

ESTUDO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MATERIAL CELULAR POR INFILTRAÇÃO DE AL EM PRÉ-FORMAS POROSAS

Fábio Gatamorta, fabiog@fem.unicamp.br¹
Henrico Gouvêa da Silva, henrico.gouvea@gmail.com¹
Maria Helena Robert, helena@fem.unicamp.br¹

¹Unicamp, Rua Mendeleiev s/n - Cidade Universitária "Zeferino Vaz" - Cep 13083-970 - Campinas – SP.

Resumo: O desenvolvimento de materiais celulares têm apresentado avanços significativos nos últimos anos com relação a novos processos de fabricação e caracterização. A combinação de suas propriedades fez crescer sua aplicação industrial, elevando esses materiais ao posto de nova classe de materiais para engenharia. Atualmente os processos de fabricação desses materiais mais utilizados envolvem técnicas de metalurgia do pó com uso de agentes espumantes para produção de precursores que promovem a espumagem pela gaseificação controlada. Devido a sua grande área superficial, as espumas são sistemas instáveis e por isso fatores como a estabilização do sistema e a retenção do elemento gasoso no interior do líquido são fundamentais para o sucesso da operação. A dificuldade de controle dos parâmetros de processos na espumagem dos líquidos iniciou uma busca por processos alternativos. Este trabalho tem como objetivo a produção de material celular metálico (ligas porosas) por infiltração, realizada através do processo de tixoforjamento da liga de alumínio A2011 (Al-5,5%Cu) no estado semi-sólido em pré-formas porosas sinterizadas de micro-esferas de vidro. Os resultados mostram a possibilidade de obtenção desses produtos que são relativamente homogêneos em todo seu volume; não foi detectada contaminação da liga pelo material das pré-formas empregadas. A qualidade do produto foi dependente da microestrutura da liga utilizada e dos parâmetros de processamento, cuja falta de controle pode resultar em produtos com distribuição heterogênea de poros e ruptura da pré-forma sinterizada.

Palavras-chave: materiais celulares, espumas metálicas, tixoconformação, semi-sólido, esferas de vidro.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a sociedade tem necessitado de um contínuo desenvolvimento tecnológico como forma de suprimir os desafios que a própria evolução humana impõe. Um dos fatores evolutivos ao longo da história mostrou ser o desenvolvimento de novos materiais com características necessárias a cumprir novos desafios que se apresentam. Dessa forma o estudo e o desenvolvimento de novos materiais e de novos processos se apresentam como essenciais nos dias atuais.

Seguindo essa premissa tem ocorrido, nas últimas décadas, um expressivo crescimento na aplicação dos materiais celulares, em substituição aos materiais convencionais. Os materiais celulares são materiais que possuem espaços vazios, chamados de poros ou células, distribuídos regularmente no interior de sua matriz ou material principal e combinam propriedades não encontradas nos materiais convencionais (Degischer, 2002). O desenvolvimento de novas formas de processamento, de modo a obter matérias celulares, tem como objetivo maximizar algumas das propriedades finais do produto. Para a produção de espumas e esponjas metálicas, diversos tipos de metais têm sido empregados sendo predominante o uso do Al e suas ligas, já amplamente conhecidas e estudadas, e que se mostram mais adequadas aos processos atualmente utilizados na produção dos materiais celulares.

Um dos processos de fabricação de materiais metálicos celulares mais empregados envolve a compactação de misturas de pós da liga e de agentes espumantes, seguido de aquecimento para a fusão da liga e sua espumagem pela gaseificação controlada do agente espumante (Wadley, 2005). A evolução controlada dos elementos que formam gases *in situ*, quando submetidos a elevadas temperaturas podem ocorrer pelo uso de diferentes agentes espumantes e diferentes parâmetros de processo (Banhart, 2005).

