

Efeito da adição de zircônia estabilizada com céria nas propriedades mecânicas de compósitos à base de alumina

Effect of zirconia stabilized with ceria in the mechanical properties of alumina composites

Heloísa Gonçalves Campos¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
helo.gc@gmail.com

Annelise Kopp Alves¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
annelise.alves@ufrgs.br

Resumo. Revestimentos de máquinas e equipamentos, por consequência de processos industriais, são danificados por abrasão, impacto e ataque químico, o que torna necessária a frequente parada de produção para ações de manutenção. Essa situação motiva o desenvolvimento de materiais de maior resistência a essas solicitações. A adição de óxidos de zircônio e cério em compostos à base de alumina tem apresentado resultados promissores quanto ao aumento nos valores de propriedades como a resistência mecânica, a densidade e a dureza. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi o estudo da influência da adição de zircônia parcialmente estabilizada com céria (ZPEC, 3 a 10%) em compósitos à base de alumina. Para a obtenção desses compostos, óxido de alumínio, óxido de cério e óxido de zircônio foram misturados em moinho de bolas e conformados por prensagem isostática a frio. Após, passaram por um processo de secagem e foram sinterizados a 1.500 ou 1.600°C. As matérias-primas foram caracterizadas por difração de raios X e granulometria a *laser*. As propriedades mecânicas, densidade, porosidade, resistência à flexão e dureza, dos materiais após a sinterização foram avaliadas utilizando-se ensaios de retração linear de queima, porosidade e densidade aparente e resistência mecânica à flexão em 4 pontos. Por ser um composto a ser utilizado em revestimentos de máquinas sujeito a desgaste erosivo, a taxa de erosão foi determinada através da aplicação de ensaio baseado na norma ASTM G-76. Os resultados indicam que o aumento no teor de ZPEC nos compósitos a base

Abstract. Coatings for machinery and equipment, in consequence of industrial processes, are damaged by erosion, impact and chemical attack, which lead to frequent production shutdown for maintenance actions. This fact encourages the development of higher strength materials to attend the processing needs. The addition of zirconium and cerium oxides into alumina based compounds has shown promising results as to increase the modulus properties of ceramic such as strength, density and hardness. In this context, the objective of this work was to study the influence of the addition of ceria partially stabilized zirconia (ZPEC, 3-10%) in alumina based composites. To obtain these compounds, aluminum oxide, cerium oxide and zirconium oxide were mixed in a ball mill and formed by cold isostatic pressing, dried and sintered at 1500 or 1600 °C. The raw materials were characterized by XRD and laser granulometry. Mechanical properties, density, porosity, strength and hardness of the materials after sintering were evaluated by linear shrinkage, apparent porosity and density and flexural strength. As a compound to be used as coating which will be subject to erosive wear, the erosion rate was determined by applying a test based on ASTM G-76. The results indicate that the increase in ZPEC content in the alumina-based composites tends to increase the values of resistance to erosive attack, density and flexural strength of these materials, which are im-

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Osvaldo Aranha, 99, sala 709, 90035-190, Porto Alegre, RS, Brasil.

de alumina tende a elevar os valores de resistência ao desgaste erosivo, de densidade e de resistência à flexão desses materiais, propriedades de extrema importância para a aplicação de materiais em ambientes industriais.

Palavras-chave: alumina, zircônia estabilizada com céria, propriedades mecânicas.

important properties for application of materials in industrial environments.

Keywords: alumina, ceria-stabilized zirconia, mechanical properties.

Introdução

Ainda que com diferentes intensidades, todo material experimenta algum tipo de interação com o ambiente em que se encontra. Tal interação pode comprometer o uso do material, devido à deterioração das suas propriedades mecânicas e físicas. Materiais cerâmicos são relativamente resistentes à deterioração que geralmente ocorre a elevadas temperaturas e/ou em ambientes bastante agressivos, como em presença de petróleo, minérios a altas velocidades, meios demasiadamente ácidos ou básicos (Schubert *et al.*, 2013). Os processos a que são submetidos os materiais cerâmicos quando submetidos a essas condições é normalmente chamado de corrosão (Rêgo, 2012).

