

# PROPOSTA DE UM NOVO PROCESSO PARA FABRICAÇÃO DE ESPONJAS METÁLICAS

**Daniel Delbin<sup>(1)</sup>, Fábio Gatamorta<sup>(2)</sup>, Maria Helena Robert<sup>(2)</sup>.**

(1) - ALUMAR – Consórcio de Alumínio do Maranhão: daniel.delbin@alcoa.com.br

(2) - UNICAMP – Faculdade de Engenharia Mecânica: helenah@fem.unicamp.br

## **Resumo:**

*Na última década os materiais celulares, esponjas metálicas, apresentaram uma crescente aplicação industrial emergindo como uma nova classe de materiais para engenharia. Esse trabalho apresenta um novo processo para a produção desses materiais, que consiste na conformação de pasta tixotrópica da liga A2011, sobre camada de agente bloqueador posteriormente removido para a formação da porosidade do material. Foram produzidos cilindros de material poroso metálico tipo sanduíche, com três diferentes classes de porosidade: fina, média e grosseira. As esponjas foram submetidas à tomografia computadorizada e a análise metalográfica para sua caracterização estrutural. Investigou-se a influência da temperatura de tratamento térmico, que determina a fração líquida da pasta semi-sólida, e da granulometria do agente bloqueador, na estrutura formada do material celular (aspecto geral, caracterização qualitativa dos poros e densidade) e nas características de processo (força de tixoforjamento e capacidade de penetração da pasta). Os resultados obtidos mostram um grande potencial do processo proposto para a produção de material celular e a remoção completa do agente bloqueador. O sucesso do mesmo depende da fração líquida presente na pasta tixotrópica; reduzida fração líquida pode resultar em incompleta infiltração da pasta e compressão das partículas do agente bloqueador. Nas condições analisadas a granulometria do agente bloqueador não teve influência sensível na qualidade do produto. A densidade do material poroso aumenta com o aumento da temperatura de processo, devido ao aumento da espessura de parede metálica na estrutura porosa.*

## **Palavras-chave:**

*Materiais celulares, esponjas metálicas, tixoforjamento, semi-sólido, alumínio.*

## 1. INTRODUÇÃO

Sólidos celulares, em particular espumas e esponjas metálicas, têm encontrado crescente aplicação industrial na última década, emergindo como uma nova classe de materiais para engenharia, dada a interessante combinação de propriedades que apresentam: reduzido peso específico, elevada rigidez, grande capacidade de absorção de energia, isolamento térmico e acústico, entre outras.

Degischer e Kriszt<sup>(3)</sup> dizem que a maioria das propriedades mecânicas de espumas metálicas pode ser obtida com outros materiais, algumas vezes até com maior eficiência, mas as espumas oferecem uma combinação única de muitas, e aparentemente contraditórias, propriedades que não se consegue obter com um único material de uma só vez, como ultra-baixa densidade aliada à alta rigidez, a capacidade de absorver choque e bom amortecimento de vibrações. Metais celulares são, portanto, promissores em diversas aplicações, onde estas muitas funções podem ser combinadas.

Diferentes tipos de metais podem ser utilizados na forma de espumas, esponjas, elementos porosos e celulares, como Al, Cu, Sn, Pb, Zn e suas ligas, sendo predominante até o momento a utilização de Al e suas ligas.

Na indústria automotiva, espumas e esponjas de ligas de Al têm encontrado aplicação devido à sua capacidade de absorção de energia em impactos, para uso em partes estruturais e pára-choques, por exemplo<sup>(4)</sup>; ao seu reduzido peso, o que possibilita o aumento do desempenho do automóvel, e ainda devido ao isolamento acústico e térmico que possibilitam, proporcionando maior conforto ao passageiro<sup>(5)</sup>.

Também na indústria aeronáutica os materiais celulares a base de ligas de Al, em particular as espumas encontram utilização na fabricação de painéis estruturais<sup>(6)</sup>. Ainda na construção civil esta classe de materiais encontra aplicações promissoras, dada à capacidade de isolamento térmico e acústico que proporcionam.

Dentre os processos de fabricação de materiais metálicos celulares Wadley<sup>(7)</sup> diz que os mais conhecidos envolvem a compactação de misturas de pós da liga e de agentes espumantes, em geral TiH<sub>2</sub>, aquecimento do compactado para a fusão da liga e sua espumagem pela gaseificação controlada do agente espumante; ou ainda evolução controlada de elementos que formam gases *in situ*, quando submetidos a elevadas temperaturas. Espumas são sistemas instáveis devido a sua grande área superficial.

