

## Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I: Procesos por vía líquida<sup>(\*)</sup>

P. Fernández\*, L. J. Cruz\* y J. Coletto\*\*

### Resumen

Los metales celulares, con sus interesantes y particulares características, constituyen parte de la gran familia de los nuevos materiales. Ellos pueden ser de porosidad abierta o cerrada. En la actualidad, el gran reto para los investigadores en materiales se fundamenta, aún, en el perfeccionamiento de las técnicas de fabricación que permitan obtener metales celulares reproducibles, confiables y de calidad. Por tal motivo, en el presente trabajo, se revisan los diferentes métodos de producción por vía líquida, haciendo una breve descripción de los principales parámetros involucrados y las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

### Palabras clave

Metales celulares; Espumas metálicas; Esponjas metálicas; Fundición.

## Manufacturing processes of cellular metals. Part I: Liquid route processes

### Abstract

With its interesting and particular characteristics, cellular metals are taking part of the great family of new materials. They can have open or closed porosity. At the present time, the major challenge for the materials researchers is based in the manufacturing techniques improvement in order to obtain reproducible and reliable cellular metals with quality. In the present paper, the different production methods to manufacture cellular metals by liquid route are reviewed; making a short description about the main parameters involved and the advantages and drawbacks in each of them.

### Keywords

Cellular metals; Metallic foams; Metallic sponges; Casting process.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los metales celulares (MC) son materiales obtenidos a partir de un metal puro o de una aleación, que bien pueden formar una estructura de poros abiertos (esponjas metálicas) o una de poros cerrados (espumas metálicas). Dicha estructura porosa hace que los MC sean materiales muy especiales, innovadores y con prometedoras perspectivas de aplicaciones futuras ya que, además de contar con una muy baja densidad, poseen propiedades físico-químicas, mecánicas y estructurales propias del metal del que están formados y otras derivadas de la estructura porosa<sup>[1-4]</sup>. En este sentido, los MC han sido reconocidos como materiales “multifuncionales”, debido a que cubren una serie de características necesarias en diferentes aplicaciones, las cuales varían mucho según el proceso de producción empleado<sup>[5 y 6]</sup>. Como ratificación de lo anterior es posible, entonces, observar como las

esponjas metálicas son utilizadas como materiales funcionales (absorción de ruido y vibraciones, intercambiadores de calor y superficie para catálisis), y las espumas metálicas se usan en aplicaciones de tipo estructural (absorción de energía de impacto, aligeramiento de estructuras)<sup>[1-7]</sup>.

Aunque desde hace sólo alrededor de una década, este tipo de materiales está en pleno auge, los MC distan de ser un material reciente si se tiene en cuenta que la primera patente con referencia a estos materiales data de 1940, cuando Sosnick obtuvo la patente sobre un proceso realizado con una aleación de metales, donde uno de ellos era vaporizado debido a su bajo punto de fusión para dar lugar, así, a la estructura porosa del metal de mayor punto de fusión<sup>[8]</sup>. Aún así, los MC son materiales que no han alcanzado un total nivel de desarrollo y, mucho menos, de explotación debido, principalmente, a una serie de problemas que aun existen en la mayoría de los procesos de producción, y que

(\*) Trabajo recibido el día 10 de diciembre de 2007 y aceptado en su forma final el día 27 de mayo de 2008.

\* Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia patricia.fernandez@upb.edu.co, luis.cruz@upb.edu.co

\*\* Unidad de Aeronáutica, Fundación Inasmet-Tecnalia, San Sebastián, España, javier.coletto@inasmet.es.

están relacionados con los costos de producción, control del proceso y calidad de las espumas<sup>[9]</sup>. A pesar de contar con un futuro promisorio, por sus especiales características, todavía hay mucho por hacer con respecto al desarrollo y optimización de estos materiales, de manera que puedan ser más competitivos en términos de costos y prestaciones<sup>[10]</sup>. Aún hoy, las propiedades de algunos MC son muy inferiores a las teóricamente predichas por los modelos desarrollados, situación que se debe, primordialmente, a la falta de conocimiento y control de los procesos de fabricación<sup>[11]</sup>. En este artículo se efectúa una revisión de los métodos de fabricación de los MC contemplados por la literatura, haciendo énfasis en los principales parámetros de fabricación y en las ventajas y desventajas de cada proceso.

## 2. PRODUCCIÓN DE METALES CELULARES

En la actualidad, existen más de 12 empresas distribuidas por Europa, Japón y Norteamérica que comercializan MC. Además de estas compañías, también existe un gran número de centros de investigación, universidades y empresas trabajando en el desarrollo de nuevos procesos, búsqueda de nuevas aplicaciones, caracterización y modelación tanto de procesos como de los materiales porosos obtenidos. En la tabla I, se listan algunas de las entidades que han logrado desarrollos importantes en el tema de procesamiento de MC <sup>[1, 4 y 12-25]</sup>.

Existen diferentes criterios a la hora de clasificar los procesos de fabricación de MC. Uno de ellos

**Tabla I.** Compañías productoras de metales celulares

*Table I. Manufacturing companies of cellular metals*

Proceso de producción	Compañía	Denominación comercial/ proceso
Espumación directa del fundido por inyección de gas	Cymat Aluminium Corporation, Canadá HKB-LKR, Austria Foamtech, Korea Sperre, Noruega	Cymat Metcomb Lasom
Espumación directa del fundido por adición de agente espumante	Shinko Wire Co, Japón Cambridge University, Inglaterra IPP, Alemania	Alporas Formgrip
Fundición de precisión ( <i>investment casting</i> )	M-Pore, Alemania ERG, Oakland, USA	Duocel
Infiltración en moldes solubles	Instituto de Tecnología Federal de Suiza Northwestern University, EE.UU.	
Reacción eutéctica sólido-gas	DMI, Ucrania	Gasar
Infiltración del metal líquido en molde de esferas huecas	Instituto Tecnológico de Georgia, EE.UU.	Syntactic Alulight
Adición de agente espumante a precursores producidos por PM	Mepura, Austria Gleich-IWE, Alemania Fraunhofer Institute, Bremen, Alemania Neuman, Austria Schunk-Honsel, Alemania	Foaminal Alufoam
Sinterización de polvos / fibras	GKN Sinter Metals Filter GMBH	
Sinterización de polvos	Porvair Advanced Materials, EE.UU.	Metpor
Sinterización – disolución de moldes solubles	Liverpool University, Inglaterra	DSP
Sinterización de esferas huecas metálicas	IFAM, Bremen, Alemania Inco Special Products, Canadá Recemat Internacional	Incofoam Recemat
Técnicas de deposición	Sumitomo, Japón Fiberrnide, Canadá Dunlop, Inglaterra	Celmet Retimet

consiste en dividir los procesos en espumación directa y espumación indirecta<sup>[26]</sup>. Otro, los clasifica en función del estado de la materia prima a partir del cual se da lugar a la formación del material celular, estableciendo, así, tres familias generales: procesos a partir de un fundido metálico, de sólidos metálicos y deposición gaseosa<sup>[27]</sup>. Este artículo se elaboró bajo este último criterio de clasificación, tal como se muestra en la figura 1. A través de todo el texto, se hará una breve descripción de los principales métodos de producción de MC por la vía líquida.

## 2.1. Vía líquida de fabricación de MC

### 2.1.1. Inyección de gas en el fundido

Actualmente, las espumas de aluminio obtenidas por este método son explotadas comercialmente por Cymat Aluminium Corporation, en Canadá, y por Hydro Aluminium, en Noruega, aunque el proceso en su inicio fue desarrollado y patentado por Alcan International Ltd, Canadá<sup>[1, 4, 12, 15, 23 y 28]</sup>.

En la figura 2 se observa un esquema del método de producción de espumas metálicas (EM) por inyección de gas en el fundido. En este caso, el material de partida (comúnmente, aleaciones de aluminio) es

mezclado con un porcentaje de partículas cerámicas (SiC, MgO, TiB<sub>2</sub>, ZrSiO<sub>4</sub>, MnO<sub>2</sub> o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que tienen la función de incrementar la viscosidad del fundido<sup>[24]</sup> y, a su vez, actúan como estabilizadores de la espuma<sup>[29]</sup>. Luego, el metal a espumar se funde en un horno que tiene un agitador a través del cual se inyecta un gas (aire, nitrógeno, argón) para generar burbujas a través del metal fundido<sup>[24]</sup>. En el caso de las aleaciones de aluminio, la temperatura de inyección del gas

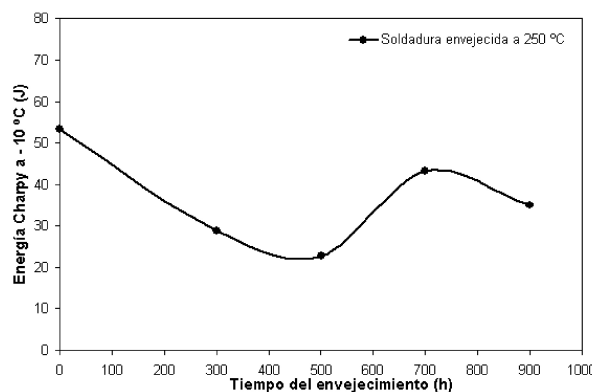


Figura 2. Producción de EM por inyección de gas<sup>[34]</sup>.

Figure 2. MF production by gas injection<sup>[34]</sup>.

