde, manteniendo canales abiertos en los espacios entre los granos originales. En el proceso más simple, el aluminio fundido se vierte simplemente en el bloque para infiltrar los canales. La estructura entera es removida del molde, enfriada, y colocada en agua para disolver la sal. Al final, se obtiene una espuma con poro abierto cuyo tamaño y diseño es similar a los granos de sal originales, y un tamaño celular mínimo de, aproximadamente, 1 mm.

Una versión más avanzada de este proceso infiltra el metal líquido a presión por un gas inerte, donde la preforma de sal está al vacío. Posteriormente, como en el proceso anterior, se disuelve la sal y se obtiene una espuma de poro abierto. El uso de presión durante el paso de infiltración produce espumas con poros pequeños de hasta 50  $\mu\text{m}$ . Este proceso ofrece la posibilidad adicional de usar granos de sal de diversos tamaños durante la producción de la preforma para producir espumas con diferentes tamaños de poro, en regiones diferentes o con

una distribución controlada de tamaño de poro. El costo, también, es el más bajo porque no se utiliza metal en polvo. Se han producido espumas con un tamaño de poro entre 50  $\mu\text{m}$  y 5 mm. No hay restricción en los metales o aleaciones que pueden usarse en este proceso, a no ser que reaccionen con la sal o el agua. La calidad de las espumas producidas es buena, y puede obtenerse un tamaño de poro pequeño. Las desventajas consisten en que el proceso es lento, difícil a escala industrial, e involucra muchos pasos<sup>[22]</sup>.

### 3.4.2. Infiltración en dos etapas

El proceso de infiltración en dos etapas se utiliza para hacer espumas de aluminio de poro abierto que reproduce la forma de las espumas poliméricas con un buen control dimensional. El proceso se muestra en la figura 6. Una espuma de poliuretano se infiltra, primeramente, con yeso y se calienta a 700 °C para fundir la espuma de poliuretano y dejar una cadena de canales a lo largo del bloque de yeso. El metal fundido se vierte en el molde, normalmente en vacío y con alta presión, para asegurar la total infiltración. El yeso se disuelve para dar una espuma metálica con la forma final y una estructura idéntica a la espuma del polímero original.

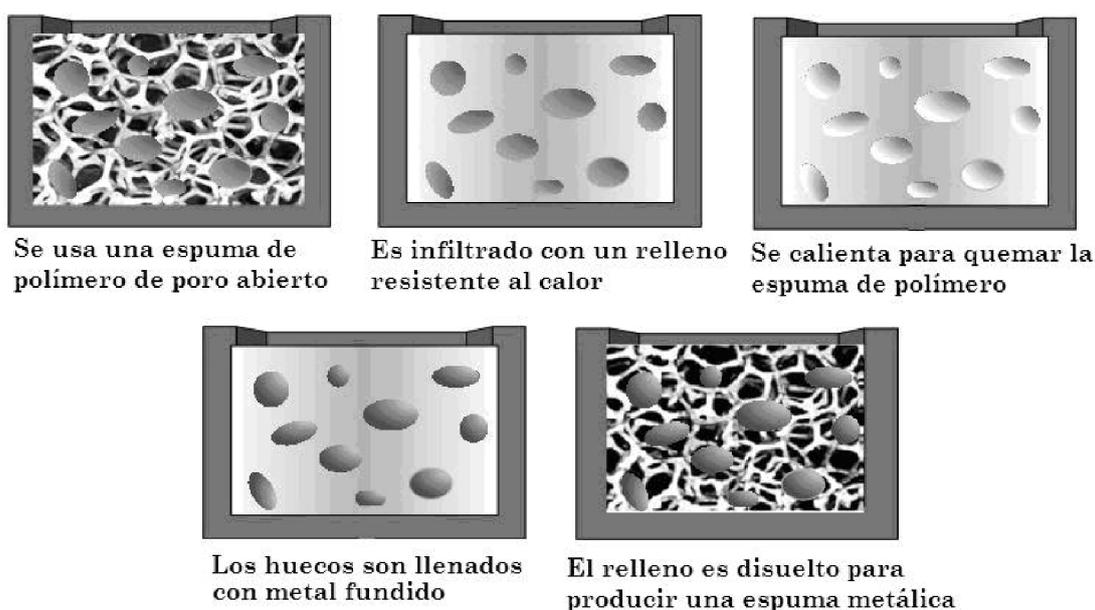
Este proceso produce cantidades relativamente pequeñas de espumas de elevado costo, pero de gran calidad con buenas propiedades mecánicas del material (Fig. 2). La porosidad puede ser hasta del 98%, con un tamaño de poro entre uno y varios milímetros. La forma del producto final puede reproducirse fácilmente y pueden seleccionarse zonas sólidas aplicando cera en la preforma del polímero. Puede fabricarse con esta técnica cualquier metal o aleación. Este método se usa para producir, comercialmente, espumas para intercambiadores de calor, filtros y materiales de absorción acústica. Las principales desventajas son la complejidad, costo y las dificultades para desmoldear el producto<sup>[22]</sup>.

### 3.4.3. Deposición sobre una preforma

Se han desarrollado procesos para depositar metal sobre espumas de polímero de poro abierto. Una vez que el polímero es cubierto, totalmente, con el metal, se sinteriza para remover el polímero.

#### 3.4.3.1. Electrodeposición

La electrodeposición se realiza sobre una espuma de poliuretano de poro abierto, la cual es sumergida en



**Figura 6.** Proceso de infiltración en dos etapas en un molde de yeso obteniendo una espuma de aluminio con la misma estructura de la espuma de polímero inicial.

*Figure 6. Infiltration process in two stages in a plaster mould obtaining aluminium foam with the same structure of the initial polymer foam.*

un fluido coloidal de negro de carbono. Se calienta para remover el polímero, dejando una red de poro abierto con canales huecos. Este proceso se usa, comercialmente, para producir espumas de níquel de poro abierto con el 95 % de porosidad y tamaño de poro entre 400 y 5.000  $\mu\text{m}$ , principalmente, para el uso como electrodos de batería<sup>[23]</sup>.

### 3.4.3.2. Deposición en fase gaseosa

Una preforma de polímero de poro abierto es cubierta con un material de gran absorción de infrarrojo, normalmente negro de carbono o pigmentos apropiados. La deposición en fase gaseosa se realiza a altas temperaturas, donde el  $\text{Ni}(\text{CO})_4$  se descompone para depositar una capa de níquel sobre la superficie del polímero. Se utiliza radiación infrarroja para calentar la capa de polímero y facilitar la descomposición del  $\text{Ni}(\text{CO})_4$ . La estructura celular es, posteriormente, calentada para eliminar el polímero. Las espumas producidas por este método son, mecánicamente, más fuertes y muestran mejor conductividad que las espumas electrodepositadas, debido, principalmente, a que se obtienen superficies más uniformes. Esta técnica de deposición se usa, comercialmente, para producir espumas de níquel, de poro abierto, con tamaños de células entre 450 a 3.200  $\mu\text{m}$  y porosidades altas de 70 a 98 %<sup>[24]</sup>.

