

# ESPUMAS METÁLICAS - PROCESSOS DE FABRICO, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

## PARTE I – Processos de fabrico

I. M. A. Duarte<sup>1</sup>, A. J. M. Ferreira<sup>2</sup>, J. Banhart<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Estrada do Paço de Lumiar, 1649-038, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>DEMEGI, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Portugal

<sup>3</sup>Fraunhofer-Institute for Advanced Materials, Wiener Str. 12, 28359 Bremen, Alemanha

**Resumo:** Dentro do mundo dos materiais utilizados na indústria, os metais são os mais utilizados devido às suas propriedades. Actualmente, para certas aplicações tem vindo a ser testado uma nova forma de os utilizar na indústria, *i.e.*, na forma de espuma. As espumas metálicas são idênticas às espumas poliméricas apenas diferindo no material de base que em vez de um polímero é um metal. As espumas metálicas são então materiais sólidos com uma elevada percentagem em volume de poros, os quais poderão ser abertos ou fechados. É esta porosidade (aberta ou fechada) aliada às propriedades metálicas que fazem com que estes materiais apresentem excelentes propriedades para futuras aplicações na indústria, em que o baixo peso e a elevada capacidade de absorção e dissipação de energia sejam factores determinantes. Este artigo pretende apresentar uma revisão bibliográfica da situação actual deste tema em três linhas de orientação: i) processos de fabrico, ii) propriedades e iii) identificação das potenciais aplicações destes materiais na indústria.

### Introdução

A ideia das espumas metálicas surge nos anos 50, sendo tão antiga como as espumas poliméricas. Contudo enquanto que o fabrico das espumas poliméricas revelou ser extremamente fácil, o mesmo não sucedeu com as espumas metálicas, em que o seu uso foi limitado devido às dificuldades encontradas no seu fabrico e também aos elevados custos envolvidos na sua produção. Apesar disto, sabe-se que durante a Guerra Fria houve alguns desenvolvimentos e mesmo certas utilizações em aplicações militares [1].

A ideia foi então abandonada pela comunidade científica e só no princípio dos anos 90, é que começou a ter algum impacto e as trouxesse para aplicações ditas mundanas. Nesta altura surgem então algumas patentes e artigos científicos descrevendo processos de fabrico aparentemente viáveis industrialmente. Actualmente alguns destes processos de fabrico estão a ser comercializados por empresas como a Cymat (no Canada), a Shinko Wire (no Japão), a Schunk (na Alemanha), a Mepura (na Áustria) e a Recemat (na Holanda). No entanto, os problemas de uniformidade e reproductibilidade requeridas na produção e os requisitos comerciais não foram ainda totalmente resolvidos. Deste modo, existem grandes grupos de investigação na Europa e nos Estados Unidos pertencentes a Universidades e Institutos de Investigação conjuntamente com grandes empresas industriais nos diferentes sectores a actuarem segundo três grandes tópicos de investigação: i) a nível do processo de fabrico – controlar e otimizar os parâmetros de fabrico dos processos de forma a ter as propriedades requeridas para cada aplicação; ii) avaliação das propriedades – físicas, químicas, mecânicas, acústicas, térmicas, eléctricas, ... por forma a identificar as potenciais aplicações nos diferentes sectores industriais; iii) simulação do

comportamento mecânico por forma a prever o seu comportamento em serviço.

O presente artigo pretende assim divulgar de uma forma educativa e elucidativa à Comunidade Científica e às Empresas potencialmente interessadas nesta área para a existência destes materiais dando a conhecer o seu actual estado de conhecimento. O artigo será subdividido em duas partes: Parte I - descrição dos principais processos de fabrico, e Parte II - principais propriedades e potenciais aplicações nos diferentes sectores industriais, focando as perspectivas futuras de aplicabilidade das espumas metálicas.

### 1. Processos de fabrico

De acordo com o estado inicial do metal – fundido, pó ou ionizado – os processos de fabrico das espumas metálicas podem ser divididos em três grupos como mostra a Figura 1.

Dependendo do processo de fabrico usado, assim podemos obter diferentes estruturas (abertas ou fechadas) e gamas de densidades, como se ilustra na figura 2 [2].

#### 1.2.1. Produção de espumas metálicas a partir de metal fundido

As espumas metálicas podem ser obtidas a partir do metal fundido injectando directamente gás no seu interior, ou adicionando agente(s) expensor (es) o(s) qual (quais) se decompõem termicamente libertando um gás. Podem ainda ser obtidas por métodos indirectos, os quais iniciam-se a partir de uma espuma polimérica, ou a partir de materiais sólidos de enchimento garantindo a permanência de um certo espaço entre

eles para que os poros permaneçam na espuma final, após vazamento e solidificação do metal fundido.

### 1.2.1.1. Expansão directa do metal fundido

Os processos de expansão directa do metal fundido consiste em obter espumas metálicas por injeção de gás (por exemplo dióxido de carbono, oxigénio, gases inertes) ou mesmo ar no seio do metal fundido, ou por adição de agente(s) expensor(es) que sofrem decomposição térmica com a libertação de um gás, na forma de bolhas.

As bolhas de gás injectadas ou formadas por decomposição térmica de um agente expensor tem tendência a alcançar a superfície rapidamente num liquido altamente denso. Para evitar que as bolhas de gás arrebentem antes de alcançar a superfície do metal fundido, é adicionado geralmente ao metal fundido pós cerâmicos finos (por exemplo carboneto de silício ou alumina) ou elementos de liga na forma de pó. Desta forma controlando a viscosidade do metal fundido controla-se a velocidade de ascensão das bolhas de gás até à superfície do metal fundido.