Com o objetivo de obter diferentes arquiteturas de poros, como por exemplo, poros abertos e interconectados foram desenvolvidos outros processos de obtenção de metais celulares. Um desses processos envolve a solidificação de líquidos em espaços confinados entre partículas ou reticulados de material não reagente com o metal, o qual é retirado após o processamento; estes materiais são chamados bloqueadores (San Marchi, 2002). O produto obtido é caracterizado como material celular de poros abertos ou esponjas. Existem ainda processos que utilizavam a tecnologia

dos semi-sólidos, como o uso de processos de tixoconformação sobre agentes bloqueadores, para produção de materiais com diferentes arquiteturas de poros. A tixoconformação ou a conformação do material da liga no estado semi-sólido e que ocorre entre a temperatura *solidus* e *liquidus* do material possibilita maior reprodutibilidade e maior controle, melhorando a qualidade do produto final (Delbin, 2006). A busca pelo maior controle na arquitetura de poros implica na melhoria de propriedades como a absorção acústica cujas características dependem de características como porosidade, morfologia dos poros, tamanho dos poros e resistência ao fluxo de ar (Han, 2003).

A característica de baixa densidade fez com que, também na indústria aeronáutica, os materiais celulares a base de ligas de Al, em particular as espumas, encontrassem utilização na fabricação de painéis estruturais (Leyda, 2003). Na construção civil esta classe de materiais encontra aplicações promissoras dadas à capacidade de isolamento térmico e acústico que proporcionam (Shinko, 1998).

Este trabalho, dada a importância dos materiais metálicos celulares como materiais de engenharia, objetiva contribuir para o desenvolvimento desta classe de materiais, investigando uma das técnicas para sua fabricação, e a utilização de um novo tipo de pré-forma de agente bloqueador enfrentando as dificuldades ainda inerentes aos processos de fabricação empregados para sua produção

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizada a liga AA2011 de composição básica Al-5,5%Cu (ASM, 1993). A escolha da liga deve-se ao fato da liga apresentar um intervalo de temperaturas, entre as linhas *solidus* e *liquidus*, adequado aos parâmetros operacionais do processo de tixoconformação. Foram adquiridas no mercado barras extrudadas que foram seccionadas para a obtenção de corpos de prova cilíndricos de dimensões com diâmetro de 43,5 milímetros e altura de 9 milímetros, para produção de pastas tixotrópicas.

Para a caracterização da matéria prima e para a verificação de sua homogeneidade estrutural foram realizadas análises das microestruturas em corte transversal ao longo do raio da barra. A figura 1 mostra a micrografia da liga AA2011 como recebida (extrudadas). Pode-se observar que sua estrutura não dendrítica apresenta grãos equiaxiais pequenos que não são típicos de fundição convencional. Essa microestrutura é resultado de um processo de recristalização que acontece durante a extrusão. A estrutura apresenta variações de dimensões dos grãos: valores da ordem de 10 μ m na superfície, que apresentam crescimento na direção do raio até chegarem a 130 μ m no centro da barra. Esse gradiente nas dimensões dos grãos é resultado do regime térmico durante a conformação. O interior da barra apresenta um resfriamento lento, resultando no crescimento dos grãos. No interior da fase primária α pode-se observar a presença da fase θ (CuAl₂), formada por precipitação durante resfriamento até a temperatura ambiente.

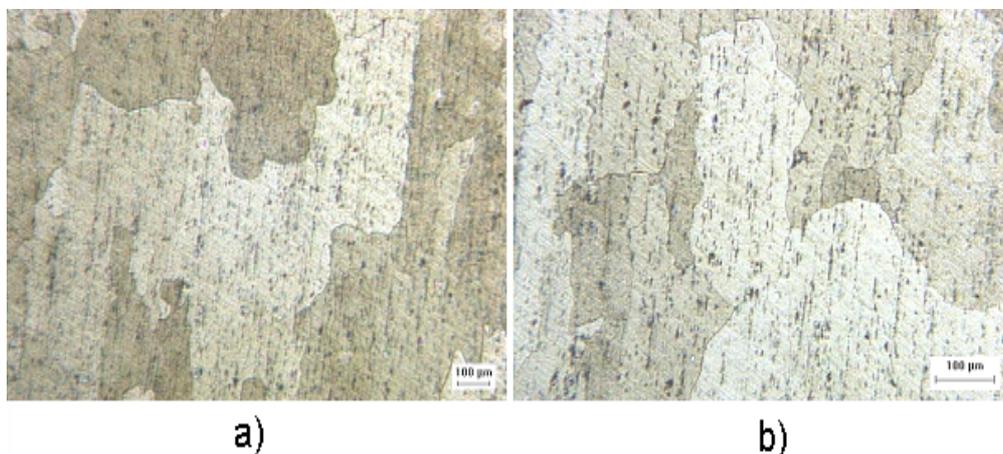


Figura 1: Micrografias da liga AA2011 comercial: (a) 50x; (b) 100x.