Cerâmicas à base de alumina são amplamente utilizadas como materiais estruturais, devido ao elevado módulo de elasticidade, resistência ao desgaste, ataque químico e estabilidade a elevadas temperaturas. Entretanto, apresenta alguns fatores que limitam sua gama de aplicações, tais como baixa tenacidade à fratura e à flexão (Pierrri *et al.*, 2005). Como forma de reduzir as limitações de uso de materiais à base de alumina, compósitos com matriz desse material são estudados, apresentando resultados promissores frente a propriedades como dureza, tenacidade à fratura e resistência à flexão (Chiang *et al.*, 1997; Choi e Bansal, 2005; Magnani e Brillante, 2005; Zhong *et al.*, 2015).

Aditivos cerâmicos são compostos utilizados a fim de aprimorar propriedades físicas e mecânicas como densidade, resistência à flexão e erosão, dureza e tenacidade à fratura, bem como auxiliar no processo de sinterização do material. Diversos óxidos de terras raras são estudados para esses fins, dentre eles, o óxido de cério (Matóvic *et al.*, 2014). Através da adição de CeO₂ na estrutura de outros materiais cerâmicos, como a zircônia e a alumina, observam-se resultados promissores na melhora de suas propriedades tecnológicas (Rêgo, 2012; Choi e Bansal, 2005; Mitra *et al.*, 2015).

A adição de zircônia na alumina como aditivo de sinterização é utilizada com o objetivo de promover uma maior densificação do material. Compósitos de alumina e zircônia são conhecidos por ZTA (*Zirconia Toughened Alumina*) e ATZ (*Alumina Toughened Zirconia*). Para fins estruturais, quando uma maior resistência mecânica é necessária, a ATZ é mais utilizada, uma vez que a dureza da alumina (15 GPa) é maior que a apresentada pela zircônia (12 - 13 GPa) (Magnani e Brillante, 2005; Naga *et al.*, 2015). O compósito conhecido como ZTA consiste em uma matriz de alumina reforçada com partículas de zircônia (De Aza *et al.*, 2002; Naga *et al.*, 2015).

Com adição de zircônia na alumina como aditivo de sinterização, objetivou-se uma maior densificação dos compósitos e, como consequência, diminuição na porosidade do material. De acordo com Marques, a porosidade tem influência direta na taxa de erosão de materiais cerâmicos como a alumina e o ZPEC. Trabalhos como os de Zeng *et al.* (2014), Zhong *et al.* (2015) e Arab *et al.* (2015) apresentam resultados promissores em relação à melhora de propriedades físicas e mecânicas como tenacidade à fratura, dureza, resistência à flexão, densidade e porosidade com a adição de ZTA em cerâmicos à base de alumina. A gama de aplicações para esses compósitos é vasta. Esses materiais podem ser utilizados na área da saúde como próteses ou, ainda, nas indústrias na fabricação de peças e revestimentos.

Considerando-se esses aspectos, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar as propriedades de compósitos à base de alumina sinterizados a 1.500 ou 1.600°C, com inserção de 3, 7 ou 10% de zircônia parcialmente estabilizada com céria (14 mol%) – ZPEC, através de ensaios de porosidade aparente, densidade aparente, retração linear de queima, resistência mecânica de flexão a 4 pontos, taxa de erosão, com o intuito de determinar qual material se apresenta mais adequado, utilizando-se o

método de fabricação proposto, para obtenção de revestimentos de equipamentos industriais sujeitos a ambientes severos.

