

Processamento e caracterização de espumas vitrocerâmicas do sistema $\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (LZSA) produzidas por gelcasting

Processing and characterization of glass-ceramic foams belonging to the $\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (LZSA) system produced by gelcasting

I. E. F Pozzobom¹, J.B. Rodrigues-Neto¹,
F. Raupp-Pereira¹, K. Donadel²,
E. Sousa³, A.P.N Oliveira¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PGMAT) - Departamento de Engenharia Mecânica (EMC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – CEP: 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil
e-mail: ida@ifsc.edu.br; jbrn.ufsc@gmail.com; rauppereira@yahoo.com.br; pedronovaes@emc.ufsc.br

² Centro Universitário Barriga Verde – UNIBAVE – CEP: 8845000, Cocal do Sul, SC, Brasil
e-mail: ka_donadel@yahoo.com.br

³ Departamento de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) – CEP: 12231-280, São José dos Campos, SP, Brasil
e-mail: eliandra.sousa@gmail.com

RESUMO

Neste trabalho, a técnica de viscosimetria foi utilizada para avaliar as características reológicas de suspensões preparadas com precursor vitrocerâmico do sistema LZSA ($\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$). A partir da caracterização reológica, foi possível estabelecer condições composicionais adequadas de fração de sólidos, dispersante e monômeros orgânicos. A quantidade de agente espumante para produção de espumas vitrocerâmicas por *gelcasting* foi determinada pela variação volumétrica após agitação. As espumas resultantes foram submetidas a tratamentos térmicos no intervalo de temperatura compreendido entre 200 e 500°C/60 min, para degradação da matéria orgânica e a 950°C/60 min para sinterização e cristalização. Com os corpos cerâmicos porosos foram realizadas medidas de retração térmica, densidade aparente, análise microestrutural e resistência mecânica. A adequação das características reológicas do precursor LZSA por *gelcasting* permitiu a produção de espumas com elevada porosidade (> 90%) aberta e interconectada com boa estabilidade térmica e com resistência mecânica compatível com cerâmicas porosas.

Palavras-chave: reologia, gelcasting, espumas vitrocerâmicas.

ABSTRACT

In this work the viscosimetry technique was used to evaluate the rheological characteristics of ceramic suspensions prepared with a LZSA ($\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) glass. From the rheological characterization it was possible to establish optimized conditions of solid fraction, dispersant, organic monomers and foaming agent for the production of glass-ceramic foams by gelcasting. The resulting foams were subjected to heat-treatments at 200-500°C/60 min, for degradation of organics and at 950°C/60 min for sintering and crystallization. With the obtained porous ceramic bodies linear thermal shrinkage, apparent density and mechanical strength measurements as well as microstructural analysis were performed. The adaptation of the rheological characteristics of the LZSA parent glass powder with the gelcasting processing technique allowed the production of ceramic foams with high open and interconnected porosity (>90%) with good thermal stability and with mechanical strength suitable for the production of porous ceramics.

Keywords: rheology, gelcasting, glass-ceramic foams.

1. INTRODUÇÃO

A porosidade de um material exerce influência sobre suas propriedades físicas, tais como densidade, condutividade térmica e resistência mecânica [1]. O crescente interesse pelas cerâmicas porosas, para

diversas aplicações tecnológicas, está associado a sua baixa densidade e condutividade térmica, alta área superficial, refratariedade e resistência ao ataque químico. Diversos processos de preparação de cerâmicas porosas estão sendo pesquisadas na busca de novos materiais com estruturas com diferentes tamanhos de poros, geometria complexa, microestrutura definida e sem a necessidade da etapa de usinagem [2]. Dentre estes, destaca-se o processamento por *gelcasting* [3], associado à aeração de uma suspensão cerâmica com um agente espumante [4]. Este processo consiste na introdução de monômeros orgânicos a uma suspensão aquosa que polimeriza na presença de agentes químicos. Após conformação em um molde com a geometria final da peça (*near net shaping*), forma uma estrutura gelificada, que fornece rigidez aos corpos no estado verde. Assim, é possível obter estruturas com poros abertos e interconectados (30 - 2000 μm), tendendo a uma geometria esférica, com porosidade que pode ultrapassar 90%, elevada permeabilidade e, normalmente, com filamentos densos e sem trincas no produto sinterizado [5,7]. No entanto, dois inconvenientes, associados a esta técnica, são conhecidos: uso de monômeros considerados neurotóxicos [8] e a necessidade de manter a atmosfera inerte durante a produção da espuma [9]. Atualmente, estão sendo usados os derivados do monômero de acrilamida, de baixa toxicidade e sistemas gelificantes naturais termo reversíveis, não tóxicos e de baixo custo [10, 15]. No entanto, apesar da toxicidade dos monômeros orgânicos utilizados na produção de espumas cerâmicas, o processamento por *gelcasting* com tais aditivos orgânicos parece ser ainda a melhor solução para a obtenção de estruturas celulares (porosas), no estado verde, com resistência mecânica adequada.

