

Produção e caracterização de espumas macrocelulares de alumina para aplicação em queimadores radiantes

Production and characterization of Al_2O_3 macromolecular foams for application in radiant burners

Verônica Moreno

Departamento de Engenharia Química da Universidad de los Andes (Uniandes)
Bogotá [Colombia]
veromo83@hotmail.com

Jairo Arturo Escobar

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidad de los Andes (Uniandes)
Bogotá [Colombia]
jaiescob@uniandes.edu.co

Oscar A. Alvarez

Departamento de Engenharia Química da Universidad de los Andes (Uniandes)
Bogotá [Colombia]
oalvarez@uniandes.edu.co

Carlos Renato Rambo

Departamento de Engenharia Química (EQA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Florianópolis, SC [Brasil]
rambo@enq.ufsc.br

Antônio Pedro Novaes de Oliveira

Departamento de Engenharia Mecânica (EMC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Florianópolis, SC [Brasil]
pedronovaes@emc.ufsc.br

Dachamir Hotza

Doutor em Engenharia;
Laboratório Interdisciplinar de Materiais – Labmat;
Departamento de Engenharia Mecânica – EMC;
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Florianópolis – SC [Brasil]
hotza@pq.cnpq.br

Nos últimos anos as indústrias vêm apresentando um grande interesse em diminuir a poluição gerada por seus processos, procurando alternativas que proporcionem igual ou melhor eficiência nos seus processos. Uma alternativa muito promissora na aplicação de processos que requerem aquecimento por radiação se refere aos queimadores radiantes porosos (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; CATAPAN, 2007). Os queimadores devem ser porosos e constituídos de uma cerâmica que, além de resistir a temperaturas elevadas (>1500°C), deve apresentar alta resistência ao choque térmico. Neste trabalho, foi utilizado o método da réplica para a obtenção de espumas de alumina. Espumas de poliuretano foram impregnadas com suspensões aquosas de 50-70% em massa de sólidos (Al_2O_3) mais aditivos (ligantes). A viscosidade da suspensão foi avaliada e ajustada a uma impregnação adequada. As espumas impregnadas foram submetidas a um tratamento térmico para degradação do poliuretano a 400°C/1h e, subsequentemente, sinterizadas (entre 1500°C e 1600°C/3h) para densificação das paredes celulares. Permeabilidade e resistência à compressão das espumas foram correlacionadas à microestrutura e à morfologia celular (tamanho e geometria das células). A temperatura de sinterização que apresentou melhores resultados foi 1600°C, promovendo maior densificação e aumento na resistência mecânica.

Palavras-chave: Alumina. Espuma cerâmica.
Método da réplica.

From time to time the industries present an interest on reducing the pollution generated by its processes, searching for alternatives which provide equal or better efficiency in its activities. A very promising alternative for the application of processes which need heating by radiation in related to the porous radiant burners (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; CATAPAN, 2007). The radiant burners should be porous and consist of a ceramic to resist at high temperatures (> 1500°C) and to provide high resistance to thermal shock. In this work, the replication method was used to obtain alumina foams. Polyurethane foams were impregnated with aqueous suspensions of 50-70% wt. solid (Al_2O_3) and additives (binders). The viscosity of the suspension was evaluated and adjusted to an appropriate impregnation. The impregnated foams were heat treated for degradation of polyurethane at 400°C/1h and subsequently sintered (between 1500°C and 1600°C/3h) for densification of the cell walls. Permeability and compressive strength of the foams were correlated to the microstructure and cellular morphology (size and geometry of the cells). The sintering temperature, which promoted greater densification and increase in mechanical strength, was 1600°C.

Key words: Alumina. Ceramic foam. Replication method.



1 Introdução

As espumas cerâmicas são materiais que se caracterizam por ter propriedades como baixa condutividade térmica, baixa densidade, alta resistência ao choque térmico e alta permeabilidade (SARMIENTO, 2006; SCHEFFLER, COLOMBO, 2004). Atualmente, devido a suas propriedades, esses materiais têm numerosas aplicações na indústria. Exemplos dessas aplicações são: queimadores porosos, filtros para motor diesel, filtros para fundição de metais e gases a altas temperaturas; também são usadas como isolamento térmico, suportes para catalisadores e trocadores de calor (SARMIENTO, 2006).

O desempenho das espumas cerâmicas depende basicamente da morfologia e do material do qual ela foi fabricada. Existem diferentes métodos de fabricação de espumas cerâmicas, tais como réplica, espumação direta e sacrifício de *template* (STUDART et al., 2006). Isso leva ao conceito de variadas tecnologias de fabricação das estruturas celulares cerâmicas segundo a utilização do produto final. O método da espuma polimérica (PSM – *polymeric sponge method*), também conhecido como método de réplica, oferece uma maneira simples, econômica e versátil de fabricar espumas cerâmicas.