Estes métodos são usados por duas empresas comerciais – Cymat (no Canada) e Shinko Wire (no Japão). O processo Cymat (ver figura 3A) para o fabrico de espumas de alumínio, foi originalmente desenvolvido e patenteado pela Alcan International, o qual consiste nas seguintes etapas [3]:

- i) fusão de um metal num equipamento de fundição;
- ii) transferência do metal fundido para um reservatório, onde o gás é injectado, em forma de bolhas;
- iii) ascensão das bolhas de gás ou ar formando uma massa espumosa semi-líquida (constituída por uma mistura de metal fundido e bolhas de gás) na parte superior do reservatório. Esta massa semilíquida é vazada continuamente para um tapete rolante de extracção, com subsequente solidificação do metal. A obtenção de painéis de espuma de superfícies planas é conseguida através de um outro tapete rolante colocado na parte superior do tapete rolante de extracção.

Este processo de fabrico é particularmente utilizado para elevados volumes de produção de painéis de espuma metálica de estrutura fechada. Actualmente, a linha de produção em contínuo é capaz de produzir painéis a uma velocidade de 900 Kg/hr dependendo da densidade da espuma, com comprimentos até 15.24 m, espessura que pode variar de 15.2 mm a 150 mm e com uma largura máxima de 1.52 m. Os painéis resultantes podem ter valores de densidade entre 2 e 20% do alumínio sólido (figura 3B). Estes painéis poderão ser utilizados tal qual, sem sofrerem qualquer tipo de acabamento, ou sofrerem posterior acabamento dependendo do tipo de aplicação requerida. As aplicações comerciais destes painéis são normalmente para isolamento de som e arquitectónicas.

O processo permitir ainda o fabrico de componentes a 3D por vazamento de uma massa espumosa semilíquida emergente para o interior de moldes fechados. No entanto, o elevado volume de produção de perfis a 2 D associado ao relativo baixo preço e a baixa densidade alcançada são vantagens aliadas ao processo. Uma das desvantagens deste processo é a elevada percentagem de partículas cerâmicas presentes que poderá apresentar dificuldades na maquinaria dos painéis, se necessário.

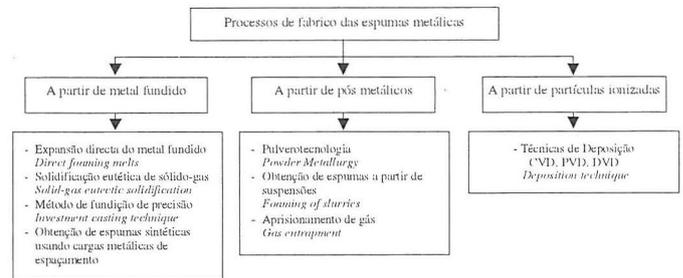


Figura 1: Processos de fabrico das espumas metálicas.

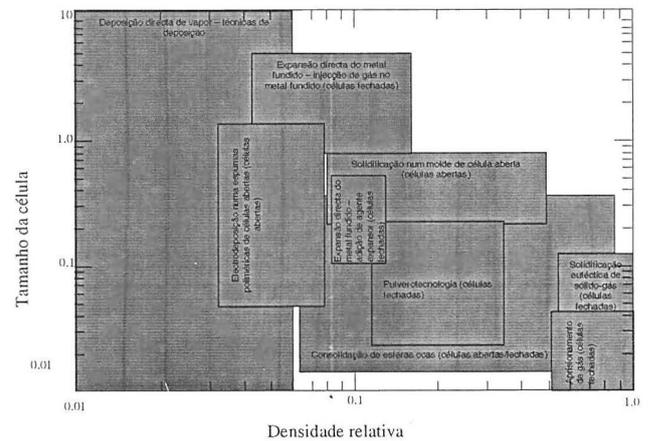


Figura 2: A variação da densidade e do tamanho de células para espumas obtidas através de diferentes processos de fabrico [2].

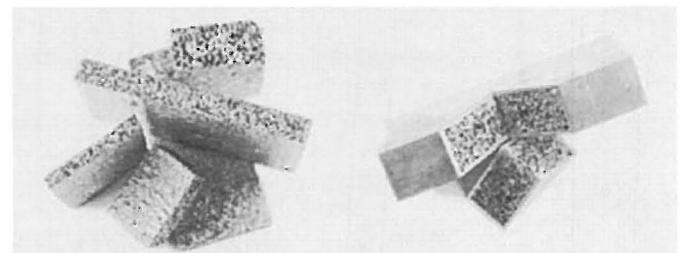
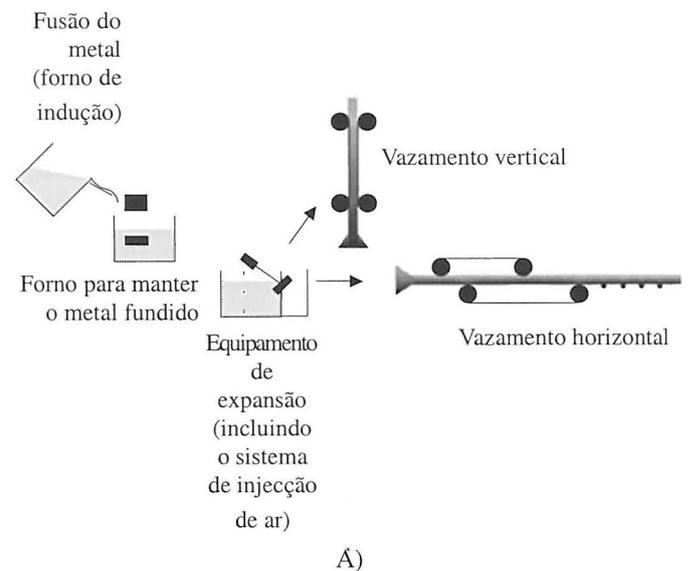


Figura 3: A) Processo de vazamento (Cymat). B) Painéis de espuma de alumínio e painéis com o núcleo em espuma, obtidos pelo processo Cymat [3].

