

***Espumas***

***Metálicas***

**Equilibrio y Cinética  
de Sólidos:**

***Proyecto Fin de Curso***  
***UCM 2008/2009***

## Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Propiedades de las espumas de aluminio</b>	
<b>2.1. Densidad .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Tamaño del poro.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Comportamiento bajo esfuerzos.....</b>	<b>5</b>
<b>2.4. Módulo Elasticidad.....</b>	<b>6</b>
<b>2.5. Conductividad Térmica y Elástica.....</b>	<b>6</b>
<b>2.6. Absorción del sonido.....</b>	<b>7</b>
<b>2.7. Escudo Electromagnético.....</b>	<b>7</b>
<b>3. Fabricación de Espumas Metálicas.....</b>	<b>8</b>
<b>4. Métodos de producción</b>	
<b>4.1. Espumaje mediante inyección de gas.....</b>	<b>11</b>
<b>4.2. Descomposición de partículas de gas liberadas en el fundido.....</b>	<b>12</b>
<b>4.3. Descomposición de partículas de gas liberadas en semisólidos.....</b>	<b>13</b>
<b>4.4. “Catering” usando un polímero o cera precursora como plantilla .....</b>	<b>14</b>
<b>4.5. Descomposición de metal en preformas celulares.....</b>	<b>15</b>
<b>5. Aplicaciones</b>	
<b>5.1. Industria Automovilística.....</b>	<b>17</b>
<b>5.2. Construcción de barcos.....</b>	<b>18</b>
<b>5.3. Industria ferroviaria.....</b>	<b>19</b>
<b>5.4. Industria de la Construcción.....</b>	<b>20</b>
<b>5.5. Mejora de la seguridad en autocares.....</b>	<b>21</b>
<b>6. Aplicación a una espuma en concreto.....</b>	<b>23</b>
<b>7. Aplicaciones funcionales.....</b>	<b>25</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>26</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

Las espumas metálicas son metales con estructura porosa, por lo que forman parte de la familia de los materiales celulares, que constituyen una nueva y atractiva clase de materiales. Este tipo de materiales no están caracterizados de modo completo todavía y su atractivo esta basado en las bajas densidades que presentan (¡a veces densidades menores que la del agua!), y sus novedosas propiedades físicas, mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas. Las espumas pueden presentar una estructura abierta de poros interconectados, similar a una esponja de baño, o bien una estructura de poros cerrados no conectados entre sí y mantienen las propiedades características del metal del que están formadas, junto a propiedades derivadas de la estructura que presentan, las cuales dependen de el tamaño y la forma de la celda, el espesor de la pared de la misma y el tipo de conectividad entre celdas La “multifuncionalidad” es el término que mejor define este nuevo tipo de materiales, como puede deducirse de sus características:

- Los poros de la espuma representan el 65-90% de su volumen total. La mayoría de sus propiedades depende de la porosidad.
- Es resistente al fuego, no inflamable y no desarrolla humos tóxicos.
- Es reciclable, podemos decir que son materiales amigos del medio ambiente.
- Gran capacidad para absorber la energía de impacto.
- Tienen baja capacidad térmica y permeabilidad magnética.
- Es un eficiente absorbente de ruidos y de vibraciones y protector electromagnético.

Esta combinación de características, en ocasiones contradictorias, que no pueden ser obtenidas por un sólo material convencional al mismo tiempo, es lo que hace a estos materiales tan interesantes.

Las primeras patentes de estos materiales comenzaron en los años 50 y hasta 1970 se propusieron muchas variantes de los procesos de espumado. A partir de 1980 gracias a una mayor publicación de resultados resurgió la fabricación y en nuestros días ha empezado su proceso de comercialización.

Durante la exposición de este trabajo describiremos las propiedades más importantes de las espumas metálicas, aquellas que determinan sus principales aplicaciones, centrándonos en las espumas basadas en aluminio.

## 2. PROPIEDADES DE LAS ESPUMAS DE ALUMINIO

### 2.1. Densidad:

La densidad en estos materiales puede ser determinada por dos métodos. Uno se conoce como el método volumétrico, en el cual se relaciona el peso y la geometría. En el otro, en cambio, los poros de la superficie agujereada son llenados por una resina negra que establece el contraste entre los poros y las paredes de los mismos, de manera que tras un escaneado, la densidad puede ser calculada a lo largo de una determinada longitud sobre los ejes x e y. Este segundo método, al contrario del primero, nos da información acerca de la distribución de la densidad en la muestra, encontrando que en regiones próximas a la superficie la densidad es notablemente mayor que la densidad de la muestra en conjunto. Los valores típicos de las densidades de las espumas de aluminio están dentro del rango de 0,4-1,2  $\text{gr.cm}^3$ . En la siguiente figura (Fig.1) se muestra la distribución de la densidad de la espuma a lo largo del eje x e y:

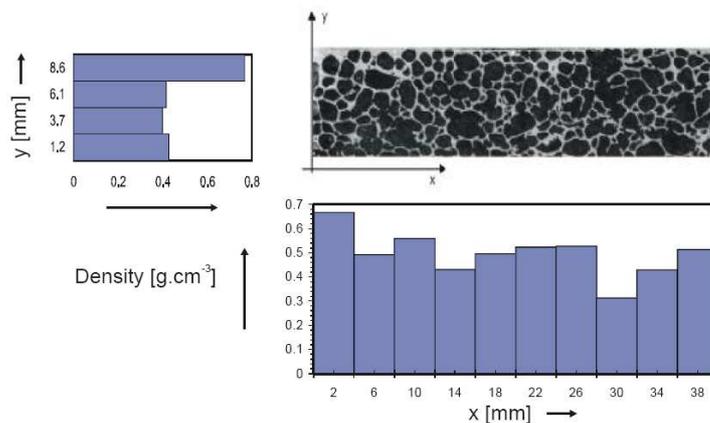


Fig.1: Distribución de la densidad [1]

### 2.2. Tamaño del poro:

Los poros en las espumas metálicas son esencialmente esféricos y parcialmente cerrados. Estos poros no tienen un diámetro fijo, sin embargo las muestras pueden ser preparadas con varios valores medios del diámetro, entre 0,5 y 8mm dependiendo de la composición de la matriz y los parámetros espumantes: temperatura y tiempo.



