

Efeito da técnica de aeração sobre a macroestrutura e a permeabilidade de espumas cerâmicas produzidas via “gelcasting”

(Effect of aeration technique on the macrostructure and permeability of gelcast ceramic foams)

F. S. Ortega*, M. D. M. Innocentini, F. A. O. Valenzuela, V. C. Pandolfelli

Departamento de Engenharia de Materiais, DEMa

Universidade Federal de S. Carlos, SP - UFSCar

Rod. Washington Luiz km 235, C. P. 676, S. Carlos, SP, 13565-905

Resumo

A produção de espumas cerâmicas através da aeração de suspensões associada ao processo “gelcasting” pode proporcionar cerâmicas porosas celulares com excelentes propriedades mecânicas, em uma ampla faixa de densidades. Entretanto, o uso deste material em aplicações específicas, como filtragem, isolamento térmico e suporte para catálise, requer adequações macroestruturais que favoreçam as propriedades desejadas, tais como permeabilidade, condutividade térmica e área superficial. Tais propriedades decorrem de características como densidade, distribuição de tamanho de célula e conectividade entre células vizinhas, as quais são definidas durante a produção da espuma. Neste trabalho estudou-se a influência do processo de aeração sobre a macroestrutura da espuma cerâmica. Foram utilizados dois tipos de aerador, sendo um do tipo planetário e outro constituído de um borbulhador acoplado a um agitador mecânico. Suspensões de alumina contendo diferentes concentrações de agente espumante foram submetidas a ciclos de agitação nos dois tipos de aerador. Após a gelificação, os corpos obtidos foram sinterizados e avaliados quanto à permeabilidade ao ar e quanto à distribuição de tamanho de célula utilizando as técnicas de análise de imagem e de porosimetria de mercúrio. Os resultados mostram que o processo de aeração pode influenciar sensivelmente a densidade e o tamanho médio dos poros, com efeitos significativos sobre a permeabilidade do material. Verificou-se ainda que a caracterização da distribuição de tamanho de poro por porosimetria de mercúrio e por microscopia ótica leva a diferentes resultados, mas que ambas as técnicas podem ser úteis, dependendo do objetivo com que são usadas.

Palavras-chave: cerâmica porosa, espuma cerâmica, gelcasting, aeração, permeabilidade.

Abstract

The production of porous ceramics through the aeration of suspensions associated with the gelcasting process provides cellular porous ceramics with excellent properties and a wide range of densities. Nonetheless, the use of this material in applications such as filtering, thermal insulation, or catalyst supports requires a macrostructural tailoring in order to favor specific properties, such as permeability, thermal conductivity or specific surface area. These properties are determined by characteristics such as density, pore size distribution and connectivity between neighboring cells, which are defined during foam formation. The aim of this work was to assess the influence of the aeration process on the macrostructure of ceramic foams. A planetary mixer and a stirring vessel with a bubbling ring at the bottom surface were studied in this work. Alumina suspensions containing different foaming agent concentrations were submitted to mixing cycles in both foam generators. After gelling, samples were sintered and had their pore size distribution evaluated using image analysis and mercury porosimetry. The air permeability was also evaluated. The results showed that the aeration process may strongly influence the density and the mode pore size, having a significant effect on the material's permeability. It was observed that mercury porosimetry and image analysis lead to different pore size distributions. However, both results are useful, depending on the aim of the analysis.

Keywords: porous ceramics, ceramic foam, gelcasting, aeration, permeability.

INTRODUÇÃO

As cerâmicas porosas podem apresentar associações de certas propriedades, como baixo peso específico, ampla faixa de permeabilidade, baixa condutividade térmica, boa resistência a

* Atualmente na Univap, Universidade do Vale do Paraíba, S. José dos Campos, SP.

ataques químicos e alta refratariedade, o que as tornam bastante atrativas para certas aplicações tecnológicas como filtros para altas temperaturas, isolamento térmico, suportes para catálise, implantes médicos, entre outras. [1] A produção de espumas cerâmicas através da aeração de suspensões cerâmicas associada ao processo *gelcasting* é uma técnica desenvolvida recentemente, capaz de proporcionar materiais celulares com uma ampla faixa de densidades

[2] e propriedades mecânicas superiores às de cerâmicas porosas produzidas por outros processos. Entretanto, o uso deste material em aplicações específicas requer uma adequação macroestrutural da espuma que favoreça as propriedades desejadas, tais como resistência mecânica, permeabilidade, condutividade térmica e área superficial. Tais propriedades decorrem de características como porosidade, distribuição de tamanho de poros e conectividade entre os poros, as quais são definidas durante a produção da espuma.