Como mencionado anteriormente, a segunda via para a produção de espumas metálicas a partir de metal fundido é a adição homogênea de agente(s) expensor (es) no seu interior. O(s) agente(s) expensor(es) decompõem-se termicamente (resultante do calor do próprio metal fundido) dando origem à libertação de um gás, o qual é responsável pelo processo de expansão. A Shinko-Wire (no Japão) é a empresa que explora este processo, cujo o nome comercial do produto é a Alporas (figura 4A) [4].

No processo o cálcio (Ca) é usado para promover a estabilização do fundente (provavelmente com a formação de um intermetálico  $Al_4Ca$ ) e o hidreto de titânio ( $TiH_2$ ) actua como agente expensor decompondo-se termicamente libertando hidrogénio. As espumas de alumínio (de célula fechada) são produzidas em recipientes 2000 x 1000 x 600 (mm) aproximadamente e densidades obtidas são geralmente entre 0.25 e 0.33 g/cm<sup>3</sup>. Os blocos finais são cortados em chapas com a espessura desejada. A estrutura do poro é geralmente uniforme. Actualmente, estes painéis estão a ser vendidos para aplicações como painéis de isolamento de som em túneis rodoviários e em auditórios (figura 4B).

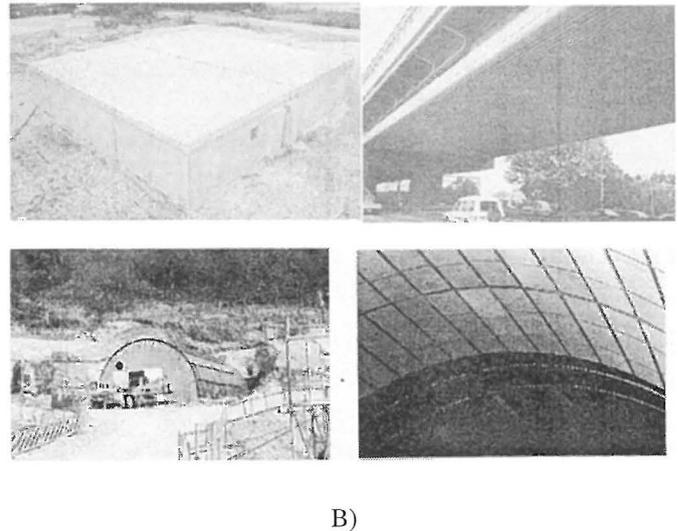
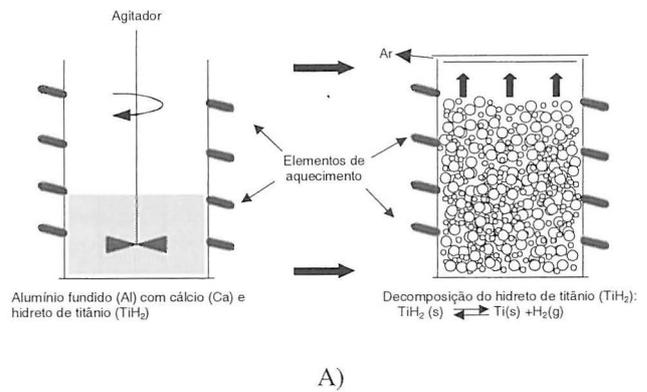
**1.2.1.2. Solidificação eutética de sólido - gás (processo GASAR)**

O processo GASAR [5], figura 5, foi desenvolvido na Ucrânia no Dnepropetrovsk Metallurgical Institute (DMI) e está a ser utilizado para produzir metais porosos (cobre, alumínio, níquel, berílio, molibdénio, cobalto, aço, bronze, ligas de aço, ligas de bronze) e cerâmicos porosos (vidro, alumina, alumina – magnésio). O processo consiste na fusão do metal (ou cerâmico) numa atmosfera de hidrogénio, que é posteriormente arrefecida através do ponto eutético, em que o hidrogénio é a fase gasosa no interior do metal. A solidificação eutética do gás e a nucleação dos poros ocorre simultaneamente como um resultado da difusão do hidrogénio gasoso no metal.

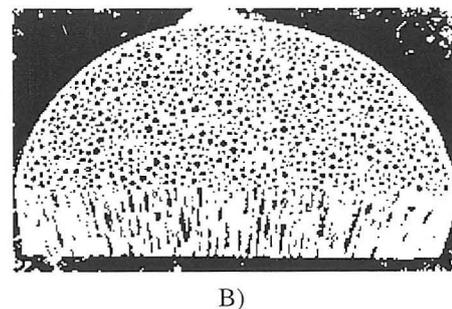
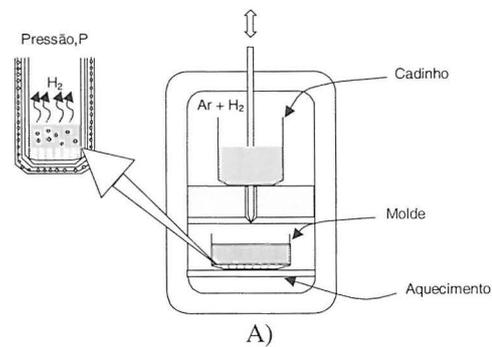
Este processo permite um bom controle das propriedades finais dos materiais porosos, nomeadamente a percentagem de porosidade, o tamanho e geometria dos poros e a sua orientação através da simples manipulação dos parâmetros do processo da seguinte forma:

- a percentagem de porosidade - é controlada pela manipulação da atmosfera de hidrogénio na câmara, desde que o ponto eutético dependa da pressão do sistema.
- o tamanho dos poros – é controlado pela manipulação da velocidade de arrefecimento, *i.e.*, uma elevada velocidade de arrefecimento diminui o tempo de difusão do hidrogénio no seio do metal, dando origem a tamanho de poros muito pequenos.
- a orientação dos poros – é controlada pela direcção do processo de arrefecimento.