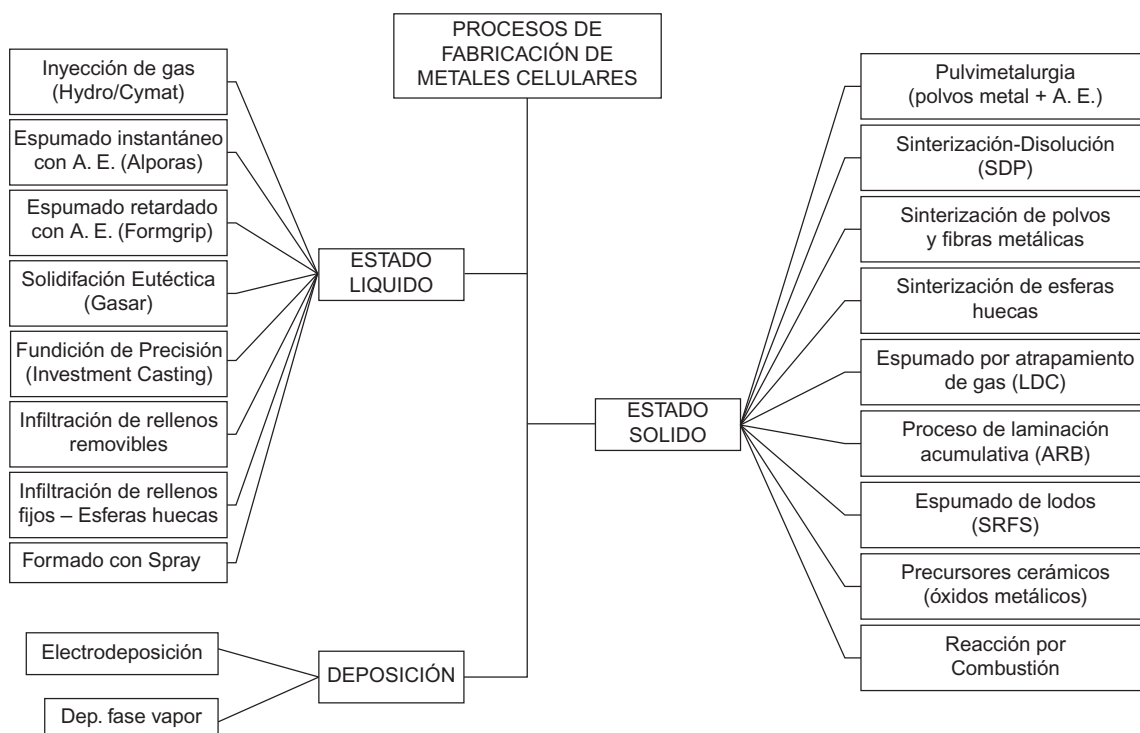


Figura 1. Procesos de fabricación de metales celulares.

Figure 1. Manufacturing processes of cellular metals.

es de alrededor de 700 °C<sup>[18]</sup>, dando lugar a la formación de burbujas que son estabilizadas con la ayuda de las partículas cerámicas que se encuentran homogéneamente dispersas en el fundido<sup>[18 y 30]</sup>. Durante el proceso, la espuma generada se acumula en la superficie superior del metal líquido por efecto de su menor densidad; luego, es recogida mediante una correa deslizante que se encarga de transportarla y se somete a enfriamiento<sup>[31]</sup>. Esta técnica permite producir espumas de gran volumen, las cuales pueden ser sometidas a procesos de conformación secundarios de acuerdo a los requerimientos de uso<sup>[12-14]</sup>. Los gradientes en densidad, tamaño de poro y elongación de poros que, comúnmente, se presentan pueden ser consecuencia natural del drenaje gravitacional. Para mejorar esto, se ha propuesto extraer la espuma de manera vertical<sup>[13, 15 y 32]</sup>.

En general, el tamaño de las partículas cerámicas empleado se encuentra entre 1-30 µm y su contenido en un porcentaje del 10 al 30 % vol., pues un alto contenido de las mismas pueden generar problemas de maquinado de la espuma<sup>[7, 13, 15 y 31]</sup>. Cymat emplea fundidos con partículas de SiC con un tamaño inferior a 20 µm (5-15 % vol.), mientras que Hydro Aluminium emplea aleaciones de aluminio con partículas de SiC o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en un intervalo de tamaño entre 10 y 30 µm (10-30 % vol.)<sup>[4, 16 y 33]</sup>. Se ha informado que el porcentaje de porosidad de este tipo de espumas está entre 80-98 % y el tamaño de poro entre 3 y 25 mm, siendo posible obtener valores de densidad en un intervalo entre 0,05-0,55 g/cm<sup>3</sup><sup>[28, 34 y 35]</sup>. Por otra parte, Babcsán *et al.* determinaron que la estabilidad de la espuma metálica depende tanto de la reacción y distribución de las partículas en el metal fundido como del espesor de la superficie del metal fundido (capa de óxido) y su tensión superficial<sup>[36]</sup>. La influencia del tamaño y del porcentaje de partículas cerámicas puede observarse en la figura 3. Dichas burbujas presentan, a su vez, fenómenos de drenaje que influye en la estabilidad de la espuma, tema que ha sido estudiado más a fondo por García-Moreno y Banhart<sup>[19, 37 y 38]</sup>. Otros estudios acerca de la solidificación y el drenaje de las espumas sugieren que su colapso sucede, con una mayor probabilidad, en espumas grandes o muy húmedas, que han sido calentadas muy por encima del punto de fusión<sup>[39]</sup>.

Los parámetros que tienen mayor influencia en la estructura celular final son: las partículas cerámicas (composición, forma, tamaño), la cantidad de partículas<sup>[14 y 20]</sup>, el gas (composición y pureza), la composición de la aleación matriz<sup>[20]</sup>, la velocidad angular y el diseño del agitador, el flujo y presión del gas<sup>[18 y 40]</sup>, el tiempo de agitación y la viscosidad del fundido<sup>[41]</sup>, el agente espumante utilizado y la temperatura de espumado<sup>[20 y 30]</sup>. De otro lado, Eckert y Gerbeth demostraron que en un metal líquido de dos fases, los parámetros tales como el tamaño, distribución y velocidad de

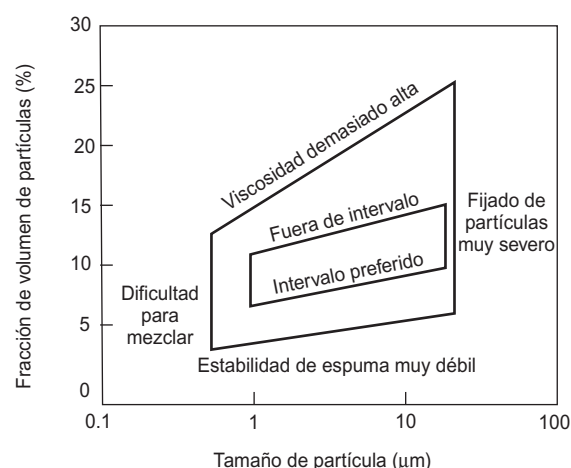


Figura 3. Intervalo de estabilización<sup>[7]</sup>.

Figure 3. Stabilization range<sup>[7]</sup>.

formación de las burbujas pueden ser controlados mediante la aplicación de campos electromagnéticos externos donde, finalmente, concluyen que los campos de tipo DC amortiguan las fluctuaciones turbulentas y reducen la dispersión de las burbujas de gas y los campos de tipo AC (p.e. campos magnéticos de rotación) promueven la distribución de las burbujas de gas dentro del volumen del fluido<sup>[42]</sup>.

Cymat ha introducido metal reciclado dentro de su proceso, produciendo de manera satisfactoria espumas de aluminio estabilizadas, *SAF-Stabilized Aluminium Foam*<sup>[40]</sup>. Aunque las aleaciones de aluminio son las de mayor uso<sup>[20]</sup>, también es posible espumar otros metales y sus aleaciones tales como el acero, níquel, cinc, cobre, plomo y magnesio<sup>[1 y 14]</sup>, donde la principal limitante es el punto de fusión del metal y el control de las burbujas una vez éste es espumado. En el caso del procesado de metales amorfos, tales como el Pd43Ni10Cu27P20, no se requiere el uso de partículas refractarias para la estabilización de la espuma debido a las altas viscosidades propias de estos metales y, para simplificar su procesamiento se utiliza el B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, hidratado como agente espumante<sup>[43-45]</sup>. A continuación, se detallan algunas ventajas y desventajas del proceso por inyección de gas.

### 2.1.1.1. Ventajas

- Bajo costo y método de producción simple, comparado con otros procesos.
- Buen control de densidad. Posibilidad de obtener muy bajas densidades.
- Tamaños y capacidad de producción grandes. Proceso continuo.

- Posibilidad de piel externa generada por el procesamiento directo de la espuma con láminas del mismo metal u otro.
- Bajo costo del material de partida.

### 2.1.1.2. Desventajas

- No es tan versátil como otras vías, p.e., la de PM para obtener estructuras con formas finales.
- Difícil control del tamaño de celda que, por lo general, es demasiado grande e irregular.
- Baja calidad de las espumas. Pobre control de la distribución de poros.
- Posibles problemas de corte y maquinabilidad por la presencia de partículas cerámicas.
- Problemas de drenaje.

### 2.1.2. Espumación de lingotes con agente espumante

El proceso llamado Formgrip (*Foaming of reinforced metals by gas release in precursors*) fue desarrollado por el Dpto. de Ciencia de Materiales y Metalurgia de la Universidad de Cambridge. La técnica consiste en la incorporación de polvos del agente espumante, en un porcentaje alrededor de 0,6 a 1,5 % en peso, directamente al metal fundido, el cual está compuesto por la aleación matriz y partículas cerámicas en un 5 al 15 % vol., que actúan como estabilizadores de la espuma. Una vez realizada la mezcla, se permite la solidificación del material que será utilizado como material precursor en un segundo paso, durante el cual, se calienta en un horno por encima de su temperatura de fusión dando lugar al material espumado que pasa a ser solidificado rápidamente. El tipo de partículas refractarias utilizadas son las mismas mencionadas para el proceso de inyección de gas (SiC, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [1, 7 y 46]. Para las aleaciones de aluminio, la mezcla se agita mecánicamente a una velocidad entre 1.000 a 1.200 rpm y a una temperatura del fundido entre 620-640 °C [28 y 47]. En la figura 4 se puede ver, de forma esquemática, el proceso de producción.