Fig.2. Diferentes estructuras porosas en debidas a diferentes parámetros espumantes (temperatura y tiempo) [1]

### 2.3. Comportamiento bajo esfuerzo:

La curva de compresión-deflexión de las espumas de aluminio puede ser dividida en tres regiones distintas. Primeramente, y para bajas deflexiones, el material se deforma casi elásticamente (las paredes de las celdas se doblan), posteriormente, y para una compresión constante, existe un aumento progresivo de la deformación en la que las paredes de las celdas se curvan, ceden o se rompen). A continuación existe una zona en la que el esfuerzo aumenta rápidamente tras producirse el agrupamiento de las celdas:

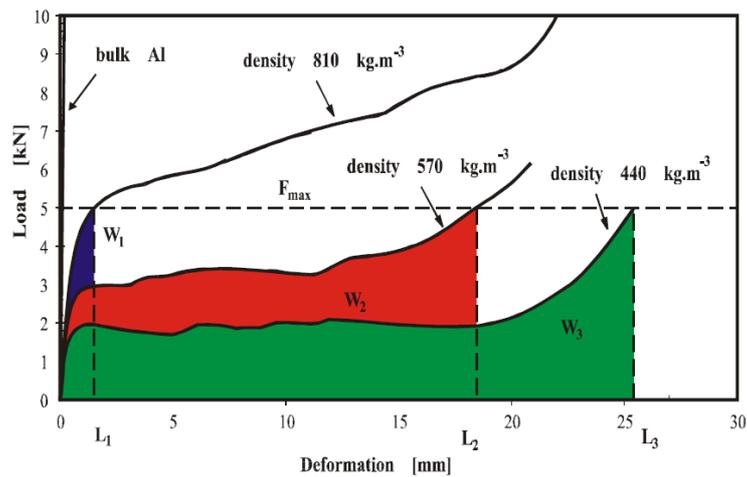


Fig.3. Curva de compresión-deflexión [1]

Cuando la deformación plástica comienza, la tensión a la que se produce dicha deformación, puede ser definida como la tensión de colapso plástico. Esta tensión aumenta cuando lo hace la densidad. La forma en que colapsan las espumas metálicas de aluminio depende de la composición de la aleación y del tratamiento térmico al que se vieron sometidas durante su formación, de manera que las espumas basadas en aleaciones de aluminio tienden a romper las paredes de sus celdas, mientras que las aleaciones de hierro fundido doblan y curvan dichas paredes. El área por debajo de la curva de esfuerzo-deflexión da información sobre la energía que se necesita para producir la deformación plástica. La energía empleada en la deformación plástica hasta durante la aplicación de un esfuerzo, es un parámetro importante si nos interesa la energía de absorción de impacto del material. También esta energía depende fuertemente de la densidad, ya que lo que nos interesa para poder absorber las energías de impacto son densidades intermedias, ni muy altas ni muy bajas.

## 2.4. Módulo de elasticidad

Depende fuertemente de la densidad, siguiendo una función exponencial cuyo exponente es 1,6. A bajas densidades el modulo de elasticidad es muy alto y esto provoca una rigidez específica en las espumas.

Material	density $\rho$ [g.cm <sup>-3</sup> ]	modulus E [GPa]	$E/\rho^2$ [10 <sup>-5</sup> GPa.kg <sup>-2</sup> .m <sup>6</sup> ]
Al-foam	0.5	5	2.00
Epoxy	1.3	5	0.30
Steel	7.8	210	0.35
aluminium	2.7	69	0.95
Glass	2.5	70	1.12
concrete	2.5	50	0.80

Tabla 1.  $E'/\rho^2$  para diferentes estructuras de materiales en comparación con la espuma de aluminio [1]

## 2.5. Conductividad térmica y eléctrica

Experimentalmente se ha comprobado que las espumas de aluminio siguen la ley de Wieder-Franz. El comportamiento de las propiedades de transporte depende de modo significativo de la densidad, esto esta de acuerdo sorprendentemente con la dependencia obtenida para el módulo de elasticidad. Esto implica que tanto el módulo de elasticidad como la conductividad eléctrica y térmica pertenecen a la misma clase, siguiendo este último una ley exponencial con exponente comprendido entre 1,48 y 1,60.

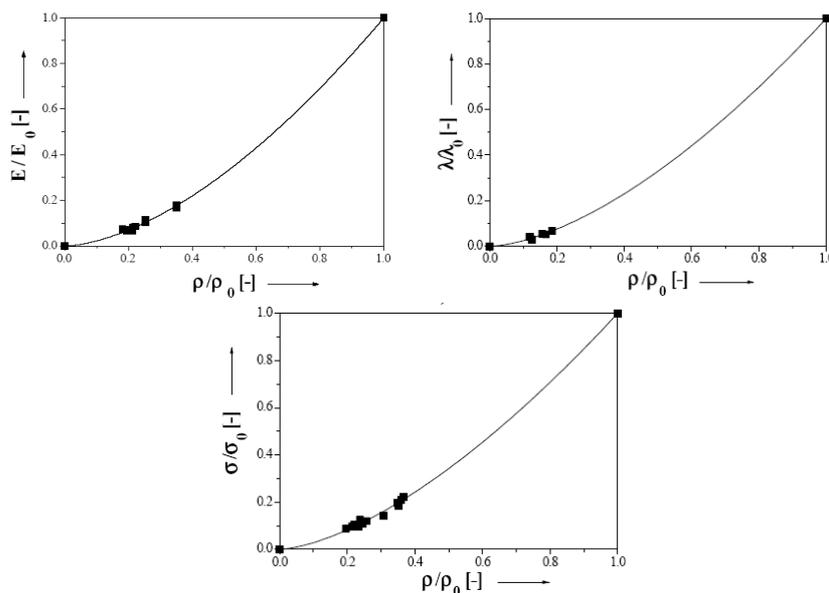


Fig.4. Representación de las propiedades mecánicas de dos espumas de aluminio, con distinta densidad, se representan a continuación (Modulo de la elasticidad, conductividad térmica y conductividad eléctrica) [1]

## **2.6. Absorción del sonido**

Las espumas de aluminio, especialmente aquellas que tienen sus poros interconectados resultan altamente eficaces en la absorción del sonido. El coeficiente de absorción es función del espesor del material, de la densidad de la espuma y del tamaño de los poros.

Si este coeficiente lo comparamos con otros materiales absorbentes como el vidrio, espumas de polímeros o “fibras minerales”, las espumas metálicas son muy consistentes y por lo tanto muy convenientes para esta aplicación, presentando además la ventaja de que no necesitan ningún soporte para su construcción.

## **2.7. Escudo electromagnético**

La buena conductividad eléctrica de las espumas metálicas Permite minimizar la penetración de las ondas electromagnéticas, actuando como un mecanismo de protección ante campos electromagnéticos. Además la baja permeabilidad magnética hace que convierta la energía magnética en calor.

### **3.FABRICACIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS**

Muchas sustancias (soluciones acuosas, polímeros, cristales o incluso metales) pueden ser espumados. El espumado de metales ha sido un reto durante mucho tiempo por las dificultades derivadas de los procesos de altas temperaturas y de la reactividad del fundido metálico. Dadas las aplicaciones industriales del crecimiento de metales celulares, muchos métodos están siendo desarrollados para su fabricación. Como consecuencia, se ha realizado una gran diversidad de materiales celulares siendo clasificados por el tamaño/distribución de sus celdas (stochastic o periódica), el tamaño del poro (cerrado o abierto) y la densidad relativa de la estructura.

Ahora bien, el término espuma no ha sido siempre bien utilizado. Si nos planteamos las posibles dispersiones de una fase en una segunda (Tabla 2, <sup>[2]</sup>), vemos que las espumas son dispersiones uniformes de una fase gaseosa ya sean en un sólido o en un líquido.

	es dispersado en un		
Cuando un	Gas	Líquido	Sólido
Gas	Mezcla de gases	Espuma	Espuma sólida Espuma celular
Líquido	Niebla (fog)	Emulsión	Gel
Sólido	Humo	Suspensión de partículas (slurry)	Partículas inclustradas (embedded particles)

*Tabla 2. Posibles dispersiones de una fase a otra, donde cada fase puede ser cualquiera de los tres estados de agregación[2].*

El concepto espuma fue inicialmente reservado para una dispersión de burbujas de gas en un líquido cuya morfología puede ser preservada permitiendo al líquido solidificarse. Este último estado da lugar a una “espuma sólida” o “espuma metálica”, siendo la espuma metálica líquida es un mero estado transitorio durante la fabricación [3].