Segundo San Marchi<sup>(8)</sup> as dificuldades de controle de parâmetros de processos de espumagem levaram ao desenvolvimento de processos alternativos, como 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. O produto obtido é caracterizado como material celular de poros abertos.

O forte mercado automobilístico brasileiro, entre outros setores, não pode deixar de olhar com interesse para esta classe de materiais, tendo em vista as perspectivas de aumento de desempenho e aumento de segurança veicular que podem representar. Estas perspectivas demandam a pesquisa e desenvolvimento desta classe de materiais.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

No trabalho utilizou-se a liga de alumínio comercial A2011, cuja composição química básica, segundo o Metals Handbook<sup>(9)</sup> é Al-5,5% em peso de Cu, e valores de análise química, feita por espectrometria de emissão atômica, apresentados na Tabela 1. A liga apresenta: um razoável intervalo de temperaturas entre as linhas *solidus* e *liquidus*, que permite um adequado controle dos parâmetros operacionais e fases de fácil identificação.

Tabela 1. Composição química da liga A2011 utilizada (% em peso)

Elemento	Cu	Bi	Fe	Si	Mn	Zn	Cr	B	Al
%	5,29	0,47	0,39	0,27	0,02	0,08	0,01	~0,001	Balanço

O agente bloqueador utilizado no trabalho foi o cloreto de sódio iodado (NaCl) comum, nas granulometrias: fina ( $\phi_1$ ) – partículas com diâmetro entre 1,0mm e 1,6mm, média ( $\phi_2$ ) – partículas com diâmetro entre 1,6mm e 3,15mm e grosseira ( $\phi_3$ ) – partículas com diâmetro maior que 3,15mm.

Na Figura 1 observa-se a morfologia dos cristais de NaCl para as três faixas de granulometria utilizadas: em (a) partículas com granulometria fina, apresentam geometrias retangular e triangular dos cristais com arestas planas e regulares, em (b) partículas com granulometria média, apresentam arestas planas e regulares, ângulos de vértices mais definidos com geometria predominantemente retangular; em (c) bloqueador grosseiro, geometria retangular bem definida, ângulos retos e arestas planas e regulares.

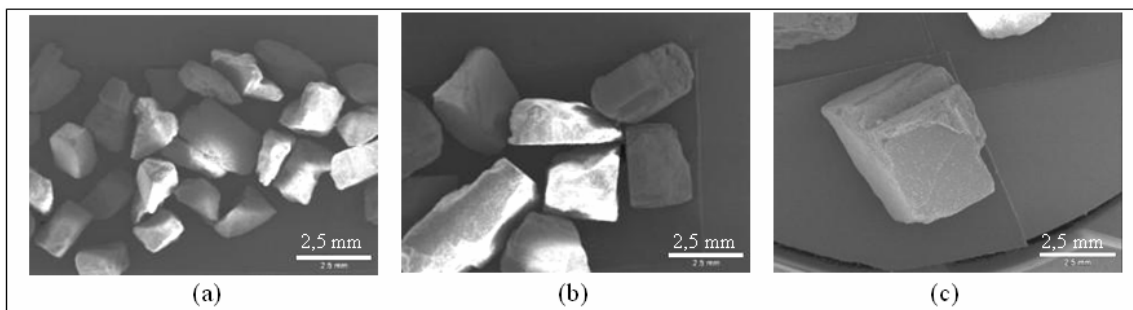


Figura 1. Fotos dos cristais de NaCl obtidos por MEV: (a) - de granulometria fina; em (b) - de granulometria média; em (c) de com granulometria grosseira.

Para os ensaios de tixoforjamento foi utilizado sistema compreendido pelos seguintes equipamentos: prensa equipada com sistema de aquisição de dados (monitoramento de força e temperatura), forno de aquecimento (posicionado na mesa da prensa) e ferramental para tixoforjamento (moldes e punção).

Os materiais foram posicionados na seguinte seqüência: inicialmente amostra cilíndrica da liga A2011 no interior do molde, de dimensões 44,5mm de diâmetro por 10mm de altura, seguida de uma camada de 20mm (38g) de espessura do agente bloqueador 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 construção de curvas Txt e monitoramento do processo.

Na Figura 2 é apresentado o esquema de montagem do sistema para o ensaio; pode-se observar o posicionamento das amostras de alumínio, bem como das partículas do bloqueador e o correto posicionamento dos termopares utilizados para controle de todo o processo.

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 a prensa hidráulica a uma velocidade de 2,5mm/s. A força aplicada foi monitorado com o uso de célula de carga e sistema de aquisição de dados, numa freqüência de aquisição de 5Hz e total de 300pontos.