Aunque existen varios tipos de agentes espumantes, el hidruro de titanio (TiH<sub>2</sub>) es el principal utilizado en este proceso. Sin embargo, una de las dificultades para el control del proceso de espumación radica en la rápida descomposición que sufre el TiH<sub>2</sub> una vez es añadido al fundido. Gegerly y Clyne han establecido un tratamiento térmico del TiH<sub>2</sub>, previo a la mezcla con el metal fundido, consistente en una oxidación térmica, al colocarlo a 400 °C por 24 h y, luego, a 500 °C por 1 h, para, de esta manera, gene-

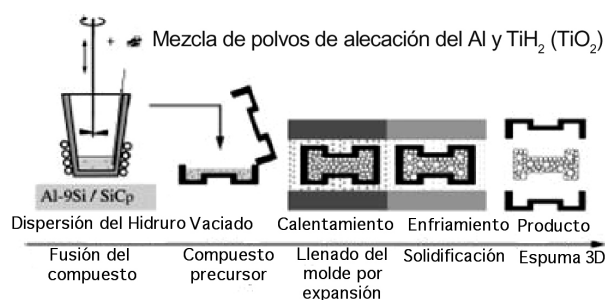


Figura 4. Proceso FORMGRIP [47].

Figure . 4. FORMGRIP process<sup>[47]</sup>.

rar una capa de TiO<sub>2</sub> superficial que actúa como una barrera de difusión y retarda la liberación del gas durante el colado del material precursor<sup>[46-51]</sup>. Como se dijo anteriormente, en algunos procesos de obtención de espumas metálicas es común el uso de hidruros como agentes espumantes, tales como el TiH<sub>2</sub> y el ZrH<sub>2</sub> [52]; sin embargo, estos pueden ser inflamables y pueden llegar a causar autoignición, siendo necesario tomar algunas medidas preventivas para su manipulación<sup>[53]</sup>. De lo anterior y en vía de conseguir una mayor economía del proceso, se ha estudiado la posibilidad de usar otros espumantes y en este sentido se ha hecho uso de CaCO<sub>3</sub>, el cual libera CO<sub>2</sub> por descomposición térmica, obteniéndose espumas de aluminio con tamaños de poros más finos (<1 mm) y estructuras más uniformes. Adicionalmente, este carbonato es mucho más barato y no requiere de ningún tratamiento térmico previo a su uso para la obtención de espumas de aluminio<sup>[48 y 54]</sup>.

Además del control que debe darse a la viscosidad, la poca disponibilidad de agentes espumantes para cada metal (en relación directa con las temperaturas de descomposición) impide que, mediante este método de espumado en dos etapas, sean procesados muchos metales, viéndose utilizado, típicamente, para el espumado de aluminio. Utilizando este método de espumación, Yang concluyó que la viscosidad y la solidificación del fundido, controladas apropiadamente, promueven una buena uniformidad de la estructura porosa (tamaño de poro y el volumen de porosidad total) de las espumas de aluminio. Establece, entonces, que la existencia de partículas de alúmina tiene una fuerte influencia en el incremento de la viscosidad del fundido y en la nucleación de las burbujas, cuyo crecimiento es proporcional al tiempo de solidificación<sup>[55]</sup>. De otro lado, con el fin de generar una espuma de poros más finos y con estructuras de celda más uniformes, se ha recurrido a la deformación mecánica del precursor espumable, lo cual acelera el proceso de espumación<sup>[56]</sup>. Mediante el ajuste del

tiempo y la temperatura de espumado, parámetros claves del proceso, se consiguen porosidades entre 50-95 % y tamaños de celda entre 1-10 mm. A continuación, se muestran las ventajas y desventajas del proceso descrito anteriormente.

### 2.1.2.1. Ventajas

- Descomposición más lenta del agente espumante, dispersión homogénea del polvo.
- Control del proceso de espumación: control de tamaño de celda y estructuras uniformes.
- Producción de componentes finales y llenado de moldes complicados e, incluso, de cavidades huecas.
- Posibilidad de trabajar con un material sólido espumable.

### 2.1.2.2. Desventajas

- Limitaciones en cuanto a materiales; se usa, principalmente, para el espumado de aluminios.
- Necesidad de adición de partículas cerámicas.
- Posibles problemas de corte y maquinabilidad por la presencia del SiC.
- Si el metal no tiene una viscosidad suficiente a su  $T_{\text{fusión}}$  se da el colapso de las burbujas.

### 2.1.3. Adición de un agente espumante al fundido metálico

Desde el año 1986, Shinko Wire Co. fabrica y comercializa espumas metálicas bajo el nombre comercial de ALPORAS utilizando este proceso<sup>[57]</sup>. En esta ruta, bajo la cual se fabrican, principalmente, espumas de aluminio y sus aleaciones, el agente espumante se adiciona directamente al metal fundido que, por acción de la temperatura, libera el gas que genera la espuma metálica<sup>[31]</sup>. La principal diferencia con respecto al proceso anterior radica en la adición de un 1,5 % en peso de calcio, a fin de aumentar la viscosidad del metal líquido y, con ello, la estabilización de las burbujas; luego, se adiciona entre un 1 y un 3 % en peso de agente espumante (típicamente 1,6 % de  $\text{TiH}_2$ ). A continuación, la mezcla es agitada a una temperatura alrededor de 680 °C<sup>[22, 35 y 57]</sup>. A mayor temperatura se obtiene más hidrógeno liberado del  $\text{TiH}_2$ , sin embargo, también se presenta una liberación más rápida del gas<sup>[58]</sup>. Durante la expansión de la espuma, ésta se mantiene dentro de una cámara a presión constante, lo cual genera espumas con estructura de celda homogénea y, una vez se tiene el volumen requerido,

se procede al enfriamiento y solidificación de la espuma. En la figura 5 se puede ver, de forma esquemática, el proceso de producción de las espumas.

Mediante este método es posible espumar aleaciones de hierro de manera similar a los aluminios, utilizando polvos de tungsteno como estabilizadores de la espuma. El  $\text{ZrH}_2$  es otro agente espumante, utilizado para el espumado de aluminio en un porcentaje aproximado del 0,5 % en peso y añadido al fundido a 670-705 °C<sup>[1 y 7]</sup>. Por otra parte, se ha informado que las espumas tipo Alporas presentan, en general, porosidades entre 84-95 %<sup>[14-16, 33 y 59]</sup>, densidades entre 0,18-0,24 g/cm<sup>3</sup><sup>[57]</sup> y una estructura altamente isotrópica y homogénea, lo que conlleva que, a nivel comercial, sean consideradas como las más homogéneas<sup>[4]</sup>.

El ajuste de la viscosidad a valores adecuados es fundamental, en este proceso. Algunos de los métodos más utilizados para el aumento de la viscosidad consisten en añadir y dispersar en el metal fundido partículas cerámicas como SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[58 y 60]</sup>, adicionar la fase sólida de la misma aleación utilizada, como es el caso de polvos de aluminio para las aleaciones de este mismo metal<sup>[61]</sup> y dar lugar a la formación de partículas de óxidos mediante la agitación en ambiente atmosférico del fundido, a lo cual se puede ayudar mediante la adición y agitación de elementos con una gran afinidad hacia el oxígeno, como son el calcio y el magnesio, generando la formación de CaO, MgO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaAl}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$  o  $\text{Al}_4\text{Ca}$ <sup>[4, 7, 23, 25, 58 y 60]</sup>. Como un efecto adicional al aumento de la viscosidad, debido a la adición del calcio o el magnesio, se encuentra la disminución del drenaje que ocurre en la espuma, mejorando, así, su estabilidad<sup>[62 y 63]</sup>.

Entre los parámetros que controlan la porosidad y calidad de la espuma están la cantidad y la cinética del hidrógeno generado, el espesor crítico de ruptura de las paredes, la coalescencia de las celdas, el ciclo térmico, la velocidad de enfriamiento<sup>[64]</sup>, la viscosidad, la tensión superficial y el punto de fusión del metal matriz<sup>[65]</sup>. La figura 6 muestra cómo para los mayores

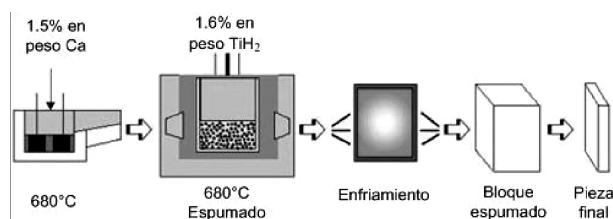


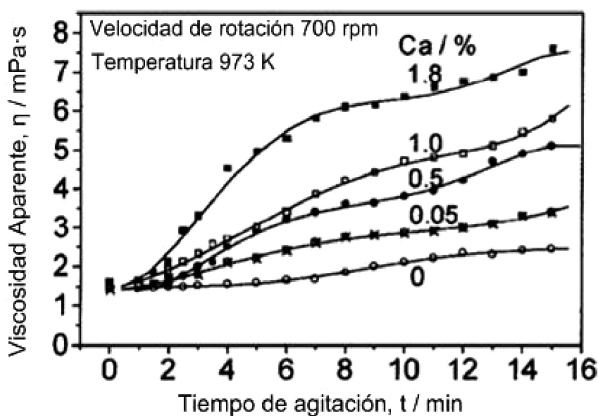
Figura 5. Proceso de fabricación ALPORAS<sup>[57]</sup>.