En el caso de líquidos, o de las espumas sólidas (imagen homóloga del líquido) tienen la misma restricción para lograr minimizar la energía superficial: poseer unas concretas morfologías, limitando su producción. Para los restantes sólidos celulares no se requiere partir de un estado líquido, pudiendo tener cualquier morfología, como por

ejemplo una estructura abierta de polvos aglomerados. El nombre correcto para estas estructuras de poros abiertos es esponjas.

#### **4.MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE LAS ESPUMAS METÁLICAS**

Existen diferentes metodologías atendiendo al estado del metal con el que realizamos el proceso. En un comienzo se distinguían cuatro categorías: formadas a partir de una fase vapor (componentes metálicos gaseosos), de un estado líquido metálico, de un metal sólido metálico en polvo y por electrodeposición desde una solución acuosa. No obstante, esta clasificación ha tendido a reagruparse en tres clases, coincidiendo con los estados de agregación (Fig. 5).

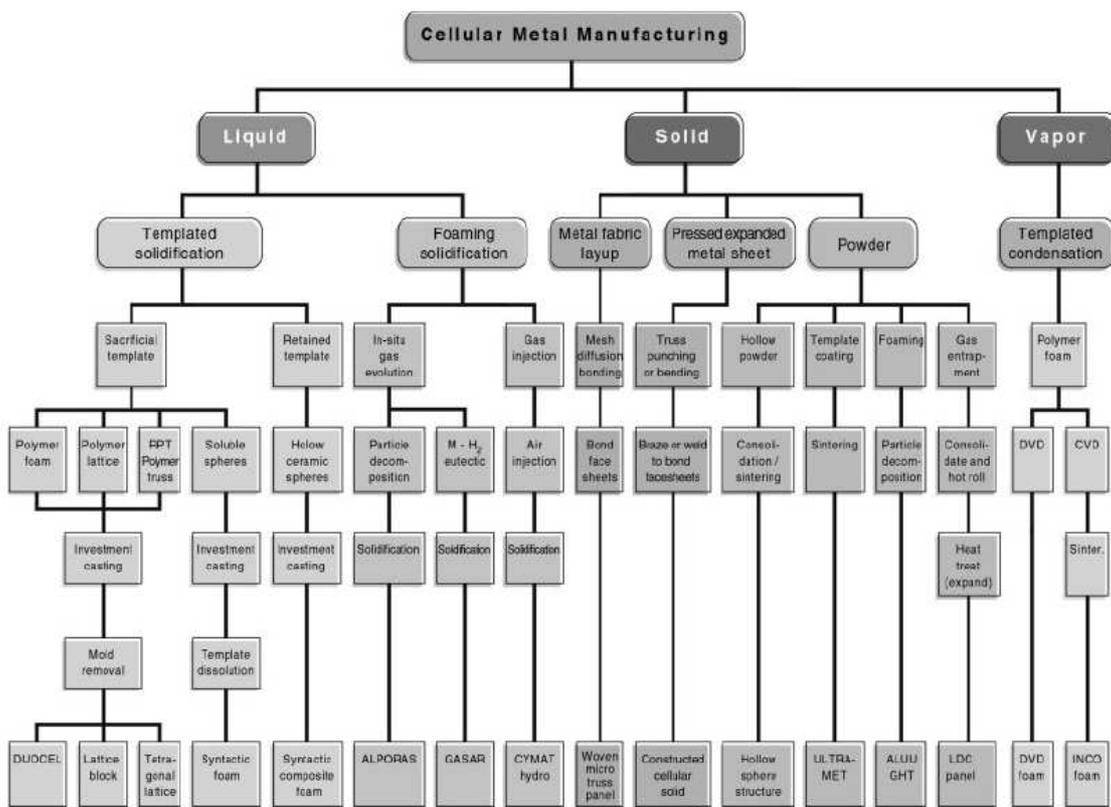


Fig. 5. Agrupaciones de los diferentes métodos de producción para toda clase de metales celulares [3]

Cada uno de las clases sólo puede ser utilizada con un pequeño subgrupo de metales para crear un material con poros con un rango limitado de sus densidades relativas y el tamaño de sus celdas (Fig. 6)

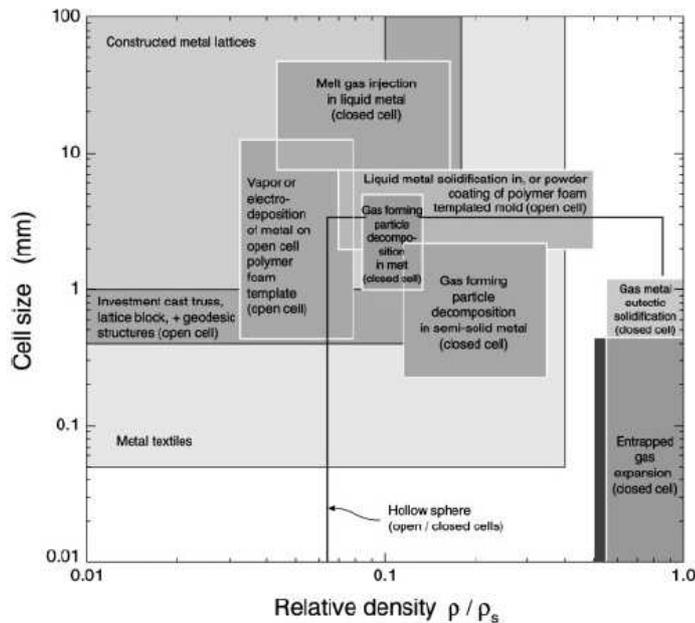


Fig. 6. Rango del tamaño de la celda y la densidad relativa ( $\rho / \rho_s$ ) para materiales creados por métodos de fabricación principales ( $\rho$  la densidad del metal celular y  $\rho_s$  densidad del sólido desde el cual está hecha)[4].

Para el caso de las espumas metálicas (donde por impacto comercial incluiremos algunas esponjas metálicas), son nueve los métodos fundamentelas desarrollados para su fabricación. Sólo cinco han sido desarrollados comercialmente [5]:

- 1) Burbujeo de gas a través de un fundido de las aleaciones Al-SiC o Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [Para Al, Mg]
- 2) Mediante agitación de un agente espumante (típicamente TiH<sub>2</sub>) en una aleación fundida (una aleación de aluminio) y controlando la presión mientras enfiamos. [Al]<sup>[6]</sup>
- 3) Consolidación de polvos metálicos (aleaciones de Al son las más comunes) con un agente espumante (TiH<sub>2</sub>)
- 4) Fabricación de un molde cerámico de cera o espuma polimérica precursora, seguido de un agotamiento del precursor e infiltración de presión con un fundido metálico o un slurry de de polvo metálico que es luego sinterizado. [Al, Mg, Ni-Cr, Cu].
- 5) Deposición de una fase vapor o electrodeposición de un metal en un espuma polimérica precursora que es posteriormente agotado, dejando puentes de celdas con agujeros. [Ni, Ti].
- 6) Atrapamiento de gas inerte a alta presión en poros por powder HIP (método para reducir la porosidad a través de la adherencia de polvos), seguido de la expansión de un gas a elevada temperatura.[Ti].