Esse processo consiste na impregnação de uma espuma polimérica de sacrifício de células abertas com uma suspensão cerâmica. Posteriormente, a espuma polimérica é queimada e, finalmente, o material cerâmico é sinterizado, resultando em uma cerâmica celular com a morfologia inicial da espuma polimérica de sacrifício (STUDART et al., 2006). A capacidade de infiltração da suspensão cerâmica na espuma, a retenção da suspensão e as características finais da estrutura cerâmica dependem diretamente do tamanho e distribuição da célula da espuma polimérica e da reologia da suspensão (Tixotropia e Viscosidade)

(GIBSON et al., 1997). Um fluido ou suspensão tixotrópica apresentam uma diminuição na viscosidade aparente com o tempo quando submetidos a uma tensão de cisalhamento constante (DINGER, 2002; REED, 1995). A tixotropia é uma propriedade desejável nas suspensões cerâmicas nesse tipo de processo, pois permite que a suspensão seja impregnada nas paredes da espuma polimérica sem perda de suspensão em excesso.

Nos últimos anos, o interesse pelo estudo e a produção de materiais cerâmicos celulares teve um incremento em razão das propriedades que eles oferecem. O objetivo deste trabalho é fabricar e caracterizar espumas de alumina mediante o método da réplica para a sua utilização em queimadores porosos.

2 Material e métodos

Para o desenvolvimento do trabalho, foram escolhidos dois tipos de espumas: A, 10 ppi (poros por polegada) e B, 20 ppi de espumas de poliuretano de porosidade aberta (Foam Partner, Suíça). O material cerâmico utilizado foi alumina calcinada (A1, Alcoa, Brasil) com 98,5% de pureza e tamanho médio de partícula de 95 μm . Foram utilizados também os seguintes aditivos na preparação da suspensão cerâmica: acetato de polivinila (PVA) e um polímero acrílico (WB4101, Polymer Innovations, San Marcos, CA, EUA), utilizados como ligante, silicato de sódio (3,4% $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, Merck) e Darvan C (polimetacrilato de amônio, R.T. Vanderbilt, Norwalk, CT, EUA), utilizados como dispersantes, além de água deionizada utilizada como meio dispersante.

Para avaliar os diferentes fatores que podem influenciar as propriedades da suspensão de Al_2O_3 , foi feito um planejamento experimental. Foi elaborado um planejamento fatorial completo 2^4 , no qual foi variada a porcentagem de sólidos

dos na suspensão, a concentração do ligante e do dispersante, e o tipo de dispersante. Na Tabela 1, apresentam-se os fatores e os níveis do planejamento fatorial 2⁴.

Tabela 1: Fatores e níveis do planejamento fatorial completo 2⁴

Fator	Nível	
	-1	+1
Concentração de dispersante	1%	2%
Concentração de ligante	5%	10%
Porcentagem de sólidos	50%	60%
Tipo de dispersante	Na ₂ O/SiO ₂	Darvan C

Fonte: Os autores.

Com o objetivo de observar o comportamento reológico e obter uma composição ótima da suspensão de alumina, para, assim, ter uma boa impregnação das espumas, o comportamento tixotrópico foi medido como variável de resposta para cada ensaio. Neste trabalho foi usado o processo de fabricação de espumas cerâmicas pelo método da réplica (SOUSA et al., 2005; SCHEFFLER, COLOMBO, 2004). A suspensão foi preparada em um moinho de bolas (Servitech, CT 242). Os componentes (alumina, água, ligante e dispersante) foram misturados durante 10min a uma velocidade de 1720 rpm. A impregnação foi realizada manualmente, submergindo cada uma das amostras poliméricas (de 25 x 25 x 25 mm) na suspensão obtida. O processo de impregnação foi repetido 3 vezes. Após a impregnação, as amostras foram secadas em temperatura ambiente por 24 h (SARMIENTO, 2006; SOUSA et al., 2005). As amostras secas foram submetidas a um tratamento térmico para degradação do poliuretano e posterior sinterização do material cerâmico.

A caracterização das espumas foi feita mediante análises de resistência mecânica, morfologia/microestrutura, permeabilidade e porosidade.

Por meio da máquina de ensaios universais DL2000 foi medida a resistência mecânica das

amostras submetidas a diferentes temperaturas de sinterização (1500, 1550, 1600°C). A microscopia eletrônica de varredura foi feita num equipamento Philips XL 30 e foram obtidas imagens das amostras sinterizadas com aumentos de 17, 30, 500 e 4000 vezes. A densidade relativa e a porosidade das espumas de poliuretano foram definidas pelos dados de densidade fornecidos pelo fabricante e a densidade do material sólido medido por picnometria de He. Foram medidas as dimensões das 45 amostras de espumas sinterizadas em diferentes temperaturas com um micrômetro (Mitutoyo série 530, Japão). As dimensões das espumas cerâmicas foram comparadas com as das amostras poliméricas para se estabelecer a porcentagem de retração volumétrica das amostras após a sinterização.

A reologia das suspensões cerâmicas foi analisada usando-se um viscosímetro rotacional, com geometrias de cilindros concêntricos (System/52p Rheomex, Haake), a uma taxa de cisalhamento de 1-500 s⁻¹. A tixotropia e a viscosidade das diferentes suspensões foi determinada para diferentes composições, a partir de um planejamento experimental, mediante o gráfico de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento (DINGER, 2002; MACOSKO, 1994; ZHU et al., 2002). A permeabilidade das espumas de poliuretano e das réplicas foi avaliada por meio de medidas de queda de pressão em função da velocidade de fluxo de N₂ nas amostras. Os resultados foram obtidos em temperatura ambiente. Um transdutor de pressão (Omega PX137-015AV) foi utilizado para determinação da pressão e um fluxímetro (Omega FMA-1720) foi utilizado para determinação da vazão do gás.