Materiais e métodos

Foram utilizadas como matérias-primas pós comerciais de Al_2O_3 (pureza 99,4525%, diâmetro médio de partícula 2,64 μm , densidade 4,0 g/cm^3 , tipo APC, ALCOA) e ZrO_2 parcialmente estabilizada com 14 mol% de óxido de óxido de cério (ZPEC, Cetarch). O CeO_2 (American Elements) possuía pureza de 82,54%, diâmetro médio de partícula de 1,0 μm e densidade de 7,22 g/cm^3 . Como ligantes, foram utilizadas soluções aquosas de álcool polivinílico (0,05% p/p) e de carboximetilcelulose (CMC, 0,025% p/p). Estes foram misturados aos pós através de aspersão, de maneira a ser adicionado 3% das soluções ligantes em relação à massa total do material em pó.

Foram definidas, para este trabalho, cinco diferentes formulações:

- 100 % Al_2O_3 + Ligantes
- 97 % Al_2O_3 + 3 %p ZPEC + Ligantes
- 93 % Al_2O_3 + 7 %p ZPEC + Ligantes
- 90 % Al_2O_3 + 10 %p ZPEC + Ligantes
- 100 % ZPEC + Ligantes

Para o preparo das formulações, foi realizado um procedimento de mistura de pós convencional utilizando-se um moinho de volume de 1 litro (Servitech, CT-241), preenchido com 50% de seu volume com esferas moedoras de alumina com diâmetro em torno de 3 mm. O processo de mistura foi realizado a seco durante 15 minutos, e a mistura resultante foi passada em sua totalidade em peneira *mesh* 200.

A conformação dos pós cerâmicos foi realizada através de prensagem isostática a frio (Cetarch), sob pressão de aproximadamente 240 kgf/cm^2 , em um molde metálico de aproximadamente 270 mm x 250 mm. Após a conformação dos pós, os corpos cerâmicos passaram previamente por um processo de secagem em estufa a 80°C por 24h. As amostras foram cortadas com auxílio de disco diamantado (Bosch 4.1/2", liso para porcelanato) nas dimensões 78 mm x 26 mm x 6 mm e submetidas a um acabamento superficial com lixas d'água 100, 200, 800 e 1.000. Foram então sinterizadas a 1.500 ou 1.600°C, utilizando taxa de aquecimento de 1,4°C/min, com patamar de 4h na temperatura máxima (forno mufla, modelo MAC - 1700, Cetarch). Após

a sinterização, os corpos de prova foram lixados com disco copo diamantado (Tyrolit CW0003) para que atingissem as dimensões de 60 mm x 20 mm x 5 mm. Após o lixamento, as peças foram polidas com auxílio de lixas d'água 100, 200, 800 e 1.000.

Foram realizados ensaios de difração de raios X (Phillips X'Pert.) e determinação da distribuição granulométrica a laser (Cilas, 1800L) para caracterização das matérias-primas.

Os corpos-de-prova sinterizados foram caracterizados quanto à resistência mecânica pelo método de flexão a quatro pontos (AG-X Plus, Shimadzu). A retração linear de queima (Equação 1) (Tanaka *et al.*, 2014) foi avaliada através da relação entre as dimensões dos materiais pré e pós sinterização.

$$\text{Retração Linear} = \left(\frac{L - L_0}{L} \right) \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde L e L_0 são, respectivamente, as medidas de comprimento dos corpos-de-prova pós e pré sinterização.

No ensaio de porosidade aparente (Equação 2) (Vallea *et al.*, 2015), os corpos-de-prova foram secos em estufa a 110°C. Após, foram pesados em uma balança de precisão e colocados dentro de um recipiente metálico, com altura de 70 mm. Os corpos-de-prova permaneceram completamente submersos em água à temperatura ambiente por 48h. Após esse período, foram pesados, novamente.

$$\text{Porosidade Aparente} = \left(\frac{P_{\text{saturado}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{seco}}} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde P_{saturado} é o peso do corpo-de-prova após 48h de imersão total e P_{seco} é o peso após da secagem a 110°C em estufa.

A densidade aparente (ρ_{aparente}) foi determinada utilizando-se princípio de Arquimedes, (Equação 3) (De Aza *et al.*, 2002).

$$\rho_{\text{aparente}} = \left(\frac{P_{\text{seco}}}{P_{\text{imerso}}} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Onde P_{seco} é o peso da peça seca, e o P_{imerso} é o peso medido no momento em que a peça encontra-se completamente submersa em água.