Para este trabalho uma composição do sistema $\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (LZSA) foi escolhida, para produzir espumas vitrocerâmicas, por apresentar boas resistências química e ao choque térmico e baixo coeficiente de expansão térmica linear ($2\text{-}11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) [16]. Além disso, as propriedades das espumas vitrocerâmicas podem ser controladas por meio da modificação do processo de aeração, composição química, tamanho de partícula do pó vítreo (precursor vitrocerâmico), concentração do agente espumante, viscosidade da suspensão cerâmica, e, ainda, controlando-se a temperatura e o tempo de tratamento térmico. Assim, torna-se possível obter diferentes tipos de espumas vitrocerâmicas com propriedades adequadas para uma dada aplicação [5,17, 18].

Este trabalho tem como objetivo avaliar as principais variáveis que influenciam no comportamento reológico de suspensões preparadas para produzir espumas vitrocerâmicas do sistema LZSA pelo processo *gelcasting*, sem controle atmosférico, as quais serão caracterizadas do ponto de vista de suas propriedades típicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de produção das espumas vitrocerâmicas é mostrado no fluxograma da Figura 1 e descrito em detalhes a seguir.

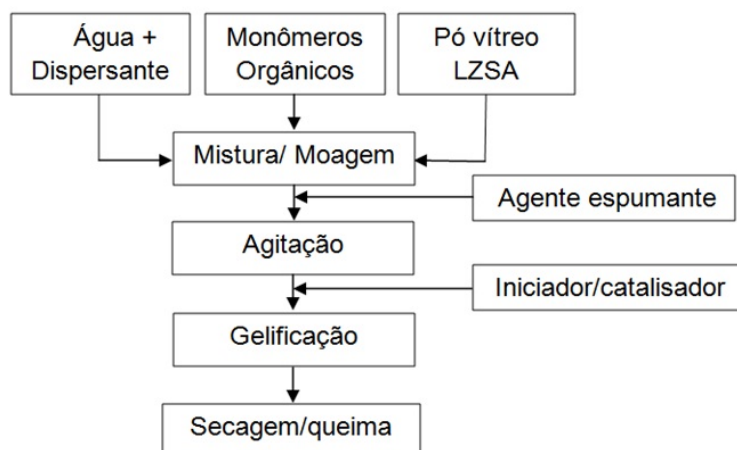


Figura 1: Fluxograma esquemático da metodologia experimental para obtenção das espumas vitrocerâmicas do sistema LZSA pelo processo *gelcasting* de espuma.

Para a obtenção das suspensões cerâmicas foi utilizada uma frita do sistema LZSA, de composição

9,53Li₂O.13,37ZrO₂.62,96SiO₂.14,14Al₂O₃ (% em massa), preparada a partir de matérias-primas de uso industrial tais como Li₂CO₃, ZrSiO₄, SiO₂ e LiAlSi₃O₈. Detalhes sobre a preparação e obtenção da frita LZSA podem ser obtidos no trabalho de MONTEDO [16].