Para um bom escoamento da pasta tixotrópica no processo é necessário a presença de glóbulos de pequenas dimensões, que pode ser obtida por fusão parcial controlada (FPC) de estruturas originalmente refinadas ou deformadas. A matriz metálica tratada por FPC altera sua microestrutura apresentando uma estrutura em forma de rosetas ou glóbulos que é característica de pastas tixotrópicas.

Para determinação das temperaturas de tixoconformação foi utilizado o software Thermocalc que apresenta a variação de fração líquida da liga em função da temperatura. Foi usada base de dados TTAL5 com cálculos utilizando a equação de Scheill. A figura 2 apresenta a curva da variação de fase líquida com a temperatura da fase sólida da liga e indica como temperatura *liquidus* $T_l = 642^\circ\text{C}$ e temperatura *solidus* $T_s = 524^\circ\text{C}$.

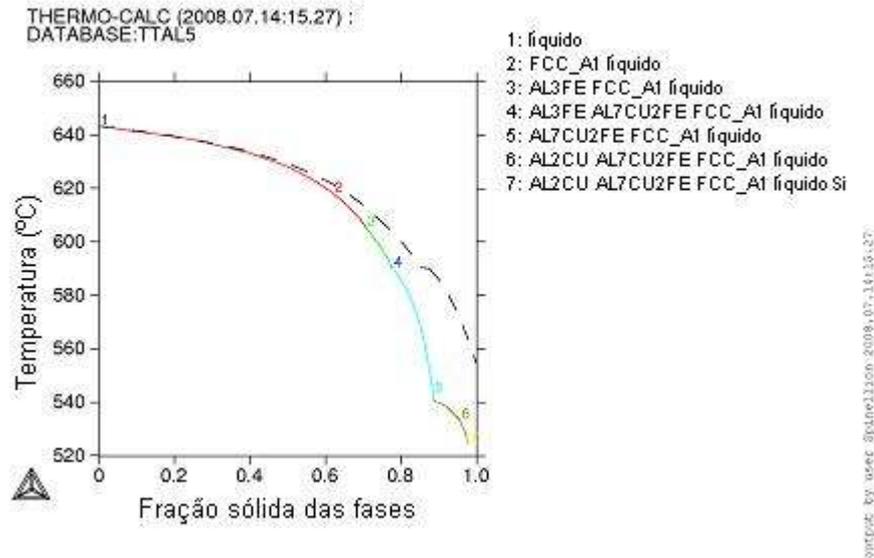


Figura 2: Variação da fração sólida da liga AA2011 em função da temperatura.

A pré-forma utilizada é composta de micro-esferas de vidro sinterizadas por tratamento térmico em temperatura de 780°C pelo tempo de 30 minutos. A granulometria das esferas apresentou variação entre 10 e 75 µm. A figura 3 apresenta a microscopia eletrônica de varredura das pré-formas sinterizadas de micro-esferas de vidro. Ela revela o tamanho dos interstícios e a variação de tamanho das esferas.

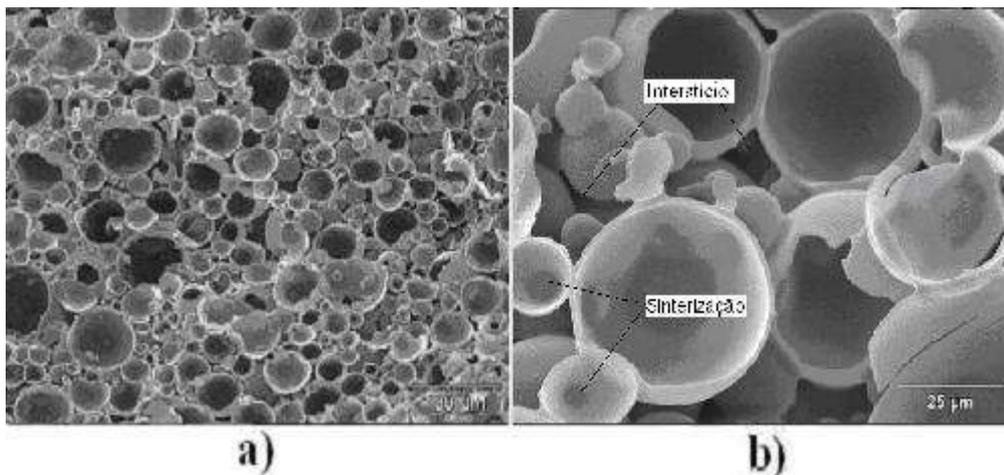


Figura 3 – Microscopia eletrônica de varredura das pré-formas sinterizadas. a) aspecto geral das pré-formas; b) detalhe mostrando a sinterização e os interstícios.