A densificação foi determinada através da razão entre a densidade aparente e a densidade teórica ($\rho_{\text{teórica}}$) do material compósito (Equação 4) (De Aza *et al.*, 2002).

$$\% \text{ densificação} = \left(\frac{\rho_{\text{aparente}}}{\rho_{\text{teórica}}} \right) * 100 \quad \text{Equação 4}$$

As densidades teóricas dos compósitos foram determinadas a partir das massas específicas de cada uma das matérias-primas utilizadas (Equação 5) (De Aza *et al.*, 2002). Para o cálculo das densidades teóricas dos compósitos, foram consideradas 4,0 g/cm³ a densidade da alumina (Viana, 2009) e 6,32 g/cm³ a densidade da zircônia parcialmente estabilizada com céria (Viana, 2009; Villanova *et al.*, 2012).

$$\rho_{teórica\ de\ compósito} = \left(\left(\frac{m_A}{(m_A + m_B)} \right) \times \rho_{teórica\ A} \right) + \left(\left(\frac{m_B}{(m_A + m_B)} \right) \times \rho_{teórica\ B} \right) \quad \text{Equação 5}$$

Onde: m_A é a massa, em gramas (g), do composto A; m_B é a massa, em gramas (g), do composto B; $\rho_{teórica\ A}$ é a densidade teórica (g/cm³) do composto A e; $\rho_{teórica\ B}$ é a densidade teórica (g/cm³) do composto B.

O desgaste de revestimentos de equipamentos é um dos principais problemas em processos industriais onde as linhas de transferência estão sujeitas à alta velocidade de fluidos contendo partículas sólidas. Para o ensaio de desgaste dos corpos-de-prova, foi utilizado um equipamento usado para ensaios de desgaste erosivo. Esse equipamento foi desenvolvido no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade do Federal do Rio Grande do Sul, baseado na norma ASTM G-76 (Marques, 2006). Para este ensaio, os corpos-de-prova foram limpos com álcool isopropílico e em seguida secos com ar comprimido. A seguir, foram pesados em uma balança analítica, e então colocados no porta-amostras do equipamento de erosão. Os parâmetros utilizados para a análise de desgaste

dos corpos-de-prova foram: ângulo de incidência de 90° do fluido com as partículas erodentes de alumina eletrofundida, de diâmetro médio 184 µm, temperatura do fluido (ar comprimido) de 25°C e velocidade de 20 g/min. Os corpos-de-prova foram submetidos ao teste por 30 minutos, uma vez que os corpos já apresentaram uma redução na massa na segunda casa decimal com esse tempo de exposição ao ensaio.

A taxa de desgaste foi estimada pela perda de volume, a partir da perda de massa considerando a densidade aparente dos corpos analisados. A Equação 6 foi a relação utilizada para obter os resultados para a taxa de desgaste (Marques, 2006).

$$T_{volume} = \frac{(m_i - m_f)}{\rho_{ap} - m_e} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: T_{volume} é a taxa de desgaste erosivo volumétrica;

m_i é a massa, em gramas (g), inicial do corpo de prova;

m_f é a massa, em gramas (g), final do corpo de prova;

ρ_{ap} é a densidade aparente (g/cm³) do corpo de prova;

m_e é a massa, em gramas (g), do erodente.

Resultados e discussões

Caracterização da matéria-prima

A análise de difração de raios X do óxido de zircônio parcialmente estabilizado com óxido de cério (14 mol%) – ZPEC (Figura 1) revelou a presença das fases zircônia-céria com predominância da fase tetragonal.