7) Sinterización de esferas con huecos, creadas por un proceso atómico de modificación o de óxidos u hidruros metálicos seguido de reducción/deshidratación o por deposición de fase valor de metal en esferas poliméricas. [Ni, Co, aleaciones Ni-Cr].

8) Infiltración de presión de un fondo de partículas filtradas por un líquido metálico, seguido por un filtrado dejando un esqueleto de la espuma metálica. [Al, con sal como polvo filtrante].

9) Disolución de un gas (típicamente, H<sub>2</sub>) en un líquido metálico bajo presión, permitiendo liberarse de manera contralada durante su posterior solidificación.[Cu, Ni, Al].

Las cinco primeras son realizadas a nivel comercial, que son los que explicaremos, sin contar con las espumas Gasar (estudiadas en Ucrania) -9)- que juegan con la solidificación eutéctica del sólido-gas y están en proceso de comercialización. Asimismo, explicaremos el método de dos esponjas -4) y 5)-, dada su relevancia a nivel industrial, aunque no sean estrictamente espumas metálicas.

#### **4.1 Espumaje mediante inyección de gas**

Los líquidos metálicos puros no es sencillo convertirlos en espuma mediante burbujeo de un gas en ellos. El “drainage” del líquido (flujo de escurrimiento hacia abajo fuera de la espuma a través de las membranas de las celda causado por la gravedad<sup>[2]</sup>) debajo de las paredes que lanzan las burbujas suele ocurrir más rápido de lo necesario para formar la espuma (requiere más tiempo para solidificarse de forma estable). Sólo entre el 10–30% de las partículas son insolubles o se disuelven lentamente, como SiC o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, aumentan la viscosidad del aluminio fundido e impiden el “drainage” en la membrana de burbujas, estabilizándose la espuma. Los procesos de inyección de gas son más fáciles en implementación con aleaciones de Al porque tienen una baja densidad y no se oxidan excesivamente cuando el fundido es expuesto al aire o a otros gases con oxígeno. El Al puro o una aleación de Al es fundida y se añade un 5–15 % en peso de partículas cerámicas para lograr la estabilización, partículas de 0.5–25 μm de diámetro como el zirconio (Fig. 7)

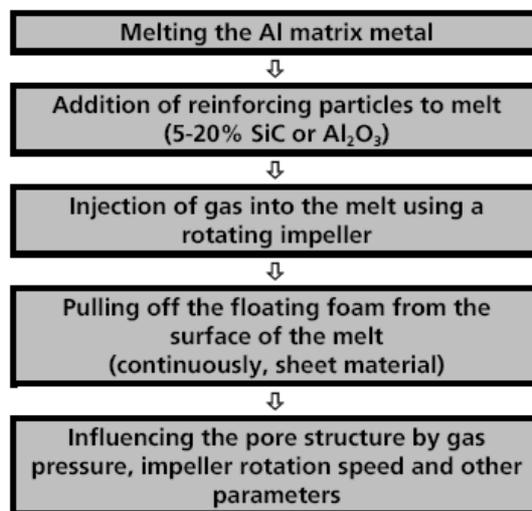


Fig 7. Esquema del proceso de fabricación por inyección de gas[7]

Una de las variantes posibles es la realizada en el CYMAT y HYDRO (Fig. 8), que da lugar a las espumas llamadas MMC:

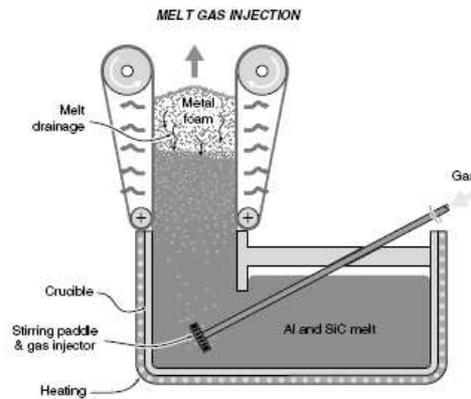


Fig. 8 Esquema de la fabricación de espumas de Al según el proceso del CYMAT y HYDRO[4]

Con el líquido de Al se pueden usar diversos gases para crear las burbujas: aire es el más común, también  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y gases inertes.

Las burbujas flotan en la superficie del fundido, se escurre el líquido y comienza la solidificación. El gradiente térmico en la espuma determina cuánto tiempo la espuma permaneció líquida o semi-sólida y de este modo, la extensión del “drainage”. Controlando el proceso de inyección de gas y la tasa de enfriamiento de la espuma, obtenemos espumas de celda cerrada con una baja densidad relativa, espumas de hasta 1m, de espesor 0.2m con poros de celda cerrada de diámetros entre 5 y 20mm y de densidad relativa entre 0.03 y 0.1. El método está limitado a la fabricación de espumas de aluminio.

#### **4.2 Descomposición de partículas de gas liberadas en el fundido**

Se mezcla con la aleación metálica un agente de espuma, liberándose gas cuando estamos calentando. El agente más utilizado es  $\text{TiH}_2$ . Al calentar sobre  $465^\circ\text{C}$ ,  $\text{TiH}_2$  se descompone en Ti y  $\text{H}_2$  gaseoso. Por adición del agente al fundido de aluminio (fundido de alta viscosidad), grandes volúmenes de gas  $\text{H}_2$  son rápidamente producidos, creando burbujas que pueden conducir a espumas de celdas cerradas, proporcionando un “drainage” de la espuma suficientemente lento.

La compañía Shinko Wire sigue este procedimiento para fabricar un tipo de espumas de aluminio llamado Alpora (Fig. 9)

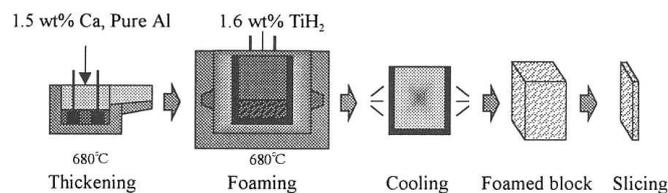


Fig. 9 Esquema de la fabricación de las Alporas[8]

El proceso comienza con aluminio fundido a una temperatura entre 670 y 690°C. Se aumenta su viscosidad añadiendo un 1–2% de calcio que rápidamente se oxida y forma partículas de CaO y CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. El fundido es agitado agresivamente y se añade un 1–2% de TiH<sub>2</sub>. Cuando se dispersa el TiH<sub>2</sub>, se para el sistema de agitación y se forma una espuma sobre el fundido. Terminado el espumado, se enfría el fundido para la solidificación de la espuma antes de que el hidrógeno escape y las burbujas se colapsen.