As características da espuma são influenciadas por diversos fatores, como a tensão superficial na interface líquido-gás, determinada pelo tipo e concentração de agente espumante [3], viscosidade e densidade da suspensão [4] e pelo processo de agitação. Com relação ao processo de agitação, existem basicamente duas alternativas para a produção de espumas: a formação da fase gasosa a partir da fase líquida [5], e a incorporação da fase gasosa à fase líquida por agitação mecânica na presença de um agente espumante [6]. A simplicidade da segunda opção a torna bastante atrativa diante da complexidade das suspensões utilizadas nos processos *gelcasting*, as quais contêm um grande número de componentes que interagem de forma complexa, como o pó cerâmico, o defloculante, monômeros iônicos e agente espumante [2]. Além disso, é fundamental controlar o tempo de indução e a taxa de polimerização, que por sua vez são afetados pela quantidade de iniciador e catalisador adicionados, concentração de oxigênio, temperatura, pH e quantidade de fase gasosa incorporada [7].

Este trabalho investiga a influência de dois tipos de aerador sobre a macroestrutura de espumas cerâmicas produzidas por aeração de suspensões cerâmicas associada ao processo *gelcasting*. Foram utilizados, um aerador do tipo planetário (batedeira), o qual foi usado na maioria dos trabalhos publicados sobre cerâmica porosa produzida através deste processo, [2-4, 7, 8] e um aerador constituído de um borbulhador acoplado a um agitador mecânico, o qual permite maior controle sobre variáveis como velocidade de rotação, vazão de gás e formato das hélices. A produção de espumas cerâmicas nos dois equipamentos, sob diferentes condições, e a posterior análise da macroestrutura, permeabilidade e distribuição de tamanho de poros das amostras fornecem subsídios para uma melhor compreensão dos principais fatores envolvidos na formação da macroestrutura deste material. Estes incluem, além do processo de agitação, a viscosidade da suspensão [4] e o tipo de agente espumante utilizado [3].

MATERIAIS E MÉTODOS

A Fig. 1 apresenta um fluxograma do procedimento experimental, detalhado em seguida.

Preparação da suspensão

As suspensões cerâmicas foram preparadas adicionando-se alumina em pó (A-1000 SG, Alcoa, Brasil) a uma solução aquosa contendo monômeros orgânicos (30% de acrilato de amônio e 1% de metileno-bisacrilamida, Ciba, Inglaterra) e uma quantidade previamente determinada [8] de poliácrlato de amônio, como defloculante (Dispex A-40, Ciba, Inglaterra). Essa suspensão foi desaglomerada durante 30 minutos em moinho de bolas, e em seguida, dividida em alíquotas de 150 g, às quais foram adicionadas

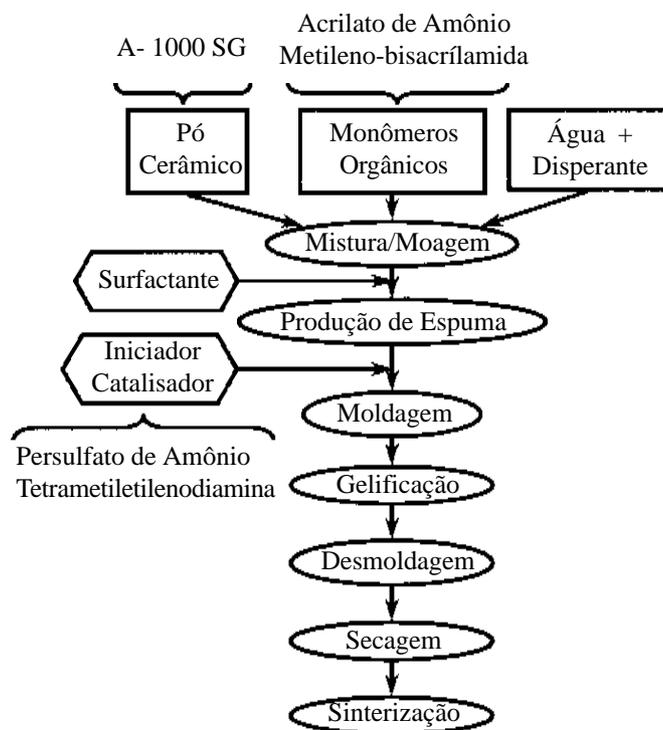


Figura 1: Fluxograma do processo de fabricação da espuma cerâmica através da aeração de uma suspensão cerâmica associada ao processo *gelcasting*.

[Figure 1: Flow chart of ceramic foam production through the aeration of a ceramic suspension associated to the *gelcasting* process.]

diferentes quantidades de um surfactante não-iônico de alto poder espumante (Lutensol ON-110, Basf, Brasil).

Produção das Espumas

Foram utilizados dois equipamentos distintos para produzir espumas de suspensão cerâmica: uma bateadeira doméstica (Electrolux, FM-171) e um aerador constituído de um vaso cilíndrico dotado de 6 aletas nas laterais, um borbulhador no fundo com vazão de gás controlada por um rotâmetro, um agitador com velocidade controlável entre 50 e 2500 RPM e um par de hélices com desenho específico para melhorar a mistura de fases líquida e gasosa [9] (Fig. 2). Este equipamento foi construído observando-se relações geométricas otimizadas para um reator destinado a operações de mistura [10, 11].