## 4. PROPIEDADES DE LAS ESPUMAS DE ALUMINIO

Las propiedades de las espumas de aluminio están directamente ligadas a la composición química, proporción y morfología entre las zonas sólidas y gaseosas que componen su estructura. Debido a la gran variedad de productos disponibles, obtenidos por métodos de fabricación muy distintos, como se ha detallado anteriormente, las propiedades presentan una gran variabilidad. La principal ventaja de la utilización de las espumas de aluminio es el disponer de unas propiedades notablemente diferentes frente a las aleaciones metálicas originales que las hacen atractivas para la fabricación de nuevos productos y el desarrollo de nuevas aplicaciones. La mejora continua de las espumas de aluminio para satisfacer nuevos requerimientos y aplicaciones está basada en la obtención de propiedades cada vez más específicas. Para analizar el comportamiento de las espumas y sus posibles usos se han dividido sus propiedades en tres grupos: físicas, químicas y mecánicas.

## 4.1. Propiedades físicas

### 4.1.1. Densidad

Una de las ventajas de las espumas de aluminio es su baja densidad, lo que permite fabricar con ellas estructuras ultraligeras con elevada resistencia y rigidez específicas. La densidad de las espumas de aluminio se encuentra en el rango de 0,4 -1,2  $\text{g}/\text{cm}^3$ , es decir, los poros ocupan del 65 % al 85 % del volumen total<sup>[25]</sup>. La densidad de la espuma de aluminio se determina por métodos volumétricos (peso y geometría) o mediante análisis de imagen de la estructura del poro interno; en este caso los poros en la superficie mecanizada se llenan con resina negra para establecer el contraste entre los poros y las paredes del poro. Los resultados obtenidos por este medio son bastante cercanos a la densidad obtenida por el método volumétrico. Adicionalmente, el análisis de imagen también da información sobre la distribución de densidades en la muestra.

### 4.1.2. Propiedades elásticas

Los módulos de Young y de cizallamiento se calculan como la relación de las tensiones frente a las deformaciones resultantes. La importancia técnica de que los módulos de Young y de cizallamiento sean grandes, con relación a la densidad, ha dado lugar al desarrollo de distintas técnicas para incrementar el valor de estas propiedades. Un módulo de elasticidad relativamente alto, con densidad baja, permite obtener una rigidez específica muy alta y puede minimizarse el peso de una estructura<sup>[9]</sup>. El módulo de elasticidad en las espumas de aluminio depende, fuertemente, de la densidad. La dependencia obedece a una función exponencial ( $E = \text{Cte} \cdot \rho^n$ ) con un exponente de valor, aproximadamente,  $n = 1,6$ . La función exponencial es dependiente del tamaño y distribución de los poros y la presencia de aditivos en la aleación de aluminio y, por tanto, de la tecnología utilizada para la fabricación del material<sup>[26 y 27]</sup>.

El módulo de elasticidad de la espuma de aluminio no puede obtenerse fácilmente a partir de la curva tensión-deformación. Esto, es debido al efecto de sujeción y también debido a la deformación plástica de paredes celulares muy delgadas en las fases iniciales de aplicación de la tensión. El método más adecuado para este propósito parece ser el cálculo de la respuesta de vibraciones libres de las muestras<sup>[15]</sup>. El módulo de elasticidad también puede calcularse usando la respuesta frente a vibración por impacto según DIN 53 440, donde el módulo de elasticidad resulta, casi, independiente de la frecuencia de resonancia<sup>[28]</sup>.

### 4.1.3. Propiedades térmicas

El aluminio tiene una alta conductividad térmica. Debido a la elevada superficie específica de las espumas de aluminio, tanto con poros abiertos como cerrados, pueden constituir un medio eficiente para la transferencia de calor. Las especificaciones para estos materiales se realizan a partir de la disipación de calor y los índices de caída de presión<sup>[29]</sup>. Debido a los muchos parámetros que están involucrados, para evaluar el comportamiento en diferentes espumas comerciales y asumir que los mismos coeficientes son aplicables para un gran rango de densidades relativas y tamaños de poro de la espuma, se utilizan gráficos experimentales, que deben estar construidos para puntos específicos de velocidades del flujo líquido y del espesor de la espuma<sup>[30]</sup>.

### 4.1.4. Propiedades eléctricas

La conductibilidad eléctrica de la espuma de aluminio depende significativamente de la densidad. Si los valores experimentales se normalizan por las propiedades de aleación básica, la dependencia obedece una ley exponencial con un exponente que varía de 1,48 a 1,60. El exponente similar encontrado para la conductibilidad eléctrica y térmica confirma la validez de la ley de Wiedemann-Franz para las espumas de aluminio:  $LT = K/\sigma$ , donde,  $K$  es la conductividad térmica,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica y  $L$  es una constante (número de Lorenz que depende de la temperatura a la que se encuentre el metal). La resistividad real de la espuma tiene una componente que aumenta con la temperatura, que no es sensible a la estructura y es el resultado directo de la agitación térmica, cualquier otra imperfección da lugar a un segundo componente de la resistividad, que es el componente principal a temperaturas bajas y se conoce como resistividad residual<sup>[31]</sup>.

### 4.1.5. Propiedades acústicas

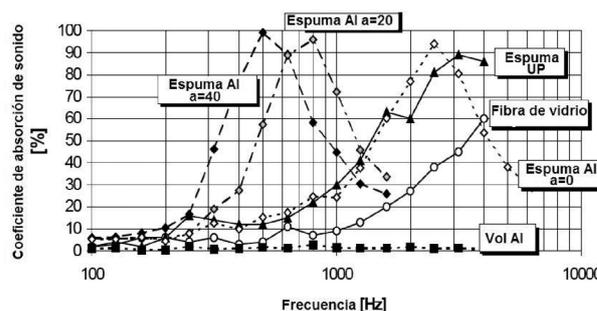
Las espumas de aluminio poseen la capacidad de absorber o rechazar parte de la energía sonora que les llega. La incidencia de una onda acústica en un paramento recubierto con este material, permite definir el coeficiente de absorción sonora por unidad de superficie ( $\alpha$ ) a la relación entre la energía sonora absorbida por un material y la energía sonora incidente sobre dicho material. Este coeficiente depende, además, de la naturaleza del material, de la frecuencia y del ángulo de incidencia de dicha onda acústica. Los

fabricantes de materiales suelen darlo en función de una banda de frecuencias comprendida entre 125 Hz y 4 kHz.

Las espumas de aluminio, sobre todo aquellas con los poros interconectados son muy eficaces en la absorción del sonido: el sonido entrante se refleja dentro de la espuma entre los poros; la superficie del poro vibra convirtiendo el sonido en calor. Un nivel de sonido muy reducido se refleja dentro del espacio encerrado. El coeficiente de absorción es una función del espesor del material, la densidad y el tamaño del poro. La máxima absorción de sonido para las frecuencias incidentes puede ajustarse por el tamaño del poro de la espuma (agrandando la capa de aire,  $\alpha$  máximo cambia hacia frecuencias más bajas). La mayor absorción de energía sonora se produce para espumas con densidades en torno a  $0,65 \text{ g/cm}^3$  <sup>[28]</sup>. La comparación de coeficientes de absorción de sonido de espumas de aluminio de poros abiertos, el aluminio puro, la fibra de vidrio y la espuma de PU se muestra en la figura 7 <sup>[32]</sup>.

## 4.2. Propiedades químicas

Las espumas de aluminio se fabrican tanto de aluminio puro como de aleaciones, lo cual hace que se comporten de diferente forma frente a la corrosión, por ejemplo al alea el aluminio con cobre se producen precipitaciones de fase cerca de los límites de



**Figura 7.** Coeficiente de absorción de sonido de diferentes espumas de aluminio de densidad  $0,5 \text{ g/cm}^3$  con estructura de poro abierto con diferente diámetro de poro ( $a$ ) en mm, comparado con aluminio sólido, espuma de PU y matriz de fibra de vidrio<sup>[32]</sup>.