3 Resultados e discussão

Para avaliar a influência dos fatores do planejamento sobre o comportamento tixotrópico da



suspensão foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos no comportamento reológico das suspensões (*software* Statistica 6.0). A Tabela 2 e 3 apresentam a tabela de ensaios realizados e a análise de variância com um nível de confiança de 95% e, na sequência, a Figura 1, os resultados dos efeitos representados em um gráfico de pareto.

Tabela 2: Ensaios do planejamento experimental

Ensaio	1	2	3	4	Resposta
					Tixotropia
1	(-1) 1%	(-1) 5%	(-1) 50%	(-1) NaSiO2	30,04
2	(+1) 2%	(-1) 5%	(-1) 50%	(-1) NaSiO2	567,6
3	(-1) 1%	(+1) 10%	(-1) 50%	(-1) NaSiO2	102,5
4	(+1) 2%	(+1) 10%	(-1) 50%	(-1) NaSiO2	416,2
5	(-1) 1%	(-1) 5%	(+1) 60%	(-1) NaSiO2	80,27
6	(+1) 2%	(-1) 5%	(+1) 60%	(-1) NaSiO2	0,1328
7	(-1) 1%	(+1) 10%	(+1) 60%	(-1) NaSiO2	346,8
8	(+1) 2%	(+1) 10%	(+1) 60%	(-1) NaSiO2	219,4
9	(-1) 1%	(-1) 5%	(-1) 50%	(+1) Darvan C	30,04
10	(+1) 2%	(-1) 5%	(-1) 50%	(+1) Darvan C	301,8
11	(-1) 1%	(+1) 10%	(-1) 50%	(+1) Darvan C	1615
12	(+1) 2%	(+1) 10%	(-1) 50%	(+1) Darvan C	332,8
13	(-1) 1%	(-1) 5%	(+1) 60%	(+1) Darvan C	3300
14	(+1) 2%	(-1) 5%	(+1) 60%	(+1) Darvan C	1291
15	(-1) 1%	(+1) 10%	(+1) 60%	(+1) Darvan C	255
16	(+1) 2%	(+1) 10%	(+1) 60%	(+1) Darvan C	1476

Fonte: Os autores.

Tabela 3: Análise de variância para comportamento tixotrópico da suspensão

Fator	SS	df	MS	F	P
(1) % Dispersante	83336	1	83336	0,285	0,616
(2) % Ligante	1724506	1	1724506	5,90	0,059
(3) % Sólidos	79727	1	79727	2,729	0,159
(4) Tipo de dispersante	2922986	1	2922986	10,00	0,025
1-2	1371875	1	1371875	4,694	0,0824
1-3	43718	1	43718	0,149	0,714
1-4	372760	1	372760	1,275	0,309
2-3	296692	1	296692	1,015	0,095
2-4	1231602	1	1231602	4,214	0,091
3-4	1272439	1	1272439	4,354	
Erro	1461222	5	292244		
Total SS	11578863	15			

Fonte: Os autores.

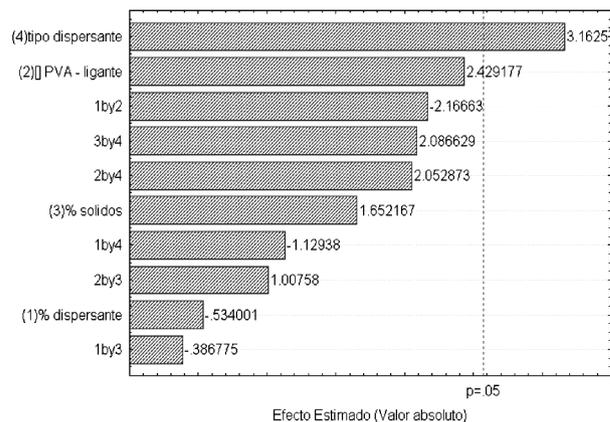


Figura 1: Gráfico de pareto dos resultados dos efeitos

Fonte: Os autores.

Dos resultados obtidos, apresentados na Tabela 3, pode-se observar que o fator 4 (tipo de dispersante) foi o mais significativo no comportamento tixotrópico das suspensões. Assim, o valor de p é menor do que 0,05 para o fator 4, enquanto que para os outros três fatores (% dispersante, % ligante e % sólidos) e para as interações entre os fatores, o valor de p está acima de 0,05 (BARROS NETO et al., 1995).

Não foi possível inicialmente preparar suspensões com uma porcentagem de sólidos maior do que 45% em peso. A suspensão apresentou um comportamento muito viscoso, sem fluência, impedindo assim a impregnação na estrutura polimérica de modo efetivo. Nesses casos, no momento da degradação térmica do poliuretano, nenhuma das estruturas resistiu, colapsando completamente.

Com esses resultados, foram analisados os fatores que poderiam ter influência na obtenção das estruturas celulares. Um desses fatores diz respeito ao conteúdo de sólidos (SCHEFFLER; COLOMBO, 2004). Para conseguir aumentar esse conteúdo de sólidos na suspensão, foi feita uma redução de tamanho de partícula da alumina (HAN et al., 2003), por meio de moagem por 72h em um moinho de bolas (FLORES; NEVES, 1997). Nas análises granulométricas apresentadas na Tabela 4, evidencia-se que houve uma redução no tamanho das partículas maiores, (aproximadamente 30%), o que permitiu a preparação de suspensões com um conteúdo de sólidos maior do que 45%.