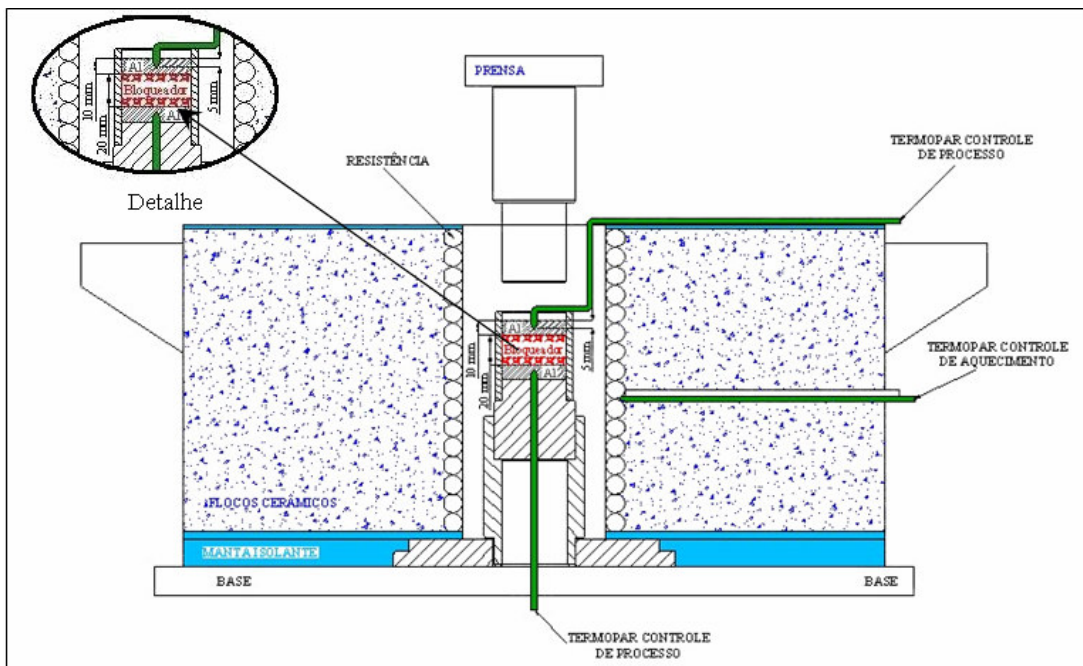


Figura 2. Esquema de montagem do sistema para ensaio.

Foram produzidas duas amostras cilíndricas de material celular para cada condição (temperatura de tixoforjamento e granulometria do agente bloqueador) de dimensões 44,5mm de diâmetro e altura média da ordem de 30mm, esquematicamente apresentados na Figura 3.

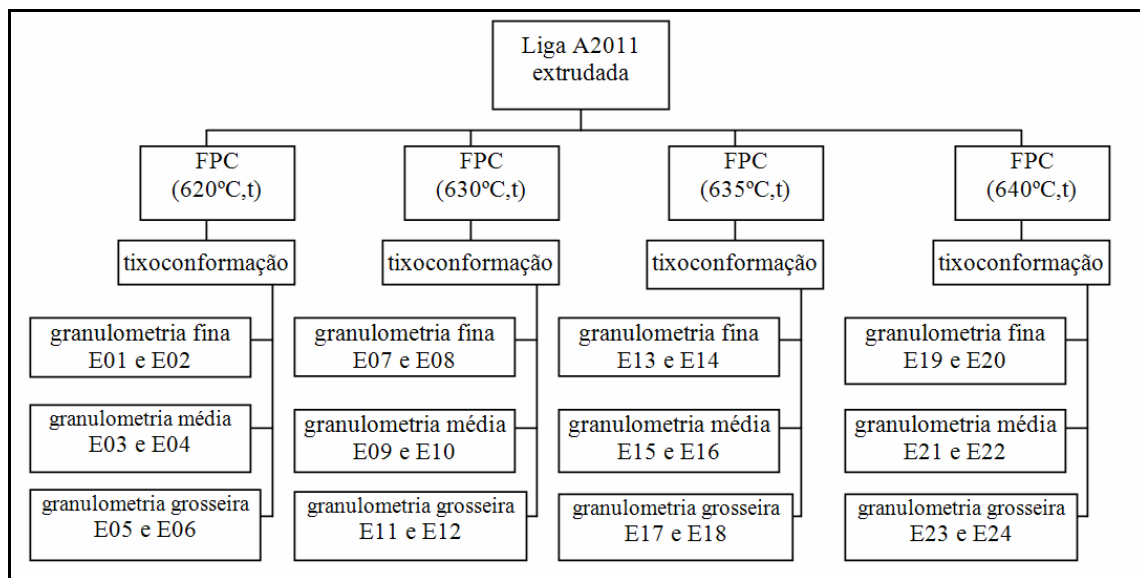


Figura 3. Representação dos experimentos efetuados ( $t=5$  min), onde: E – indica “ensaio”.