As espumas foram produzidas dentro de uma caixa com luvas hermeticamente fechada, com concentração de oxigênio inferior a 0,3%, obtida substituindo-se o ar contido na caixa por nitrogênio. Este procedimento é necessário, pois a polimerização é inibida por oxigênio [7]. As alíquotas de suspensão contendo agente espumante foram agitadas na bateadeira ou no aerador em diferentes velocidades, durante 3 minutos, após os quais foram adicionadas quantidades previamente determinadas de catalisador (tetrametiletlenodiamina - Sigma, USA) e de iniciador (persulfato de amônio - Sigma, USA). As espumas foram imediatamente moldadas em béqueres de 600 mL, onde a gelificação ocorreu.

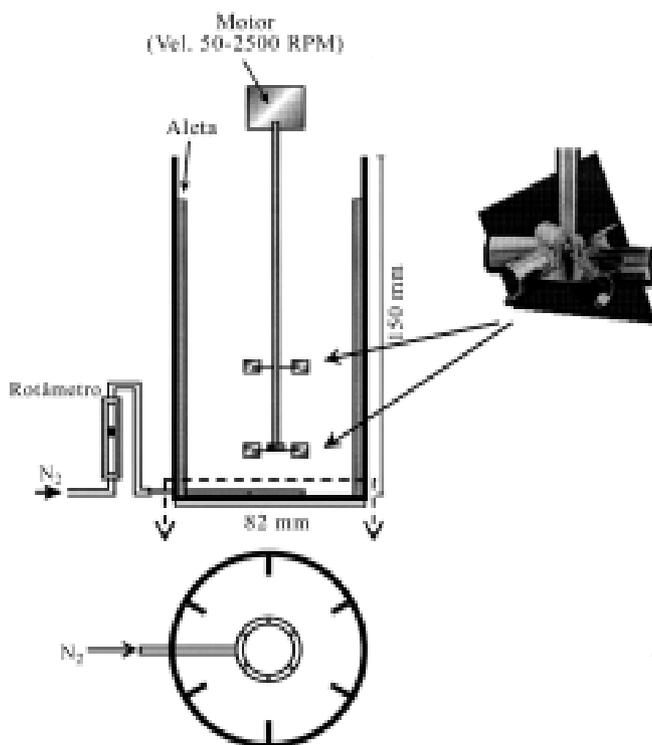


Figura 2: Visão esquemática do aerador utilizado para produzir espuma a partir de uma suspensão cerâmica.
 [Figure 2: Sketch of the aerator used on the ceramic suspensions foaming.]

Em seguida as espumas foram desmoldadas e secas a temperatura ambiente por aproximadamente 48 h. Com o auxílio de uma serra-copo foram cortados cilindros com 1,9 cm de diâmetro, os quais foram sinterizados a 1650 °C durante 3 horas (taxa de aquecimento de 5 °C/min.), tomando-se o único cuidado de permanecer por 1 hora em um patamar de 300 °C, durante o aquecimento, para a eliminação de material orgânico.

Caracterização das espumas

Os corpos foram caracterizados quanto à densidade pelo método de imersão de Arquimedes. A distribuição de tamanho de poros foi avaliada por porosimetria de mercúrio (Micromeritics – Poresizer 9320) e por análise de imagens obtidas por microscopia ótica de seções planas dos corpos-de-prova. Na análise de imagens, considerou-se o diâmetro de área projetada do poro, ou seja, o diâmetro de uma área circular equivalente à área da seção transversal do poro. Esta aproximação é aceitável, já que os poros tendem a um formato esférico, como mostra a Fig. 3. Para cada amostra foram considerados pelo menos 500 poros. A distribuição obtida foi corrigida segundo o procedimento matemático descrito por Saltikov [12], o qual calcula a distribuição de diâmetros de poros a partir da imagem obtida de uma seção plana, considerando que um plano aleatoriamente orientado pode cortar um poro em posições diferentes de seu equador, originando calotas esféricas com diâmetro menor.

A permeabilidade das espumas cerâmicas foi medida em um permeômetro a gás e avaliada segundo a equação de Forchheimer

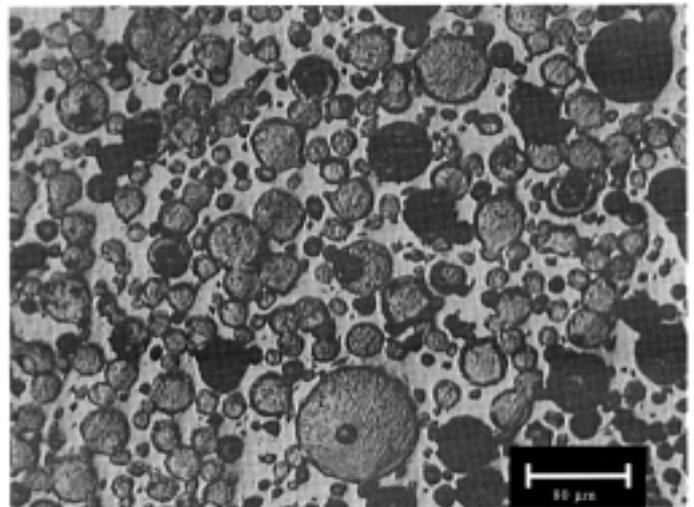


Figura 3: Imagem obtida por microscopia ótica de uma seção plana de espuma cerâmica, utilizada para avaliar a distribuição de tamanho de poros por análise de imagem.
 [Figure 3: Optical microscopy image of a ceramic foam cross-section used to evaluate the pore size distribution through image analysis.]