A produção das amostras através de tixoforjamento utilizou o sistema compreendido pelos seguintes equipamentos: prensa equipada com sistema de aquisição de dados (monitoramento de força e temperatura), forno de aquecimento e ferramental para tixoforjamento (moldes e punção).

Os materiais foram posicionados na seguinte seqüência: inicialmente amostra cilíndrica da liga no interior do molde, de dimensões 44,5mm de diâmetro por 10mm de altura, seguida da pré-forma sinterizada, e em seguida outra amostra da liga, de mesmas dimensões que a amostra colocada como base. Termopares de controle (tipo K) foram inseridos e conectados ao sistema de aquisição de dados, para monitoramento do processo.

Na Figura 4 é apresentado o esquema de montagem do sistema para o ensaio; pode-se observar o posicionamento das amostras de alumínio, bem como da pré-forma e o posicionamento dos termopares utilizados para controle de todo o processo.

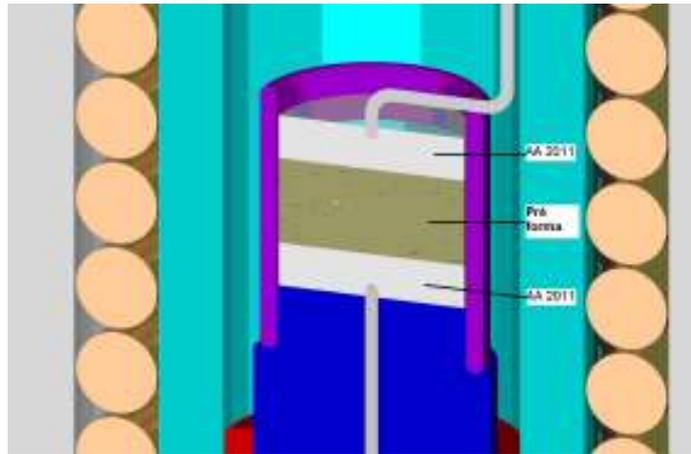


Figura 4 – Esquema de montagem do sistema para produção de material celular.

A operação de tixoforjamento foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, o conjunto matriz, punção, corpos de prova e bloqueadores foram aquecidos a diferentes temperaturas no interior da zona *solidus/liquidus* da liga, para a promoção da modificação da sua estrutura e obtenção do estado pastoso tixotrópico. O aquecimento foi a uma taxa de aquecimento inicial de 5,5°C/min e final de 0,4°C/min. Depois de atingida a temperatura especificada, esta foi mantida constante por 5 minutos para garantir a completa globularização da fase primária da pasta e da homogeneização da temperatura, sendo finalmente acionada à prensa hidráulica, a uma velocidade de 2,5mm/s. A força aplicada foi monitorada com o uso de célula de carga e sistema de aquisição de dados, numa frequência de aquisição de 5Hz e total de 300 pontos. Para a completa infiltração a força do punção foi mantida por um período de 2 minutos.

O processo de infiltração ocorre pela força exercida pelo punção sobre os discos da matriz metálica em estado semi-sólido que é infiltrado nos interstícios entre as micro esferas de vidro sinterizada. A figura 5 esquematiza esse processo.

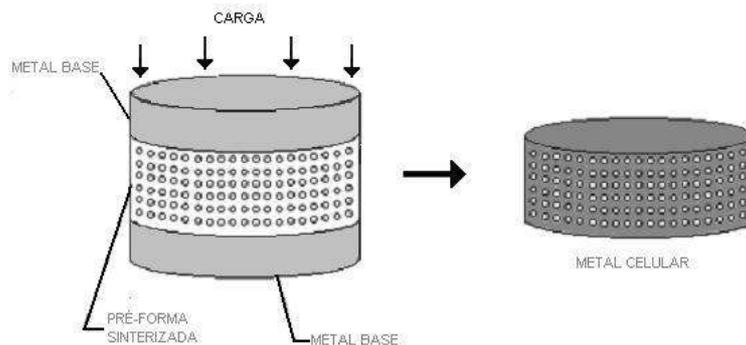


Figura 5 – Representação do processo de infiltração da matriz metálica sobre a pré-forma.