O material celular obtido após o ensaio possuía em seu interior as partículas do agente bloqueador e apresentava acabamento com rebarbas. Para a retirada do sal o material foi colocado em banho com água à temperatura de 100°C durante 2 horas com a mesma sendo trocada a cada 20 minutos. Transcorrido este tempo o material foi submetido a um banho em água à temperatura ambiente, sendo agitada em ultra-som por quatro horas, sendo esta trocada a cada 10 minutos. Após este tempo, o material foi aquecido à temperatura de 200°C para remoção completa da água para evitar sua oxidação. Com a retirada completa do sal e secagem, foi efetuada a remoção de rebarbas.

### 3. RESULTADO E DISCUSSÕES

A variação das forças requeridas com o tempo de sua aplicação, para as diferentes condições de tixoforjamento analisadas, são apresentadas na Figura 4. São apresentados resultados para dois ensaios em cada condição para análise da repetibilidade do processo.

Pode-se observar claramente o efeito da temperatura na força requerida para o tixoforjamento: o aumento da temperatura, por promover o aumento da fração líquida na pasta tixotrópica, reduz a força necessária para a sua conformação. Com relação a influência da granulometria das partículas do agente bloqueador, não é possível a observação do seu efeito na força de tixoforjamento, pela realização de 2 ensaios para cada situação

Os valores da força requerida, em todos os casos, são bastante reduzidos, da ordem de 10 a 15kN. Utilizando o procedimento de *Chauvenet* como critério para descartar um valor<sup>(11)</sup> os valores 17,8kN (para temperatura de 620°C), 2,3kN e 10,1kN (para temperatura de 640°C) podem ser rejeitados para a análise dos resultados das forças

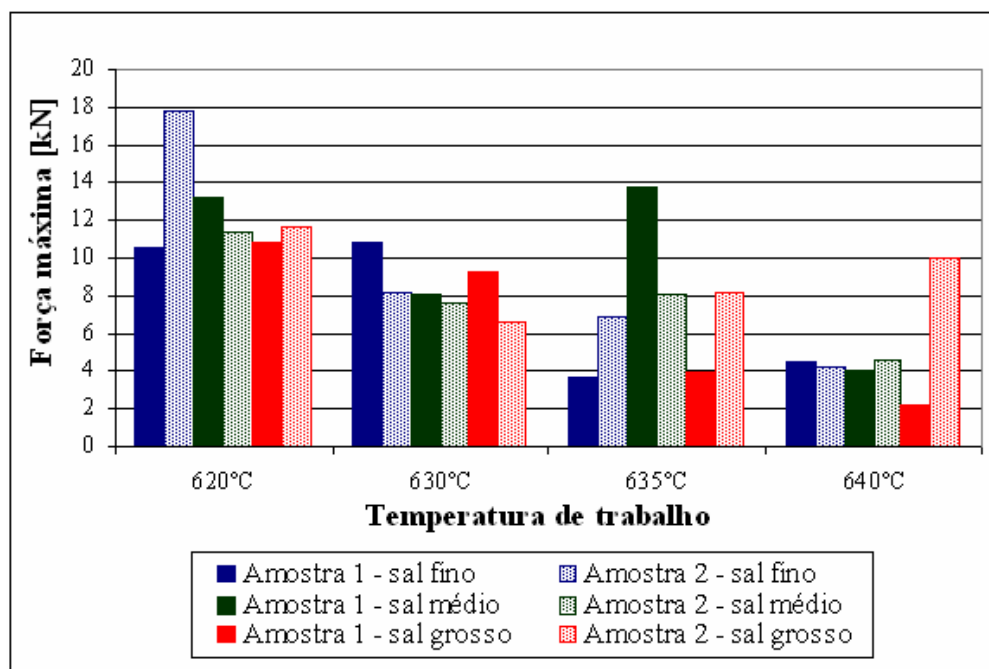


Figura 4. Valores máximos da força de tixoforjamento da liga A2011 sobre a camada de bloqueadores para todos os parâmetros estudados.