A frita de LZSA foi colocada em um jarro de porcelana contendo bolas de alumina e moída a seco por 30 minutos em moinho de jarro rápido (Servitech, CT-242). O pó obtido foi passado em peneira de malha 325 mesh (45 µm) e homogeneizado via úmida (proporção entre pó e água de 70/30) em moinho de bolas tipo gira jarro (Cienlab, CE-300/120) por 48 horas. Subsequentemente, a suspensão foi seca em estufa a 120°C por 24 horas e desagregada em moinho de jarro rápido por 5 minutos, tal que pós com tamanhos médios de partículas, $d_{50} = 3,80 \mu\text{m}$ foram obtidos (Malvern, Mastersizer 2000). Suspensões cerâmicas com teor de sólidos variando entre 30 e 42,5% em volume foram preparadas por meio da dispersão do pó vítreo em solução aquosa contendo diferentes concentrações (20, 25 e 30% em volume) de monômeros orgânicos, N,N,N',N'-hidroximetilacrilamida (HMAM, Sigma-Aldrich), metacrilamida (MAM, Sigma-Aldrich), metilenobisacrilamida (MBAM, Sigma-Aldrich), em proporção molar de 3:3:1. A suspensão foi dispersa com polimetacrilato de amônio (Darvan C-N, R.T. Vanderbilt) e desaglomerada em moinho de jarro rápido por 5 minutos. As medidas de potencial zeta foram realizadas usando suspensões diluídas de pó vítreo LZSA na ausência e presença de dispersante (polimetacrilato de amônio), utilizando um analisador de potencial zeta (ZEN-3660, Malvern). A caracterização reológica foi realizada utilizando-se um viscosímetro (HAAKE - Viscotester 550) com geometria de cilindros concêntricos e temperatura controlada a 25°C. Os parâmetros reológicos foram definidos por meio do software RheoWin para um fluxo ascendente-descendente com taxas de cisalhamento entre 0 e 1000 s⁻¹ durante aproximadamente 180 segundos para cada período. Antes de cada leitura, as suspensões foram homogeneizadas em moinho de jarro rápido por 5 minutos. Para a produção das espumas, as suspensões foram divididas em alíquotas de 48 g, nas quais foram adicionadas 1,0; 1,2 e 1,4% em massa de agente espumante (Alkolan CP 30 EG, Oxiteno), com base na massa da suspensão. Esta mistura foi agitada em batedeira doméstica (Philips Walita, 200 W) por aproximadamente 3 minutos. A partir deste ponto, quantidades pré-determinadas de catalisador (tetrametiletlenodiamina - TEMED, Sigma- Aldrich) e iniciador (persulfato de amônio - APS, Vetec) foram adicionadas para promover a gelificação do sistema. A espuma produzida foi imediatamente moldada em recipiente circular com volume de 600 ml. Após permanecer em estufa a 50°C por 24 horas [17, 18], a espuma foi desmoldada e, com auxílio de um serra copo, cilindros de 14 mm de diâmetro foram cortados e tratados termicamente. O ciclo térmico aplicado para consolidação das espumas consistiu de aquecimento até 200°C (a uma taxa de 5°C/min) e subsequente elevação da temperatura, a uma taxa de 1°C/min, até 500°C, com um patamar de 60 minutos, de modo a garantir a eliminação do material orgânico. Subsequentemente, a temperatura foi elevada até 950°C a uma taxa de aquecimento de 5°C/min. Após 60 minutos nesta temperatura máxima, para sinterização e cristalização, as espumas cerâmicas foram resfriadas ao ar até a temperatura ambiente. A caracterização da espuma foi realizada por meio de medidas de retração térmica linear (paquímetro digital, Mitutoyo com resolução de 0,01 mm) e de densidade geométrica (ρ_{geo}), calculada a partir das dimensões e da massa dos corpos de prova. A fração de vazios das espumas vitrocerâmicas foi determinada pela porosidade (ϵ), expressa por $[1 - (\rho_{\text{geo}}/\rho_t)]$, onde ρ_t é a densidade real do pó vítreo (2,63 g.cm⁻³) obtida via picnometria a gás hélio (Multi-Pycnometer, MVP-4DC). As imagens de microscopia eletrônica foram feitas em um equipamento Philips, XL 30. Para determinação da resistência mecânica à compressão, foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos - EMIC DL 2000, com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min e demais condições de acordo com a norma ASTM C496-90 [19, 20], utilizando cinco corpos cilíndricos com 10 mm de diâmetro. As superfícies dos corpos de prova foram recobertos com uma borracha semirrígida para eliminar efeitos de carregamento localizado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra a variação do potencial zeta para o pó vítreo LZSA, sem e com adição do dispersante polimetacrilato de amônio (Darvan C-N), em função do pH. Para a suspensão de pó vítreo LZSA sem adição de dispersante o pH foi de 7,2 e com dispersante o pH foi de 8,0. No estudo do potencial zeta em função da variação do pH, para a suspensão sem adição de dispersante, observa-se que o pó vítreo apresentou ponto isoelétrico (PIE) localizado em pH 2,6 (valor de pH onde o somatório de cargas elétricas ao redor das partículas é zero). Acima deste valor, a suspensão apresentou valores de potencial zeta negativos, atingindo o valor máximo em torno de -65,5 mV em pH 9,0. Quando adicionado o dispersante, o PIE foi deslocado para pH aproximadamente 2,2. Este fenômeno deve-se, provavelmente, à presença do cátion NH₄⁺ do dispersante polimetacrilato de amônio, que consegue dar uma maior estabilidade para a suspensão [21], o qual também refletiu no incremento do valor absoluto do potencial zeta ao longo do pH. A partir do pH 6,0, o potencial

zeta tornou-se altamente negativo, com valores entre -44,5 mV a -71,7 mV. Nesses valores de pH, essas suspensões (sem e com adição de dispersante) são estáveis ou defloculadas não necessitando de ajustes.