Este processo permite obter materiais porosos com uma microestrutura uniforme desde que a temperatura e a pressão sejam ser apropriadamente coordenados. Este processo permite ainda o fabrico de materiais com uma porosidade graduada ou sólido alternativo e camadas porosas podem ser produzidos pela mudança das variáveis de controle durante a solidificação. Estruturas em camadas com bandas alternativas de sólido e



**Figura 4:** A) Processo de vazamento (Shinko-wire). B) Exemplo de aplicações reais de painéis em espuma alumínio para isolamento de som em auditórios e em túneis rodoviários, com o nome comercial de ALPORAS [4].



**Figura 5:** A) Solidificação eutética de sólido - gás (processo GASAR). B) Exemplo de uma estrutura de poros alongados obtida pelo processo GASAR [5].

materiais porosos são também possíveis. Deste modo, pelo controlo da pressão, velocidade de arrefecimento e a direcção do gradiente de temperatura aplicada durante a solidificação, podem então ser produzidas uma enorme variedade de estruturas porosas. Por exemplo, o arrefecimento de baixo ou de lado de um molde cilíndrico pode originar poros radiais e longitudinais. O tamanho de poros que podem ser obtidos através deste processo é de 5 mm a 10 mm e a porosidade pode variar de 0.05 a 0.75 pelo controlo da pressão da atmosfera de hidrogénio e da velocidade de solidificação. A gama de porosidade disponível nos materiais base específicos dependem evidentemente da solubilidade do hidrogénio no metal.

### 1.2.1.3. Método de fundição de precisão

O método de fundição de precisão inicia-se com uma espuma

polimérica, a qual deve ter a geometria e a estrutura porosa igual ao componente que se pretende fabricar. Esta espuma é então preenchida por uma suspensão de um material resistente ao calor, por exemplo uma mistura de mulite, resina fenólica e carboneto de cálcio. Seguidamente a mistura é seca e a espuma polimérica é removida por simples aquecimento. O metal fundido é então vazado para o interior da estrutura aberta resultante anteriormente. Finalmente, o material constituinte do molde é removido e a espuma metálica é então obtida, sendo uma imagem exacta da espuma polimérica com que se partiu. A empresa ERG (na Califórnia) produz espumas metálicas através deste processo, sob o nome comercial DUOCEL [6], em pequenas séries para tecnologia avançadas tais como semicondutores, aplicações criogénicas e outras aplicações específicas (figura 6B). As espumas obtidas através deste processo diferem das outras por terem as células abertas, que

i) Pre - forma ii) Queima do polímero iii) Infiltração do metal fundido iv) Remoção do material do molde