[13], que após integração para um gás ideal compressível é representada por:

$$\frac{P_1^2 - P_0^2}{2PL} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (A)$$

onde: P_1 e P_0 são as pressões absolutas do gás na entrada e na saída da amostra respectivamente, P é a pressão na qual v_s , μ e ρ foram medidos ou calculados (neste trabalho, P é igual a P_0), L é a espessura da amostra, v_s é a vazão de gás por unidade de área da amostra, μ e ρ são respectivamente a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido, e as constantes k_1 e k_2 são chamadas permeabilidade Darciana e não-Darciana, respectivamente. Esta equação inclui um termo inercial, $(\rho/k_2)v_s^2$, desconsiderado na equação de Darcy, mas que se torna significativo para escoamentos em alta velocidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade relativa de espumas cerâmicas produzidas nos diferentes tipos de aerador é apresentada na Fig. 4, em função da concentração de surfactante adicionado à suspensão.

Verifica-se que as amostras produzidas na bateeira apresentaram densidade menor do que as produzidas no aerador. Por outro lado, as amostras produzidas no aerador foram afetadas principalmente pela velocidade de rotação, sendo de modo geral menos sensíveis à concentração de surfactante. Embora o aerador tenha sido projetado para permitir um melhor controle sobre as características da espuma, já que ele possibilita controlar variáveis como a velocidade de rotação e velocidade com que o gás é aspergido, verificou-se que há uma tendência em ocorrer coalescência de bolhas acima do borbulhador. Isso leva à formação de uma bolha maior, capaz de ultrapassar a região de alto cisalhamento próxima às hélices e atingir a superfície, sem ser incorporada à suspensão. De fato, quando a rotação do misturador é aumentada, a maior taxa de cisalhamento favorece a divisão das

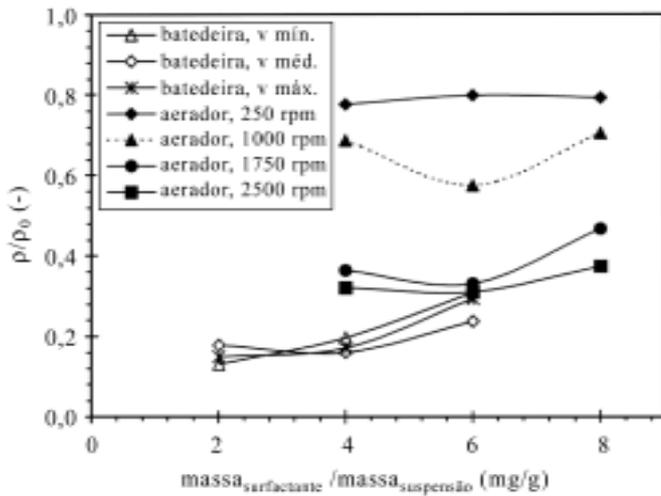


Figura 4: Densidade relativa (ρ/ρ_0 , considerando $\rho_0 = 3,98 \text{ g/cm}^3$) de espumas de alumina após sinterização a $1650 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 3 h, em função da concentração de surfactante adicionado à suspensão, do tipo de agitador e da velocidade de rotação com que a espuma foi produzida (v. mín.: velocidade mínima; v. méd.: velocidade média; v. máx.: velocidade máxima).

[Figure 4: Relative density (ρ/ρ_0 considering $\rho_0 = 3,98 \text{ g/cm}^3$) of alumina foams sintered at $1650 \text{ }^\circ\text{C}$ for 3 h, as a function of surfactant concentration added to the suspension, type of aerator and rotor speed (v. mín.: minimum speed; v. méd.: middle speed; v. máx.: maximum speed).]

bolhas, resultando na incorporação de uma maior quantidade de gás à suspensão e, portanto na diminuição da densidade da espuma cerâmica.

O fato de que as espumas cerâmicas produzidas no aerador foram menos sensíveis à adição de surfactante parece estar relacionado à capacidade do equipamento incorporar gás à suspensão. A migração das moléculas de surfactante para a interface líquido-gás diminui a tensão superficial nesta interface, favorecendo a formação de espuma. Quando todo o surfactante adicionado à suspensão estiver localizado nesta interface, a incorporação de uma quantidade adicional de gás será bastante restrita, ou seja, não será possível produzir uma espuma estável com maior volume. Por outro lado, se o equipamento tiver uma baixa capacidade de incorporar o gás aspergido à suspensão, apenas uma parte do surfactante adicionado será consumido, e a dependência entre o volume de espuma e a concentração de surfactante será menos evidente, como observado no aerador.