La fracción en volumen de Ca y TiH<sub>2</sub> añadidos determina la densidad relativa y el tamaño de la celda. La celda varía de 0.5 a 5 mm cambiando el contenido de TiH<sub>2</sub>. Se logran densidades relativas entre 0.2 y 0.07. (Fig. 10)

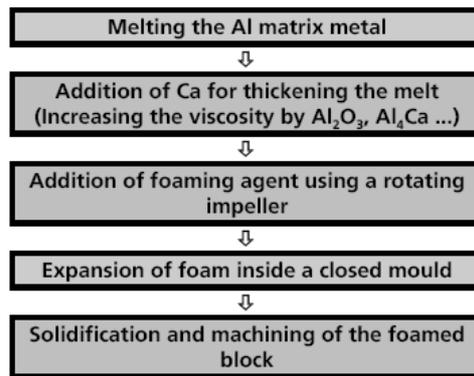


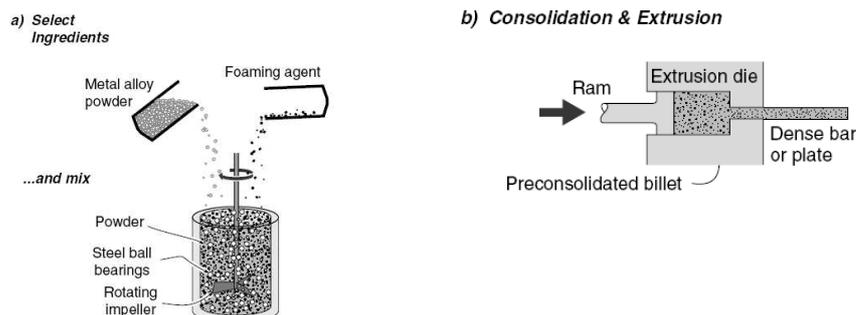
Fig 10. Esquema del proceso de fabricación de las Alporas[7]

Las Alporas son predominantemente de celda cerrada. Hay otros agentes de espumaje como carbonatos o nitratos y basados también en aleaciones de Níquel.

#### 4.3 Descomposición de partículas de gas liberadas en semi-sólidos.

Agentes espumantes pueden ser introducidos en los metales en el estado sólido mezclando y consolidando polvos. TiH<sub>2</sub> comienza a descomponerse a 465°C, temperatura por debajo del punto de fusión del Aluminio puro (660°C) y de sus aleaciones. Esto aumenta la posibilidad de crear una espuma por dispersión del agente espumante en un sólido de aluminio usando procesos metalúrgicos de polvo. De este modo, incrementamos la temperatura lo suficiente como para causar la liberación de gas y el fundido parcial o total del metal, permitiendo el crecimiento de la burbuja. Enfriando logramos la estabilización de la espuma.

Este método es practicado por el Fraunhofer-Institute en Bremen, Alemania (Fig. 11) y LKR o Neuman-Alu en Austria.



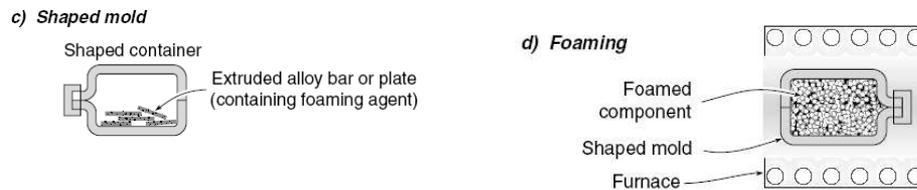


Fig. 11 Esquema de los pasos de metalurgia del polvo[5]

Mezclamos minuciosamente las partículas del agente espumante con los polvos de aleación de Aluminio. Antes de la mezcla, el polvo es compactado por frío y extrudido en una barra o plato (le damos forma haciendo salir por una abertura obteniendo una barra) de una determinada densidad. Este material precursor es cortado en pequeñas piezas, colocadas dentro de la abertura de un molde sellado, y calentadas a la temperatura solidus de la aleación.  $TiH_2$  se descompone, creando huevos con una alta presión interna. Estos se expanden por un flujo semi-sólido y el aluminio se hincha, creando una espuma que llena el molde. Este proceso resulta en componentes con la misma forma que el envase y densidades relativas tan bajas como 0.08. La espuma tiene celdas cerradas con diámetros entre 1 y 5mm. (Fig. 12)

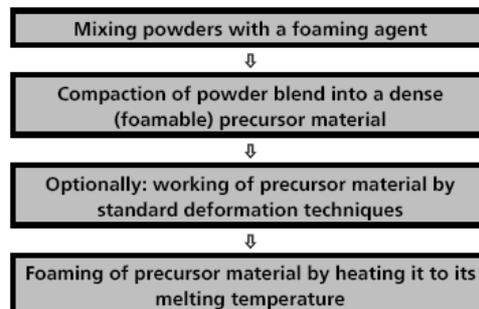


Fig 12. Esquema del proceso metalúrgico de polvo para la fabricación de espumas metálicas[7]

#### **4.4“Casting”\* usando un polímero o cera precursora como plantilla**

“Casting “es un proceso por el cual un material es introducido un material líquido en un molde y se le permite solidificarse en una específica forma.

Las espumas poliméricas de celda abierta con baja densidad relativa y un ancho rango de tamaño de celda de gran uniformidad son posibles desde numerosas fuentes. Pueden ser utilizadas como plantillas para crear moldes “casting” en los cuales una gran variedad de metales y sus aleaciones pueden ser fundidas. Las espumas DUOCEL son fabricadas de esta manera por ERG en California. (Fig. 13)

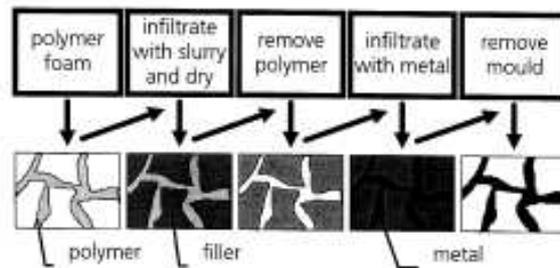


Fig 13. Fabricación de una espuma por casting[3]

Seleccionamos un molde plantilla de una espuma polimérica de celda abierta con el tamaño del celda y la densidad relativa deseada. Esto puede ser tapado con un molde “castering” de slurry de polvo cerámico que es secado y incrustado en arena “casterizada”. El molde es horneado para endurecer el material “casterizado” y descomponer (y evaporar) la plantilla polimérica, dejando atrás un negativo de la espuma. Este molde es posteriormente llenado con una aleación metálica y lo enfriamos. El uso de una presión moderada durante la infiltración del fundido puede superar la resistencia para fluir algunas aleaciones líquidas. Después de la solidificación direccional y el enfriamiento, los materiales del molde son removidos dejando atrás el metal equivalente de la original espuma polimérica. Slurries de polvos metálicos puede ser usados en lugar de metales líquidos, que son posteriormente sinterizados. Este método nos permite obtener esponjas con tamaño de poro de 1–5 mm de diámetro y densidades relativas tan bajas como 0.05. El proceso puede ser utilizado para fabricas esponjas de casi todo metal que puede ser “casterizado”. (Fig. 14)

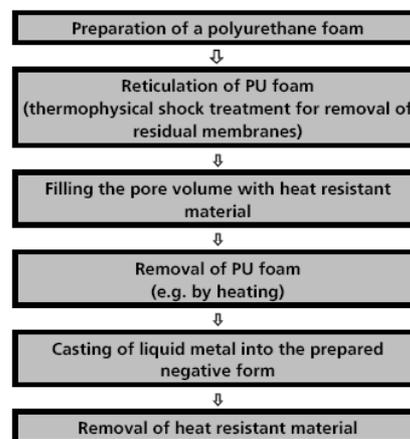


Fig 14. Esquema de la fabricación de espumas por “castering”[7]

#### **4.5 Deposición de metal en preformas celulares**

Las espumas poliméricas de celda abierta pueden servir también como plantillas sobre las que los metales son depositadas por descomposición química en vapor (CVD), por evaporación o por electrodeposición. En el proceso INCO, Níquel es depositado por descomposición de  $\text{Ni}(\text{CO})_4$  (Fig. 15) Este gas se descompone en Ni y CO a los  $100^\circ\text{C}$  y tapa todas las superficies expuestas al calor con el reactor. Sólo un horno de infrarrojos puede ser usado para calentar una espuma polimérica. Después de que se hayan

depositado varias decenas de micrómetros del metal, el metal cubierto de polímero es sacado del reactor CVD y el polímero se agota calentándolo al aire. Esto resulta en una estructura de metal celular con huecos interconectados (hollow ligaments). Un posterior paso de sinterización es densar los “ligaments”. El gas  $\text{Ni}(\text{CO})_4$  es bastante tóxico y requiere controles medioambientales. Los métodos de electrodeposición han sido también para tapar la preformas, pero la deposición de Ni por CVD tiene una menor resistencia eléctrica.