*Figure 7. Coefficient of absorption of sound of different aluminium foams of density  $0,5 \text{ g/cm}^3$  with open-cell structure with different pore diameter ( $a$ ) in mm, compared with aluminium solid, PU foam and of glass fibre matrix<sup>[32]</sup>.*

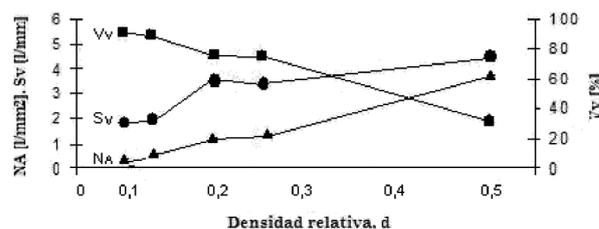
grano, produciendo una capa empobrecida en cobre y anódica respecto al resto del material.

El aluminio es considerado un material adecuado para resistir a los ácidos oxidantes pero, por desgracia, ocupa un lugar muy bajo en la serie de potenciales electroquímicos y el carácter esencialmente reactivo del material en sí anula, en muchos casos, el carácter protector de la película de alúmina formada en sus superficies libres. El aluminio, a cualquier concentración, presenta trazas de cloruros que activa el ataque. Las espumas de aluminio son sensibles a la corrosión-fatiga donde el agente nocivo es el vapor de agua<sup>[33]</sup>. No obstante, en muchos de los procesos de fabricación de espumas de aluminio, se agrega sílice, tanto por aumentar la densidad de la espuma como para mejorar su resistencia a la corrosión.

La utilización de aleaciones de aluminio de alta resistencia, cuyas mejores propiedades se alcanzan mediante tratamiento térmico de bonificado (temple seguido de una maduración natural o artificial), puede conducir a que estas aleaciones sean susceptibles al agrietamiento por corrosión bajo tensión. El comportamiento es diferente según la aleación y en algunos casos se puede alcanzar una gran resistencia sin peligro de vulnerabilidad si los tratamientos térmicos se realizan adecuadamente<sup>[34]</sup>.

### 4.3. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de las espumas de aluminio dependen, fundamentalmente, de su densidad relativa y la estructura del poro que las forma. Gran cantidad de trabajos han evaluado los valores del módulo elástico, alargamiento, límite elástico, carga de rotura y absorción de energía de las espumas de aluminio y su conexión con la variación de la densidad<sup>[35-39]</sup>. La cuantificación de estos valores se realiza mediante la determinación de una serie de parámetros geométricos: número de poros por unidad de superficie (NA), el área de los poros por unidad de volumen (SV) y el volumen de los poros por unidad de volumen (VV). Estos valores, al ser representados respecto a la variación de la densidad, muestran cómo al disminuir la densidad, VV crece y NA y SV disminuyen (Fig. 8)<sup>[40]</sup>. La distribución del tamaño de los poros disminuye al aumentar la densidad de la espuma; esto, está favorecido, adicionalmente, por la presencia de poros de pequeño tamaño localizados preferentemente en la piel de las espumas. Para espumas de densidades entre 0,13 y 0,26 gr/cm<sup>3</sup> los poros que predominan (al menos, el 40 %) tienen tamaños entre 0,02 y 0,26 mm<sup>[40]</sup>. La mayoría de las propiedades de las espumas de aluminio pueden ser relacionadas en base a la densidad relativa de la



**Figura 8.** Variación de la densidad relativa en función del número de poros por unidad de superficie (NA), el área de los poros por unidad de volumen (SV) y el volumen de los poros por unidad de volumen (VV)<sup>[40]</sup>.

*Figure 8. Variation of the relative density in function of the number of pore sections (NA), pore area within a unit volume (SV) pore volume (VV)<sup>[40]</sup>.*

espuma y de una constante característica de la propiedad considerada. Estas propiedades se pueden calcular según la ley de la energía:

$$\text{Propiedad de la espuma} = \text{Constante de la propiedad} \cdot (\rho_{\text{espuma}}/\rho_{\text{sólido}})^n$$

El módulo elástico presenta variaciones durante la deformación elástica y alta sensibilidad a los defectos morfológicos en la estructura celular. La capacidad de deformación plástica está directamente asociada a la absorción de energía estática y dinámica. El comportamiento plástico está relacionado con la variación del tamaño de poro, habiéndose observado que el micromecanismo de deformación en las espumas de poro cerrado, es el colapso colectivo simultáneo de 5 o 6 poros. Al variar el volumen de las muestras estudiadas, no se han observado variaciones escalonadas de propiedades<sup>[41]</sup>.

Los ensayos a compresión son muy habituales ya que muchas estructuras se diseñan para trabajar a compresión. La dirección de deformación es importante en los resultados obtenidos y se suele especificar que ésta sea paralela a la dirección del crecimiento de la espuma. Los resultados de los ensayos a compresión presentan una curva típica con una zona plana o meseta extendida, a valores de compresión en torno al 60 %. Espumas con densidades altas pueden presentar un desarrollo más plano, debido a la mayor resistencia que proporciona la eliminación de las paredes de la espuma en el curso de la deformación. Hay diversos métodos para la evaluación de la fuerza de compresión, como la extrapolación o el cálculo por elementos finitos. El nivel de tensión de la región de la meseta es el esfuerzo de compresión

característico para cada material matriz y función de la densidad de la espuma. Estos valores se pueden obtener a partir de la ecuación empírica:

$$\sigma = Cc (\rho_{\text{espuma}} / \rho_{\text{sólido}})^n$$

dónde, Cc es una constante de compresión y el valor de n es:  $1,5 < n < 2,5$ .

En el análisis de la resistencia a la compresión de estructuras tipo sándwich se ha obtenido que, generalmente, la carga del colapso obtenida excede el valor estimado (por cualquier método teórico) en un 50 %; se piensa que la diferencia es debida a la presencia de una capa límite en la interfase entre el núcleo de espuma y las láminas de la cara<sup>[42]</sup>. Tales efectos han sido estudiados usando modelos basados en las condiciones dependientes de los esfuerzos de plasticidad, como las teorías de Fleckand y de Hutchinson<sup>[43]</sup>. Los métodos de evaluación comunes suelen estar sujetos a estudios analíticos por medio de elementos finitos.

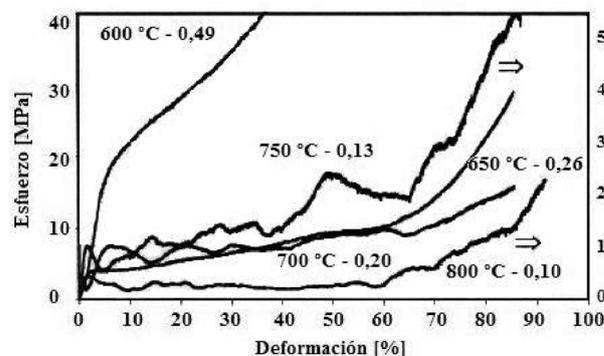
Los ensayos de tracción se realizan sobre muestras de forma de prisma rectangular o con geometría de hueso, mediante ensayos cuasiestáticos. Las espumas de aluminio muestran un comportamiento frágil bajo carga de tracción. Las tensiones en la rotura indican que la deformación elástica es seguida por una tensión plástica provocando un fallo inmediato de la espuma. Los poros individuales actúan como muescas que propician el inicio de la fractura. En la determinación del límite elástico, los defectos estructurales tienen una gran influencia en el comportamiento de las espumas de aluminio de poros cerrados. Los poros parcialmente acoplados y los colapsos locales de poros pueden causar desviaciones serias en la respuesta tensión-deformación y reducir, significativamente, el límite elástico y el esfuerzo para el colapso plástico<sup>[44]</sup>. La existencia de defectos estructurales también contribuye a la disminución de estos valores. Por consiguiente, la reducción de los defectos estructurales a través de la mejora de técnicas de manufactura es esencial para mejorar las propiedades mecánicas de estos materiales<sup>[45]</sup>.