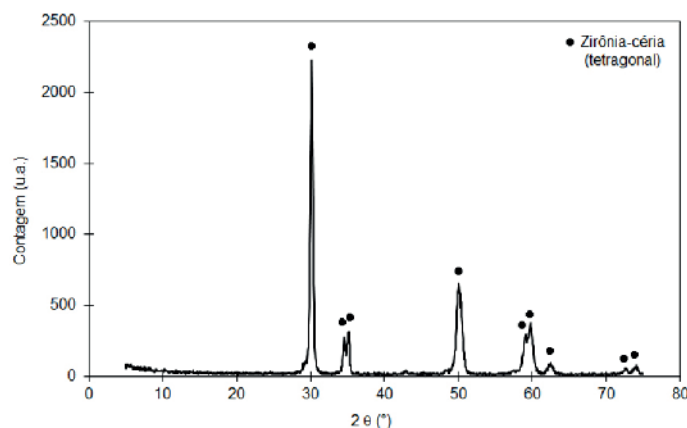


Figura 1. DRX do Óxido de Zircônio Parcialmente Estabilizada com Céria (ZPEC).

Figure 1. XRD of Zirconium oxide Partially Stabilized by Cerium oxide (ZPSC).

O diâmetro médio das partículas de alumina foi de 3,41 μm , enquanto o diâmetro médio das partículas de ZPEC foi de 2,8 μm . Entretanto, o diâmetro médio não pode ser apresentado como única informação do tamanho de particulado do material, uma vez que materiais com diâmetros médios iguais podem apresentar distribuições granulométricas diferentes e, conseqüentemente, comportamentos e propriedades diferentes (Cargnin *et al.*, 2011). A distribuição granulométrica dos pós utilizados foi então analisada; a Figura 2a mostra os resultados obtidos para a Al_2O_3 , e a Figura 2b, para a ZPEC.

O D_{10} , D_{50} e D_{90} das partículas de alumina foram, respectivamente, 0,31; 2,7 e 7,58 μm . Para esses mesmos parâmetros, em relação ao ZPEC, foram obtidos os valores de 0,71; 2,45 e 5,3 μm . Através da análise do perfil de distribuição de tamanho de partículas observado pelos histogramas das Figuras 2a e b, observa-se que a alumina e o ZPEC são muito semelhantes e complementares, por exemplo, na faixa de tamanhos em que há menor número de partículas de alumina, em torno de 1 μm , observa-se um maior número de partículas de ZPEC. Isso é um indicativo de que pode haver uma boa mistura desses pós, com as partículas menores ocupando os interstícios das partículas maiores, o que pode levar a um maior empacotamento e maior densificação.

De fato, os compósitos apresentaram níveis de porosidade bastante reduzidos e semelhantes entre si, independentemente do teor de ZPEC adicionado. Os valores de porosidade dos compósitos contendo 3, 7 ou 10% de ZPEC sinterizados a 1.500°C foi de 0,05%, mas por outro lado, quando sinterizados a 1.600°C, a

porosidade das amostras foi de 0,02%. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Rice ao trabalhar com corpos-de-prova de alumina, conformados por prensagem a quente, em diferentes temperaturas. As peças de alumina pura apresentaram porosidade aparente de 0,05 e 0,03%, para as temperaturas de sinterização de 1.500 e 1.600°C, respectivamente. As peças de ZPEC puro nas mesmas condições apresentaram porosidade aparente de 0,04 e 0,02%, respectivamente. Essa porosidade residual bastante reduzida pode estar associada à distribuição granulométrica do material (Tadokoro e Muccillo, 2001) e ao tipo de processamento de pó utilizado, a prensagem isostática.

Essa porosidade aparente bastante reduzida produz corpos-de-prova com baixa absorção de água (Figura 3) para ambas temperaturas de sinterização utilizadas. A absorção de água de ZPEC puro sinterizado ficou em torno de 5,7%, enquanto a absorção de água da alumina pura sinterizada foi de 4,7%. Os compósitos obtidos pela mistura de 3, 7 ou 10% de ZPEC em alumina sinterizados a 1.500 ou 1.600°C apresentaram, na prática, o mesmo valor de absorção de água, em média, 3,85%, para as diferentes composições ou temperaturas de sinterização.