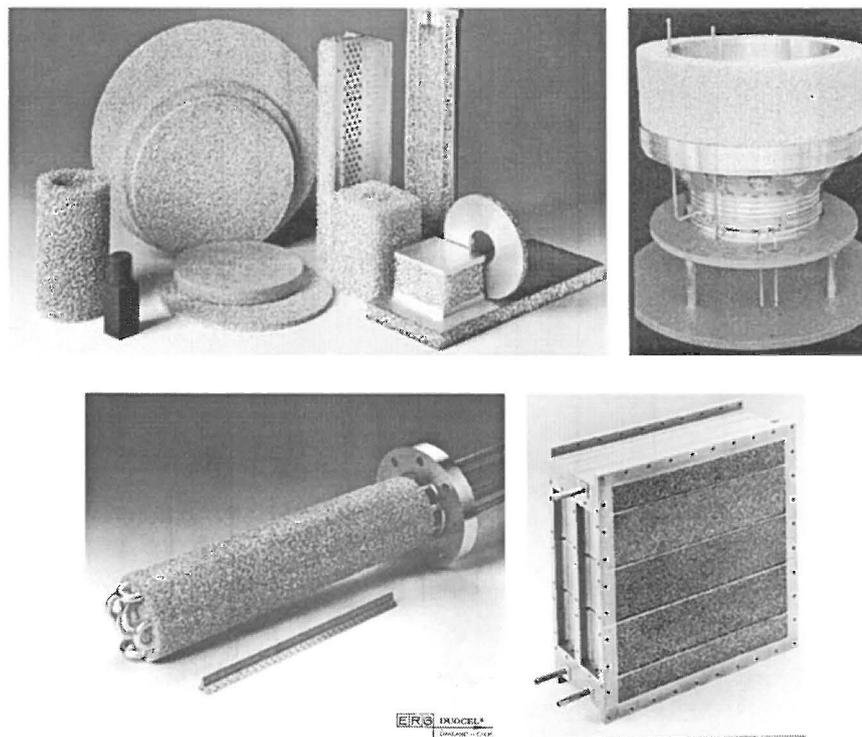
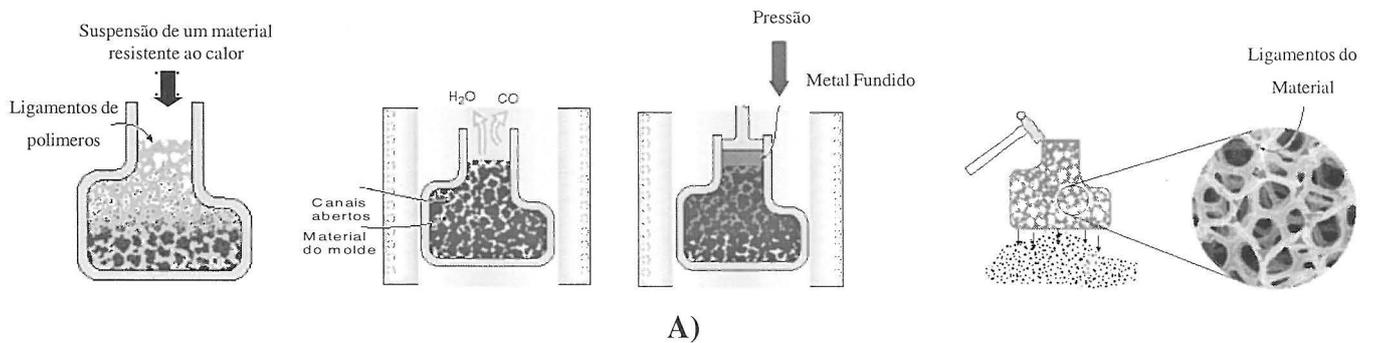
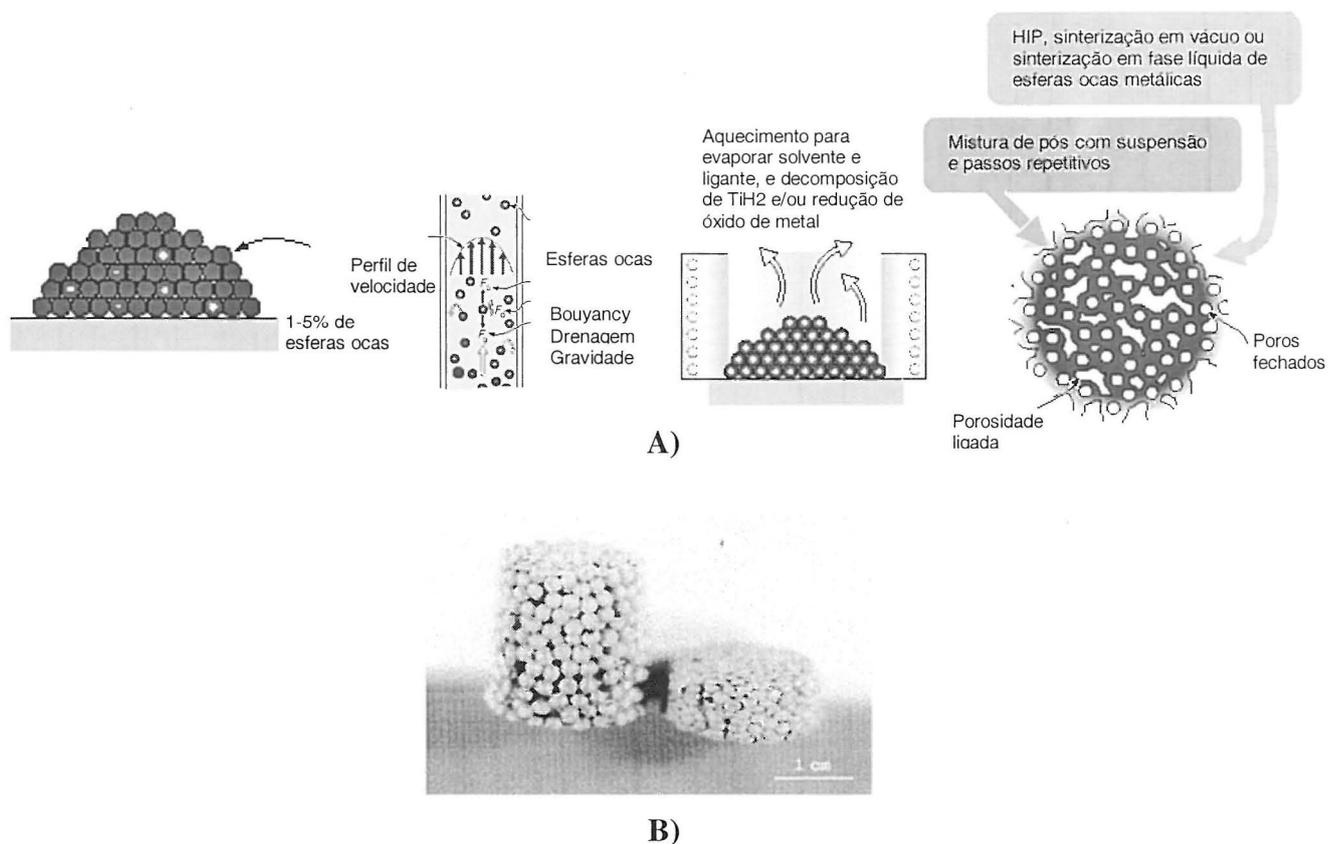


Figura 6: A) Método de fundição de precisão. B) Exemplos de componentes em espumas metálicas [6]

- i) Atomização de pós a gás      ii) Separação de pós ocios      iii) Vazamento de suspensão      iv) Consolidação



**Figura 7:** Espumas sintéticas usando cargas metálicas espaçosas [7].

permite a sua utilização como reservatórios de armazenamento de gases e líquidos ou de fluidez. O ERG tem um contrato com a NASA para produzir as estruturas de suportes mecânicos e permutadores de calor para a remoção de contaminantes no space shuttle. O Governo local e a empresa ERG trabalham conjuntamente para o tanque de fuel de hidrogénio para os autocarros. O tanque controla o hidrogénio libertado do LiH<sub>2</sub> depois de aquecido. Através deste processo de vazamento é possível produzir estruturas metálicas de elevada qualidade. A densidade dos poros dos materiais resultantes é de 2.5 a 16 poros por cm, correspondendo a uma gama de porosidade de 80-97%. Esta técnica permite produzir componentes de geometria complexa e partes massivas num processo de um passo.