Las espumas de aluminio presentan alta eficiencia absorbiendo energía dinámica, ya que su velocidad de deformación es casi constante para un amplio rango de velocidades de aplicación de la carga. La estructura altamente isotrópica de la espuma hace que la energía mecánica recibida se disperse por igual en todas las direcciones<sup>[16]</sup>. Durante el impacto los poros se colapsan y actúan de amortiguador, disipando la energía de choque<sup>[46]</sup>. Se han estudiado espumas de aluminio sujetas a impacto con cargas de choque en medios líquidos y gaseosos, en los cuales se revela que la energía disipada con un choque frontal excede significativamente la absorción de energía absorbida

mediante ensayos cuasiestáticos ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ). En los ensayos de choque la deformación produce una onda plana de tamaño similar al tamaño celular donde la espuma se fragmenta en pequeñas partículas<sup>[47]</sup>. Los ensayos a alta velocidad de deformación se pueden realizar mediante caída de pesos (hasta  $100 \text{ s}^{-1}$ ), impacto con barra Hopkinson (hasta  $5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) o mediante ensayos balísticos (hasta  $10^5 \text{ s}^{-1}$ ).

Los ensayos de flexión se realizan en configuraciones de tres o cuatro puntos. Es importante una selección cuidadosa de los rodillos que transmiten el soporte y la fuerza, debido a que los colapsos locales pueden provocar que los resultados de la prueba no sean significativos. Los ensayos sobre espumas con piel externa rígida influyen en los resultados obtenidos en las pruebas.

Los ensayos de fatiga más utilizados son en condiciones de compresión-compresión, aunque también hay trabajos en condiciones de compresión-tensión, de tensión-tensión y de flexión rotatoria<sup>[48]</sup>. Cuando el fallo se produce por compresión, puede ser un problema identificar el punto de inicio de rotura, pudiéndose definir como criterio de fallo un nivel de deformación crítico o el número de ciclos para el colapso plástico<sup>[49]</sup>. La resistencia a la fatiga de las muestras ensayadas en la dirección de crecimiento de la espuma es inferior a la obtenida cuando la carga es perpendicular a la dirección del crecimiento de la espuma (Fig. 9). La diferencia en la resistencia a la fatiga según la dirección ensayada puede ser explicada por el diferente gradiente de densidades en la dirección del crecimiento de la espuma y a la forma anisotrópica del poro debida al efecto de la gravedad durante la fabricación a partir del metal fundido.



**Figura 9.** Curva de tensión-deformación de espumas de aluminio con diferentes densidades relativas<sup>[40]</sup>.

*Figure 9. Stress-strain curves for aluminium foams having different relative densities<sup>[40]</sup>.*

Otros ensayos mecánicos incluyen medidas de la dureza mediante indentación con penetradores de diversas geometrías. Para los paneles tipo sándwich con una base celular, hay pruebas tecnológicas para describir la unión entre las hojas de la cara y la base, tal como la prueba de la piel de tambor (ASTM D1781). Los procesos de fallo en espumas de aluminio pueden ser monitorizados registrando las emisiones acústicas por la ruptura de las paredes celulares, técnica que puede ser complementaria a las medidas ordinarias de tensión. En la tabla I se han recogido algunos datos de propiedades mecánicas de diversas composiciones y densidades de espumas de aluminio.

De acuerdo a los estudios realizados sobre las propiedades mecánicas de las espumas de aluminio, se puede resumir que la mejor combinación de propiedades se suele encontrar en espumas con un elevado número de poros (82 %-95 %), una densidad relativa baja (0,2-0,5), una buena distribución de poros (40 %-70 %) y un tamaño de poro entre 0,02 y 0,12 mm<sup>2</sup>.

## 5. APLICACIONES

Las principales aplicaciones de las espumas de aluminio están en la industria de automoción, aeroespacial, naval, ferroviaria y construcción. Su estructura le confiere unas especiales características físicas, mecánicas, térmicas y eléctricas; especialmente sus propiedades de aislamiento térmico y acústico, su bajo peso y su

capacidad para absorber energía de impacto. Esto hace posible la utilización de estos materiales en un sinfín de diferentes aplicaciones con formas geométricas complejas. Sin embargo, todavía falta más investigación para optimizar nuevos productos<sup>[50 y 51]</sup>.

### 5.1. Estructuras tipo sándwich

Las estructuras sándwich son construcciones laminares constituidas por dos revestimientos unidos a un cuerpo central (núcleo) relativamente ligero, dando como resultando un panel de elevada rigidez y poco peso. La principal función de los revestimientos es la de soportar y transmitir, uniformemente, las cargas superficiales recibidas. Estos revestimientos pueden estar formados por láminas de materiales metálicos como el aluminio y sus aleaciones, materiales compuestos, madera, etc. En aplicaciones de carácter estructural la misión del núcleo es resistir la transmisión de esfuerzos de cortadura de una piel a otra, así como, resistir la compresión.

La estructura tipo sándwich con núcleo de espuma de aluminio puede obtenerse a partir de bloques, planchas, hojas, etc.; mediante operaciones de mecanizado, hasta llegar a la forma deseada; o, fabricándola "in situ", obteniendo mediante colada (por presión diferencial o gravedad) la pieza o conjunto<sup>[52]</sup>. Adicionalmente a las construcciones de elevada rigidez, las estructura sándwich tienen importante

**Tabla I.** Propiedades mecánicas espumas de aluminio<sup>[74]</sup>

*Table I. Mechanical properties of aluminium foam<sup>[74]</sup>*

PROPIEDAD	UNIDAD	Espuma de aluminio							
		AlSi12	AlSi12	AlMg1Si (6061)	AlMg1Si (6061)	AlMg1Si (6061)	AlSi7	AlSi7	AlSi7
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	0,6	0,8	0,5	0,6	0,8	0,5	0,6	0,8
Modulo de Young	GPa	4,9	8,4		3,9				
Resistencia a compresión	sin piel [MPa]	18,8	30,2	14,3	22	43,6	7,8	11,9	22,8
	con piel [MPa]	16,1	29	14,1	20,3	35,8			
Absorción de energía a compresión	por volumen [kJ/dm <sup>3</sup> ]	3,1			7,1		4,4	5,3	
	por masa [kJ/kg]	5,3	9,75	9,86	11,9		8	8,4	
Conductividad térmica	W/mK	16,7 (20°C)			18,4 (20°C)		6,1 (50 °C)	7,8 (50 °C)	
							6,9 (100 °C)	8,8 (100 °C)	
							7,7 (200 °C)	9,8 (200 °C)	
Capacidad calorífica	kJ/kgK	0,88			9,2		0,9	0,9	
Coefficiente de dilatación lineal	[10 <sup>-6</sup> /K]	19,9 a 20,6			23,1				

aplicación en estructuras resistentes al impacto, utilizadas en vehículos para mejorar la seguridad pasiva, así como en estructuras ultraligeras, atenuación de ruidos en carreteras, puentes, edificios y máquinas, sistemas de protección contra incendios, etc.