A Figura 3 apresenta o comportamento reológico das suspensões aquosas preparadas com o pó vítreo LZSA com concentrações variando de 30 a 42,5% em volume de sólidos. Observa-se, a partir da análise da Figura 3, que as suspensões apresentam comportamento dilatante, caracterizado por um aumento da viscosidade aparente com a elevação da taxa de cisalhamento aplicada. Este comportamento é característico de suspensões altamente concentradas, onde as partículas encontram-se muito bem empacotadas e bastante próximas entre si [22]. Observa-se também que nas curvas de fluxo a recuperação da viscosidade é dependente do tempo (tixotropia), caracterizada pela formação do laço de histerese entre o fluxo de subida e descida da taxa de cisalhamento (ver representação na curva 6, Figura 3). A manifestação deste comportamento tixotrópico se dá pela relação do tempo de formação e de destruição dos aglomerados de partículas quando aplicada uma tensão de cisalhamento.

Assim, para baixas taxas de cisalhamento o fluxo de líquido entre as partículas é relativamente fácil, mas torna-se cada vez mais difícil em condições de cisalhamento mais intensas. A presença de partículas com elevada rugosidade superficial e formato assimétrico, a existência de pronunciadas forças de repulsão entre as partículas, a estreita distribuição granulométrica e o aumento da concentração efetiva de sólidos da suspensão são fatores que podem contribuir para a ocorrência de dilatância numa suspensão [22].

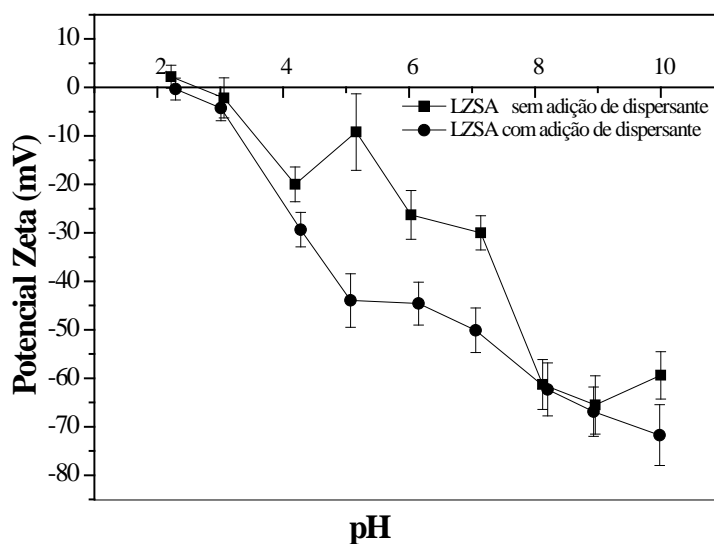


Figura 2: Variação do potencial zeta para o pó vítreo LZSA com e sem adição de dispersante polimetacrilato de amônio em função do pH.

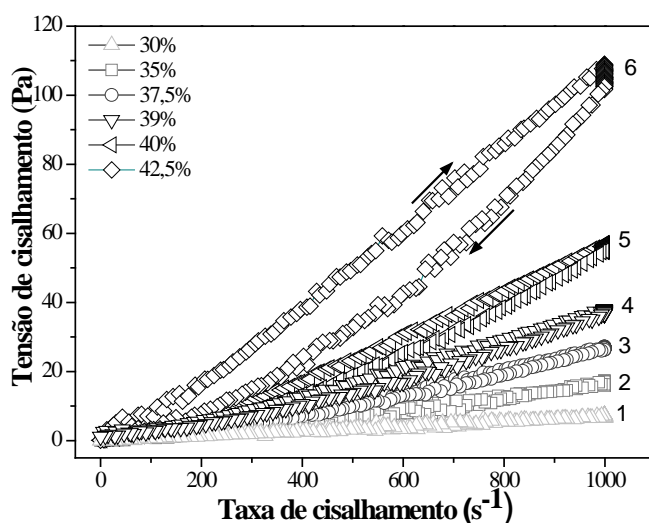


Figura 3: Curvas de tensão de cisalhamento para suspensões de pó vítreo LZSA contendo diferentes concentrações de sólidos, em volume: (1) 30%, (2) 35%, (3) 37,5%, (4) 39%, (5) 40%, (6) 42,5%.