A Fig. 5 apresenta o diâmetro modal dos poros (diâmetro de poro mais freqüente, ou característico) em função da densidade relativa das espumas cerâmicas produzidas nos diferentes equipamentos, caracterizado por porosimetria de mercúrio e por análise de imagem.

Observa-se que os dados podem ser separados em dois grupos: um de alta densidade ($\rho/\rho_0 > 0,30$) e outro de baixa densidade ($\rho/\rho_0 < 0,30$). Verifica-se que as amostras de baixa densidade correspondem em sua maioria àquelas produzidas na bateadeira. Para estas amostras, há uma tendência de diminuição do tamanho de poro à medida que a densidade relativa das amostras aumenta. Esta tendência é observada tanto na caracterização por microscopia ótica quanto por porosimetria de mercúrio, embora o diâmetro modal de poro medido por análise de

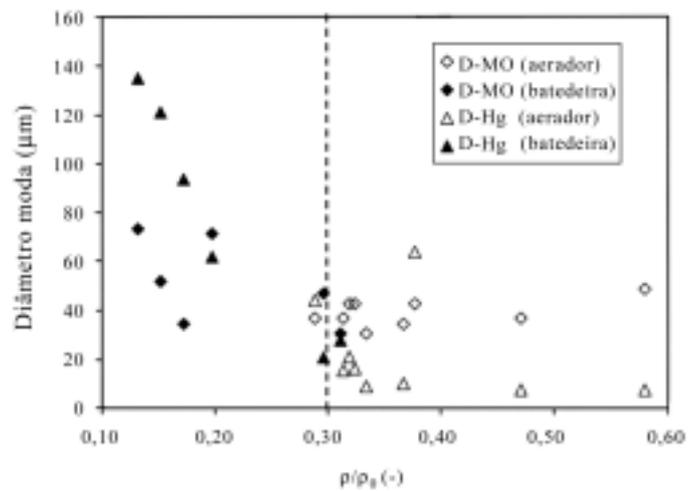


Figura 5: Diâmetro modal de poro de espumas cerâmicas sinterizadas em função da densidade relativa (ρ/ρ_0) e do equipamento utilizado para produzir a espuma. A distribuição de tamanho de poro foi avaliada por microscopia ótica (D-MO) e por porosimetria de mercúrio (D-Hg).

[Figure 5: Mode pore diameter of sintered ceramic foams as a function of relative density (ρ/ρ_0) and type of aerator. The pore size distribution was evaluated by optical microscopy (D-MO) and mercury porosimetry.]

imagem seja, em geral, menor do que o medido por porosimetria de mercúrio. As amostras de alta densidade ($\rho/\rho_0 > 0,30$) correspondem àquelas produzidas no aerador. Para estas amostras, observa-se que o diâmetro característico de poro é praticamente independente da densidade das amostras. Nota-se ainda que, ao contrário das amostras produzidas na bateadeira, para as amostras produzidas no aerador o diâmetro de poro medido por porosimetria de mercúrio é menor do que o medido por microscopia ótica.

Este comportamento está associado à variação da morfologia dos poros, decorrente de alterações na densidade da espuma e no processo de aeração, bem como aos princípios físicos envolvidos em cada técnica de caracterização de tamanho de poro. A morfologia de duas amostras com diferentes densidades, observadas em microscópio eletrônico de varredura, é mostrada na Fig. 6 [3].

Observa-se que a amostra de maior densidade (Fig. 6-a) apresenta conexões entre poros vizinhos significativamente menores do que a espuma de menor densidade (Fig. 6-b). Esta diferença traz importantes conseqüências, pois a porosimetria de mercúrio é baseada em um modelo que admite amostras com poros cilíndricos, cujo diâmetro é calculado a partir da pressão necessária para causar a penetração do mercúrio no poro. Este modelo não prevê, entretanto, a existência de poros relativamente grandes com aberturas pequenas, denominados genericamente de poros em forma de garrafa. Quando a amostra apresenta poros com esta característica, o modelo calcula, na verdade, o diâmetro do canal que liga poro à superfície, e não seu diâmetro real. Já a análise de imagens obtidas por microscopia ótica considera o diâmetro geométrico do poro, medido diretamente a partir de uma imagem.