A Figura 4a e b apresentam os resultados de retração linear de queima e densificação para os compósitos sinterizados a 1.500 e 1.600°C, respectivamente. Observa-se uma relação proporcional entre a retração linear e a densificação dos materiais: quanto maior a retração linear, maior é a densificação (Papini, 2003).

A retração linear dos compósitos sinterizados a 1.500°C atingiu, em média, 17,5% e em torno de 19% para a temperatura de 1.600°C.

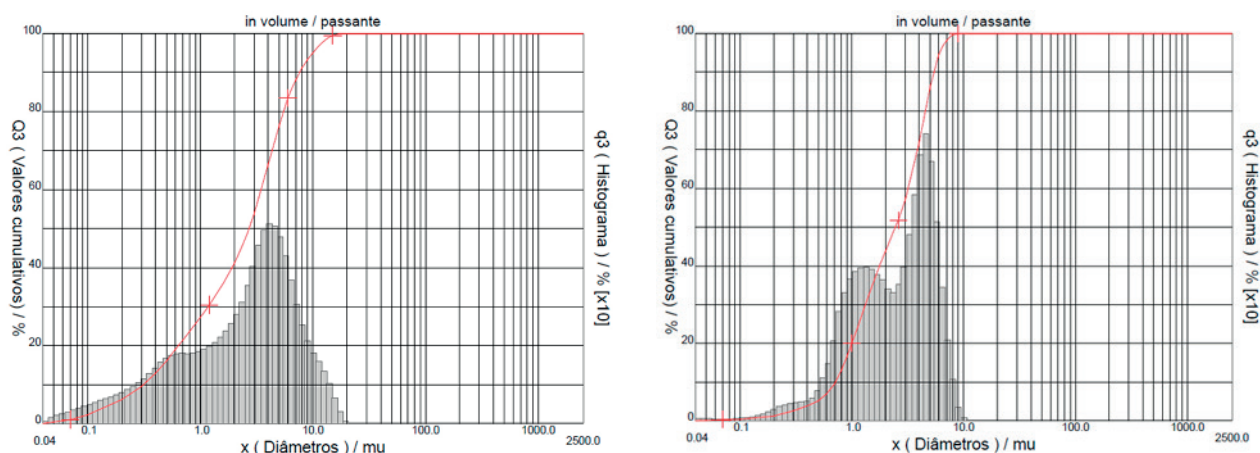


Figura 2. Distribuição Granulométrica: (a) alumina e (b) zircônia estabilizada com céria – ZPEC.
Figure 2. Granulometric distribution: (a) alumina and (b) zirconia partially stabilized with ceria – ZPEC.

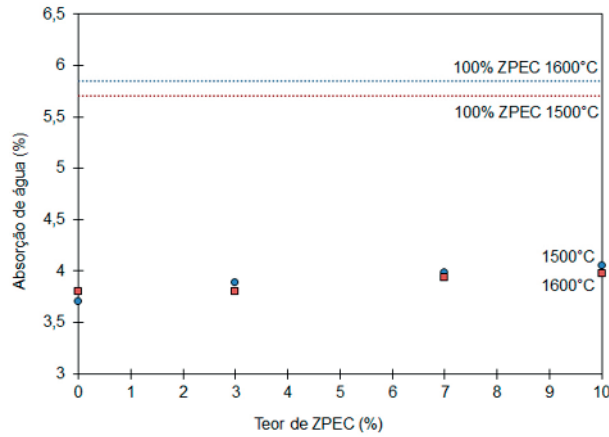


Figura 3. Absorção de água dos compósitos alumina-ZPEC sinterizados a 1.500°C e 1.600°C.
Figure 3. Water absorption of the alumina-ZPEC composites sintered at 1,500°C and 1,600°C.