Após obtenção das curvas de fluxo, definiu-se a suspensão com 40% em volume de sólidos como a mais adequada para dar prosseguimento ao estudo reológico, devido à acentuada histerese que as suspensões apresentaram em concentrações superiores a esta. A Figura 4 mostra a viscosidade aparente das suspensões cerâmicas (a 500 s^{-1}), obtida pela razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento, em função da fração mássica de dispersante polimetacrilato de amônio (0,5 a 3% em relação à massa de sólido). Observa-se (Figura. 4) que há uma diminuição da viscosidade aparente da suspensão na presença de 0,5% de dispersante, tornando-se praticamente constante na faixa de 0,5-1,5% e, após este ponto ocorre um aumento da viscosidade. Esta característica pode ser atribuída ao mecanismo de estabilização eletroestérica [22, 23] desse polieletrólito na superfície das partículas. Para dar prosseguimento a caracterização reológica das suspensões de pó vítreo, optou-se pelo uso de 1% em massa de dispersante, em relação à massa de sólido.

Com o objetivo de estudar a influência da adição de monômeros utilizados no processo *gelcasting*, a partir deste ponto da caracterização reológica, optou-se pela suspensão contendo 35%-vol. de pó vítreo, já que, concentrações superiores do pó e adição dos monômeros provocam aumentos significativos na viscosidade da suspensão, dificultando a formação de espumas de baixa densidade [9].

A Figura 5 apresenta as curvas de tensão de cisalhamento para suspensões contendo 35%-vol. de pó vítreo LZSA, 1% em massa (em relação à massa de sólido) de dispersante (polimetacrilato de amônio) e diferentes concentrações de monômeros: HMAM, MAM e MBAM, em proporção molar de 3:3:1 [19, 20, 24]. Pode-se observar (Figura 5) que, com a adição dos monômeros as suspensões continuam apresentando comportamento dilatante e tixotrópico. O aumento da viscosidade fica fortemente evidenciado quando se compara a viscosidade aparente das suspensões (a 500 s^{-1}) de pó vítreo LZSA preparadas com 35%-vol. sem monômeros e com monômeros (em destaque na Figura 5), indicando a influência dos mesmos sobre a reologia da suspensão.

Suspensões foram produzidas adicionando os percentuais extremos dos monômeros orgânicos (20 e 30% em volume), com diferentes concentrações de agente espumante (1,0; 1,2 e 1,4% em relação à massa da suspensão). A Figura 6 apresenta os dados de viscosidades aparentes (suspensões com monômeros) e volumes das espumas produzidas (com iniciador e catalisador) em relação aos teores de agente espumante adicionado. Observa-se (Figura 6) que quanto maior a concentração de agente espumante e de monômeros, maior o volume de espuma produzida. Porém, a suspensão com 30% de monômeros e com 1% de agente espumante, proporcionou uma estabilidade maior da espuma com menor coalescência de bolhas e danos macroestruturais antes da gelificação do sistema, fato que definiu esta composição como opção de caracterização do corpo cerâmico poroso.

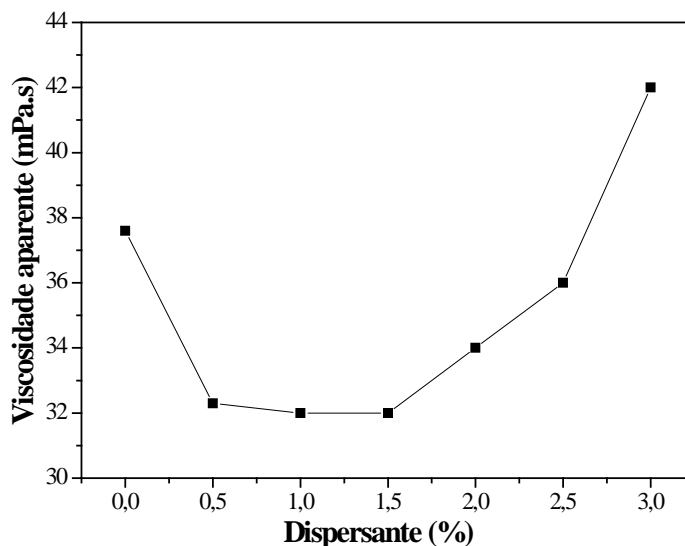


Figura 4: Variação da viscosidade relativa (a 500 s^{-1}) em função da fração mássica de dispersante (polimetacrilato de amônio) para suspensões contendo 40%-vol. de pó vítreo LZSA.