Após estas considerações, analisando novamente a Fig. 5 verifica-se que, nos corpos de maior densidade, o fato dos valores de tamanho de poro medido por porosimetria de mercúrio serem menores do que os valores medidos por microscopia ótica pode estar relacionado à diminuição da razão entre as aberturas do poro

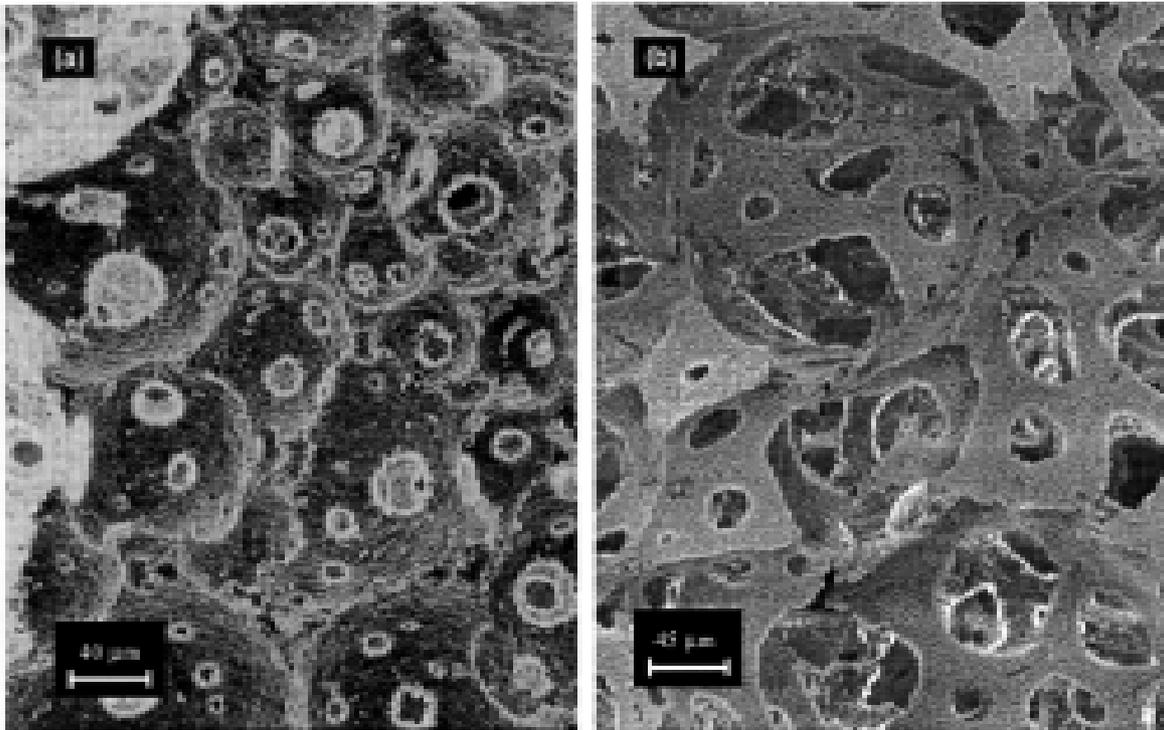


Figura 6: Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura de espumas cerâmicas com diferentes densidades: (a) $\rho/\rho_0 = 0,18$; (b) $\rho/\rho_0 = 0,06$ [3].
 [Figure 6: SEM of ceramic foam samples with different densities: (a) $\rho/\rho_0 = 0,18$; (b) $\rho/\rho_0 = 0,06$ [3].]

e o seu diâmetro. Com isso, à medida que a densidade relativa aumenta, a porosimetria de mercúrio mede um diâmetro de poro cada vez menor do que o diâmetro verdadeiro, com base na pressão necessária para fazer o mercúrio atravessar os canais que fazem a comunicação entre o poro e o exterior. Assim, nas amostras de maior densidade o diâmetro de poro medido por porosimetria de mercúrio tende a ser menor do que o medido por análise de imagem.

Ainda na Fig. 6, observa-se que cada poro apresenta várias conexões com poros vizinhos, de modo que o mercúrio pode penetrar no interior do poro através da maior delas, ou mesmo por mais de uma abertura, se a densidade da amostra for muito baixa. Conseqüentemente, o diâmetro medido por porosimetria de mercúrio poderá ser maior do que o diâmetro geométrico, medido por análise de imagem, especialmente em amostras de baixa densidade.

A Fig. 7 apresenta as constantes de permeabilidade k_1 e k_2 , medidas experimentalmente, em função da densidade relativa.

Ambas as constantes diminuem algumas ordens de grandeza com o aumento da densidade relativa. Entretanto, devido à pouca sobreposição entre os dados produzidos nos diferentes equipamentos, não é possível determinar se as amostras produzidas no aerador e na bateadeira resultaram em diferentes macroestruturas, proporcionando comportamentos distintos, ou se a maior permeabilidade das amostras produzidas em bateadeira deve-se apenas à sua menor densidade relativa. De qualquer modo, o baixo espalhamento dos dados experimentais sugere que as constantes de permeabilidade foram influenciadas principalmente pela densidade das amostras, independentemente do equipamento em que foram produzidas.

As constantes de permeabilidade k_1 e k_2 medidas experimentalmente são comparadas, respectivamente nas Figs. 8

e 9, ao diâmetro de poro das amostras, caracterizado por diferentes técnicas.