Figure 5. ALPORAS manufacturing process<sup>[57]</sup>.

porcentajes de calcio, la viscosidad aparente del aluminio fundido aumenta a medida que incrementa el tiempo de agitación y, en la figura 7, se puede ver cómo el contenido de calcio influye en la porosidad de la espuma. Finalmente, se informan algunas ventajas y desventajas propias de este proceso.

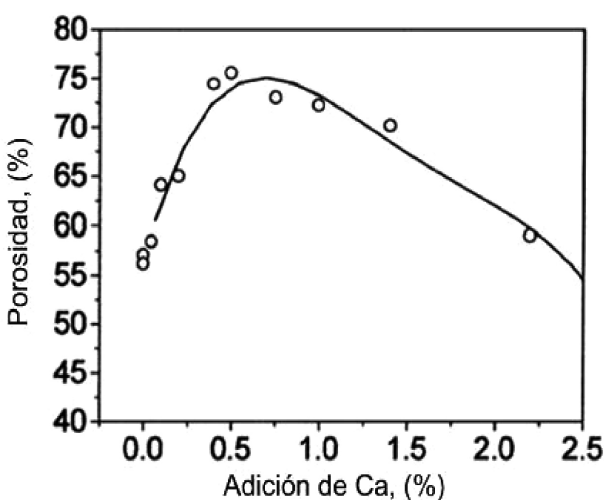
### 2.1.3.1. Ventajas

- Método de producción, relativamente simple.
- Relativamente, fácil de llevarlo a escala industrial.
- Obtención de mejores características estructurales en cuanto a homogeneidad e isotropía de los



**Figura 6** Tiempo de agitación vs. viscosidad aparente<sup>[58]</sup>.

Figure 6. Stirring time vs. apparent viscosity<sup>[58]</sup>.



**Figura 7.** Efecto del calcio sobre la porosidad<sup>[64]</sup>.

Figure 7. Calcium effect in the porosity<sup>[64]</sup>.

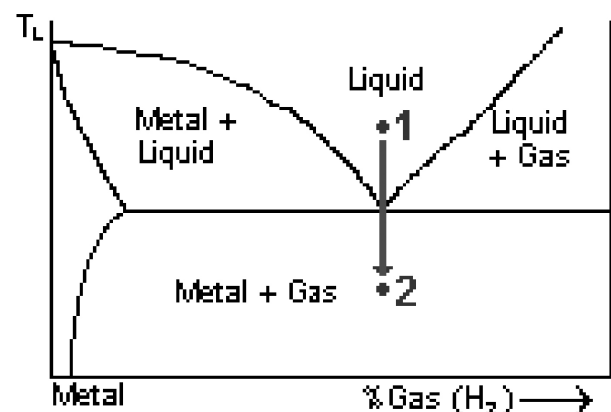
poros del producto con respecto los procesos de espumación por inyección de gas.

### 2.1.3.2. Desventajas

- Proceso costoso para fabricación de espumas con respecto a la inyección de gas.
- Difícil control de la densidad y tamaño de poro por el agente espumante
- Contaminación del aluminio por la presencia de calcio y titanio.

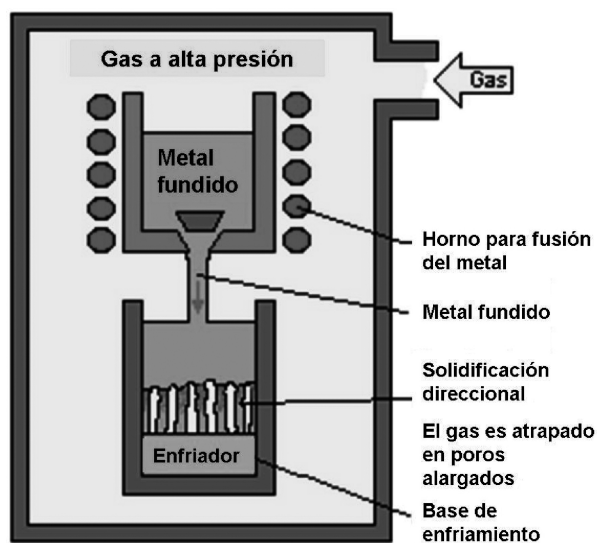
### 2.1.4. Solidificación eutéctica de un fundido saturado de hidrógeno (Gasar)

Método desarrollado en el Dnepropetrovsk Metallurgical Institute (DMI), en Ucrania, entre los años 1980-1985, denominado proceso Gasar (acrónimo ruso de *gas reinforced* [7, 23 y 66]) y patentado por Shapovalov en 1993. Esta técnica aprovecha el hecho de que algunos fundidos metálicos forman una mezcla eutéctica con un elemento gaseoso (p.e., el hidrógeno), como se muestra en la figura 8. De esta manera, se funde el material bajo una alta presión del gas (> 50 atm), con miras a obtener una alta solubilidad del gas en el fundido<sup>[31 y 32]</sup>. Cuando el fundido solidifica, el gas escapa debido a su baja solubilidad en el metal sólido dando a lugar un material poroso anisotrópico con poros cuasi-cilíndricos orientados en la dirección de la solidificación<sup>[1, 7 y 25]</sup>. En la figura 9 se muestra una descripción esquemática de este sistema de producción, mediante el cual se pueden obtener espumas de aluminio, níquel, cobre, magnesio, titanio, cobalto, molibdeno, cromo y aceros,



**Figura 8.** Diagrama de fases metal-gas.

Figure 8. Metal-gas fases diagram.



**Figura 9.** Proceso Gasar.

*Figure 9.* Gasar process.

con porosidades entre 5 y 75 % [15, 25, 67 y 68]. En la tabla II se lista el tipo de gas a utilizar, de acuerdo al metal a procesar por esta vía [69].

En el caso del aluminio y el níquel, se ha determinado la influencia del contenido de H<sub>2</sub> y de las condiciones de sobrecalentamiento en la porosidad final obtenida [70]. Del mismo modo, se ha estudiado el efecto de la presión de saturación, la temperatura, la presión sobre el metal fundido, la temperatura del molde y la velocidad de enfriamiento en el total de la porosidad y en el tamaño, la distribución y la forma de los poros [66 y 71]. Dentro del mismo proceso, Shapovalov presentó una discusión teórica acerca de las estructuras y morfologías observadas en este tipo de materiales [72]. En el procesado de aceros al carbono se ha evidenciado que la porosidad y los diámetros de poro pueden ser controlados mediante la

**Tabla II.** Proceso Gasar: Metales porosos y gases disponibles [69]

*Table II.* Gasar Process: Porous metals and available gases [69]

Gas Disponible	Metales porosos a fabricar
Hidrógeno	Fe, aceros al carbono, aceros inoxidables, Ni, Al, Cu, Mg, Co, W, Mn, Cr, Be, Ti
Nitrógeno	Fe, Ni
Oxígeno	Ag, Au

presión del nitrógeno [68 y 73]. De otro lado, se ha comprobado que la conductividad térmica juega un papel muy importante durante la solidificación y formación de los poros, evidenciándose velocidades de solidificación casi constantes en metales con altas conductividades térmicas, lo cual se refleja en porosidad y tamaños de poros más uniformes [67 y 69].

En general, las espumas obtenidas se caracterizan por tener formas de poro cilíndricas, esféricas o elipsoidales [66] con diámetros de poro entre 10 μm-10 mm y longitudes de 100 a 300 μm [1 y 7], siendo constante la morfología alargada en la dirección longitudinal de la solidificación; precisamente, a ello se debe el nombre de “estructuras tipo loto” (*lotus-type porous metals*), por su semejanza con las raíces de los lotos [74]. Las ventajas y desventajas son las siguientes:

#### 2.1.4.1. Ventajas

- No requiere el uso de partículas estabilizantes.
- Se puede emplear para diferentes tipos de metales.
- Control de tamaño y dirección de los poros y de la porosidad total.

#### 2.1.4.2. Desventajas

- Porosidades obtenidas relativamente bajas.
- Se requieren altas presiones para el hidrógeno.
- Se requiere uso de autoclave.

#### 2.1.5. Fundición de precisión (*Investment casting*)

A nivel comercial, se encuentran varias empresas que emplean este método para la producción de esponjas, dentro de las que se destacan ERG (Duocel), Cellmet, IPP, y M-Pore, las dos últimas, alemanas. De igual manera, el Instituto de Fundición de la Universidad Técnica de Aachen, en Alemania y algunos centros de Investigación del Japón, también han realizado trabajos relacionados con la producción de esponjas metálicas mediante la técnica de fundición de precisión [15 y 75].

En este método de producción de esponjas metálicas, se parte de un modelo de esponja de poliuretano con las características que son requeridas en el componente final (poros por mm, tamaño de poro, % de porosidad). A la esponja de poliuretano se le ensambla el sistema de alimentación y otras partes que requiera el componente final mediante técnicas tradicionales como el moldeo por inyección a la cera perdida,



dando lugar al modelo propiamente dicho. Posteriormente, este modelo es llenado con una arcilla refractaria altamente resistente a la temperatura para, luego, proceder mediante un tratamiento térmico a la eliminación del modelo de cera y de la preforma de poliuretano, rigidizando, finalmente, la estructura de refractario. El metal fundido es colado en el molde precalentado (siendo el aluminio la aleación de mayor uso). Finalmente, se remueve el molde cerámico cuidando de no causar daños a la delicada estructura metálica<sup>[31, 75 y 76]</sup>. En general, el simple colado por gravedad no es suficiente para infiltrar el material a través de las paredes muy finas del molde, por lo que es común emplear condiciones de presión de vacío para obtener esponjas de menores tamaños de poro y paredes muy pequeñas. Las esponjas producidas poseen porosidades en un intervalo del 80 al 98 %<sup>[15-16, 25, 32, 46 y 77]</sup>. En la figura 10 se puede ver un esquema del proceso de fundición de precisión<sup>[78]</sup>.