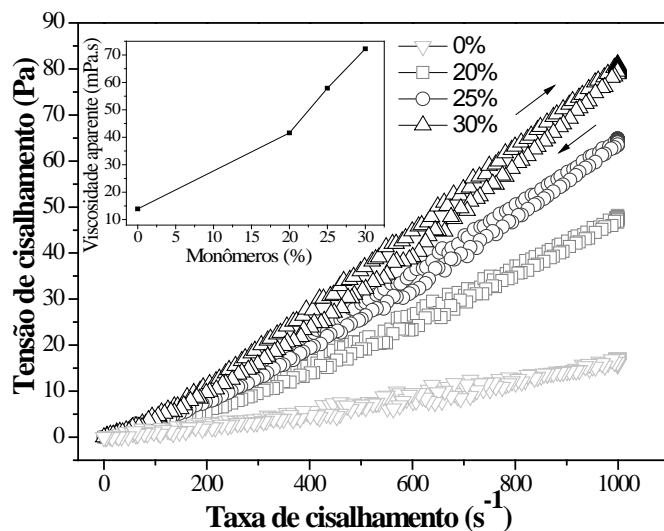


Figura 5: Curvas de tensão de cisalhamento para suspensões contendo 35%-vol. de pó vítreo LZSA, 1% de dispersante (polimetacrilato de amônio) e diferentes concentrações em volume de monômeros HMAM/MAM/MBAM em proporção molar de 3:3:1.

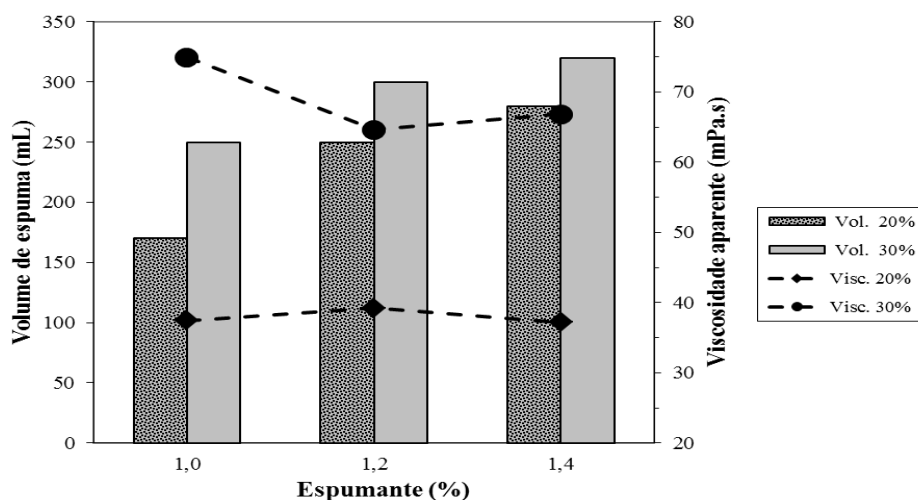


Figura 6: Viscosidade aparente e volume de espumas produzidas em função das concentrações de espumante e monômeros adicionados.

As espumas vitrocerâmicas sinterizadas a 950°C apresentaram densidade aparente de 0,25 g/cm³, retração térmica linear de 35,5% e porosidade de 90,5%. As micrografias da Figura 7 mostram uma distribuição homogênea de células abertas e interconectadas com distribuição de poros variando entre 50 e 300 µm.

O valor médio de resistência à compressão para as espumas vitrocerâmicas sinterizadas a 950°C por 60 minutos foi de 0,81 MPa. Este valor é menor ao verificado em espumas de mesma composição sinterizadas a 750°C por 60 minutos obtidas por SOUSA *et al.* [20], sendo que a espuma produzida neste trabalho é mais porosa (90,5%).