Foram produzidas doze amostras cilíndricas de material celular de dimensões 44,5mm de diâmetro e altura média da ordem de 10mm, para cada uma das condições de processamento estudada (temperaturas de tixoforjamento de 635°C e 640°C e uso de material comercial com e sem deformação a frio de 40%). A Figura 6 apresenta esquematicamente as condições experimentais utilizadas.

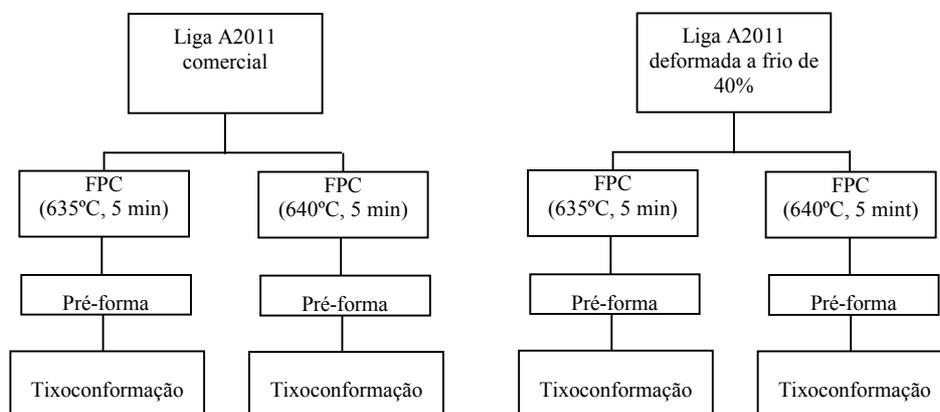


Figura 6 – Fluxograma dos experimentos efetuados (t=5min).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 7 é possível observar a estrutura de rosetas ou glóbulos obtidos por FPC na temperatura de 640°C, a partir da estrutura extrudada.

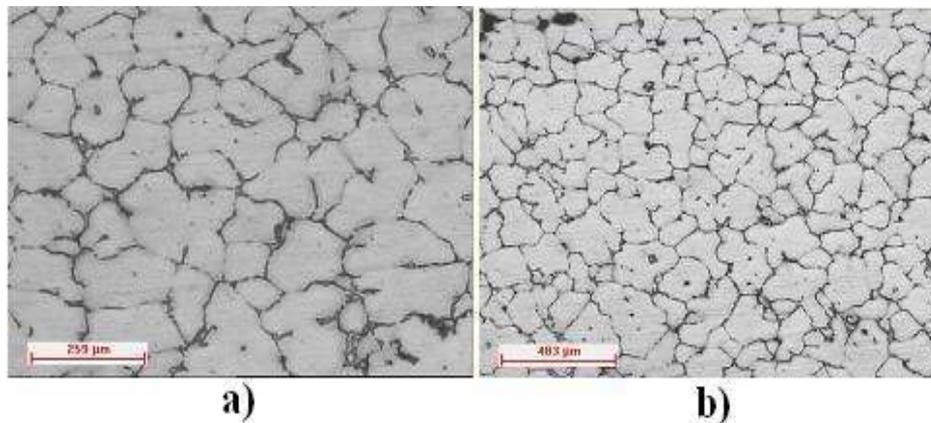


Figura 7: Micrografia da liga AA2011 tratada por FPC na temperatura de 640: (a) 50x; (b) 100x

Nos ensaios realizados com a liga em seu estado comercial tanto na temperatura de 635°C (fração líquida de 60%) quanto na temperatura de 640°C (fração líquida de 80%) não foi possível ocorrer a completa infiltração da matriz metálica na pré-forma. Um dos motivos dessa dificuldade é a incompatibilidade entre o tamanho de grão e o tamanho dos interstícios entre as micro esferas sinterizadas. Na figura 8 é apresentada uma amostra com defeito de infiltração onde é possível observar a ruptura da pré-forma com preenchimento da trinca formada e um detalhe de início de infiltração.