Mediante este proceso es posible obtener esponjas tanto de algunos metales puros como de sus aleaciones, tales como aluminio, cobre, zinc, hierro, níquel y magnesio<sup>[78-80]</sup>. Hintz *et al.* infiltraron aluminio A356, combinando esta técnica con *thixocasting*, con lo que lograron una notoria mejoría en la resistencia a la compresión del producto obtenido<sup>[81]</sup>. ERG comercializa esponjas en aleaciones de aluminio 6101 y A356 con densidades relativas del 3-50 % (definida como el volumen del material de

esponja relativo al volumen del material sólido), aunque, también producen, bajo pedido, componentes especiales en otras aleaciones<sup>[35 y 82]</sup>, mientras, de otro lado, el Instituto Técnico de Aachen ha producido bloques y componentes complejos de densidades relativas entre 2,5-8 %. Las ventajas y desventajas que posee este proceso se listan a continuación.

### 2.1.5.1. Ventajas

- Gran libertad de diseño y materiales colables.
- Poros interconectados, posible alta porosidad.
- Totalmente reproducible, estructura homogénea y totalmente controlable.
- Densidad y tamaño de poro variable, independientemente.
- Muy buena calidad metalúrgica del componente, igual al metal base.

### 2.1.5.2. Desventajas

- Coste elevado por componente/bloque.
- Sistema discontinuo y tamaños limitados.
- Gran número de etapas, tiempos de remoción de molde elevados.

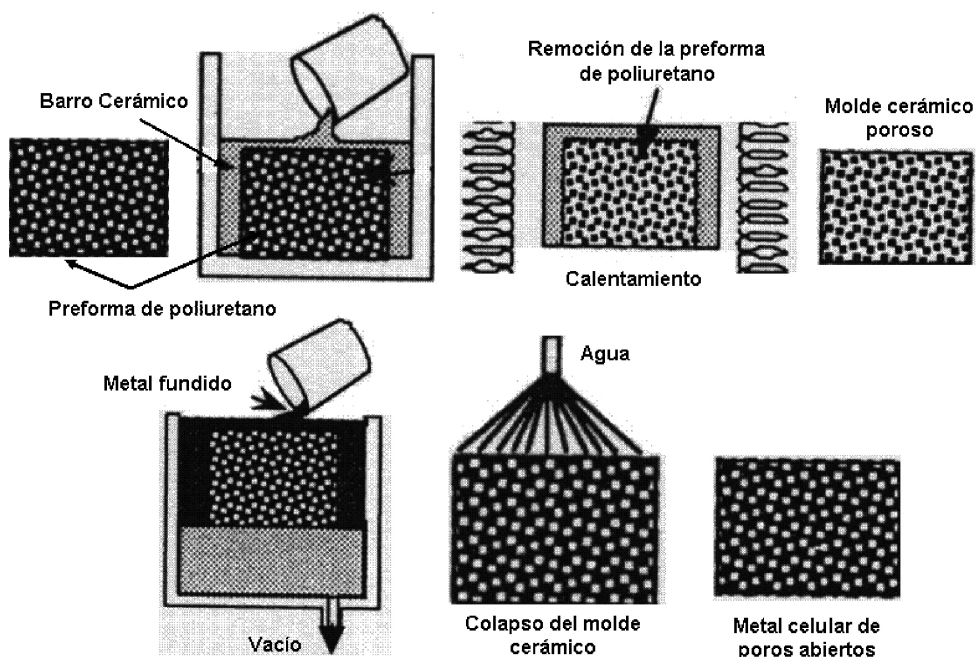


Figura 10. Fundición de precisión con preforma de poliuretano<sup>[78]</sup>.

Figure 10. Investment casting with polyurethane perform<sup>[78]</sup>.

- Difícil de llevarlo a escalas industriales.
- Necesidad de extracción de gases generados por la eliminación de la cera y el poliuretano.

### 2.1.6. Infiltración por fundición de moldes con rellenos removibles

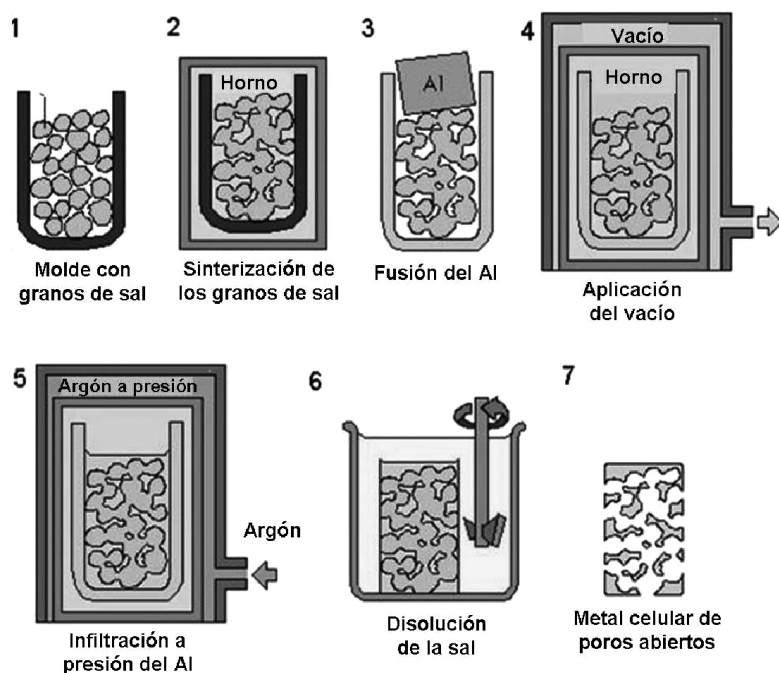
Los primeros trabajos relacionados con este proceso datan de 1960. Sin embargo, a lo largo de los años, se han realizado mejoras en el sistema de infiltración, como se observa en el proceso desarrollado por el Instituto Tecnológico Federal de Suiza (EPFL). *Replication Process (RP)*, es otro nombre que recibe este proceso<sup>[83]</sup>, el cual consiste en preparar un molde con materiales de relleno ya sean orgánicos o inorgánicos; luego, se sinteriza y enfría, dando lugar a un molde con poros interconectados; la preforma obtenida es infiltrada con el metal fundido (p.e., aluminio) y luego enfriada y solidificada. Por último, el material obtenido es sometido a un proceso de disolución o a un tratamiento térmico que permita la remoción de la preforma y obtener la esponja metálica<sup>[84 y 85]</sup>. Estos materiales pueden alcanzar porosidades de un 55 % a un 98 %<sup>[86]</sup> y densidades relativas entre 0,3 y 0,5<sup>[2]</sup>. En la figura 11 se observa un esquema del proceso.

Cuando se utiliza NaCl para la elaboración de la preforma, la sinterización no se considera un paso estrictamente necesario ya que es posible colar, simple-

mente, el material fundido por gravedad sobre los cristales de sal, logrando obtenerse esponjas de un tamaño de poro mínimo de 1 mm y porosidades entre 60-70 %<sup>[87]</sup>. Torres *et al.* han obtenido esponjas de Zinalco con propiedades mecánicas destacadas, utilizando infiltración por gravedad en moldes de NaCl<sup>[88 y 89]</sup>. De otro lado, en un trabajo reciente realizado por Deping *et al.*, se simuló el proceso de infiltración de aluminio fundido en un medio poroso mediante presión externa, obteniendo una buena correlación entre los datos del proceso prototipo llevado a cabo y la simulación<sup>[90]</sup>. Igualmente, se ha demostrado experimentalmente que el grado de abertura del poro disminuye con el incremento de la presión negativa de infiltración<sup>[91]</sup>.

La producción de esponjas metálicas por *RP* se extiende a metales tales como las aleaciones de aluminio, aleaciones de magnesio y aleaciones de hierro y níquel. Así mismo, el material removible más común es el NaCl, por ser económico y de fácil manipulación. También, pueden utilizarse sales como el NaF con una capacidad de resistir temperaturas hasta de 900 °C<sup>[86 y 92]</sup>. Por otra parte, se ha estudiado el uso de NaOH como medio de disolución de preformas de NaCl para la fabricación de esponjas de magnesio<sup>[93]</sup>.

Puesto que en este proceso se obtiene un metal celular con poros que son una replica de los polvos del material soluble (p.e., NaCl), Gaillard *et al.* establecieron una ruta que denominaron “precipitación anti-solvente” de NaCl para producir cristales que conducen a la obtención de esponjas más uniformes<sup>[83]</sup>. Una



**Figura 11.** Infiltración de metal fundido en moldes solubles.

*Figure 11. Melting metal infiltration in removable molds.*

variante del método de infiltración consiste en reemplazar la sal por esferas cerámicas (p. ej., partículas de  $Al_2O_3$ ), aditivos poliméricos, pequeñas cantidades de bentonita, agua, polivinil alcohol (como agente ligante) [94] y carboximetil celulosa o hidroxipropil metil celulosa. Luego de realizar el mismo proceso que para las preformas de sal, las esferas cerámicas son removidas mediante vibración ultrasónica y agua. De esta manera, es posible obtener productos con porosidades de alrededor del 88 % [87]. Por otro lado, al reemplazar el NaCl por sales de fluoruros tales como  $SrF_2$  y  $BaF_2$ , Brothers *et al.* obtuvieron con éxito espumas de aleaciones de vidrios metálicos (aleación de zirconio, denominada Vit106) [95]. El IFAM ha obtenido esponjas mediante un método desarrollado por ellos mismos, HPMI (*High Pressure Melt Infiltration*), que consiste en infiltrar el metal líquido (aluminio) en un precursor conformado por gránulos de polímero sinterizados con una resina que, finalmente, son removidos por tratamiento térmico [96]. Mediante este proceso se han obtenido esponjas con porcentajes de porosidad del 73-86 % [97].