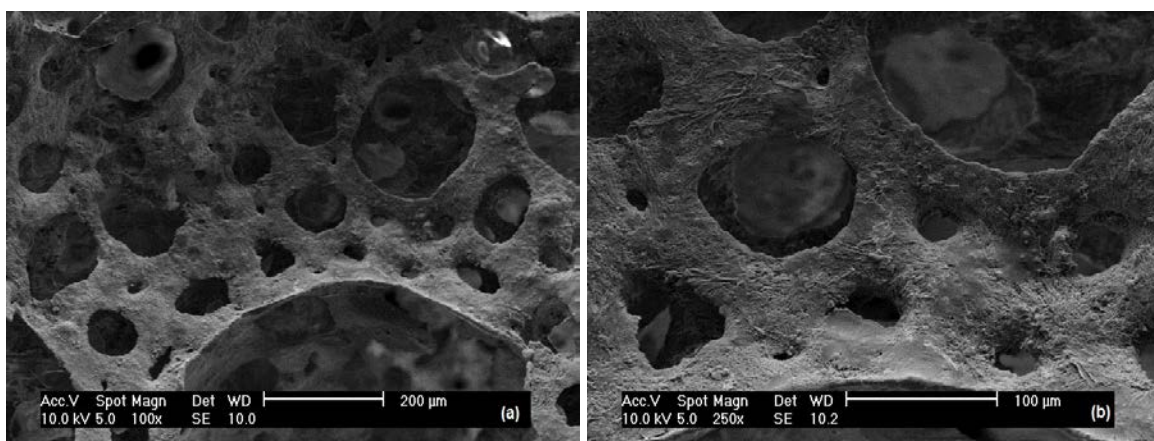


Figura 7: Micrografias (MEV) da espuma vitrocerâmica do sistema LZSA obtida por gelcasting com 1% em massa de agente espumante (polimetacrilato de amônio) e sinterizada a 950°C: (a) 100x ampliação e (b) 250x ampliação.

4. CONCLUSÕES

As suspensões preparadas com vitrocerâmicas do sistema LZSA, revelaram um comportamento dilatante e dependente do tempo (tixotropia), onde a viscosidade diminui continuamente com o tempo sob ação de um esforço cisalhante e apresenta uma recuperação subsequente da viscosidade com a interrupção do escoamento. A vitrocerâmica porosa, sinterizada a 950°C, produzida a partir de suspensões com 35%-vol. de pó vítreo LZSA, 30%-vol. de monômeros (HMAM, MAM, MBAM, em proporção molar 3:3:1), 1% de dispersante e 1% de agente espumante apresentou porosidade de 90,5%. As imagens de MEV revelaram que os poros de característica esférica estão interconectados e distribuídos homogêaneamente na matriz vitrocerâmica. O valor médio da resistência à compressão determinado foi de 0,81 MPa. O estudo realizado sugere a realização de experimentos que relacionem o aumento da quantidade de pó vítreo com a diminuição dos teores de monômeros (considerando benefícios ambientais e fisiológicos), sempre analisando as propriedades e aplicação das espumas produzidas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESC e o CNPq (PRONEX T.O. n°17431/2011-9).

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] FERREIRA, O.P., ALVES, O.L., MACEDO, J.S., *et al.*, “Ecomateriais: desenvolvimento e aplicação de materiais porosos funcionais para proteção ambiental”, *Química Nova*, v. 30, n. 2, pp. 464-467, Abr. 2007.
- [2] SIGMUND, W.M., BELL N.S., BERGSTROM, L., “Novel powder-processing methods for advanced ceramics”, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 83, n. 7, pp. 1557-1574, Jul. 2000.
- [3] YOUNG, A.C., OMATETE, O.O., JANNEY, M.A., *et al.*, “Gelcasting of alumina”, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 74, n. 3, pp. 612-618, Mar. 1991.
- [4] SEPULVEDA, P., “Gelcasting foam for porous ceramics”, *American Ceramic Society Bulletin*, v.76, n. 10, pp. 61-65, Oct. 1997.
- [5] SEPULVEDA, P., BINNER, J.G.P., “Processing of cellular ceramics by foaming and in situ polymerization of organic monomers”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 19, pp. 2059-2066, Oct. 1999.
- [6] SEPULVEDA, P., ORTEGA, F.S., INNOCENTINI, M.D.M., *et al.*, “Properties of highly porous hydroxyapatite obtained by the gelcasting of foams”, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 83, n. 12, pp. 3021-3024, Dec. 2000.
- [7] STUDART, A.R., GONZENBACH, U.T., TERVOORT, E., *et al.*, “Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review”, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 89, n. 6, pp. 1771-1789, Jun. 2006.