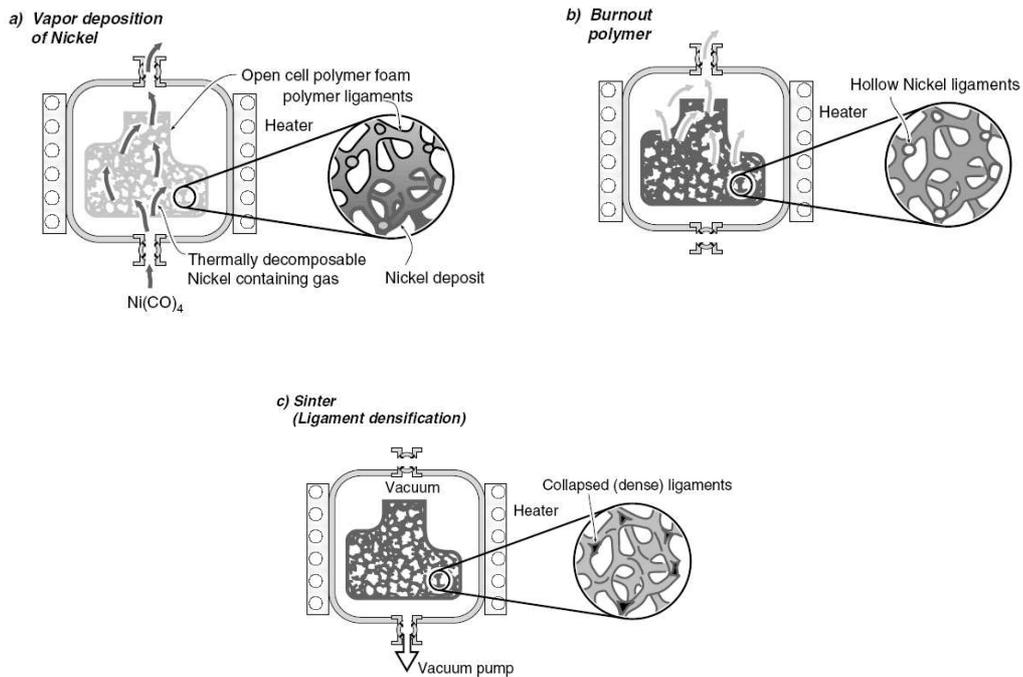


Fig. 15 Esquema del proceso de CVD para crear espumas Retimet[5]

Obtenemos esponjas con poros entre 100-300  $\mu\text{m}$  de diámetro. Este método está restringido a elementos puro como el Níquel o el Titanio por la dificultad del CVD o la electrodeposición de aleaciones. Las densidades relativas oscilan entre 0.02–0.05. (Fig. 16)

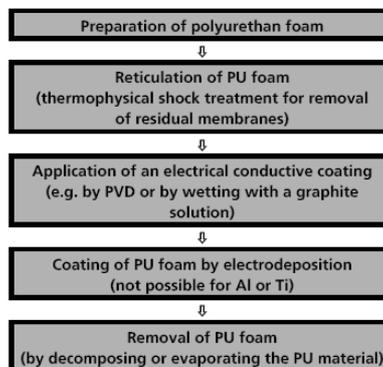


Fig 16. Esquema de la fabricación de espumas por la técnica de deposición[7]

## **5. APLICACIONES**

Las espumas metálicas pueden formar una estructura abierta de poros interconectados, similar a una esponja de baño, o bien una estructura de poros cerrados no conectados entre sí.

Tienen muy baja densidad (entre 0,03-0,2 gr/cc), a la vez que presentan algunas de las propiedades del metal del que están formados, junto a otras características derivadas de su peculiar estructura. Por tanto, son materiales con una combinación de propiedades físico-químicas y mecánicas muy especiales, de manera que tienen un conjunto de propiedades que en la actualidad no está cubierto por otros materiales, a la vez que mejoran las respectivas prestaciones.

De hecho, el término que mejor podría definir a este tipo de materiales es precisamente su "multifuncionalidad":

Estos materiales pueden ser utilizados en

- (a) aplicaciones estructurales (por su excelente relación rigidez/peso, durabilidad, etc)
- (b) absorción de energía de impacto y explosiones (por la capacidad de absorción isotrópica de energía a tensiones bajas y constantes).
- (c) absorbentes de ruidos y vibraciones y como intercambiadores de calor, como base de catalizadores, etc.

Las aplicaciones estructurales son las más desarrolladas, y las podemos encontrar en varios sectores de la industria:

### **5.1 Industria automovilística**

La creciente demanda de seguridad en los automóviles ha llevado en muchos casos a un aumento del peso del vehículo, lo que entra en conflicto con la necesidad de un menor consumo de carburante.

Además, cada vez se piden más coches de dimensiones reducidas, especialmente en Europa y en Japón. Así, lo que se intenta, es introducir nuevos motores más compactos, o reducir las estructuras manteniendo el confort/la comodidad del pasajero.

Todos estos intentos dan lugar a problemas nuevos de disipación de calor en el recinto del motor, porque todos los componentes están muy juntos en poco espacio, o a un descenso de la seguridad debido a la reducción de las zonas de choque.

Además, la necesidad de reducir las emisiones acústicas de los coches lleva a una demanda de nuevos absorbentes de sonido.

→ Las espumas metálicas ofrecen una solución para la “construcción de peso-ligero”:

Esta construcción depende de dos propiedades de las espumas metálicas: ofrecen un rango de deformaciones cuasi elásticas y casi reversibles, y tienen una relación de masa-alta.

Esta última propiedad se puede entender fácilmente considerando un ejemplo:

la rigidez de un panel plano es proporcional a  $Eh^3$ , donde E es el módulo de Young del material, y h es la anchura.

Suponiendo que se hacen varios paneles de materiales espumosos de varias densidades pero todos tienen el mismo peso por unidad de área. E es proporcional al cuadrado de la densidad de la espuma,  $\rho$ , mientras que, por supuesto, h es proporcional a  $1/\rho$ . Esto indica que la rigidez de un panel plano de cierto peso es proporcional a  $\rho^{-1}$ , lo que significa que las espumas con, por ejemplo, un quinto de la densidad de un metal, tiene relaciones rigidez-masa que son cinco veces mayores que hojas convencionales con el mismo peso.

La dependencia cuadrática del módulo de Young con la densidad se da en casos de espumas imperfectas, mientras que para espumas perfectas es de esperar una relación lineal.