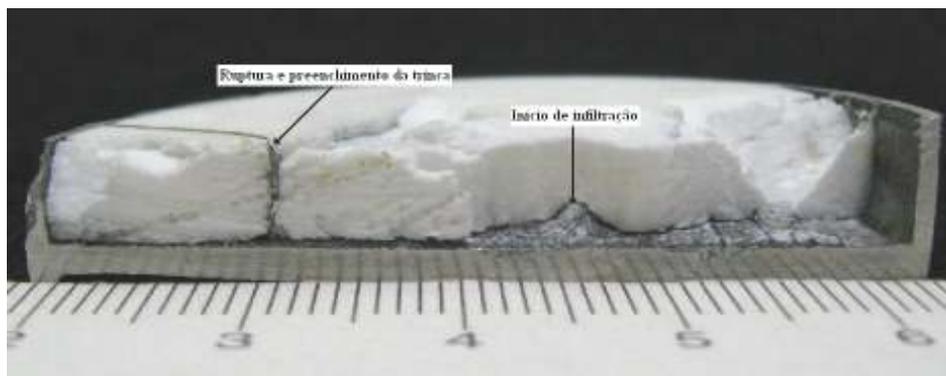


Figura 8 – Amostra com defeito de infiltração: a) ruptura da pré-forma com preenchimento da trinca; b) início de infiltração.

Em uma segunda etapa foram realizados os ensaios com a matriz metálica depois de sofrer uma deformação a frio de 40%. Nessa segunda etapa os ensaios de FPC foram realizados com as temperaturas de 635°C (fração líquida de 60%) e na temperatura de 640°C (fração líquida de 80%) e observou-se a completa infiltração da matriz metálica na pré-forma onde foram obtidos os produtos. O uso da deformação a frio e do tratamento por FPC ativa o mecanismo de recristalização e promove o refino do grão da estrutura. Com a diminuição do tamanho dos grãos a infiltração da matriz metálica na pré-forma é facilitada promovendo seu completo preenchimento. A figura 9 apresenta em (a) a pré-forma entre os discos da matriz metálica com deformação a frio de 40% e em (b) o produto obtido após a infiltração da pasta tixotrópica pelo processo de tixoconformação.

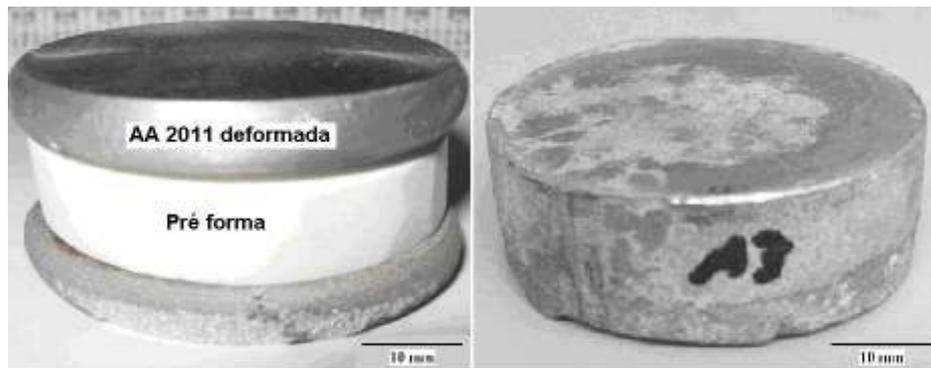


Figura 9 – (a) preparo e ensaio de tixoconformação com material deformado a frio em 40% com a pré-forma entre os discos da matriz metálica; (b) produto obtido após a infiltração da pasta tixotrópica pelo processo de tixoconformação.

As curvas de força de infiltração com o tempo, durante o processo de infiltração, são representadas na figura 10. Pode-se notar os baixos valores típicos de processo de conformação no estado semi-sólido.

Para a infiltração da liga foram utilizadas forças de pressão superiores aos processos de produção de esponjas pelo processo de tixoconformação com bloqueadores de NaCl (Delbin, 2006). Esse aumento se deve ao fato de que a pré-forma possui interstícios menores que dificultam a infiltração. A figura 10 apresenta os valores utilizados de força para as tixoconformações com a matriz metálica deformada em 40% a frio na temperatura de 635°C que representam uma fração líquida de 60%.