- [8] TALLON, C., FRANKS, G. V., “Recent trends in shape forming from colloidal processing: A review”, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, v. 119, n. 3, pp. 147-160, Mar. 2011.
- [9] ORTEGA, F. S., INOSTROZA, P. A. S., PANDOLFELLI, V. C., “Avaliação de sistemas gelificantes para a produção de cerâmicas porosas através da técnica ‘gelcasting’ de espumas”, *Cerâmica*, v. 46, n. 300, pp. 225-229. Out- Dez. 2000.
- [10] JANNEY, M.A., OMATETE, O.O., WALLS, C.A., *et al.*, “Development of Low-Toxicity Gelcasting Systems”, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 81, n. 3, pp. 581–591, Mar. 1998.
- [11] YANG, J., YU, J., HUANG, Y., “Recent developments in gelcasting of ceramics”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 31, pp. 2569-2591, Nov. 2011.
- [12] CHEN, Y., XIE, Z., YANG, J., *et al.*, “Alumina casting based on gelation of gelatin”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 19, n. 2, pp. 271-275, Feb. 1999.
- [13] ORTEGA, F.S., VALENZUELA, F.A.O., SCURACCHIO, C.H., *et al.*, “Alternative gelling agents for the gelcasting of ceramic foams”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 23, n. 1, pp. 75-80. Jan. 2003.
- [14] LORYUENYONG, V., AONTEE, A., KAEOKLOM, *et al.*, Preparation of Porous Alumina by Gel-Casting Process Using Commercial Starches as a Gelling Agent, In: *Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications*, 1 ed., Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc., pp 413-416. 2010.
- [15] RIBEIRO, C., BRESSIANI, J.C., BRESSIANI, A.H.A., “A study of the consolidation method with albumin to obtain porous beta-TCP ceramics”, *Materials Research*. v. 10, n. 3, pp. 307-310, Sept. 2007.
- [16] MONTEDO, O.R.K., *Caracterização e preparação de camada de proteção para revestimento cerâmico constituído por vitrocerâmico do sistema LZSA*, Tese de D.Sc., PGMAT/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2005.
- [17] SILVEIRA, C.B., ESCOBAR, J.A., QUINTERO, M.W., *et al.*, “Decomposição térmica de espumas de poliuretano para fabricação de vitrocerâmicas celular de $\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (LZSA)”, *Química Nova*, v. 30, n. 5, pp. 1104-1107, Jul. 2007.
- [18] MUNDSTOCK, K.B., MORAES, E.G., HOTZA, D., *et al.*, “Processamento e caracterização de espumas vitrocerâmicas do sistema SNCP ($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO-P}_2\text{O}_5$)”, *Química Nova*, v. 33, n. 3, pp. 598-602, Jan. 2010.
- [19] SOUSA, E., ORTEGA, F.S., PANDOLFELLI, V.C., “Produção e caracterização de espumas de alumina pelo processo gelcasting sem controle atmosférico”, *Cerâmica*, v.55, n. 334, pp. 151-156, Jun. 2009.
- [20] SOUSA, E., RAMBO, C.R; ORTEGA, F.S., *et al.*, “Espumas vítreas do sistema $\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ produzidas pelo processo gelcasting”, *Cerâmica*, v.55, n. 334, pp.157-162, Jun. 2009.
- [21] PETERSSON, A., MARINO, G., PURSIHEIMO, A., *et al.*, “Electrosteric stabilization of Al_2O_3 , ZrO_2 , and 3Y-ZrO_2 suspensions: Effect of dissociation and type of polyelectrolyte”, *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 288, n. 1, pp. 73-81, Aug. 2000.
- [22] OLIVEIRA, I.R., STUDART, A.R., PILEGGI, R.G., *et al.*, *Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico*, 1 ed., São Paulo, Fazendo Arte, 2000.
- [23] HOTZA, D., “Artigo revisão: Colagem de Folhas Cerâmicas”, *Cerâmica*, v. 43, n. 283-284, pp. 157-164, Dez. 1997.
- [24] SOUSA, E., DELLÚ Jr, M., PANDOLFELLI, V.C., *et al.*, “Produção de cerâmicas celulares por emulsão seguida de gelificação”, *Cerâmica*, v. 57, n. 341, pp. 38-44, Mar. 2011.