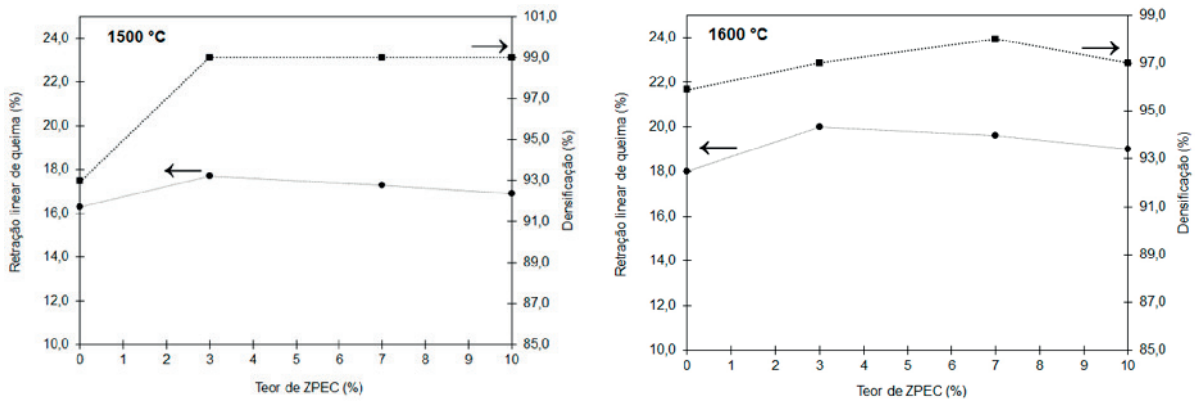


Figura 4. Relação entre a retração linear de queima e a densificação dos compósitos alumina-ZPEC sinterizados a 1.500°C (a) e 1.600°C (b).
Figure 4. Relation between linear shrinkage and densification of the alumina-ZPEC composites sintered at 1,500°C (a) and 1,600°C (b).

A variação na quantidade de ZPEC gerou uma leve diminuição na retração linear dos compósitos avaliados para uma mesma temperatura. Para os corpos-de-prova compostos apenas por ZPEC, a retração linear de queima atingiu em média 14 e 22% para as temperaturas de 1.500 e 1.600°C, respectivamente. Enquanto a densificação desse material a 1.500°C foi de 90,6% e, a 1.600°C, 93%.

Assim, observando os resultados dos materiais puros, observa-se que há um aumento na retração linear para os compósitos confeccionados com 3, 7 ou 10% de ZPEC. Para a temperatura de 1.500°C, observa-se que a adição de ZPEC não altera o valor de densificação, mantendo-a constante a 99%, em comparação com o valor de 93% da alumina pura e de 90,6% do ZPEC puro. Utilizando-se temperatura

de sinterização de 1.600°C, observa-se praticamente o mesmo comportamento constante da retração em relação aos diferentes teores de ZPEC adicionado (97%), porém, a alumina pura apresenta densificação de 95,9%, e o ZPEC puro, de 93%. Para os materiais puros, houve um aumento da densificação com o aumento da temperatura, porém, ao se sinterizar as misturas, observa-se que a maior densificação (99%) foi obtida em temperatura menor (1.500°C).

A resistência mecânica dos materiais cerâmicos é controlada pela presença do defeito de maior dimensão, trincas ou porosidade, por exemplo (Naga *et al.*, 2015; Stevens, 1986; Teixeira *et al.*, 2007). Considerando que as peças confeccionadas neste trabalho apresentaram baixa porosidade e elevada densificação, com

baixa variação dentro das composições estudadas, a resistência mecânica também variou pouco com o aumento do teor de ZPEC. A alumina pura apresentou resistência mecânica de 315 e 330 MPa, para as temperaturas de 1.500 e 1.600°C, respectivamente. O ZPEC puro apresentou resistência mecânica nessas respectivas temperaturas, de 311 e 375 MPa. Há um gradual aumento da resistência mecânica com a adição de ZPEC na alumina (Figura 5).

O ensaio de erosão gera resultados que possibilitam comparar os comportamentos dos materiais ensaiados nas mais diferentes situações de uso a que possam ser submetidos; entretanto, a comparação de resultados entre um e outro trabalho é dificultada, devido à diferença nos parâmetros aplicados nos ensaios, sejam eles na velocidade de impacto, ângulo, temperatura ou granulometria do erodente (Gonçal-

ves, 2011; Matović *et al.* 2014; Tiboni, 2011). Para materiais cerâmicos, a situação mais crítica de erosão é a mesma que foi aplicada no ensaio dos corpos de prova deste trabalho.