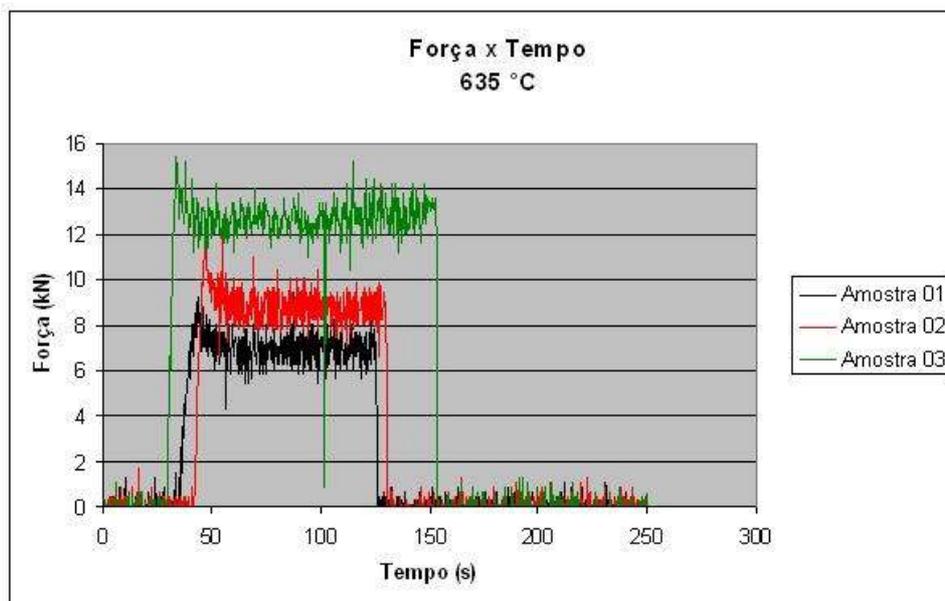


Figura 10 - Valores utilizados de força para as tixoconformações com a matriz metálica deformada em 40% a frio na temperatura de 635°C

Para a infiltração da matriz metálica pelo processo de tixoconformação foram usados também os tratamentos de FPC na temperatura de 640°C. As forças necessárias para a infiltração foram próximas, mas inferiores às forças utilizadas no tratamento com a temperatura de 635°C. Esse fator é explicado pela porcentagem de fração líquida que, nesse caso, é de 80% e é superior ao empregado na temperatura usada anteriormente. A figura 11 apresenta os valores de força empregados na tixoconformação na temperatura de 640°C

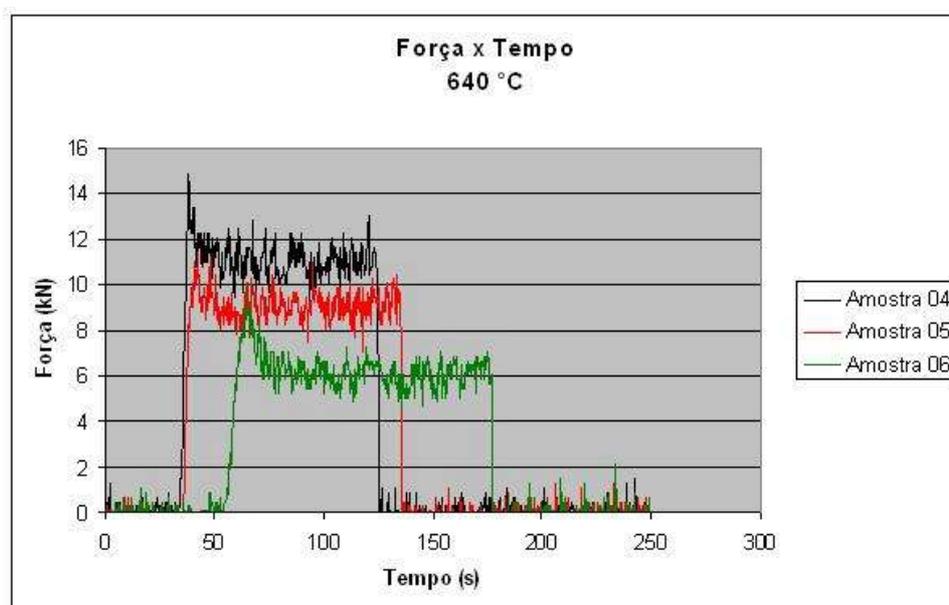


Figura 11 - Valores utilizados de força para as tixoconformações com a matriz metálica deformada em 40% a frio na temperatura de 640°C