## 5.2. Industria de automoción

Las necesidades dentro de la industria de la automoción de seguridad, reducción del consumo de combustible, elementos absorbedores de impactos, reducción de emisiones acústicas y componentes de alta emisión del calor, hacen de las espumas de aluminio un material idóneo para muchas aplicaciones. El uso de espumas de aluminio en la estructura de los automóviles es un fenómeno bastante reciente. La empresa Cymat fabrica Cymat SmartMetal, espuma de aluminio. Este material ofrece una mejor relación propiedades: resistencia-peso, absorción de energía, aislamiento térmico y acústico, reciclabilidad y un relativo bajo coste de producción y son aplicadas en partes absorbentes de impacto, vigas laterales de puertas, cajas de impacto (Fig. 10), cierras de partes de motor, turbinas, etc.<sup>[16]</sup>.

Las espumas de aluminio presentan buenas propiedades frente a un amplio rango de esfuerzos, se deforman proporcionalmente a la carga soportada y la absorción de energía es aproximadamente isotrópica. Frente a los impactos las espumas de aluminio tienen un mejor comportamiento que las espumas poliméricas, debido a su mayor deformabilidad, presentando un bajo índice de rebote en situaciones de choque dinámico, evaluado en menos de un 3 %, frente al 15 % de las espumas de poliuretano<sup>[53]</sup>. Las espumas de aluminio se están utilizando en diferentes partes de vehículos de BMW y Audi, donde han

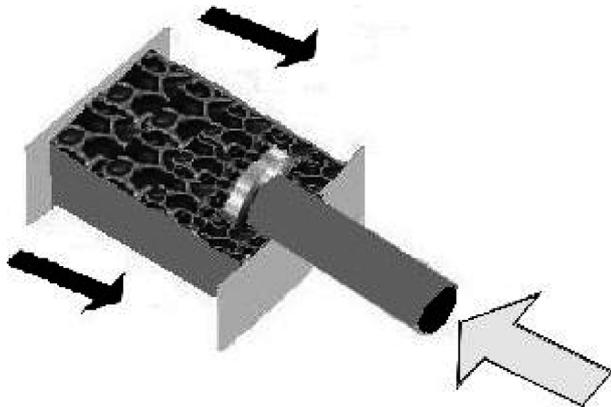


Figura 10. Caja de impacto de Metcomb.

Figure 10. Metcomb Crashbox.

supuesto un aligeramiento estructural del 30% (según pruebas de BMW), además de reforzar la seguridad debido a los absorbentes de impacto y la mejora del índice NVH (ruido, vibración y rigidez) <sup>[54]</sup>.

En coches de competición, donde la rigidez y el peso son aspectos muy importantes, el fabricante alemán Karmann actualmente ensaya paneles sándwich tridimensionales ultraligeros<sup>[48 y 55]</sup>. Al sustituir componentes fabricados tradicionalmente en acero por espumas de aluminio no solo se reduce el peso en un 25 %, sino que, además, se aumenta la rigidez en un 700 %. Debido a ello, puede reducirse significativamente el número de componentes necesarios en el vehículo, disminuyendo los costes de fabricación.

La mejora del confort por la reducción del ruido en el interior del automóvil, es otro campo donde las espumas de aluminio pueden actuar tanto como barreras acústicas como reduciendo el nivel de ruido transmitido al exterior del vehículo. El problema de las vibraciones de resonancia indeseables de un motor, vehículo, etc., que son causa de averías y la emisión de ruidos, puede reducirse. Al ser el módulo de Young de la espuma menor que el correspondiente al metal sin espumar, la frecuencia de resonancia de una espuma se desplazará, generalmente, a menores frecuencias. Adicionalmente, el factor de pérdidas de las espumas de aluminio es del orden de diez veces mayor que el del metal original, de modo que las vibraciones pueden ser amortiguadas de un modo más eficiente. Por tanto, las espumas ofrecen la posibilidad de evitar problemas de ruidos, si bien el factor de pérdidas es mucho menor que en el caso de los polímeros. Para el Cadillac Sixteen de GM se está fabricando suelo de espuma de aluminio, lo que permite la misma firmeza que otros materiales con un menor peso y menor espesor, brindando un mayor espacio interior y mejor índice NVH <sup>[56]</sup>.

## 5.3. Industria aeroespacial

En aplicaciones aeroespaciales, la sustitución de las costosas estructuras de alma alveolar por sándwiches de espuma de aluminio puede llevar a un mejor rendimiento con un menor coste. Por un lado, se busca aumentar la resistencia al alabeo y al pandeo y por otro aprovechar las importantes ventajas que suponen la isotropía de las propiedades mecánicas de las espumas y la posibilidad de fabricar estructuras compuestas sin necesidad de pegado por adhesivos. Esto último hace que mejore el comportamiento en caso de incendios, donde es necesario que la estructura mantenga su integridad tanto tiempo como sea

posible. BOEING estudia el uso de paneles sándwich de espuma de aluminio, para los largueros de cola de los helicópteros<sup>[57]</sup>. Una ventaja importante de estos materiales es que permiten fabricar piezas tridimensionales y con curvatura, en contraste con las estructuras planas de alma alveolar. Otras aplicaciones incluyen piezas estructurales en turbinas, donde tanto la rigidez como un correcto amortiguamiento son muy importantes. Los cierres entre las distintas partes del motor también se han diseñado de espuma de aluminio<sup>[58]</sup>.

En tecnología espacial se ha desarrollado el uso de espumas de aluminio como absorbedor de impactos para los elementos de aterrizaje de los vehículos espaciales y como refuerzo para las estructuras de carga en satélites, sustituyendo materiales que presentaban problemas en ambientes adversos (cambios de temperatura, vacío, etc.)<sup>[59 y 60]</sup>.

El Centro de Investigación NASA "Glenn" ha desarrollado micrófonos con mejores prestaciones piezoeléctricas utilizando espuma de aluminio como tapa de viento de micrófono para reducir el ruido y actuar como un enderezador de flujo<sup>[61]</sup>.

La ESA ha fabricado estructuras tipo sándwich con centro de espumas de aluminio, en la construcción de conos espaciales para el Ariane 5. Los ensayos realizados en las pruebas de vibración y estáticas con cargas axiales y laterales han dado excelentes resultados. La figura 11 muestra la estructura tipo sándwich del cono y las direcciones de carga ensayadas<sup>[62]</sup>.

La espuma de aluminio se usa como intercambiador de calor y matriz de soporte químico granulada para el sistema de control del dióxido de carbono atmosférico en el trasbordador espacial. El polvo de

amina granulada puede absorber o emitir, selectivamente, dióxido de carbono en función de la temperatura, pero genera o requiere calor para la reacción. La matriz de espuma de aluminio de alta conductividad térmica aumenta la rapidez y eficacia del sistema<sup>[61]</sup>.

#### 5.4. Industria ferroviaria

La aplicación de las espumas de aluminio en los equipos ferroviarios sigue las mismas normas que en la industria de automoción en lo que se refiere a los tres campos de aplicación principales: rigidez específica, absorción de energía frente a impactos y absorción de sonido. La absorción de energía es un tema muy importante en los ferrocarriles que discurren por áreas urbanas, en las que pueden producirse colisiones con coches. Se han puesto en servicio, en Japón, trenes de alta velocidad equipados con un bloque de 2,3 m<sup>3</sup> de espuma de aluminio para mejorar la absorción de energía en caso de impacto<sup>[49]</sup>. Las ventajas de los elementos fabricados con espumas son las mismas que para los automóviles, con la diferencia de que los ferrocarriles necesitan componentes de mayores dimensiones.