**1.2.1.4. Espumas sintéticas usando cargas metálicas de espaçamento**

O vazamento de metal fundido á volta de grânulos inorgânicos ou a infiltração de metal fundido para esferas ocios de baixa densidade podem produzir metais porosos leves. Os grânulos podem ser introduzidos no metal fundido ou o metal fundido pode ser vazado para o interior do material de enchimento. A condutividade e a capacidade calorífica dos grânulos é geralmente muito baixa e não perturba o caudal de metal fundido. Devido à elevada tensão superficial do fundente, o molhamento do metal dos grânulos é um problema e em geral os interstícios entre os grânulos poderão não ser totalmente preenchidos. Uma

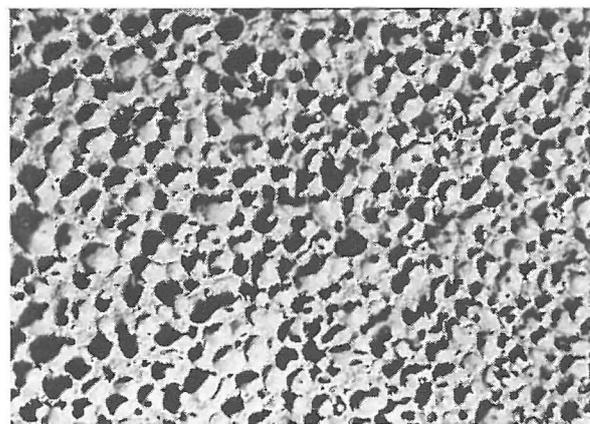
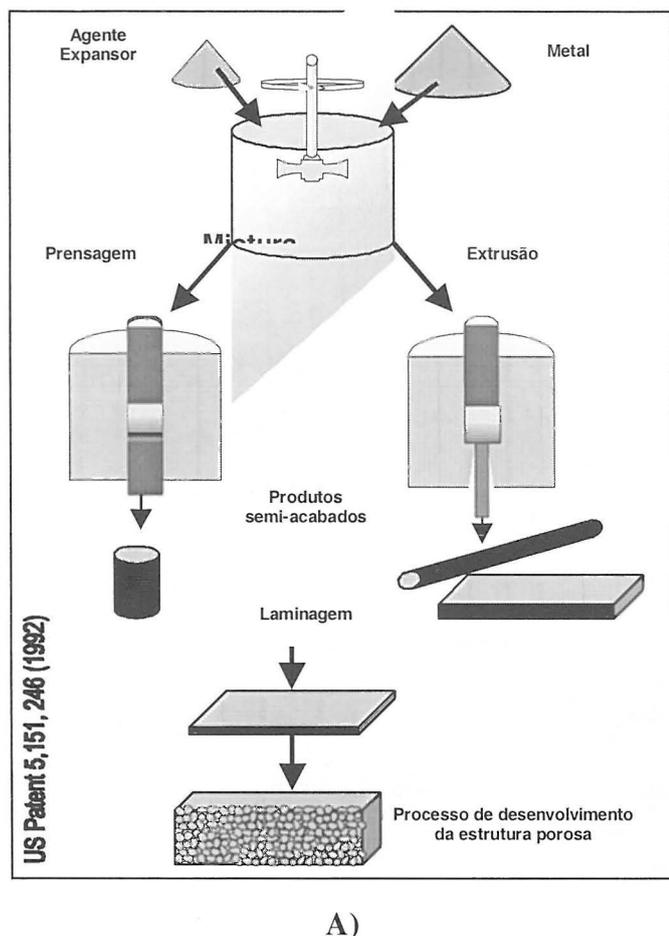
atmosfera de vácuo ou uma pressão externa facilita a infiltração significativamente. A gama de metais que podem ser processados desta forma inclui o alumínio, o zinco, o magnésio, o chumbo, a prata ,... As partes de forma predefinida podem ser fabricados por moldes de geometria apropriados, figura 7.

**1.2.2. Produção de espumas metálicas a partir de pós metálicos**

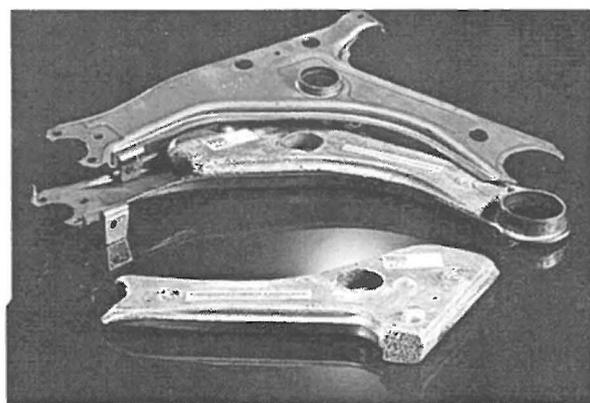
As espumas metálicas podem ser produzidas a partir de pós metálicos através de pulverotecnologia, pelo método de aprisionamento de gás ou pela expansão de suspensões de pós.

**1.2.2.1. Pulverotecnologia**

Um dos processos de fabrico de espumas metálicas por pulverotecnologia foi desenvolvido e patenteado nos princípios dos anos 90 no Fraunhofer Institute for Applied Materials Research em Bremen (Alemanha) [8]. O processo (ver figura 8) consiste na compactação a quente de uma mistura de pós de metal e de agente expensor, por forma a obter produtos semiacabados “isentos” de porosidade, que se designam por materiais precursores. A compactação pode ser conseguida por um dos métodos vulgarmente utilizado para o efeito, nomeadamente prensagem unidireccional, prensagem isostática a quente e extrusão. Estes produtos semiacabados poderão ainda ser trabalhados, através de processo de laminagem. Segue-se a



B)



C)

**Figura 8:** A) Processo de fabricação de espumas metálicas por pulverotecnologia - Processo-Fraunhofer. B) Microestrutura C) Componente automotível com a visualização do molde usado para o seu fabrico [8].

etapa do processo de expansão, *i.e.*, a etapa de desenvolvimento da estrutura altamente porosa, a qual ocorre a temperaturas acima da temperatura de fusão do metal. Após atingir a expansão requerida, procede-se ao arrefecimento relativamente rápido dando origem a um sólido altamente poroso de estrutura fechada. As espumas metálicas resultante deste processo tem uma estrutura porosa fechada e uma superfície densa que aumenta as propriedades mecânicas destes materiais. Este processo permite a obtenção de espumas metálicas de geometria complexa, se o processo de desenvolvimento da estrutura porosa for efectuado dentro de moldes com a geometria requerida (ver figura 8C). As espumas de alumínio obtidas através deste processo apresentam valores de densidade entre  $0.5 \text{ g/cm}^3$  e  $1.0 \text{ g/cm}^3$ , conseguindo-se mesmo valores de densidades mais baixos, na ordem dos  $0.2 \text{ g/cm}^3$ . Actualmente estas espumas de alumínio tem vindo a ser testadas como componentes automóveis e em aplicações aeroespaciais.