Cabe resaltar que la remoción de las preformas se considera una de las etapas cruciales en el método de infiltración con metal fundido [98], por lo cual, en algunos casos, el proceso utiliza la técnica de *squeeze casting* [99]. También, es importante mencionar que, durante la etapa de disolución de las preformas de sal, se generan soluciones salinas altamente concentradas que pueden causar corrosión significativa en algunas aleaciones [86]. En todos los casos de infiltración con metal fundido de preformas solubles, la porosidad del producto final puede ser manipulada a través del tamaño, la forma y la distribución de las partículas utilizadas en la preforma [87]. La tecnología de infiltración muestra algunas restricciones en cuanto a las estructuras que son obtenibles, ya que parámetros como tamaño y forma de la celda y la porosidad dependen, en gran extensión, del material utilizado para la preforma (material inorgánico, gránulos de vermiculita o arcilla quemada, sales solubles, gránulos de arena, etc.). Los *pellets* de arena son descompuestos mediante calor, mientras que las esferas de polímero se extraen mediante pirólisis térmica [1, 77 y 100]. A continuación se exponen las ventajas y desventajas propias de este proceso.

### 2.1.6.1. Ventajas

- Buena calidad de las esponjas.
- Bajos costos de procesamiento.
- Posibilidad de obtener esponjas con regiones de diferentes características y distribución de tamaño de poros de forma controlada.

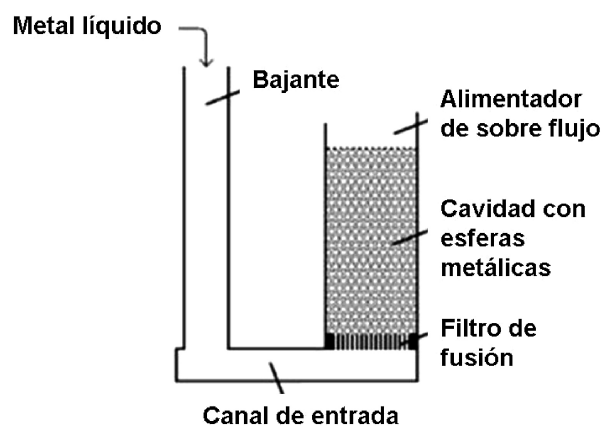
- Permite obtener espumas de tamaño de poro muy pequeño y componentes finales.
- Presiones de compresión bajas, para el caso de las preformas con esferas cerámicas.

### 2.1.6.2. Desventajas

- Difícil de llevarlo a escala de producción.
- Proceso lento (gran número de pasos) y mucho tiempo para una eficiente disolución de la sal.
- En el caso de emplear rellenos de sal, se requiere el uso de metales que no reaccionen con la misma.
- Posibles problemas de corrosión del metal base por residuos de NaCl, cuando se utilizan rellenos de sal.
- Necesidad de vibración ultrasónica para remover los residuos de las esferas cerámicas.

### 2.1.7. Infiltración de metal líquido en molde compuesto por rellenos no removibles

Otro tipo de metal poroso puede ser producido mediante el vaciado de metal fundido alrededor de gránulos inorgánicos o aún orgánicos, esferas de vidrio espumado, esferas huecas de baja densidad, entre otros. En este caso, los gránulos permanecen en el producto metálico después de la fusión produciendo una espuma sintáctica (*syntactic foam*) [24 y 25]. El proceso desarrollado por el Instituto Tecnológico de Georgia, EE.UU., consiste en infiltrar el metal líquido en un molde lleno de esferas huecas de paredes finas en condiciones de vacío y alta presión, como se muestra en la figura 12. Estas



**Figura 12.** Infiltración de esferas metálicas huecas [104].

*Figure 12. Hollow metal spheres infiltration* [104].

esferas pueden ser cerámicas (generalmente,  $Al_2O_3$ ) o metálicas (aleaciones Fe-Cr, con un punto de fusión superior al metal infiltrado. Se han fabricado espumas de aleaciones de aluminio (6061, 7075, 413, Al) y magnesio (AZ31B) <sup>[101 y 102]</sup>, además de estaño, plomo, zinc y titanio. Un caso especial es la infiltración de preformas elaboradas con microesferas huecas de carbono con aleaciones de zirconio (*Bulk Metallic Glass-BMG*) <sup>[103]</sup>.

Las esponjas obtenidas por este método presentan porosidades entre 40 y 55 %, limitadas por el empaquetamiento máximo permitido por las esferas y, además, presentan tamaño de poro mayor a 2 mm pues, con esferas de menor diámetro, las condiciones de fundición deben ser más severas dando lugar a la rotura de las esferas<sup>[1]</sup>. Así mismo, se han logrado empaquetamientos densos con arreglos, tanto aleatorios como ordenados, de esferas de acero que han sido infiltradas con aleaciones de aluminio 356 usando técnicas de fundición por gravedad, obteniéndose materiales con una densidad relativa del 41,5 % y con propiedades mecánicas apropiadas para su aplicación en industrias aeroespaciales, automotrices o biomédicas<sup>[104]</sup>. Dentro de las ventajas y desventajas se destacan las siguientes:

### 2.1.7.1. Ventajas

- Mayor empaquetamiento por unión de las esferas metálicas por difusión.
- Estrecho control de la distribución de tamaño de poro.
- Posibilidad de procesar un amplio rango de metales.
- Dependiendo del arreglo del relleno, se obtienen espumas de mayor porosidad.

### 2.1.7.2. Desventajas

- El metal de las esferas puede reaccionar con el fundido metálico.
- Mojabilidad de los gránulos: problema debido a la alta tensión superficial del metal líquido.
- Llenado incompleto de todos los intersticios entre los gránulos con el metal líquido.
- Porosidades dependientes del empaquetamiento del material de relleno.

### 2.1.8. Conformado por aspersion (Osprey process or spray forming)

En éste proceso, el metal fundido es atomizado continuamente formando una aspersion de pequeñas gotas metálicas; estas, son recogidas en un sustrato donde

crecen formando un depósito denso de una forma dada (p.ej., un lingote, lámina o tubo). Las características del material formado por atomización incluyen bajo contenido de óxido, tamaño de grano fino o un alto contenido de fases de aleación metaestables<sup>[1]</sup>. Existe la posibilidad de modificar las propiedades del depósito mediante la inyección de polvos tales como óxidos, carburos o metales puros en la atomización, permitiendo que estos reaccionen o sean mojados por las gotas de metal líquido y sean incorporados dentro del metal, a la vez que éste es depositado en el sustrato. Además de producir esponjas metálicas, ésta, puede considerarse una ruta para fabricación de MMC's (composites de matriz metálica) <sup>[105]</sup>. Por otra parte, puede aumentarse la densificación del sustrato poroso mediante un proceso de laminación, tal como lo hacen en la Hunan University's School of Materials Science and Engineering, China<sup>[106]</sup>. Algunos investigadores han trabajado la formación de porosidad en aleaciones  $CuSn_6$  mediante la inyección de polvos de  $BaCO_3$ . De igual manera, Banhart *et al.* han creado aceros porosos mediante la inyección de óxidos de silicio o de óxidos de manganeso en la aspersion de acero al carbono, obteniéndose porosidades con un valor cercano al 60 % pero con morfologías de uniformidad aún muy deficientes<sup>[1]</sup>. La figura 13 muestra como se depositan las gotas metálicas en una preforma metálica.

### 2.1.8.1. Ventajas

- Posibilidad de depósitos metálicos porosos en estratos de diversas formas geométricas.
- Mejora de las propiedades mecánicas de la capa metálica del depósito por el tamaño de grano fino.

### 2.1.8.2. Desventajas

- Proceso complicado que requiere alto control de variables y de metales a utilizar.

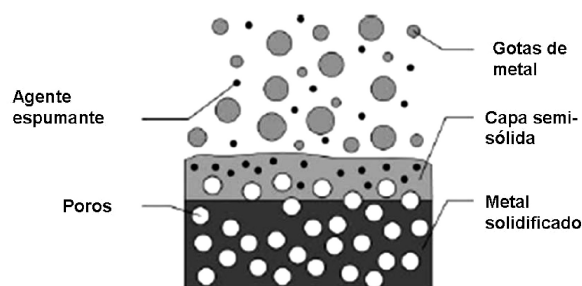


Figura 13. Método *Spray Forming*<sup>[1]</sup>.

Figure 13. *Spray Forming method*<sup>[1]</sup>.

— Baja uniformidad en la morfologías de poros obtenidos.

## CONCLUSIONES

Ha despertado un gran interés la producción de metales celulares, tanto a nivel académico y científico como industrial, en todo el mundo, aunque se destaca el enorme avance alcanzado por los países más desarrollados. Hasta ahora, cabe anotar que la producción de metales celulares por vía líquida ofrece diferentes alternativas que permiten la obtención tanto de esponjas como de espumas metálicas. Se continúa investigando, aún, en el perfeccionamiento de los métodos de fabricación de metales celulares por la ruta líquida a fin de obtener materiales reproducibles y con características técnicas y económicas que auguren en el futuro inmediato un incremento sustancial en su nivel de aceptación en diversas aplicaciones ingenieriles.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a COLCIENCIAS el otorgamiento de la beca doctoral a la Ing. Fernández, período de estudios durante el cual fue posible la realización de esta revisión.