Observa-se que apenas o diâmetro modal de poro, medido por porosimetria de mercúrio, apresentou alguma relação com as constantes k_1 e k_2 (veja curvas de ajuste para estes resultados). As medidas feitas por microscopia ótica, ao contrário, apresentaram uma grande dispersão ao serem relacionadas com as constantes de permeabilidade, especialmente se comparadas

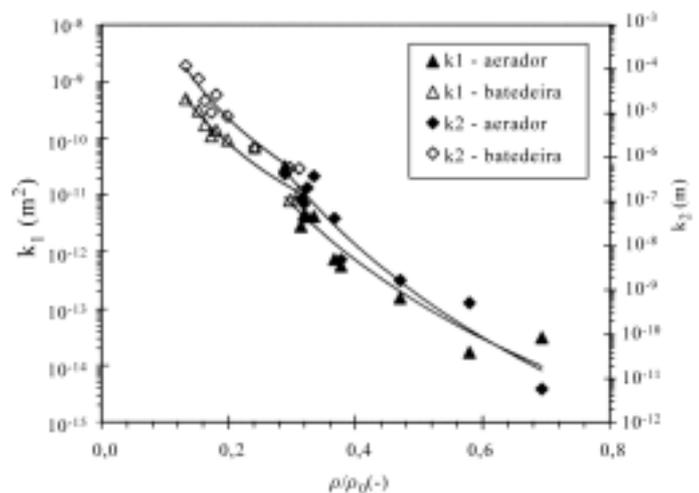


Figura 7: Constantes de permeabilidade Darciana (k_1) e não-Darciana (k_2) em função da densidade relativa (ρ/ρ_0) e equipamento utilizado para promover a aeração.
 [Figure 7: Darcian (k_1) and non-Darcian (k_2) permeability constants as a function of relative density (ρ/ρ_0) and type of aerator.]

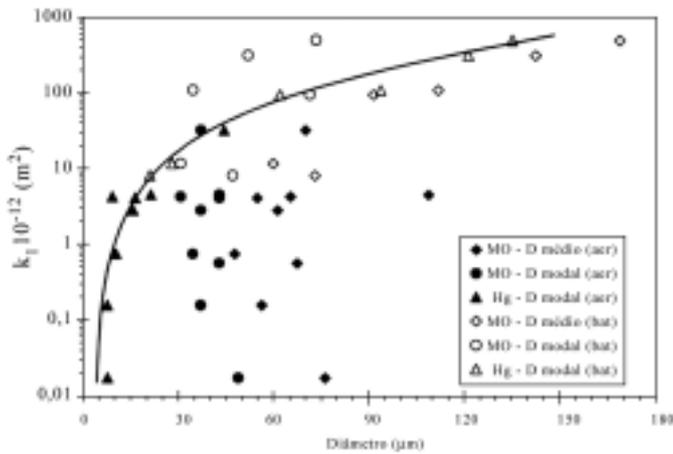


Figura 8: Variação da constante de permeabilidade Darciana, k_1 , em função do diâmetro de poro médio ou modal das espumas cerâmicas, medidos por porosimetria de mercúrio e por microscopia ótica. A curva de tendência refere-se apenas ao diâmetro de poro medido por porosimetria de mercúrio. [Figure 8 : Darcian permeability constant, k_1 , as a function of average or mode pore diameter of ceramic foams, measured by either mercury porosimetry or image analysis. Fitting curve refers only to the pore diameters measured using mercury porosimetry.]

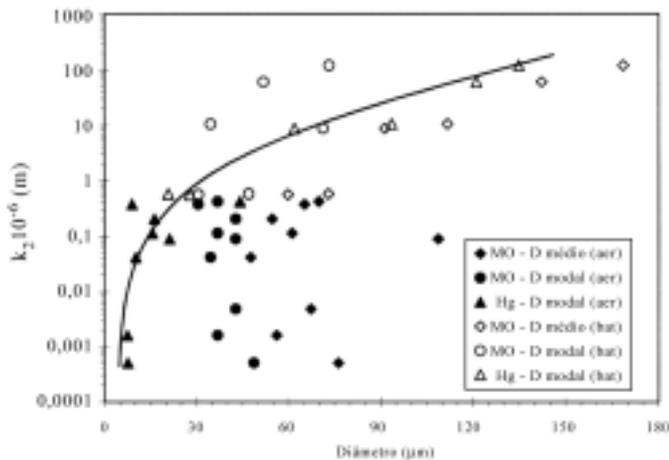


Figura 9: Variação da constante de permeabilidade não-Darciana, k_2 , em função do diâmetro de poro médio ou modal das espumas cerâmicas, medidos por porosimetria de mercúrio e por microscopia ótica. A curva de tendência refere-se apenas ao diâmetro de poro medido por porosimetria de mercúrio.