#### 5.5. Industria naval

La construcción con materiales ligeros ha ganado importancia en la industria naval. Los modernos barcos de pasajeros pueden ser construidos completamente



Figura 11. Cono espacial.

Figure 11. Space cone.

con aluminio extruido, hojas de aluminio y estructuras de aluminio de alma alveolar<sup>[63]</sup>. Las espumas de aluminio son un material prometedor para este tipo de estructuras. Los sándwiches de espuma de aluminio obtenidos por pegado con adhesivos de poliuretano son estructuras ligeras y rígidas con un excelente amortiguamiento, incluso en el caso de bajas frecuencias típicas de los barcos<sup>[64]</sup>.

## 5.6. Construcción

Existe un amplio abanico de aplicaciones en la construcción. Los modernos edificios de oficinas comienzan a decorar sus fachadas con paneles ligeros, rígidos y resistentes al fuego sujetos a las paredes del edificio mediante soportes de espuma de aluminio. De igual forma las barandillas de los balcones que suelen ser de materiales demasiado pesados y problemáticos en caso de incendio comienzan a sustituirse por espumas de aluminio<sup>[65]</sup>. Las puertas y salidas de incendios están hechas de espumas de aluminio de baja densidad, por tener reducida conductividad térmica y buena resistencia al fuego. Aunque el punto de fusión del aluminio es bastante bajo, las espumas de aluminio permanecen estables al exponerse a la llama, debido a la estabilidad de la alúmina formada superficialmente, en estas condiciones<sup>[65]</sup>.

Espumas de poro cerrado están siendo usadas como materiales absorbentes de sonidos a lo largo de las autopistas de Japón para reducir el ruido del tráfico y en algunos túneles de las líneas de ferrocarriles para atenuar las ondas de choque<sup>[66]</sup>. Para estos propósitos, las espumas son laminadas después de cortarlas. La reducción del espesor de diez a nueve milímetros crea una cantidad suficiente de grietas y otros defectos en las paredes de las celdas que mejoran sustancialmente la absorción de ruidos, aunque sigue sin ser comparable con los elementos de absorción basados en espumas de polímeros o lana de vidrio. Sin embargo, la combinación de las propiedades de absorción de ruidos con otras características como la resistencia al fuego y a la intemperie, la no generación de gases nocivos en el caso de incendios y la sencilla limpieza de los paneles hacen de las espumas un material con muchas ventajas. La novedosa estética, junto a su capacidad para reducir y aislar los ruidos, ha conducido a diseñar estructuras de cielo raso hechas con placas de espuma de aluminio como en la cafetería Baluarte en Pamplona, España (Fig. 12).

La capacidad de absorción de energía de las espumas de aluminio ha permitido desarrollar sistemas estructurales que mitigan el daño por explosión en edificios, conformando simultáneamente estructuras resistentes frente a la temperatura y el envejecimien-



**Figura 12.** Cafetería Baluarte en Pamplona, España.

*Figure 12. Baluarte's coffeeshop in Pamplona, Spain.*

to. Estos sistemas se han ensayado en Australia, donde un edificio resistió una bomba de cinco toneladas. Estos sistemas también se están utilizando en áreas específicas para almacenar productos o equipos sospechosos<sup>[67]</sup>.

## 5.7. Maquinaria

Las piezas de maquinaria fabricadas de espuma o rellenas de espuma hacen que disminuya la inercia y aumente el amortiguamiento. Estos nuevos componentes pueden utilizarse en taladradoras, fresadoras, etc. Los alojamientos de espumas para aparatos eléctricos añaden la ventaja de la protección electromagnética. El cuerpo estructural de los discos de las rectificadoras podría estar hecho de espuma de aluminio, con el material abrasivo adherido a su periferia. El amortiguamiento intrínseco del disco ayudaría en la atenuación de las vibraciones y una porosidad parcialmente abierta serviría para almacenar el material arrancado. Otras aplicaciones requieren un material de relleno flotante y muy ligero para flotadores que midan niveles de llenado en medios corrosivos o sometidos a muy altas temperaturas. Debido al elevado coste de estos flotadores, podrían ser sustituidos por piezas de espuma de aluminio con una capa densa exterior que sirviera de alojamiento al sistema magnético<sup>[68 y 69]</sup>.

## 5.8. Aplicaciones funcionales

### 5.8.1. Filtración y separación

Hay dos tipos de filtros: los que retienen y separan partículas sólidas dispersas en un líquido (suspensiones) y los que retienen partículas sólidas o líquidas dispersas

en un gas (humos o neblina, respectivamente). Ejemplos del primer tipo son los filtros para limpiar los polímetros reciclados fundidos, para separar la levadura de la cerveza o para limpiar aceite contaminado. El segundo tipo incluye el filtrado de los humos procedentes de la combustión diesel o la extracción del agua del aire. Las propiedades más importantes de los filtros son la capacidad de filtrado, la retención de partículas, la facilidad de limpieza, las propiedades mecánicas, la resistencia a la corrosión y el coste. Por lo tanto, las espumas de aluminio presentan una combinación de propiedades que pueden competir con las de los materiales tradicionalmente utilizados en la fabricación de filtros.

### 5.8.2. Intercambiadores de calor y máquinas de frío

Las espumas de aluminio pueden utilizarse como intercambiadores de calor por su alta conductividad. En este caso las espumas deben tener porosidad abierta. Los gases o líquidos pueden recibir o ceder calor fluyendo por la espuma previamente calentada o enfriada. Debido a la porosidad abierta la caída de presión puede minimizarse. Un ejemplo de estas aplicaciones son los colectores compactos de calor utilizados para enfriar dispositivos electrónicos con una gran disipación de energía como los chips de ordenadores o las fuentes de energía.

### 5.8.3. Catalizadores

La efectividad de la catálisis depende de una gran superficie de contacto entre el catalizador y el gas o líquido que debe reaccionar. Aunque no pueden competir con la gran superficie de contacto que ofrecen los cerámicos, las espumas de aluminio podrían ser materiales sustitutivos ya que presentan ductilidad y alta conductividad térmica. Una aplicación posible consistiría en la preparación de una lámina delgada de espuma metálica resistente a la corrosión, la cual se recubre con una pasta que contiene el catalizador y finalmente se cura a elevada temperatura. El catalizador resultante tendría una buena integridad mecánica. Estos elementos podrían utilizarse, por ejemplo, para eliminar los  $\text{NO}_x$  de los humos de combustión en las centrales de producción de energía eléctrica<sup>[70]</sup>.

### 5.8.4. Almacenamiento temporal de líquidos

Una de las aplicaciones más antiguas de los materiales porosos obtenidos por vía pulvimetalúrgica son los cojinetes auto lubricados, en los que el aceite es almacenado en los intersticios que hay entre las partículas y va saliendo de ellos para sustituir el aceite usado. Esta aplicación no se limita exclusivamente al aceite: puede almacenarse agua para que vaya siendo liberada lentamente y así realizar un control automático de la humedad; puede almacenarse perfume para que se vaya evaporando poco a poco. Pueden utilizarse rodillos porosos para distribuir agua o adhesivos sobre ciertas superficies. Finalmente, estructuras con poros abiertas pueden usarse para almacenar fluidos a temperatura constante y uniforme, en condiciones criogénicas. Además, la espuma puede reducir los movimientos indeseados del líquido en depósitos. Se han fabricado tanques de almacenamiento de nitrógeno líquido donde la espuma de aluminio actúa simultáneamente como elemento estructural e intercambiador de calor<sup>[67]</sup>.