A análise reológica das suspensões, apresentada na Figura 2, mostrou que quase todas apresentavam um comportamento tixotrópico, mas

apenas em 4 suspensões esse comportamento é mais evidente (suspensões 11, 13, 14 e 16).

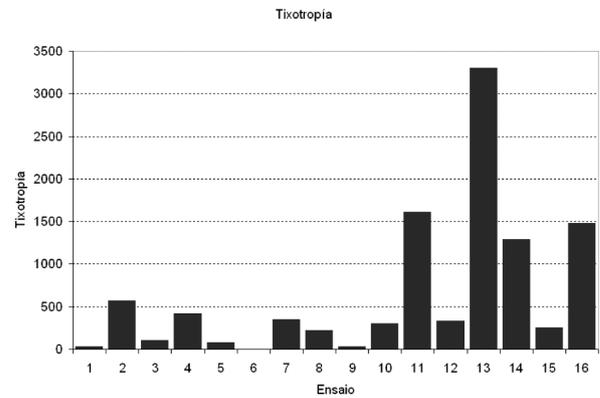


Figura 2: Tixotropia das diferentes suspensões

Fonte: Os autores.

As suspensões com $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ apresentaram uma viscosidade maior, o que dificultou uma impregnação homogênea. Esse comportamento foi verificado no momento da impregnação das espumas, no qual se evidenciou paredes não recobertas. As Figuras 3 e 4 apresentam as curvas reológicas das suspensões com composição (60% de

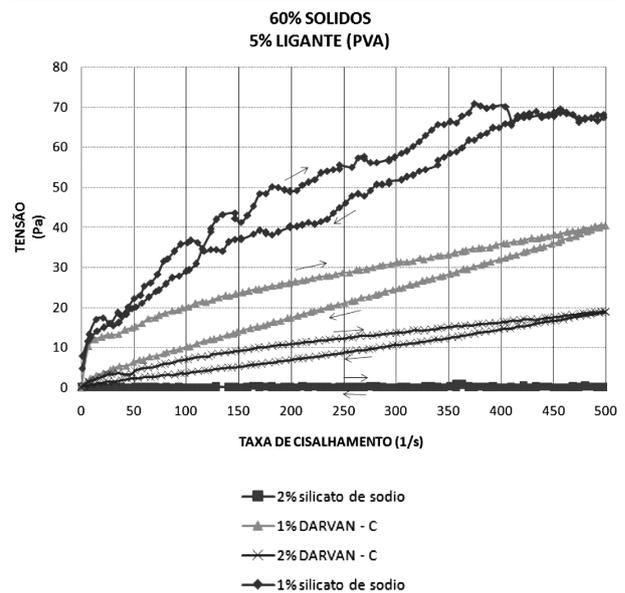


Figura 3: Tensão versus taxa de cisalhamento (60% sólidos, 5% ligante (PVA), 1% e 2% dispersante $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ e Darvan C)

Fonte: Os autores.

Tabela 4: Granulometria inicial e após 72 h de moagem

	Distribuição inicial	Distribuição final
D10 (μm)	55	55
D50 (μm)	95	95
D90 (μm)	150	120

Fonte: Os autores.



sólidos, 1% e 2% dispersante, 5% PVA) variando o tipo de dispersante ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ou Darvan C) e composição (60% de sólidos, 1% e 2% dispersante, 10% ligante PVA), variando o dispersante.

Observa-se que a suspensão com $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ apresenta uma maior tensão de cisalhamento e uma maior viscosidade, enquanto que a suspensão com Darvan C apresenta um comportamento reológico mais adequado, com menor tensão e menor viscosidade. Dessa forma, foi possível obter uma boa impregnação da espuma polimérica.

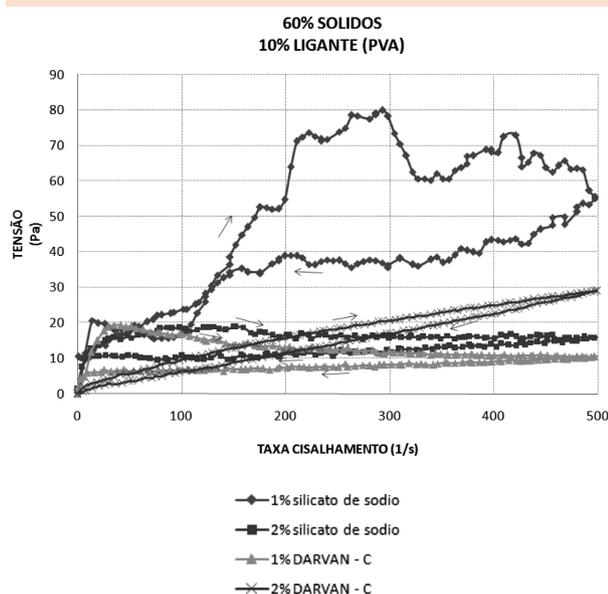


Figura 4: Tensão versus taxa de cisalhamento (60% sólidos, 10% ligante (PVA), 1% e 2% dispersante $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ e Darvan C)

Fonte: Os autores.