Si se pudiesen hacer mejores espumas con menos imperfecciones, se podría esperar incluso módulos más grandes y la ganancia de rigidez al usar estos paneles sería mayor.

Para paneles en forma de sándwich, esta ventaja de peso es incluso mayor que para paneles laminares y se debe llevar a cabo una optimización conveniente del diseño para determinar la anchura ideal de las hojas de las caras y la mejor densidad del aluminio central.

## 5.2 Construcción de barcos

Los barcos de pasajeros modernos pueden estar enteramente contruidos a partir de aleaciones de aluminio: paneles de aluminio y estructuras de panales-de abeja- de aluminio.



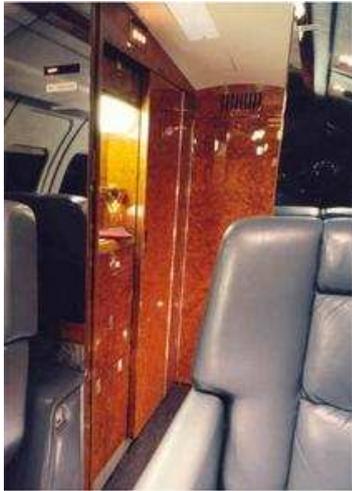
Fig. 17 Paneles de Aluminio y Estructuras panales de abeja-aluminio [9-10]

Los grandes paneles de espuma de aluminio con núcleos de este mismo metal prometen ser un elemento importante en varias de estas estructuras.

Si los paneles de las paredes están unidos al material central con adhesivos de poliuretano altamente elásticos, se obtienen estructuras ligeras y consistentes con un comportamiento aislante Excelente, incluso a las bajas frecuencias que se dan en los barcos.

Para las aplicaciones en la construcción, es importante que se puedan unir los elementos del “sándwich” hecho con espuma.

Un ejemplo de las estructuras mencionadas en la construcción de barcos se puede ver en la siguiente imagen:



*Fig.18 En este caso son nidos de abeja de polieterimida :  
Porta equipajes, paneles y tabiques están realizados con el nido de abeja « PEI » de la empresa TUBUS BAUER.*

*Este panel « PEI » tiene la ventaja de ser termoconformable pegable y muy resistente al fuego.*

*La densidad de los paneles son a partir de 48 hasta 120 kg/m<sup>3</sup>. Las celdillas producidas son de 4 y 6 mm de diametro. [11]*

### **5.3 Industria ferroviaria**

La aplicación de espumas metálicas en el equipamiento ferroviario sigue las mismas reglas que para el caso de la industria automovilística respecto a los tres campos principales de aplicación.

La absorción de energía es un tema importante, especialmente para los ferrocarriles ligeros y los tranvías que operan en áreas urbanas y para los cuales las colisiones con coches son más que probables.

Los trenes Japoneses han sido equipados con un bloque de 2.3 m<sup>2</sup> de aluminio “alporas” para mejorar la absorción de energía en los impactos.

Las ventajas de los elementos de espuma ligeros son las mismas que las de los coches, con la única diferencia de que las estructuras de los trenes son bastante mayores.

#### **5.4 Industria de la construcción**

Hay un amplio registro de posibles aplicaciones en esta industria: los edificios modernos están hechos de hormigón, sus fachadas están decoradas con paneles que esconden dicho hormigón y mejoran la apariencia del inmueble.

Estos paneles han de ser ligeros, firmes y resistentes al fuego. Con bastante frecuencia, se unen pequeñas láminas de mármol u otras piedras decorativas a un soporte que luego se fija a las paredes del edificio. Estos soportes pueden ser de espuma de aluminio, reemplazando algunos de los caros “panales de abeja” que se usan actualmente. Las barandillas de los balcones tienen que satisfacer rigurosas normas de seguridad. Algunos de los materiales utilizados hoy en día son demasiado pesados y son problemáticos en caso de incendio. Si pudiesen ser reemplazados por muestras espumas de aluminio, algunos de estos problemas se solventarían.

Las espumas de aluminio podrían ser de mucha ayuda a la hora de reducir el consumo de energía en los ascensores. La construcción con elementos ligeros es un aspecto importante debido a las constantes aceleraciones y frenados y la alta velocidad que llegan a alcanzar. Sin embargo, las regulaciones de seguridad a menudo impiden que se apliquen técnicas de construcción ligera convencionales, por lo que las aplicaciones de espumas de aluminio parecen ser prometedoras, al ser capaces de actuar como absorbentes de energía y como materiales estructurales rígidos.

Un ejemplo de espumas aplicadas a la construcción lo tenemos en el siguiente edificio:



*Fig. 19 Edificio recubierto con capas metálicas estándar*

El cerramiento exterior del edificio es un diseño muy innovador y está realizado con varias capas metálicas estándar: piezas plegadas, completas o perforadas (ST E2 900 Y ST Lumiere), y paneles aislados Ondatherm pueden verse en la cubierta detrás de los perfiles perforados (ST Lumiere). Dentro del edificio, los paneles aislados juegan varios roles:

elementos de cubierta, aislamiento térmico y estanquidad al agua y al aire detrás de la cara perforada.

El núcleo aislante del panel es espuma rígida de poliuretano inyectado en continuo entre dos chapas metálicas. Puede ser de varios espesores: 30, 40, 50, 60, 80, 100mm de acuerdo con los requisitos de aislamiento

### **5.5. Mejora de la seguridad en autocares.**

Actualmente, un grupo de investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, trabaja con espumas metálicas de relleno para mejorar la seguridad de autocares:

Han observado que ante un impacto (por ejemplo, el vuelco de un autocar) las estructuras de estos vehículos deben ser capaces de preservar un espacio libre de intrusiones. Para ello, éstas tienen que absorber la energía implicada en el impacto, deformándose sólo hasta el límite impuesto por ese espacio.

Las estructuras actuales, formadas principalmente por tubos de acero, cumplen esta función, pero la necesidad de reducir el peso del vehículo, para compensar la incorporación de nuevos sistemas de seguridad y confort junto con la conveniencia de reducir los consumos y emisiones de CO<sub>2</sub>, hace adecuada y deseable la sustitución de materiales más pesados por otros de menor densidad.[12]



*Fig. 20 Espuma de bolas porosas de aluminio*

Esta espuma se trata, en realidad, de un conjunto de bolas porosas de aluminio de diferentes densidades, cubiertas de un material adhesivo. Tras un proceso de curado en cámara climática, se unen a las paredes interiores de los tubos, a los que dotan de una mayor resistencia a flexión, con lo que se incrementaría la seguridad de la carrocería del autocar si éste volcase. Según el estudio, los tubos de acero rellenos de este material no son demasiado costosos, y permiten obtener estructuras más resistentes a vuelcos, lo que convierte a la espuma metálica en una alternativa rentable e innovadora en el refuerzo de carrocerías de autocares.

La aplicación de este material ya se emplea en algunos turismos, pero aún se encontraba en periodo de experimentación en autocares.

La investigación está subvencionada por la Universidad Politécnica de Madrid y forma parte de los proyectos de colaboración con Latinoamérica que dirige el profesor Aparicio.

El estudio de viabilidad de esta técnica alternativa ha sido realizado en las instalaciones que el Instituto Superior de Investigación del Automóvil mantiene en el Campus Sur de la Universidad Politécnica de Madrid.