Este processo está a ser comercializado pelas empresas Shunk (na Alemanha), Mepura (na Áustria), com os nomes comerciais Foaminal e Alulight respectivamente.

### 1.2.2.2. Espumas a partir de suspensões

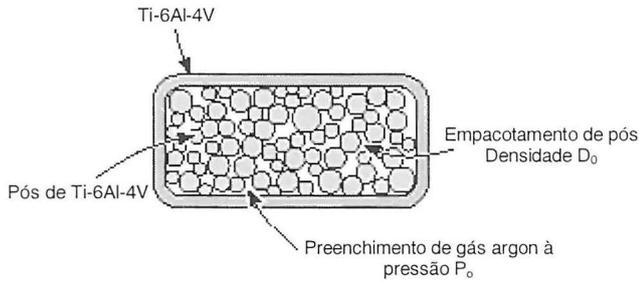
O método mais usual de produção de materiais porosos com porosidade aberta ou inter-ligada consiste na sinterização de pó de metal, sem sofrer compactação. O molde é preenchido por

pó e sinterizado sob condições que preservem a máxima percentagem de porosidade. Dependendo do tamanho e da forma das partículas de metal, os valores da densidade relativa variam entre 40% e 60% (relativamente à densidade teórica). É comum a adição de certos agentes poliméricos (*spacing agent*), cuja principal função é aumentar a percentagem de porosidade das espumas. Estes agentes podem ser removidos durante ou após a etapa de sinterização. Como exemplo, podemos mencionar o desenvolvimento de espumas de níquel, pela adição de metil-celulose (como *spacing agent*) a pós finos de níquel, obtendo-se valores de porosidade que variam entre 70 e 90%. Uma variante deste processo compreende a preparação de uma mistura de pó de alumínio (< 400 mesh) e um aditivo orgânico. A mistura sofre previamente ataque químico. A mistura é seca e subsequentemente polimerizada durante 2 horas a  $100^\circ\text{C}$  com o objectivo de aumentar a resistência mecânica da espuma. Mas, como a ligação metálica não pode ser alcançada totalmente através deste processo, a resistência mecânica das espumas resultantes deste processo é relativamente baixa.

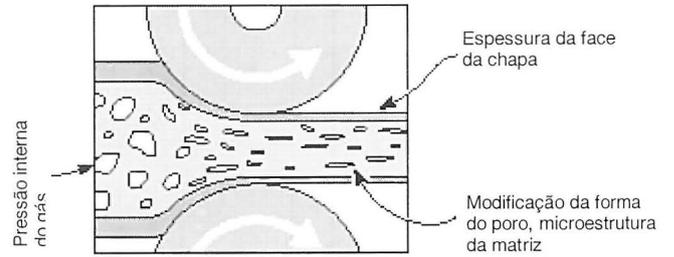
### 1.2.2.3. Aprisionamento de gás

Os metais podem também ser expandidos sem a adição de agente propulsor, pela compressão de pós num material precursor, permitindo que o gás seja aprisionado na estrutura metálica durante a compactação. Aquecendo o material precursor então

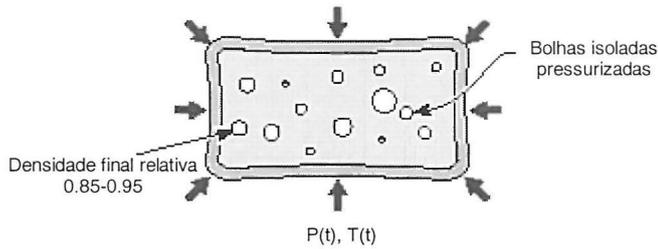
i) Preparação dos pós



ii) Prensagem isostática a quente (consolidação)



iii) Laminagem a Quente



iv) Tratamento térmico (Expansão)

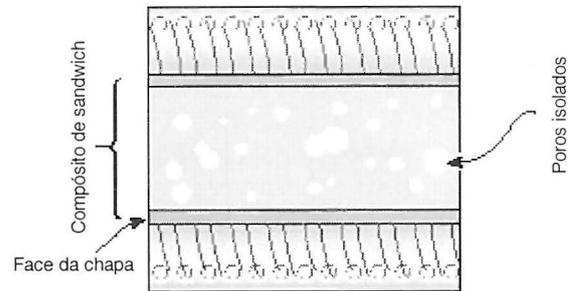
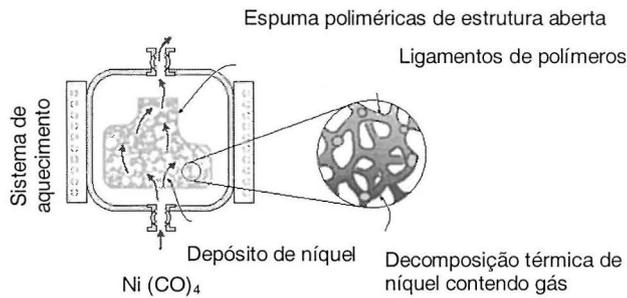


Figura 9: Processo de aprisionamento de gás [9].