A suspensão com conteúdo de sólidos de 60%, PVA como ligante (5%), Darvan C como dispersante (1%) e água como solvente foi a que apresentou maior valor de tixotrópico, com uma viscosidade apropriada para a impregnação das espumas poliméricas. Nesse caso, conseguiu-se uma melhor aderência da suspensão na espuma polimérica. Com a composição da suspensão escolhida, foi testado também o composto acrílico como ligante, substituindo o PVA.

A Figura 5 apresenta a comparação da curva reológica das suspensões com o PVA e o polímero acrílico como ligante. Observa-se que as duas suspensões apresentam um comportamento similar, mas a com ligante acrílico apresentou uma tixotropia maior, promovendo aderência da suspensão nas espumas, observado durante a impregnação. Dessa forma, a suspensão com ligante acrílico foi escolhida, de forma que nenhuma amostra colapsou após a degradação do poliuretano durante o tratamento térmico.

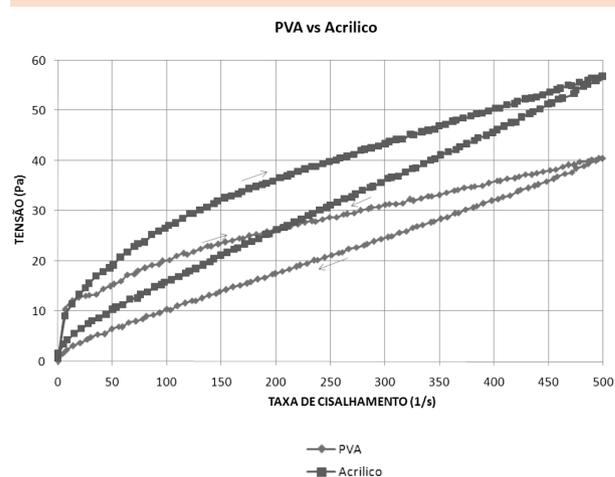


Figura 5: Tensão versus taxa de cisalhamento para a suspensão com ligante PVA e com ligante acrílico

Fonte: Os autores.

Na Figura 6, apresenta-se um gráfico comparativo da resistência mecânica das amostras obtidas na réplica da espuma A (10 ppi) e da espuma B (20 ppi) sinterizadas a 1500°C , 1550°C e 1600°C . Embora o número de amostras não seja representativo (2 para cada temperatura), observou-se que os dois tipos de espumas tiveram um comportamento similar, apresentando um aumento na resistência mecânica com a temperatura de sinterização.

A estrutura que apresentou maior resistência foi a espuma de células maiores (réplica da espuma A, 10 ppi), sinterizada a 1600°C . O resultado

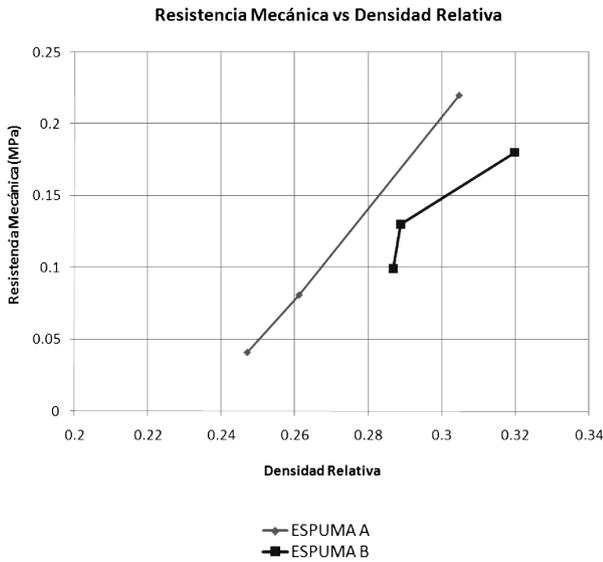
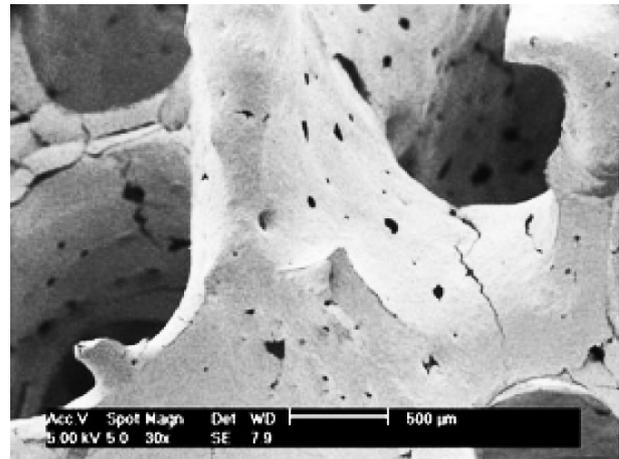


Figura 6: Resistência mecânica em função da densidade relativa das espumas cerâmicas
Fonte: Os autores.