Na Figura 5 são apresentados os produtos obtidos para as condições de 630°C e 640°C, depois de removidas as rebarbas e as partículas de NaCl. Pode-se observar, nos seus aspectos gerais, que todos os produtos apresentam um bom acabamento externo, com cavidades porosas bem definidas; nota-se a presença de poros interconectados ao longo de todo o material, caracterizando assim uma esponja metálica, em todos os casos. A distribuição de poros pode ser considerada relativamente homogênea em toda a região externa visível das amostras, com tendência à aglomeração de poros nos casos onde foram utilizadas partículas de NaCl mais grosseiras. Para todos os casos verifica-se a completa penetração do metal na camada de sal.

Quanto ao efeito dos parâmetros analisados, temperatura de tixoforjamento e granulometria do sal, os resultados mostram que estruturas mais homogêneas são obtidas para as menores granulometrias e maiores temperaturas de processo. À maior temperatura de tixoforjamento, onde maior fração líquida está presente, permite melhor infiltração da pasta (o que pode ser visto pela redução da camada maciça superior remanescente da liga). Frações líquidas maiores também

exigem menores forças para infiltração, prevenindo a compactação da camada de sal e, portanto, melhorando a distribuição dos poros resultantes.

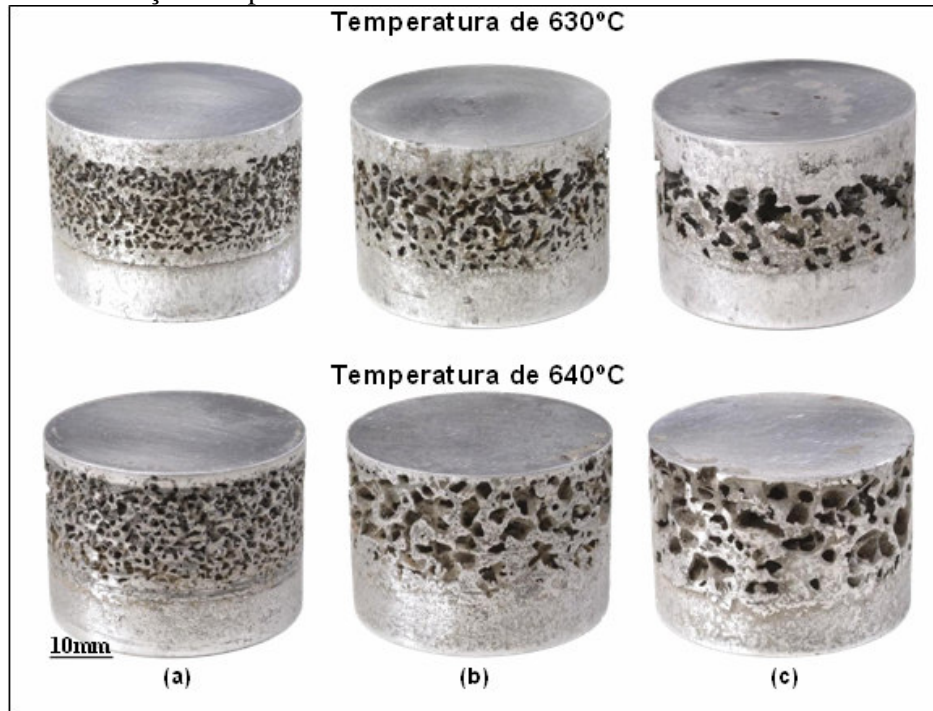


Figura 5. Fotos do material celular obtido para tixoforjamento da liga A2011 nas temperaturas de 630°C e 640°C, sobre camada de NaCl de granulometrias: (a) fina, (b) média e (c) grosseira.

A arquitetura dos poros presentes nos produtos porosos obtidos nas diferentes condições de ensaio foi analisada quantitativamente, através da medida de espessura de paredes de células. Para tanto foram utilizadas fotos da seção longitudinal das amostras cilíndricas produzidas, como mostra a Figura 6.