## REFERENCIAS

- [1] J. Banhart, *Prog. Mater. Sci.* 46 (2001) 559-632.
- [2] M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson y H.N.G. Wadley, *Metal foams: a design guide*, Butterworth-Heinemann, Oxford, Inglaterra, 2000, pp. 6-23.
- [3] L.J. Gibson y M.F. Ashby, *Cellular solids*, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 1997.
- [4] J. Banhart, *Proc. Eurofoam2000*, P. Zitha, J. Banhart, G. Verbist (Eds.), MIT-Verlag Bremen, Alemania, 2000, pp.13-20.
- [5] H.P. Degischer, *Handbook of Cellular Materials - Production, Processing, Applications*, H.P. Degischer y B. Kriszt (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim, 2002, pp. 5-7.
- [6] F. Simancík, J. Jerz, J. Kovácik y V. Minár, *Kovove Mater.* 35 (1997) 265-277.
- [7] J. Banhart, *JOM* 52 (12) (2000) 22-27
- [8] B. Sosnick, US Patent 2 434 775, 1948.
- [9] D. Leitlmeier y H. Flankl, *Proc. 2nd Int. Conf. Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT-Verlag, Bremen, Alemania, 2001, pp. 171-174.
- [10] E.M.A. Maine y M.F. Ashby, *Mater. Design.* 23 (2002) 307-319.
- [11] F. Simančík, *Handbook of Cellular Materials - Production, Processing, Applications*, H.P. Degischer y B. Kriszt (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim, 2002, pp. 1-4.
- [12] J. Banhart, *Indian Foundry J.* 51 (2005) 36-41.
- [13] J. Baron, *Cymat*, pp. 1-10. [http://www.cymat.com/pdf/automotive\\_applications.pdf](http://www.cymat.com/pdf/automotive_applications.pdf). (22 agosto 2006).
- [14] A.E. Simone y L. J. Gibson, *Acta Mater.* 46 (1998) 3.109-3.123.
- [15] C. Kammer, *TALAT*, Lecture 140, Alemania, 1999, pp. 1-24.
- [16] A.G. Evans, J.W. Hutchinson y M.F. Ashby, *Curr. Opin. Solid St. Mater. Sci.* 3 (1998) 288-303.
- [17] K. Stöbener; J. Baumeister, D. Lehms, H. Stanzick y V. Zöllmer. *Proc. Int. Conf. Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Eslovaquia, 2003, pp. 281-286.
- [18] D. Leitlmeier, H.P. Degischer y H.J. Flankl, *Adv. Eng. Mater.* 4 (2002) 735-740.
- [19] J. Banhart, F. Baumgärtner, S.J. Cox, B. Kronberg, D. Langevin, S. Odenbach, D. Weaire y T. Wübber. *Proc. 1st Int. Symp. Microgravity Research & Applications in Physical Sciences & Biotechnology*, Sorrento, Italia, 2000, pp. 589-596.
- [20] N. Babcsán, D. Leitlmeier y H.P. Degischer, *Materialwiss Werkst.* 34 (2003) 22-29.
- [21] V.N. Antsiferov, A.M. Makarov y V. D. Khramtsov, *Adv. Eng. Mater.* 7 (2005) 77-92.
- [22] J. Banhart y F. Baumgärtner, <[http://www.hmi.de/people/banhart/B-Conferences/b051\\_banhart2002.pdf](http://www.hmi.de/people/banhart/B-Conferences/b051_banhart2002.pdf)> (9 enero 2007).
- [23] N. Babcsán, J. Banhart y D. Leitlmeier, *Proc. Int. Conf. Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Eslovaquia, 2003, pp. 5-15.
- [24] W. Markus, J. Banhart y J. Baumeister, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 6 Ed., 2000, pp. 1-11.
- [25] J. Banhart, [http://www.hmi.de/people/banhart/B-Conferences/b021\\_banhart1998.pdf](http://www.hmi.de/people/banhart/B-Conferences/b021_banhart1998.pdf). pp. 3-11. (15 enero 2007).
- [26] J. Banhart y D. Weaire, *Phys. Today* 19 (2002) 37-42.
- [27] H.N.G. Wadley, *Proc. 2nd Int. Conf. Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT-Verlag, Bremen, Alemania, 2001, pp. 137-146.
- [28] C. Körner y R. F. Singer, *Handbook of Cellular Materials - Production, Processing, Applications*,

- H.P. Degischer Ed., Wiley-VCH, Weinheim, 2002, pp. 8-14.
- [29] G. Kaptay, *Proc. Int. Conf. Metal Foams and Porous Metal Structures*, J. Banhart, M. F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 141-145.
- [30] H. Fusheng, W. Jianning, C. Hefa y G. Junchang, *J. Mater. Process. Technol.* 138 (2003) 505-507.
- [31] J. Banhart y J. Baumeister, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 521*, Warrendale, Pennsylvania, MRS Symp., D. Schwartz, D. Shih, A. Evans, H. Wadley (Eds.), EE.UU., 1998, pp.121-132.
- [32] H. Wadley, *Adv. Eng. Mater.* 4 (2002) 726-733.
- [33] V. Amigó, D. Busquets y A. Cárcel. *Proc. Actas del VI Congreso Nacional de Materiales Compuestos*. AEMAC-UPV, Valencia, España, 2005, pp. 247-254.
- [34] P. Asholt, *Proc. Int. Conf. Metal Foams and Porous Metal Structures*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 133-140.
- [35] C. Körner y R. F. Singer, *Adv. Eng. Mater.* 2 (2000) 159-165.
- [36] N. Babcsán, D. Leitmeyer, H.P. Degischer, y H.J. Flankl, *Proc. MetFoam 2003 Cellular Metals: Manufacture, properties, applications*, J. Banhart, N.A. Fleck, A. Mortensen (Eds.), MIT Press-Verlag, Berlin, Alemania, 2003, pp 101-106.
- [37] Report ESA MAP (MAP-99-075) (2005) *Microgravity applications programme*, Wilson A. (Eds.), Noordwijk, ESA publications Div., 2005, pp. 126-132. <[http://hmi.de/people/banhart/D-Others/d022\\_garcia2005.pdf](http://hmi.de/people/banhart/D-Others/d022_garcia2005.pdf)> (17 Oct. 2007).
- [38] D. Bellmann, H. Clemens y J. Banhart, *Appl. Phys. A* 74 (2002) S1.136 – S1.138.
- [39] S.J. Cox, G. Bradley y D. Weaire, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 14 (2001) 87-96.
- [40] A.M. Harte y S. Nichol, *Proc. 2nd Int. Conf. Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT-Verlag, Bremen, Alemania, 2001, pp. 49-54.
- [41] S.H. Park, Y.S. Um, Ch.H. Kum y B.Y. Hur, *Colloid. Surface. A* 263 (2005) 280-283.
- [42] S. Eckert y G. Gerbeth, *Proc. MetFoam 2003 Cellular Metals: Manufacture, Properties, Applications*, J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen (Eds.), MIT Press-Verlag, Berlin, Alemania, 2003, pp. 83-88.
- [43] A. Brothers y D.C. Dunand, *Scr. Mater.* 54 (2006) 513-520.
- [44] J. Schroers, C. Veazey y W. Johnson, *Appl. Phys. Lett.*, 82 (2003) 370-372.
- [45] J. Schroers, C. Veazey, M.D. Demetriou y W.L. Johnson, *J. Appl. Phys.*, 96 (2004) 7.723-7.730.
- [46] J. Coletto, J. Goñi, J. Maudes, y I. Leizaola, *Proc. Int. Congress Eurofond*, La Rochelle, Francia, 2004, pp. 1-10.
- [47] V. Gegerly y T.W. Clyne, *Adv. Eng. Mater* 2 (2000) 175-178.
- [48] V. Gergely, D.C. Curran y T.W. Clyne. *Proc. Global Symp. Materials Processing and Manufacturing Processing & Properties of Lightweight Cellular Metals and Structures*, TMS Annual Meeting, Seattle, Washington, 2002, pp. 3-8.
- [49] A.R. Kennedy, *Scr. Mater* 47 (2002) 763–767.
- [50] V. Gegerly, y T.W. Clyne, *Proc. Int. Conf. Metal Foams and Porous Metal Structures*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 83-89.
- [51] V. Gegerly y T.W. Clyne, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 521. Materials Research Society*, 1998. pp. 139-144.
- [52] B. Matijasevic, O. Görke, H. Schubert y J. Banhart, *Proc. Porous Metals and Metal Foaming Technology*, H. Nakajima y N. Kanetake (Eds.), The Japan Institute of Metals 2005, Japón, pp. 107-110.
- [53] R. Kresse, *Proc. Int. Conf. Metal Foams and Porous Metal Structures*, J. Banhart, M. F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 109-112.
- [54] V. Gergely, D. C. Curran y T. W. Clyne, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 2-301-2.310.
- [55] C. C. Yang y H. Nakae, *J. Mater. Process. Technol.* 141 (2003) 202–206.
- [56] J. Frei, V. Gegerly, A. Mortensen y B. Clyne, *Adv. Eng. Mater.* 4 (2002) 749-752.
- [57] T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama y A. Kitahara, *Adv. Eng. Mater.* 2 (2000) 179-183.
- [58] T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama y A. Kitahara, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 521*, Warrendale, Pennsylvania, MRS Symp., D. Schwartz, D. Shih, A. Evans, H. Wadley (Eds.), EE.UU., 1998, pp. 133-137.
- [59] L.S. Abdelmajid-Elmoutaouakkil, *Adv. Eng. Mater.* 4 (2002) 803-807.
- [60] T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama y A. Kitahara, *Proc. Int. Conf. Metal Foams Porous Metal Structures*, J. Banhart, M. F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 125-132.
- [61] C.C. Yang y H. Nakae, *J. Alloy. Comp.* 313 (2000) 188-191.
- [62] B.Y. Hur, S.J. Park, K.H. Song, W.H. Lee, S.H. Park y S.Y. Kim. *Proc. Int. Conf. Advanced*