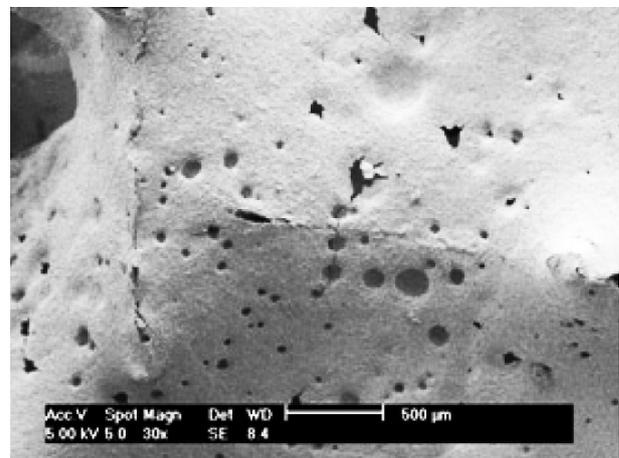
pode ter ocorrido em razão da maior espessura das paredes da espuma A (células maiores) em relação à espuma B, o que pode ser comprovado nas micrografias apresentadas na Figura 6. Observou-se também que as estruturas com melhor resistência mecânica foram as réplicas da espuma B (20 ppi) nas temperaturas de 1500°C e 1550°C, e a que apresentou melhor resistência na temperatura de sinterização de 1600°C foi a réplica da espuma A. A maior resistência mecânica foi 0,22 MPa (SMITH, 1998).

Observou-se que o aumento na resistência mecânica com a temperatura de sinterização está diretamente relacionado com a densificação do material (HAN et al., 2002). Com uma maior densificação, a estrutura fica mais resistente. Na Figura 7, é possível observar a influência da temperatura de sinterização na densificação da estrutura.

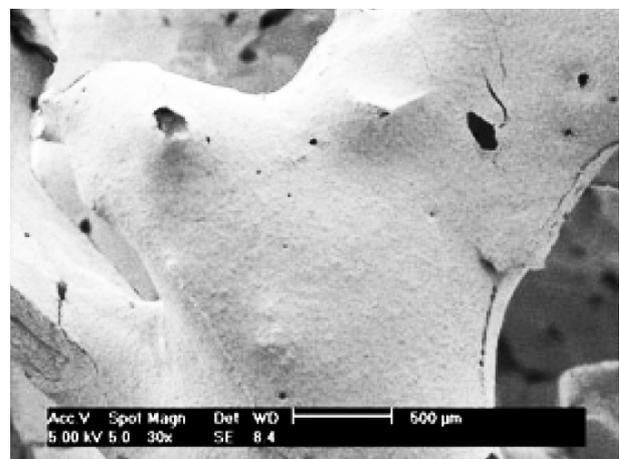
Observa-se que nas temperaturas de 1500°C e 1550°C não houve diferença significativa. As duas estruturas (a e b) apresentaram uma grande quantidade de micro poros (calculados por meio de análise de imagem), enquanto que na temperatura de 1600°C (c) observa-se uma estrutura mais



(a)



(b)



(c)

Figura 7: Micrografias MEV das amostras sinterizadas a 1500°C (a), 1550°C (b) e 1600°C (c)

Fonte: Os autores.



densificada com uma diminuição da quantidade de micro poros em aproximadamente 68%. A melhor densificação do material na temperatura de 1600°C teve como consequência um aumento na resistência mecânica. A Figura 7 mostra as micrografias das espumas sinterizadas a 1600°C tomadas com estereoscópio, com aumentos de 50 e 500x.

Observa-se que as paredes das células são mais espessas do que as paredes das células da espuma de poliuretano. Isso comprova que a impregnação das espumas foi adequada, embora as espumas cerâmicas ainda apresentem algumas cé-

lulas fechadas; aproximadamente 22% no caso da espuma A e 18% no caso da espuma B.

As paredes mais espessas promovem uma maior resistência mecânica, mas diminuem a porosidade, consequência indesejável, já que a alta porosidade é uma das características mais importantes das estruturas celulares. As espumas de alumina apresentaram uma retração volumétrica com a eliminação do poliuretano e posteriormente com a sinterização. Nas temperaturas de 1500°C e 1550°C, houve uma retração volumétrica de 35%, enquanto que as amostras sinterizadas a 1600°C apresentaram uma retração volumétrica maior; 51%. A porosidade