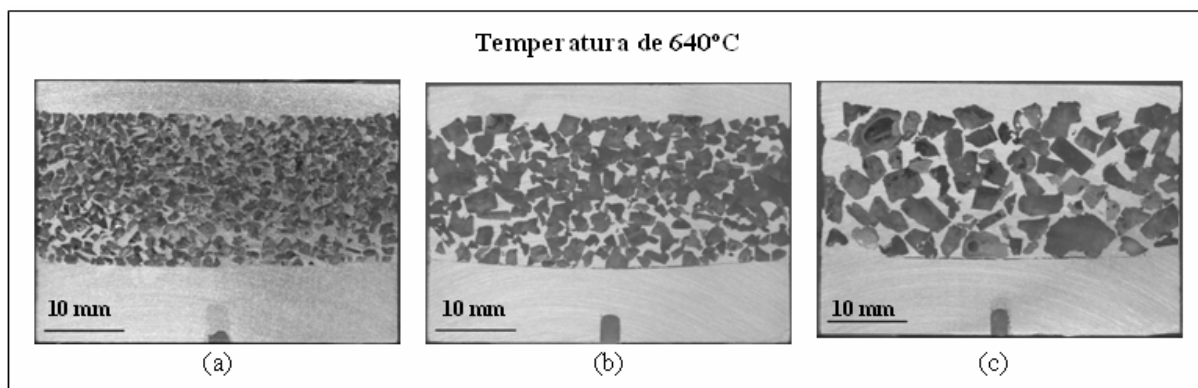


Figura 6. Seção longitudinal dos produtos porosos, obtidos por tixoforjamento a diferentes temperaturas, da liga A2011 sobre camada de NaCl com distintas granulometrias: (a) fina, (b) média e (c) grosseira.

Os resultados são apresentados numericamente na Tabela 2. Nota-se uma maior penetração, isto é, maior valor da espessura da camada porosa, para a temperatura de 640°C devido à maior fração líquida na pasta metálica. Como consequência, com relação à espessura da liga residual superior, observa-se a obtenção de valores menores quanto maior é a temperatura de processo.

Tabela 2. Valores aproximados das espessuras das camadas de material poroso e superior de liga metálica, dos produtos obtidos.

Temperatura de tixoforjamento [°C]	Granulometria do agente bloqueador	Espessura da camada porosa ( $h_p$ ) [mm]	Espessura da camada superior ( $h_1$ ) [mm]
620	grosseira	15	8
	fina	15	7
630	média	16	7
	grosseira	16	7
635	fina	16	6
	média	15	7
	grosseira	16	6
640	fina	19	4
	média	19	4
	grosseira	19	2

Não são apresentados os valores relativos aos produtos obtidos a 620°C, com sal fino e médio, por estes apresentarem fragilidade excessiva, o que não permitiu o preparo de amostras para análise.

Pode-se observar que os poros são interconectados em todos os casos, o que garante total remoção do agente bloqueador. A sua geometria e dimensões são bastante irregulares e similares à geometria e dimensões das partículas de sal utilizadas, apresentadas na Figura 1.

Pode-se também observar claramente o efeito da temperatura da liga na compressão exercida sobre a camada de sal: à menor temperatura há maior compactação do sal, reduzindo a espessura da camada porosa (já quantificada anteriormente), e aumentando a possibilidade de formação de poros de grandes dimensões.

Os valores de densidade obtidos são apresentados graficamente na Figura 7, em função dos parâmetros de processo analisados. Pode-se observar tendência em se obter produtos com maior densidade para maiores temperaturas de trabalho, influenciados pelo fato dos mesmos apresentarem espessura de paredes de poros com maiores dimensões. Não é possível estabelecer a influência da granulometria do sal utilizado no valor de densidade, nas condições analisadas.

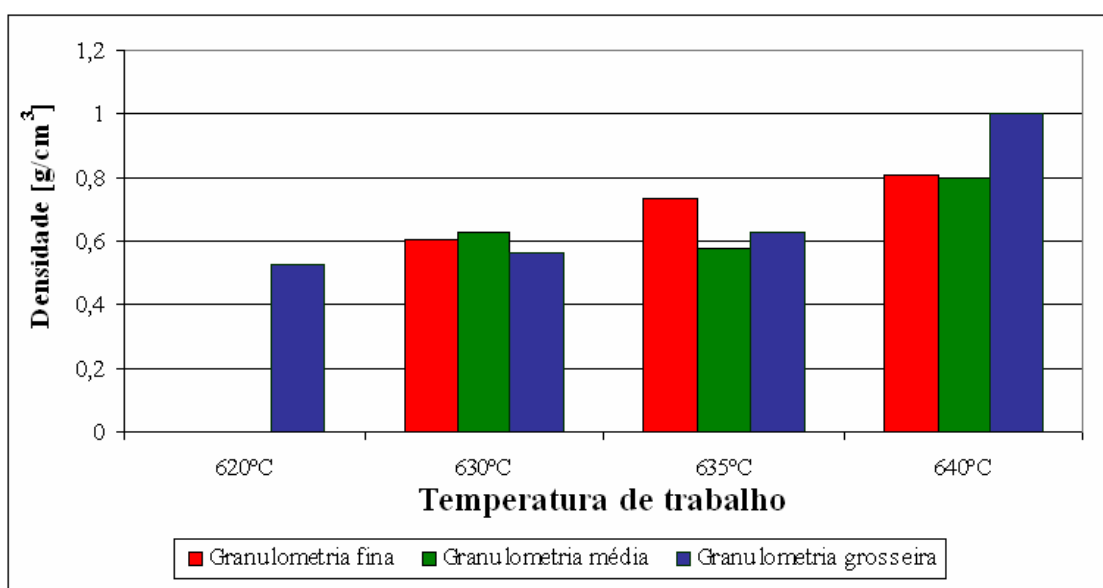


Figura 7. Densidade do material celular obtido por tixoforjamento da liga A2011, a diferentes temperaturas, sobre camada de sal com distintas granulometrias.