### 5.8.5. Control de flujo

Los materiales porosos pueden ser utilizados para controlar el flujo de gases o líquidos. Los reguladores de flujo fabricados por pulvimetalurgia son más fiables y precisos que las microválvulas convencionales. La espuma de aluminio se ha utilizado para fabricar discos difusores de gas que son capaces de estabilizar el perfil de velocidades de flujo, minimizando la velocidad del flujo lateral, reduciendo el flujo transversal superior y la turbulencia<sup>[67]</sup>.

### 5.8.6. Control acústico

A partir de espumas de aluminio de poro abierto pueden obtenerse dispositivos de control de ondas sonoras, las cuales son guiadas dentro de dichos aparatos. Se está estudiando la aplicación de las espumas de porosidad cerrada como adaptadores de impedancia para fuentes de ultrasonidos. Las espumas con poros relativamente abiertos pueden adaptarse para amortiguar sólo unas frecuencias determinadas mientras que no actúan sobre otras. Los cambios repentinos de presión que tienen lugar en los compresores o dispositivos neumáticos, comienzan a ser amortiguados a través de espumas metálicas, pudiendo en un futuro sustituir a los tradicionales por razones de efectividad y coste<sup>[71-73]</sup>.

### 5.8.7. Arte y decoración

El principal objetivo de las aplicaciones artísticas o decorativas es crear impresiones distintas a las causadas por los materiales convencionales. Las espumas de aluminio se han usado para construir muebles, relojes, lámparas, etc. Teniendo en gran consideración el comportamiento mecánico. En sistemas de altavoces las espumas de aluminio no sólo proporcionan elevada rigidez específica y moderado amortiguamiento mecánico sino que ofrece una imagen de alta tecnología que hace más atractivos estos productos.

## 6. CONCLUSIONES

Los recientes avances técnicos han hecho posible la existencia, en el mercado, de una gran variedad de espumas de aluminio con un amplio intervalo de composiciones y propiedades siendo, cada una de ellas, adecuada para una aplicación concreta, en función de las especificaciones de diseño y fabricación. Sus propiedades dependen, fundamentalmente, de su morfología en poro abierto o cerrado, la densidad, el estado del material (orientación, cristalinidad, historia térmica), la estructura de las celdillas (geometría, tamaño y distribución de poros) y la composición del gas espumante.

Las investigaciones actuales tratan de encontrar mejoras en los procesos de fabricación para obtener espumas de más alta calidad, con propiedades más homogéneas y reproducibles y obtenidas a un menor costo. En aplicaciones estructurales, la curvatura y geometría de los poros, la presencia de defectos como paredes colapsadas o inexistentes tratan de ser evitados, al influir más en las propiedades que una distribución homogénea de los poros. En cambio, en aplicaciones funcionales la uniformidad de los poros o las dimensiones de los canales de conexión entre los poros son más importantes. Para la mayoría de los procesos no existe un modelo teórico o numérico que permita predecir los efectos de posibles cambios, en algunos parámetros de fabricación, para la mejora de las características y propiedades de las espumas de aluminio obtenidas; siendo una línea abierta de investigación de prometedor futuro. La reducción de los costos de fabricación se está enfocando en la utilización de materias primas más económicas, la eliminación o simplificación del número de etapas de fabricación y la reducción de escorias o fracciones de material rechazado.

La combinación de propiedades coexistentes en las espumas de aluminio abre una variedad de aplicaciones industriales potenciales: estructuras de paneles rígidos y ligeros para edificios y transporte, ais-

lamiento térmico en estructuras y maquinaria, estructuras flotantes para elevada temperatura y presión, aislamiento de dispositivos electrónicos proporcionando protección electromagnética y térmica, absorbedores de sonido para condiciones difíciles (alta temperatura, humedad, polvo, flujo de gas, vibraciones, ambiente estéril), absorbedores de vibración, tanto para maquinaria como en estructuras.

En definitiva, las espumas de aluminio pueden considerarse como un material de alta tecnología, de gran futuro. La investigación de nuevos materiales y procesos de fabricación, junto con el desarrollo de nuevos productos y la implementación de sus aplicaciones, auguran un amplio crecimiento en su utilización tecnológica a corto, medio y largo plazo, ya que pueden dar respuesta a diversas exigencias del mercado actual, contribuyendo de manera sustancial a mejorar la eficiencia y competitividad de los equipos y estructuras donde se utilicen.

## REFERENCIAS

- [1] S. Banerjee y R. Ramanujan, *Advances in Physical Metallurgy*, Taylor and Francis, New York, EE. UU., 1996, pp. 127-135.
- [2] J. Banhart, *Proc. Eurofoam (2000)*, P. Zitta, J. Banhart y G. Verbist, (eds.), MIT-Verlag, Bremen, Alemania, 2001 pp. 398-410.
- [3] J.W. Spretnak, *Technical Notes on Forging*, FIERF, Cleveland, EE. UU. 1977, pp. 2-6.
- [4] W. Sullivan, *The Story of Metals*, ASM, Cleveland, EE. UU., 1960, pp. 3-47.
- [5] B. Sosnick, Patente EE. UU. No. 2,434,775, 1948.
- [6] W.O. Soboyejo y T.S. Srivatsan, *Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization, and Applications*, Ed. CRC Press, New Jersey, EE. UU., 2007, pp. 103-120.
- [7] B. C. Allen, M. W. Mote y A. M. Sabroff, Patente EE. UU. No. 3,087,807, 1963.
- [8] P. W Hardy y G. W Peisker, Patente EE. UU. No. 3,300,296, 1967.
- [9] A. Valencia, *Metallurgia Física*, Ed. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 1987, pp. 53-61.
- [10] F. Mehl y J. Wiley, *The Historical Development of Physical Metallurgy*, Physical Metallurgy, New Cork, 1965, pp. 1-8.
- [11] J. Banhart y D. Weaire, *Phys. Today* 55 (2002) 37-42.
- [12] M. F. Ashby, A. G. Evans y J. W. Hutchinson, *Curr. Opin. Solid St. Mat. Sci.* 3 (1998) 288-303.