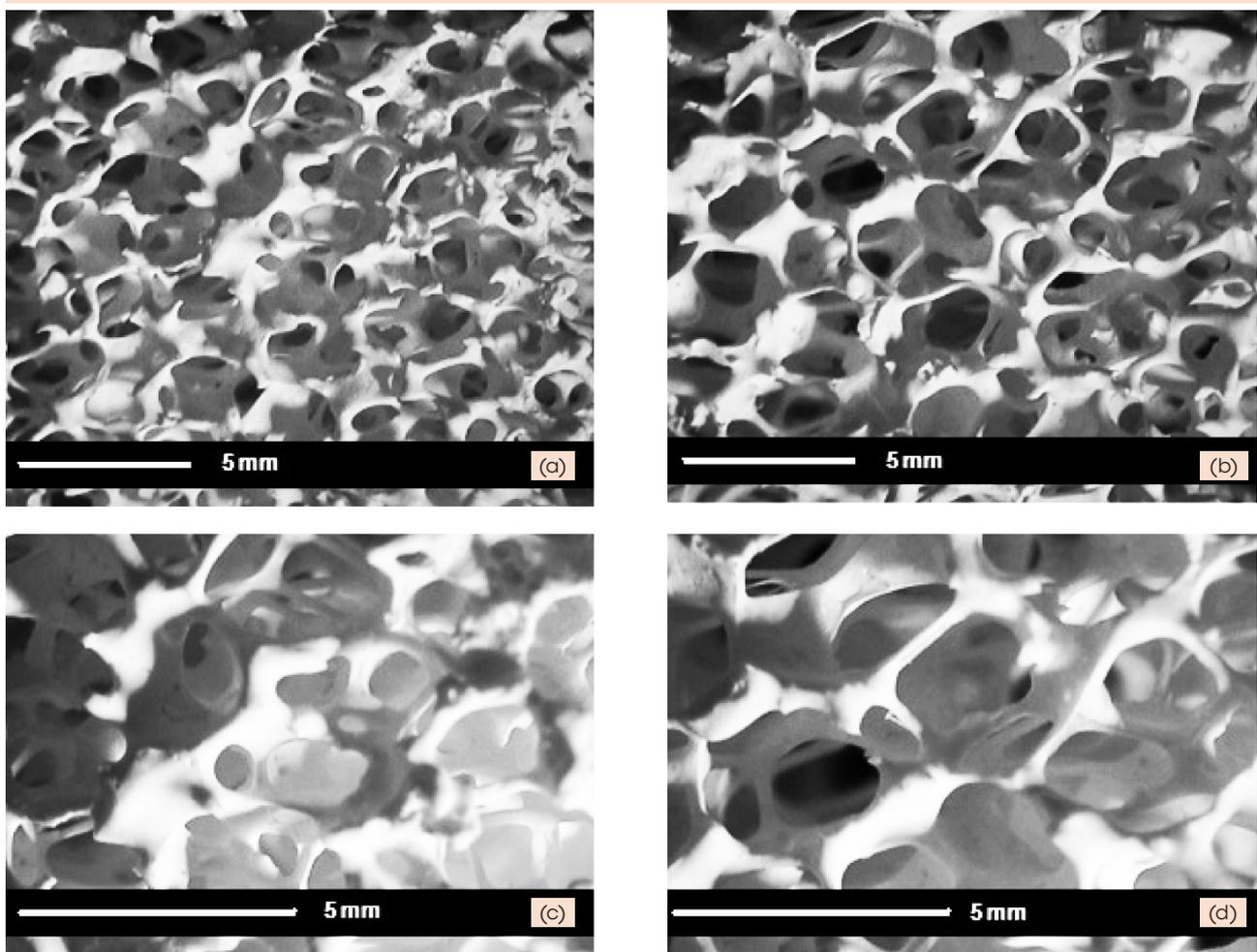


Figura 8: Micrografias das espumas sinterizadas a 1600°C, (a e c) aumento 50x espuma A e B respectivamente, (c e d) aumento 100x espuma A e B, respectivamente

Fonte: Os autores.

das amostras é mostrada na Figura 8. Observa-se que a porosidade está em uma faixa de 70 a 80 %. As amostras sinterizadas a 1600°C apresentaram uma diminuição na porosidade. A diminuição da porosidade com a temperatura de sinterização é um comportamento esperado, pois na maior temperatura de sinterização houve uma redução de volume mais significativa. Houve também uma diminuição na porosidade da réplica cerâmica em comparação com a espuma de

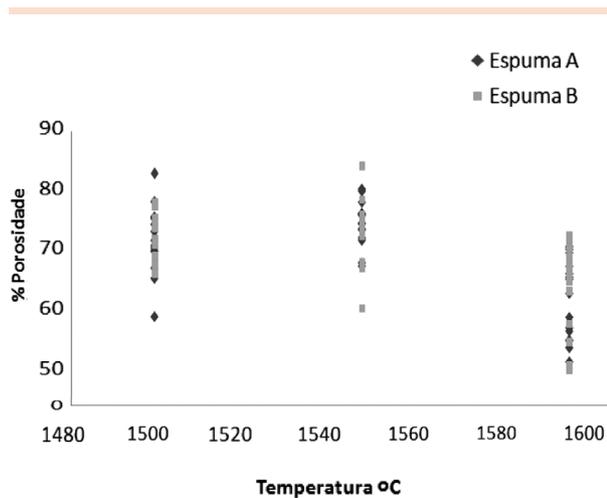


Figura 9: Distribuição da porosidade nas espumas cerâmicas

Fonte: Os autores.

poliuretano (97,4% espuma A e 97,6% espuma B) em razão do espessamento das paredes das células e ao surgimento de células fechadas, consequência do processo de impregnação com a suspensão de alumina.

A Figura 10 mostra os resultados da permeabilidade Darciana medida das espumas cerâmicas e de poliuretano.

A permeabilidade Darciana das amostras replicadas é menor do que a permeabilidade das espumas poliméricas. Uma redução de 36,4% foi encontrada no valor da permeabilidade entre a espuma de poliuretano A (*template*) e a réplica A, enquanto que a redução para a espuma B foi de 32,8%. Observa-se também que a réplica B é

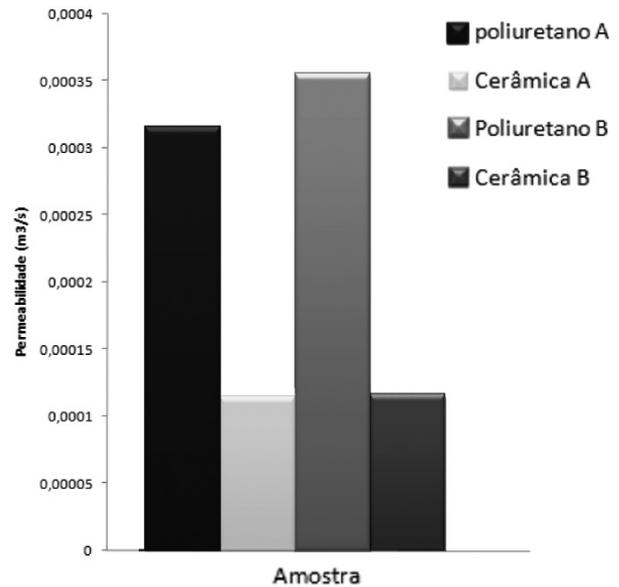


Figura 10: Comparação da permeabilidade Darciana das espumas de poliuretano e espumas cerâmicas

Fonte: Os autores.