Os resultados obtidos pela utilização de tomografia computadorizada para análise da distribuição dos poros e remoção do agente bloqueador são mostrados na Figura 8 para os produtos obtidos por tixoforjamento a 635°C, observa-se um material celular obtido com boa uniformidade na distribuição dos poros ao longo de todas as seções, para as granulometrias: fina (a) e média (b). E a mesma tendência de formação de regiões com maior concentração de poros para o produto obtido com a utilização de granulometria grosseira (c), como se observa nas posições: (4), (5), (8) e (9).

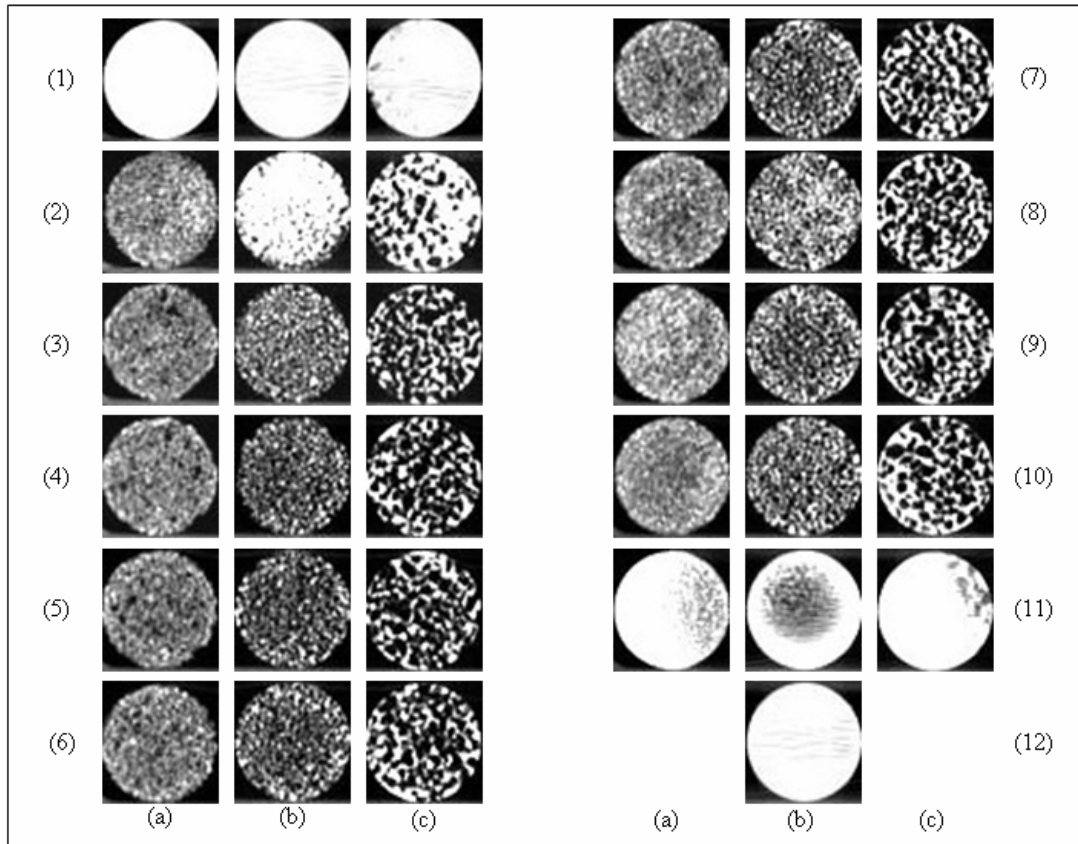


Figura 8. Imagens de seções paralelas, obtidas por tomografia, de material celular produzido por tixoforjamento a 635°C, sobre camada de bloqueadores com distintas granulometrias: (a) fina, (b) média, (c) grosseira. Distância entre planos: 2mm.

#### 4. CONCLUSÕES

É viável a produção de liga porosa A2011 utilizando a tecnologia de semi-sólidos, pela conformação da pasta tixotrópica em camada de agentes bloqueadores pós-removíveis. O produto obtido apresenta poros interconectados, caracterizando uma esponja metálica, com um aspecto geral (acabamento e dimensões) aceitável.