- [13] D. Stauffer y A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory*, 2nd ed., Taylor & Francis, Londres, Inglaterra, 1992, pp. 181-194.
- [14] Z. Wu y D. P. He, *Chinese Sci. Bull.* 45 (2000) 348-352.
- [15] F. Simančík, H. P. Degischer y H. WÖRZ, *Technical Report No. 1*, O 95/5305/035, IMMM SAS, 1996, pp. 30-42.
- [16] FUNDACIÓN OPTI, *Vigilancia Tecnológica* 17, 2004, pp. 8-9.
- [17] V. Gergely y T. W. Clyne, *Adv. Eng. Mater.* 2 (2000) 8-175.
- [18] V. Gergely, D. C. Curran y T. W. Clyne, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 2.301-2.310.
- [19] V.I. Shapovalov, Patente EE. UU. No. 5,181,549, 1993.
- [20] G.J. Davis y S. Zhen, *J. Mater. Sci.* 18 (1983) 1.899-1.911.
- [21] L. Jin, L. Kenny y H. Sang, Patente EE. UU. No 4973358, 1990.
- [22] <http://www.msm.cam.ac.uk> (5 de Junio 2007)
- [23] J. Babjak, V.A. Ettel y V. Paserin, Patente EE. UU. No. 4957543, 1990.
- [24] V. Paserin, S. Marcuson, J. Shu y D. S. Wilkinson, *Adv. Eng. Mater.* 6 (2004) 454-459.
- [25] F. Simancík, J. Jerz, J. Kováčik y P. Minár, *Aluminium foam- a new light weight structural material*, Institute of Materials and Machine Mechanics, SAS, Bratislava, Slovak Republic, 1997, pp. 265-277.
- [26] D. Stauffer y A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory*, 2nd ed., Taylor & Francis, Londres, Inglaterra, 1994, pp. 354-378
- [27] S. Arbabi y M. Sahimi, *Phys. Rev. Lett.* 65 (1990) 725-733.
- [28] P. Tobolka y J. Kováčik, *Kov. Mater.* 34 (1996) 20-28.
- [29] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson y H.G.N. Wadley, *Metal Foams: a design guide*, Butterworth-Heinemann, Oxford, Inglaterra, 2000, pp. 263-278.
- [30] A.G. Evans, J.W. Hutchinson, N.A. Fleck, M.F. Ashby y H.N.G. Wadley, *Prog. Mater. Sci.* 46 (2001) 309-327.
- [31] B. Chalmers, *Metalurgia física*, 2ª edición 1962. Aguilar S.A. de Ediciones Madrid, España, 1968, pp. 447-452.
- [32] F. Simancik, H. P. Degischer y H. Wörz, *Foamed Aluminium- Light Structural and Insulation Material*, Euromat (1995), Venice/Padua, Italia, Assoziacione Italiana di Metallurgica, Milan, Italia, 1995, pp.191-196
- [33] S. Feliu y M. C. Andrade, *Corrosión y Protección Metálicas* Vol. 1, CSIC, Madrid, España, 1991, pp. 261-266.
- [34] U.R. Evans, *Corrosiones Metálicas*, Ed. Reverté Barcelona, Bogotá, Buenos Aires, Caracas, México, 1ª edición, 1987 pp. 319-327.
- [35] J.S. Blazy, A. Marie-Louise, S. Forest, Y. Chastel, A. Pineau, A. Awade, C. Grolleron y F. Moussy, *Int. J. Mech. Sci.* 46 (2004) 217-244.
- [36] E. Andrews, W. Sanders y L.J. Gibson, *Mater. Sci. Eng. A* 270 (1999) 113-124.
- [37] O. B. Olurin, N. A. Fleck y M. F. Ashby, *Mater. Sci. Eng. A* 291 (2000) 136-146.
- [39] J. Banhart y J. Baumeister, *J. Mater. Sci.* 33 (1998) 1.431-1.440.
- [40] J. Bin, W. Zejun y Z. Naiqin, *Scr. Mater.* 56 (2007) 169-172.
- [41] J. Banhart, M. F. Ashby y N. A. Fleck (Eds.), *Proc. MetFoam 2001, International Conf. Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, MIT-Verlag, Bremen, Alemania, 2001, pp. 18-20
- [42] U. Ramamurty y A. Paul, *Acta Mater.* 52 (2003) 869-876.
- [43] C. Chen, A.M. Harte y N.A. Fleck, *Int. J. Mech. Sci.* 43 (1991) 1.483-1.506.
- [44] N. A. Fleck y J. W. Hutchinson, *Adv. App. Mech.* 33 (1997) 295-361.
- [45] C. Chen, N. A. Fleck y T. J. Lu, *J. Mech. Phys. Solids* 49 (2001) 231-259.
- [46] I. Jeon y T. Asahina, *Acta Mater.* 53 (2005) 3.415-3.423.
- [47] E. Markaki y T.W. Clyne, *Mater. Sci. Eng. A* 323 (2002) 260-269.
- [48] D.D. Radford, V.S. Deshpande y N.A. Fleck, *Int. J. Impact Eng.* 31 (2005) 1.152-1.171.
- [49] H. W. Seeliger, *Int. Conf.*, Bremen, Banhart J, AshbyMF, Fleck NA (Eds.), MIT Press-Verlag, Bremen, Alemania, 1999, pp. 29-38.
- [50] J. Banhart, *Prog. Mater. Sci.* 46 (2001) 559-632.
- [51] S. J. Cox, G. Bradley y D. Weaire, *Eur. Phys. J. AP* 14 (2001) 87-96.
- [52] D. Weaire, S. Hutzler, S. J. Cox, N. Kern, M. D. Alonso y W. Drenckhan, *J. Phys.: Condens. Mat.* 15 (2003) 65-73.
- [53] M.F. Ashby, C.J. Seymour y D. Cebon, *Metal Foams and Honeycombs Database*, Granta Design, Cambridge, Inglaterra, 1997, pp. 56-74
- [54] L.M. Niebylski y R. J. Fanning, *SAE Transactions* 720490 (1972) 216-241.
- [55] <http://www.metcomb.com> (27 de Julio 2007)
- [56] H.W. Seeliger, *Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams*, Banhart J. Eifert H. (Eds.), MIT Press-Verlag Stanton, EE. UU., Bremen, Alemania, 1997, pp. 79-95.
- [57] <http://www.cymat.com> (18 de Julio 2007).
- [58] R.L. Martin, Patente EE. UU. 5,564,064, 1996.
- [59] R.L. Martin y R. L. Lederich, *Metal Powder Report* (1992) 30-44.

- [60] E.H. Cocks, *J. Spacecraft Rockets* 2 (1984) 21-510.
- [61] E.H. Cocks, *Proc. Conf. Light Metals Vol. 2*, New Orleans, EE. UU., 1986, pp. 1.019-1.036.
- [62] <http://www.ergaerospace.com> (10 de Junio 2007).
- [63] D. Schwingel, H.W. Seeliger, C. Vecchionacci, D. Alwes y J. Dittrich, *Acta Astronaut.* 61 (2007) 326-330.
- [64] J. Banhart, C. Schmoll y U. Neumann, *Proc. Conf. Materials in Oceanic Environment (Euromat '98)*, Faria L. (Ed.), Lisboa, Portugal, vol. 1, 1998, pp. 55-63.
- [65] A.F. Giamei, *Symposium on Metal Foams*, Fraunhofer EE. UU., Stanton, EE. UU., J. Banhart, H. Eifert (Eds.) MIT Press-Verlag, Bremen, Alemania, 1997, pp. 63-78.
- [66] T.J. Lu y C. Chen, *Acta Mater.* 47 (1999) 1.469-1.485.
- [67] SHINKO WIRE Co., *Product information "Alporas"*, Japon, 1998, pp. 5-6.
- [68] <http://www.aigis.co.uk> (30 de Julio 2007).
- [69] ERG Inc. Oakland, EE. UU.. *Product information of "Duocel"*, 1996 pp. 3-16.
- [70] A.L. Geiger, *Proc. Ser. Society for Photo-Optical Engineering*, SPIE, Orlando, EE. UU., 1990, pp. 546-553.
- [71] H. Swars, Patente Alemania 3,619,360, 1987.
- [72] M. Eisenmann, *ASM Handbook, vol. 7. Materials Park*, EE. UU.: ASM International, 1998, pp. 1.031-1.035.
- [73] <http://www.seac.nl> 1998 (1 de Agosto 2007).
- [74] K. Iida, K. Mizuno y K. Kondo, Patente EE. UU. 4, 726, 444, 1988.
- [75] G. Rausch, *Foaminal, Properties overview and design guideline*, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Bremen, Alemania, Department of Casting and Foaming Technologies, pp. 7-15.