1,5% mais permeável do que a réplica A. Os resultados da permeabilidade concordam com os resultados da porosidade. Pode-se afirmar que quanto menor é a porosidade, menor é a permeabilidade.

4 Conclusões

Foram obtidas espumas de alumina a partir de espumas de poliuretano por meio do método da réplica. A suspensão que apresentou os melhores resultados foi a que continha uma composição de 60% de sólidos (alumina), 5% ligante (acrílico), 1% dispersantes (Darvan C) e 34% de meio dispersante (água). Mediante a avaliação de três temperaturas de sinterização (1500, 1550 e 1600°C), a que apresentava melhores resultados foi 1600°C. Foram caracterizadas as espumas cerâmicas apresentando uma notável melhora na resistência mecânica e a densificação do material com a temperatura de sinterização. A porosidade diminuiu e a densidade relati-



va aumentou com o aumento da temperatura de sinterização. A permeabilidade diminuiu com a diminuição da porosidade e com o aumento da densidade relativa.

Referências

- Barros Neto, B.; Scarminio, I. S.; Bruns, R. E. *Planejamento e otimização de experimentos*. 2. ed., Campinas: UNICAMP, 1995, 299 p.
- CATAPAN, R. de C. *Estudo do mecanismo combinado térmico e fluidodinâmico de estabilização de chama em um queimador poroso radiante e sua operação em ambiente de elevada temperatura*. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, Florianópolis. 2007.
- DINGER, D. R. *Characterization techniques for ceramists*. Clemson, SC: D. Dinger, 2005. 271 p.
- DINGER, D. R. *Rheology for ceramists*. Clemson, SC: D. Dinger, 2002. 213 p.
- FLORES, S. M. P.; NEVES, R. F. Alumina para utilização cerâmica, obtida a partir do rejeito de beneficiamento de caulim. *Cerâmica*, v. 43, n. 283-284, p. 175-179, 1997.
- GIBSON, L. J. *Cellular solids: structure and properties*. 2ª ed. New York: Cambridge University Press, 1997. 536 p.
- HAN, Y.-S.; LI, J.-B.; CHEN, Y.-J. Fabrication of bimodal porous alumina ceramics. *Materials Research Bulletin*, v. 38, n. 2, p. 373-379, jan. 2003.
- HAN, Y.-S.; LI, J.-B.; WEI, Q.-M.; TANG, K. The effect of sintering temperatures on alumina foam strength. *Ceramics International*, v. 28, n. 7, p. 754-759, mar. 2002.
- LUYTEN J.; THIJS I.; VANDERMEULEN, W. ; MULLENS, S. ; WALLAEYS, B. ; MORTELMANS, R. Strong ceramic foams from polyurethane templates. *Advances in Applied Ceramics*, v. 104, n. 1, p. 4-8, fev. 2005.
- MACOSKO, C. W. *Rheology: principles, measurements and applications*. New York: Wiley-VCH, 1994. 550 p.
- REED, J. *Principles of ceramics processing*. 2. Ed., New York: Wiley, 1995. 658 p.
- REY VILLALBA, A. *Estudio y evaluación de la morfología de las espumas poliuretano flexible para ser usadas como medio de obtención de estructuras celulares cerámicas*. 2006. 85 f. Trabalho de conclusão de graduação em engenharia mecânica, Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colômbia, 2006.
- SARMIENTO, A. F. *Fabrication and characterization of glass-ceramic cellular structures by the replication method*. 2006. 97 f. Trabalho de conclusão de graduação em engenharia mecânica, Universidad de Los Andes, Bogotá D.C, Colômbia, 2006.
- SCHEFFLER, M.; COLOMBO, P. *Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004, 645 p.
- SOUSA, E.; SILVEIRA, C.B.; FEY, T.; GREIL, P.; HOTZA, D.; NOVAES DE OLIVEIRA, A.P. LZSA glass ceramic foams by replication process. *Advances in Applied Ceramics*, v. 104, n. 1, p. 22-29, fev. 2005.
- STUDART, A. R., GONZENBACH, U. T.; TERVOORT, E.; GAUCKLER, L. J. Processing routes to macroporous ceramics: A review. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 89, n. 6, p. 1771-1789, jun. 2006.
- ZHU, X; JIANG, D; TAN, S. The control of slurry rheology in the processing of reticulated porous ceramics. *Materials Research Bulletin*, v. 37, n. 3, p. 541-553, mar. 2002.

Recebido em 1 jun. 2009 / aprovado em 22 set. 2009

Para referenciar este texto

MORENO, V. et al. Produção e caracterização de espumas macrocelulares de alumina para aplicação em queimadores radiantes. *Exacta*, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 205-214, 2009.