Com relação às forças requeridas para o tixoforjamento nota-se que sofrem influência da temperatura de tixoforjamento, conseqüentemente da quantidade de fração líquida obtida na pasta e não da granulometria do agente bloqueador. O aumento da temperatura acarreta redução na força requerida para a infiltração, em todos os casos os valores da força de tixoforjamento foram bastante reduzidos, demonstrando o elevado potencial do processo proposto para a produção de esponjas metálicas. Nas condições de ensaio analisadas não foi possível determinar a influência da granulometria das partículas do agente bloqueador na capacidade de infiltração da pasta tixotrópica.

A fração líquida na pasta a ser conformada determina também a capacidade de penetração da mesma na camada de agente bloqueador e o seu completo preenchimento, aproximadamente 20mm.



Frações líquidas reduzidas tendem a promover a compactação da camada do agente bloqueador durante a conformação, resultando em produtos com poros de grandes dimensões.

A utilização de bloqueadores de fina granulometria resulta em um material mais homogêneo em relação à distribuição de poros, enquanto o uso de bloqueadores grosseiros tende a resultar em poros de grandes dimensões e paredes espessas.

A densidade do material celular aumenta com o aumento da temperatura de tixoforjamento, mas não é sensível à variação da granulometria do agente bloqueador, nas condições analisadas

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao Consórcio de Alumínio do Maranhão - ALUMAR, pela parceria no desenvolvimento da pesquisa e financiamento.

Ao Dr. Sérgio Luís Marques dos Santos do Departamento de Radiologia da UNICAMP pela orientação e dedicação na realização das tomografias computadorizadas e análise de seus resultados.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (3) - Degischer, H. P., Kriszt, B. Handbook of cellular metals – Production, processing, applications, Ed – Wiley-VCH, Weinheim, 2002, 373p.
- (4) - Banhart, J., Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foam. Progress in Materials Science, 2001, pp. 559-632.
- (5) - Berg, A., Maysenhölder, W., Haesche, M., Noise reduction by open-pore aluminium foams, Proceeding of MetFoam, 2003, pp. 487-492.
- (6) - Leyda, B., Applications for open-cell metallic foams, MRS Bulletin, v.28, n.4, 2003, pp. 292-293.
- (7) - Wadley, N. G. H., Cellular metals manufacturing. Advanced engineering materials, V.4, n.10, 2002, pp. 726-733.
- (8) - San Marchi, C., Mortensen, A., Infiltration and replication process for producing metal sponges, Handbook of cellular metals, production, processing, applications, Wiley-WCH, Germany, 2002.
- (9) - ASM Metal Handbook – Vol. 2 – Properties and Selecton: Nonferrous Alloys and Special purpose materials, November, 1993, p. 15-28.
- (10) - Button, S. T., Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica de Campinas, UNICAMP, 2004, Apostila.

## 7. ABSTRACT

### A NEW PROCESS PROPOSING FOR METALLIC SPONGES FABRICATION

**Daniel Delbin<sup>(1)</sup>, Fábio Gatamorta<sup>(2)</sup>, Maria Helena Robert<sup>(2)</sup>.**

(1) – ALUMAR – ALUMAR Consortium - daniel.delbin@alcoa.com.br

(2) - UNICAMP – helena@fem.unicamp.br

#### **Abstract:**

*Cellular materials, metallic sponges presented an increasing industrial application emerging as a new class of materials for engineering on last decade. This research presented a new process for these materials production, which consists on forming of A2011 alloy thixotropic paste, over layer of blocking agent later removed for material porosity formation. It was produced metallic porous material cylinders as sandwiches with three porosity classes: fine, medium and coarse. Sponges*

*were submitted to computerized tomography and metallographic analysis for their structural characterization. It was investigated the thermal treatment temperature which determines the liquid fraction of semi-solid paste, and of blocking agent granulometry on formed cellular material structure (general aspect, porous qualitative characterization and density) and on processing features (thixoforging strength and paste penetration capacity). Results showed a great potential of proposed process for producing cellular material and complete removal of blocking agent. Its success depends on liquid fraction presents on thixotropic paste; decreasing liquid fraction may result on incomplete infiltration of the paste and blocking agent particle compression. Blocking agent granulometry didn't have a sensitive influence on part quality under analyzed conditions. Porous material density increases with the process temperature increasing due to metallic wall thickness increasing on porous structure.*

**Key Words:**

Cellular materials, metallic sponges, thixofforming, semi-solid, aluminium.