[Figure 9: Non-Darcian permeability constant, k_2 , as a function of average or mode pore diameter of ceramic foams, measured by either mercury porosimetry or image analysis. Fitting curve refers only to the pore diameters measured using mercury porosimetry.]

com os dados da Fig. 7. Este resultado indica que a porosimetria de mercúrio é capaz de detectar melhor a variação de características macroestruturais relacionadas com a permeabilidade do material. De fato, a permeabilidade das espumas cerâmicas está relacionada principalmente ao tamanho e à quantidade de conexões entre poros vizinhos, os quais são detectados pela porosimetria de mercúrio, e não ao diâmetro geométrico do poro, medido na análise de imagens.

Comparando-se as Figs. 7, 8 e 9, pode-se concluir que a permeabilidade das amostras foi influenciada principalmente pela densidade das amostras e pelo tamanho das aberturas que fazem a comunicação entre poros vizinhos, as quais foram caracterizadas satisfatoriamente por porosimetria de mercúrio. Observa-se que embora a porosimetria de mercúrio proporcione medidas de diâmetro de poro equivocadas quando estão presentes poros em forma de garrafa, como se verificou principalmente nas amostras mais densas, esta técnica pode ser particularmente útil para estimar propriedades fluidodinâmicas. Outras propriedades, como resistência mecânica e módulo elástico, poderão, no entanto, ser eventualmente melhor modeladas considerando-se o diâmetro de poro medido por microscopia ótica. Ou seja, para as espumas cerâmicas produzidas por aeração de suspensões associada ao processo *gelcasting*, não existe uma técnica absoluta para se medir a distribuição de tamanho de poros, mas sim técnicas adequadas para se fazer uma análise de propriedades específicas influenciadas pela porosidade.

CONCLUSÕES

As espumas cerâmicas produzidas em batadeira comercial apresentaram maior porosidade do que as amostras produzidas em um agitador associado a um borbulhador. Este comportamento foi associado a coalescência de bolhas acima do borbulhador, as quais puderam ultrapassar a região de cisalhamento intenso, próximo às hélices. O aumento da velocidade de rotação do rotor resultou em diminuição da densidade do material, enquanto que a variação da concentração de surfactante teve pouca influência sobre a densidade das amostras, dentro da faixa de concentração estudada. O diâmetro modal de poro diminuiu com o aumento da densidade das amostras. No entanto, não foi possível determinar o quanto esta característica foi afetada pelo equipamento utilizado na produção de espuma, devido à pouca sobreposição entre os dados obtidos nos diferentes equipamentos. A caracterização da distribuição de tamanho de poro por porosimetria de mercúrio e por análise de imagens obtidas por microscopia ótica permitiu detectar a presença de poros-garrafa, sugerindo que a razão entre o tamanho da abertura dos poros e o seu diâmetro diminuiu à medida que aumenta a densidade do material. O aumento da densidade do material causou uma diminuição de várias ordens de grandeza nas constantes de permeabilidade k_1 e k_2 das amostras. Estas constantes apresentaram pouca relação com o tamanho característico de poro obtido por análise de imagem. Entretanto, quando caracterizadas por porosimetria de mercúrio, foi possível observar uma tendência de aumento no valor destas constantes com o aumento do tamanho de poro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Allied Colloids pelo fornecimento de monômeros acrílicos, a Alcoa Alumínio S.A pelo fornecimento da matéria-prima cerâmica, e o apoio financeiro recebido da CAPES e da FAPESP.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Nettleship, Key Eng. Mater. **122-124** (1996) 305-24.
[2] P. Sepulveda, Am. Ceram. Soc. Bull. **76**, 10 (1997) 61-65.
[3] F. S. Ortega, P. Sepulveda, M. D. M. Innocentini, V. C. Pandolfelli, Am. Ceram. Soc. Bull. **80**, 4 (2001) 37-42.
[4] P. A. Sepulveda, PhD Thesis, Nottingham, 1996.
[5] J. H. Saunders, R. H. Hansen, Plastic Foams – part I, ed. By Frisch, K. C. J. H. Saunders, Marcel Dekker, N. York, 1972.
[6] P. R. Garret, Chemical Eng. Sci. **48**, 2 (1993) 367-392.
[7] P. Sepulveda, J. G. P. Binner, Chem. Mat. **13**, 11 (2001) 3882-3887.
[8] F. S. Ortega, P. Sepulveda, V. C. Pandolfelli, J. Eur. Ceram Soc. (aceito) 2001.
[9] A. S. Khare, K. Niranjana, Chemical Eng. Sci., **54** (1999) 1093-1100.
[10] R. H. Perry, D. W. Green, Perry's Handbook of Chemical Engineering, 7th ed., Mc Graw-Hill 1997.
[11] S. A. Nagata, Mixing: principles and applications, Kodansha Ltd., Tokyo, 1975.
[12] S. A. Saltikov, in Stereology, ed. H. Elias, Proc. Second Int. Cong. for Stereology, N.Y. Springer, New York, **163-173** (1967).
[13] D. Ruth, H. Ma, Transport in Porous Media, **7** (1992) 255-264.

(Rec.31/12/01, Ac. 19/04/02)