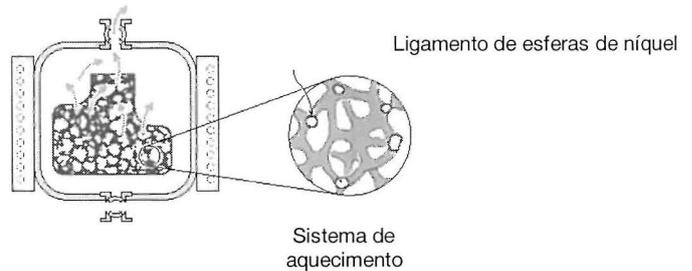
conduz a uma expansão do metal devido a pressão interna criada pelo gás aprisionado, figura 9. O processo tem sido otimizado

principalmente para estruturas porosas de titânio. Pós de titânio preenchem um contendor que poderá ser evacuado e re-preenchido

i) Deposição de vapor de níquel



ii) Queima do polímero



iii) Sinterização

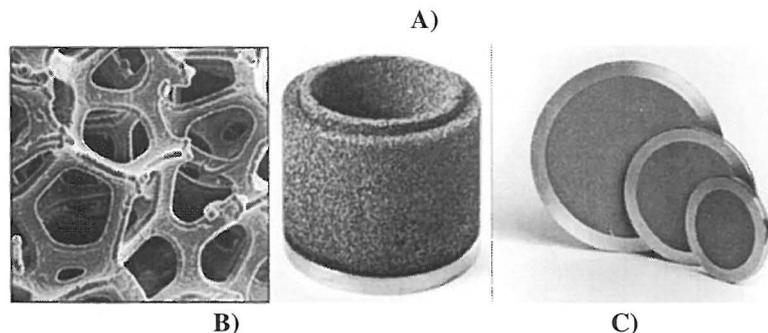
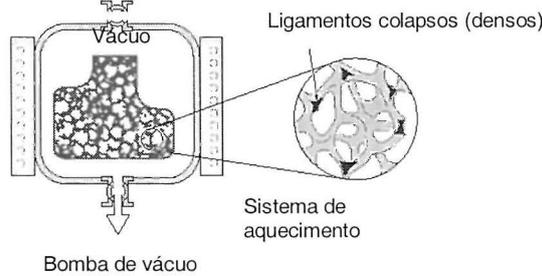


Figura 10: A) Processo de fabrico (SEAC International - Recemat) B) microestrutura C)Componentes em espuma metálica [10].

de argon. O contentor é então densificado usando prensagem isostática a quente, seguida de uma redução da espessura usando a laminagem a quente. Finalmente procede-se à expansão por meio de um apropriado tratamento de calor. A companhia Mc Donnell Douglas (agora Boeing) tem vindo a adaptar o método para o fabrico de painéis Sandwich de grandes dimensões [9].

### 1.2.3. Produção de espumas metálicas a partir de partículas ionizadas

Espumas metálicas poderão ser produzidas através de métodos de deposição, i.e. por deposição química de vapor (CVD-chemical vapor deposition), deposição física de vapor (PVD-physical vapor deposition) ou deposição directa de vapor (DVD-direct vapor deposition). Um dos métodos mais conhecido dentro destas técnicas, consiste na metalização de uma espuma de poliuretano de estrutura aberta. O precursor da espuma metálica é reticulado, de forma a destruir todas as membranas existentes na espuma, e subsequentemente é revestida com uma camada electricamente conductiva por imersão em soluções especiais de grafite por electrodeposição ou técnicas de PVD [10]. A espuma pré-revestida pode ser electrodepositada até à espessura desejada. O passo final deste processo consiste em remover o substrato da espuma de poliuretano por decomposição térmica ou vaporização, figura 10. Embora este método possa ser aplicado na maioria dos metais (sendo os preferenciais o níquel e o níquel-crómio), é um processo de elevado custo e não é aplicável no caso das espumas de alumínio. Estas espumas tem vindo a ser comercializadas sob os nomes comerciais Retimet (Dunlop Ltd, na Grã-Bretanha), Celmet (Sumitoto, no Japão) e Recemat (na Holanda). Os materiais resultantes tem densidades no intervalo de 0.2 a 0.5 g/cm<sup>3</sup>.

### Conclusões

Este artigo é a primeira parte de dois artigos que pretende divulgar as potencialidades das espumas metálicas nos diferentes sectores industriais, iniciando-se por descrever diferentes processos de fabrico para a sua produção. A segunda parte irá dar a conhecer as principais propriedades e as potenciais aplicações propriamente dita.

### Referências:

- [1] M. Judge, "Foam sweet foam", *New Scientist*, 27 Sep. (1997), 34-37
- [2] M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, "Metal Foams - A design guide", Butterworth-Heinemann (2000)
- [3] J. Banhart, M. F. Asbhy, N. A. Fleck (Editors), *Proc. Internacional Conference: Metal Foam and Porous Metal Structures*", MIT Verlag, 14-16 June (1999), Bremen, Germany
- [4] Alporas product information, Shinko Wire Co. Ltd. Japan (undated)
- [5] A.E. Simone, L. J. Gibson, "The tensile strength of porous copper made by the Gasar process", *Acta Materialia*, vol. 44, n. ° 4, (1996), 1437-1447
- [6] Duocell product information, ERG INC. Oakaland G., USA (1996)
- [7] <http://www.mse.gatech.edu/sphere.html>
- [8] J. Baumeister and H. Schrader (IFAM), "Methods for manufacturing foamable metal bodies", 29 Sept. 1992, Patent n.º US5151246, Convention date 31 May (1991), Patent n.º EP0460392, Convention date 26 Apr. (1991)
- [9] J. Banhart, H. Eifert (Editors): *Metal foams – Proceedings of the Fraunhofer USA metal foam Symposium*, 7-8 Oct. (1997), Delaware, 91 pages
- [10] J. Banhart, M. F. Asbhy, N. A. Fleck (Editors), *Proc. Internacional Conference: Metal Foam and Porous Metal Structures*", MIT Verlag, 14-16 June (1999), Bremen, Germany.