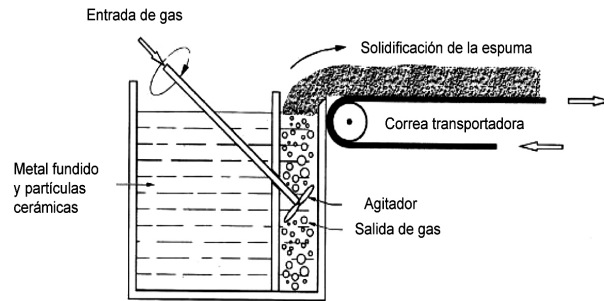
- Metallic Materials*, Smolenice, Eslovaquia, 2003, pp. 120-123.
- [63] S-H. Park y B-Y Hur, *Proc. MetFoam 2003 Cellular Metals: Manufacture, properties, applications*, J. Banhart, N.A. Fleck, A. Mortensen (Eds.), MIT Press-Verlag, Berlin, Alemania, 2003, pp 123-128.
- [64] Z.L. Song, L.Q. Ma, Z.J. Wu y D.P. He, *J. Mater. Sci.* 35 (2000) 15-20.
- [65] T. Miyoshi, T. Kasai, T. Mukai y H. Higashi, *Proc. 2nd Int. Conf Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, J. Banhart, M.F. Ashby y N.A. Fleck (Eds.), Bremen, Alemania, 2001, MIT-Verlag, Bremen, Alemania, pp. 167-170.
- [66] V. Shapovalov y L. Boyko, *Proc. MetFoam 2003 Cellular Metals: Manufacture, properties, applications*, J. Banhart, N.A. Fleck, A. Mortensen (Eds.), MIT Press-Verlag, Berlin, Alemania, 2003, pp. 203-208.
- [67] H. Nakajima, T. Ikeda y S.K. Hyun. *Adv. Eng. Mater* 6 (2004) 377-384.
- [68] S.K. Hyun y H. Nakajima, *Adv. Eng. Mater.* 4 (2002) 741-744.
- [69] H. Nakajima, T. Ikeda y S.K. Hyun, *Proc. MetFoam 2003 Cellular Metals: Manufacture, properties, applications*, J. Banhart, N.A. Fleck, A. Mortensen (Eds.), MIT Press-Verlag, Berlin, Alemania, 2003, pp. 191-202.
- [70] J.M. Apprill, D.R. Poirier, M.C. Maguire y T.C. Gutsch, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 521*, Warrendale, Pennsylvania, EE.UU., MRS Symp., D. Schwartz, D. Shih, A. Evans, H. Wadley (Eds.), EE.UU., 1998, pp. 291-296.
- [71] C.J. Paradies, A. Tobin y J. Wolla, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 521*, Warrendale, Pennsylvania, EE.UU., MRS Symp., D. Schwartz, D. Shih, A. Evans, H. Wadley (Eds.), EE.UU., 1998, pp. 297-302.
- [72] V. I. Shapovalov, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 521*, Warrendale, Pennsylvania, EE.UU., MRS Symp., D. Schwartz, D. Shih, A. Evans, H. Wadley (Eds.), EE.UU., 1998, pp. 281-290.
- [73] M. Kashihara, S.K. Hyun, H. Yonetani, T. Kobi y H. Nakajima. *Scr. Mater.* 54 (2006) 509-512.
- [74] S. K. Hyun, T. Ikeda y H. Nakajima. *Science and Technology of Advanced Materials* 5 (2004) 201-205.
- [75] C. Hintz, I. Wagner, P. R. Sahn, y P. Stoyanov, *Proc. Int. Conf. Metal Foams and Porous Metal Structures*, J. Banhart, M. F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 153-158.
- [76] M. Grohn, D. Voss, C. Hintz y P. R. Sahn, *Proc. 2nd Int. Conf. Cellular Metals and Metal Foaming Technology*. J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT-Verlag, Bremen, 2001, pp. 197-202.
- [77] B. Jiang, N. Zhao, C. Shi, X. Du, J. Li y H. Man, *Mater. Lett.* 59 (2005) 3.333-3.336.
- [78] Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Sakaguchi, M. Mabuchi, M. Nakamura, T. Asahina, T. Mukai, H. Kanahashi y K. Higashi., *Adv. Eng. Mater.* 2 (2000) 184-187.
- [79] Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Sakaguchi, M. Mabuchi, M. Nakamura, T. Asahina, T. Mukai, H. Kanahashi y K. Higashi, *Mater. Sci. Eng.* A280 (2000) 225-228.
- [80] Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Sakaguchi, M. Mabuchi, M. Nakamura, T. Asahina, T. Mukai, H. Kanahashi y K. Higashi., *Proc. Int. Conf. Metal Foams and Porous Metal Structures*, J. Banhart, M. F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 147-152.
- [81] C. Hintz, I. Wagner, M. Fehlbier, O. Klaassen y P.R. Sahn., *Proc. 2nd Int. Conf. Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT-Verlag, Bremen, Alemania, 2001, pp. 193-196.
- [82] *Duocel Aluminium Foam: A basic design material for the imagination.* <<http://www.ergaerospace.com/>> (26 marzo 2006).
- [83] C. Gaillard, J.F. Despois y A. Mortensen, *Mater. Sci. Eng. A* 374 (2004) 250-262.
- [84] A. Pollien, Y. Conde, L. Pambaguian y A. Mortensen, *Mater. Sci. Eng. A* 404 (2005) 9-18.
- [85] J. Banhart, *Proc. Int. Conf. Metal Foams and Porous Metal Structures*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 159-162.
- [86] C. San Marchi y A. Mortensen. *Handbook of Cellular Materials - Production, Processing, Applications*, H.P. Degischer y B. Kriszt (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim, 2002, pp. 43-55.
- [87] K. Chou y M.A. Song, *Scr. Mater.* 46 (2002) 379-382.
- [88] S. Casolco, G. Torres, A. Gómez y M. López, *Memorias del XI Congreso Internacional Anual SOMIM, IV Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica*, Morelia, México, 2005, pp. 1-6.
- [89] E. Ochoa, M. López, G. Torres y S. Casolco, *Memorias del XII Congreso Internacional Anual SOMIM*, Acapulco, México, 2006, pp. 1-5.
- [90] H. Deping, W. Desun, Z. Yong y Sh. Guangji, *Proc. 2nd Int. Conf. Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT-Verlag, Bremen, Alemania, 2001, pp. 187-192.
- [91] Ch. Feng y H. Deping, *Proc. Int. Conf. Metal Foams and Porous Metal Structures*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 163-166.
- [92] C. San Marchi, A. Brothers y D.C. Dunand, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 754*, Boston,

- EE.UU., MRS Symp., T. Egami, A.L. Greer, A. Inoue, S. Ranganathan (Eds.), EE.UU., 2003, pp. CC1.8.1- CC1.8.6.
- [93] F. W. Bach, D. Bormamm y P. Wilk. *Proc. MetFoam 2003 Cellular Metals: Manufacture, properties, applications*, J. Banhart, N.A. Fleck, A. Mortensen (Eds.), MIT Press-Verlag, Berlin, Alemania, 2003, pp 215-218.
- [94] B.Y. Hur, Y.S. Um, J.S. Cho y B.K. Park, *Proc. Int. Conf. Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Eslovaquia, 2003, pp. 124-125.
- [95] A.H. Brothers, R. Scheunemann, J.D. DeFouw, y D.C. Dunand, *Scr. Mater.* 52 (2005) 335-339.
- [96] A. Berg. European Vehicle Passive Safety Network (EVPSN 2). *Materials Database: HPMI AlSi9Cu3*. <www.ifam.fraunhofer.de> (23 agosto 2006).
- [97] M. Liqun, S. Zhenlun y H. Deping, *Scr. Mater.* 41 (1999) 785-789.
- [98] H.I. Bakan, *Scr. Mater.* 55 (2006) 203-206.
- [99] H.X. Peng y Z. Fan, *J. Mater. Sci. Lett.* 20 (2001) 1.769-1.771.
- [100] K. Berchem, U. Mohr y W. Bleck, *Mater. Sci. Eng. A* 323 (2002) 52-57.
- [101] J.H. Nadler, K.M. Hurysz, J.L. Clark, J.K. Cochran, K.J. Lee y T.H. Sanders, *Proc. Int. Conf. Metal Foams and Porous Metal Structures*, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (Eds.), MIT Press-Verlag Bremen, Alemania, 1999, pp. 179-182.
- [102] M. Hartmann, K. Reindel y R.F. Singer. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 521*, Warrendale, Pennsylvania, EE.UU., MRS Symp., D. Schwartz, D. Shih, A. Evans, H. Wadley (Eds.), EE.UU., 1998, pp. 211-216.
- [103] A.H. Brothers y D. C. Dunand, *Appl. Phys. Lett.* 84 (2004) 1.108-1.110.
- [104] A. Rabiei y A. O'Neill, *Mater. Sci. Eng. A* 404 (2005) 159-164.
- [105] J. Banhart y M. Knüwer, *Proc. PM World Congress*, Granada, Spain, 1998, pp. 265-270.
- [106] Z. Chen, M. Zhan y W. Xia, *Metal Powder Report* 59 (2004) 40-47.



## FE DE ERRATAS DEL VOL. 44

En la pág. 542 del vol. 44 (noviembre-diciembre, 2008), la Figura 2 publicada es errónea y no se corresponde con el pie de de la misma, que es correcto. La figura que debió publicarse es la siguiente:



**Figura 2.** Producción de EM por inyección de gas<sup>[34]</sup>.

*Figure 2. MF production by gas injection<sup>[34]</sup>.*

Esta rectificación corresponde al trabajo titulado "Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I. Procesos por vía líquida" de P. Fernández, L.J. Cruz y J. Coletto.