*Fig. 20 Autocares donde se han utilizado las espumas[12]*

Y podemos encontrar muchas más aplicaciones en sectores como la Industria aeroespacial, la construcción de maquinaria y el equipamiento deportivo.

## 6. APLICACIÓN A UNA ESPUMA EN CONCRETO:

Existe una espuma metálica en concreto, la de **poliuretano**, que cuenta con muchas aplicaciones específicas, como son:



*Fig. 21 Espuma de poliuretano reticulada[13]*

- (a) La espuma de poliuretano reticulada se usa extensivamente para mejorar la seguridad en aviones militares, en vehículos terrestres y en barcos. Se la encuentra en los tanques de combustible de aviones de combate así como en aviones de reconocimiento y transporte C-130 y P-3, donde evita explosiones catastróficas en caso de ataques por armas de fuego hostiles o cuando se genera alguna chispa estática que pueda encender los vapores del combustible durante reabastecimiento sobre el ala. Se usa inclusive en los tanques de combustible de los autos de carrera para evitar explosiones en caso de accidente
- (b) También se usan en la fabricación de almohadones de uso a la intemperie.



La espuma se seca casi inmediatamente después de ser mojada por la lluvia, nieve que se derrite, rocío de la mañana, lavado y otras formas de humedad.

Sus poros grandes y abiertos permiten un drenaje rápido y circulación de aire, permitiendo su uso enseguida de haberse mojado e inclusive empapado.

- (c) En piezas metálicas moldadas, esta espuma constituye el material usado en la fabricación de filtros cerámicos para eliminar impurezas en el proceso de moldaje metálico. En este caso, funciona como un substrato catalítico que se sacrifica en el proceso, el cual se impregna primero con una pasta cerámica y

después se somete a una cocción para remover la espuma y fusionar la cerámica. De esta manera, se crea una pieza de cerámica rígida que ofrece pasajes rigurosos apta para remover las impurezas cuando el metal fundido es vertido a través del filtro durante el proceso de moldaje metálico.

(d) Existe un sin número de aplicaciones que usan espuma de poliuretano reticulada. Algunas son más conocidas que otras: aplicadores de pomada de calzado, escobillas de fregona, filtros de aire acondicionado y esponjas.

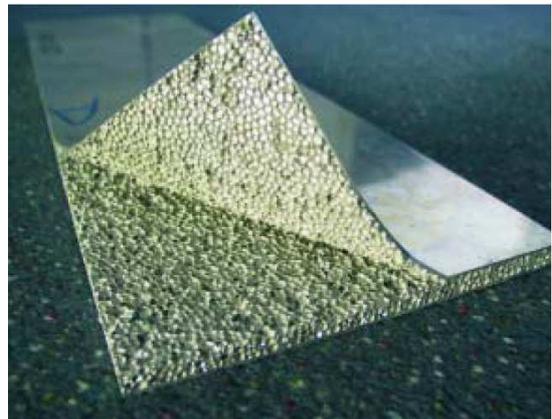
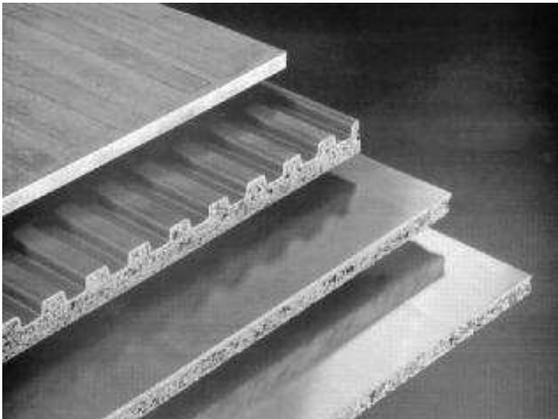
En usos industriales, la resistencia física, facilidad de corte y resistencia química de las espumas de poliuretano reticuladas permite que sean usadas en filtración, protección, sellado, absorción de sonidos, amortiguación de vibraciones, paños de limpieza y otros procesos especializados

## 7. APLICACIONES FUNCIONALES

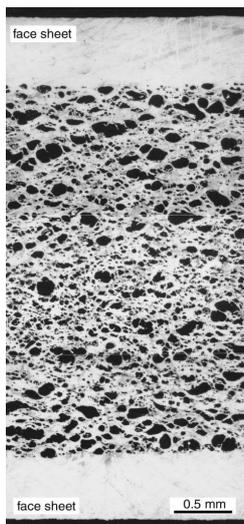
Por último, las aplicaciones funcionales de las espumas metálicas son:

- 2.1 Filtración y separación
- 2.2 Intercambiadores de calor y máquinas de refrigeración
- 2.3. Apoyo para catalizadores
- 2.4. Almacenamiento y transferencia de líquidos
- 2.5 control de flujo
- 2.6 silenciadores
- 2.7. Electrodo de batería
- 2.8 Dificultadores de llamas
- 2.9 Aplicaciones electroquímicas
- 2.10. Purificación de agua

A continuación se muestran unas imágenes ilustrativas:



*Fig.22 Vista de sandwich de aluminio ultraligero: una de las hojas de las superficies ha sido parcialmente doblada para mostrar la calidad de la unión entre la hoja y la espuma (wilhelm karmann GmbH)*



*Fig.23 Panel de sándwich con núcleo de espuma de aluminio y dos hojas superficiales de acero. [13]*

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

[1] František Simančík, Jaroslav Jerz, Jaroslav Kováčik, Pavol Minár. *Aluminium foam - a new light weight structural material*. Institute of Materials and Machine Mechanics, SAS, Račianska 75, P.O. Box 95, 830 08 Bratislava 38, Slovak Republic

[2] J. Banhart. *Metallic Foams*. Europhys News. 30, 17 (1999)

[3] J. Banhart. *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. Progress in Materials Science. 46, Págs 559-632 (2001)

[4] H. N. G. Wadley. *Cellular Metals Manufacturing*. Advanced Engineering Materials. 4, 10 (2008)

[5] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley. *Metal Foams: A Design Guide*. Butterworth-Heinemann, Woburn. (2000)

[6] C. E. Jiménez y M. T. Malachevsky. Fabricación y caracterización de espumas metálicas a partir de Mezclas Al-TiH<sub>2</sub>. Jornadas SAM. Conamet. Simposio Materia. (2003)

[7] J. Banhart. Production methods for metallic foams. Fraunhofer-Institute for Applied Materials Research, Bremen, Germany (1998)

[8] J. Banhart. Metal Foams: Production and Stability. Advanced Engineering Materials. 8, 9 (2006)

[9][http://farm2.static.flickr.com/11113/543897653\\_15817da5fc\\_m.jpg](http://farm2.static.flickr.com/11113/543897653_15817da5fc_m.jpg)

[10]<http://arquitecturaresopal.files.wordpress.com/2007/03/birdwing-1.jpg>

[11] [www.nidablog.com/categorie-1124222.html](http://www.nidablog.com/categorie-1124222.html)

[12]

[http://www.universia.es/html\\_estatico/portada/actualidad/noticia\\_actualidad/param/noticia/ejch.html](http://www.universia.es/html_estatico/portada/actualidad/noticia_actualidad/param/noticia/ejch.html)

<http://www.elmundo.es/suplementos/campus/2008/509/1202927926.html>

[13]<http://images.google.es/imgres?imgurl=>