4. CONCLUSÕES

É viável a produção de espuma metálica com o uso da tecnologia de semi-sólidos, pela conformação da pasta tixotrópica em pré-formas sinterizadas de micro esferas de vidro não-removíveis. O produto obtido apresenta um aspecto geral (acabamento e dimensões) aceitável.

A utilização de pré-formas sinterizadas de micro esferas de vidro não-removíveis resulta na quebra de algumas esferas durante o processo pelo uso da pressão de conformação durante o processo onde uma pequena variação mostrou-se importante.

Para que a infiltração seja completa é necessário que a pasta tixotrópica contenha partículas sólidas com dimensão compatível com os interstícios formados entre as micro esferas sinterizadas. A redução no tamanho de grãos da matéria-prima pelo processo de deformação a frio e recristalização mostrou necessária com resultados satisfatórios para o processo utilizado.

A força necessária para a infiltração da matriz metálica nas pré-formas sinterizadas tem relação direta com a fração líquida empregada no processo e com a relação entre o tamanho médio dos grãos da matriz metálica em seu estado semi-sólido e o tamanho dos interstícios entre as micro esferas sinterizadas.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ pela bolsa de Iniciação Científica do aluno Henrico Gouvêa Silva.

6. REFERÊNCIAS

- (2) - Degischer, H. P., Kriszt, B. Handbook of cellular metals – Production, processing, applications, Ed – Wiley-VCH, Weinheim, 2002, 373p.
- (3) - Wadley, N. G. H., Cellular metals manufacturing. Advanced engineering materials, V.4, n.10, 2002, pp. 726-733.
- (4) - Banhart, J.; Babcsan, N.; Leitmeier, D.; Metal foams - high temperature colloids Part I. Ex situ analysis of metal foams. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, v. 261, p. 123–130, 2005.
- (5) - San Marchi, C., Mortensen, A., Infiltration and replication process for producing metal sponges, Handbook of cellular metals, production, processing, applications, Wiley-WCH, Germany, 2002.
- (6) - Delbin, D., Estudo da viabilidade de produção de esponjas da liga A2011 a partir do estado semi-sólido, *Tese de Mestrado*, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- (7) Han, F., Seiffert, G., Zhao, Y., Gibbs, B., Phys, J. D., Appl. Phys. 36, 2003, pp. 294-302.
- (8) - Leyda, B., Applications for open-cell metallic foams, MRS Bulletin, v.28, n.4, 2003, pp. 292-293.
- (9) - Shinko, W., Co., Japan product information “Alporas”, 1998. In Banhart, J., Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foam. Progress in Materials Science, 2001, pp. 559-632.
- (10) - ASM Metal Handbook – Vol. 2 – Properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials, November, 1993, p. 15-28

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Abstract: The development of Cellular materials have showed significant advances in the last years, related to their new process to produce and characterization. Their property set made their industrial application grow, elevating those materials to the level of a new class of engineering materials. Nowadays, the most used manufacturing processes of those materials involve powder metallurgy, using foaming agents to produce precursors, which promote foaming by controlled gaseification. Because of their high surface area, foams are unstable systems, and therefore factors such as system stabilization and restraint of the gaseous elements inside the liquid are fundamental for the operation success. The difficulty of process parameter control in the foaming of liquids lead to a search for alternative processes. This work aims to produce cellular metallic material (porous alloys) by infiltration through the process of thixocasting the A2011 (Al-5,5%Cu) aluminum alloy in semi-solid state into sintered porous preforms of glass microspheres. The results show the possibility of obtaining those products, which are relatively homogeneous in volume; it was not detected contamination of the alloy by the preform material. The product quality depended on the alloy microstructure and the process parameters. The lack of control of them can result in products with heterogeneous distribution, after the rupture of the sintered preform.

Keywords: *cellular materials, metallic foam, thixoforming, semisolid, glass beads*