Através da análise da Figura 6, é possível observar a redução gradual da taxa volumétrica de desgaste em relação ao teor de ZPEC adicionado.

Esse fato pode estar relacionado às diferentes densidades dos compósitos. Em geral, corpos mais densos se apresentam mais compactos e, portanto, maior energia é necessária para separar as partículas que os constituem, levando a uma taxa de erosão menor (Marques, 2006; Assis, 2007; Yoshimura *et al.*, 2005). De fato, as amostras com menor valor de taxa de erosão, em torno de $3,3 \times 10^{-5}$ cm³ de amostra/g de erodente, foram as compostas por 100% ZPEC, que apresentam as maiores densidades aparentes, em torno de 5,8 g/cm³.

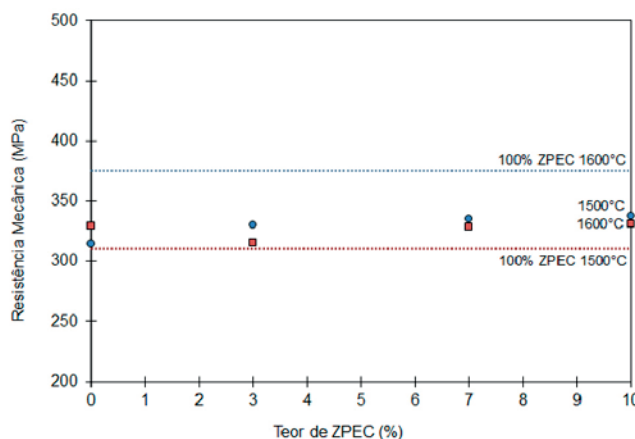


Figura 5. Resistência mecânica dos compósitos alumina-ZPEC sinterizados a 1.500°C e 1.600°C.
Figure 5. Mechanical strength of the alumina-ZPEC composites sintered at 1,500°C and 1,600°C.

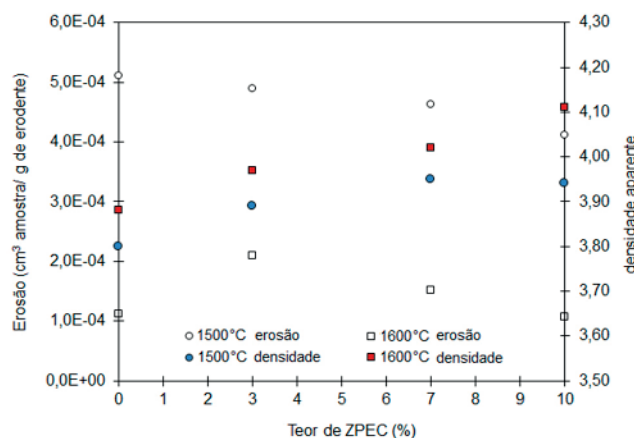


Figura 6. Taxa de erosão volumétrica e densidade aparente dos compósitos alumina-ZPEC sinterizados a 1.500°C e 1.600°C.

Figure 6. Volumetric erosion rate and apparent density of the alumina-ZPEC composites sintered at 1,500°C and 1,600°C.

Conclusões

Através da metodologia aplicada neste trabalho foi possível a obtenção de compósitos à base de alumina e zircônia estabilizada com 14% de céria (ZPEC) através da prensagem isostática a frio e subsequente sinterização a 1.500 e 1.600°C. De maneira geral, destaca-se:

- Os compósitos sintetizados possuem alta densidade relativa, entre 3,94 g/cm³ – 4,16 g/cm³ e baixa porosidade, entre 0,02 – 0,03 %, especialmente quando sinterizados na temperatura de 1.600°C. Contudo, a adição de ZPEC não altera a densificação do material, mantendo-a constante em 99%, independentemente do teor de ZPEC.
- A adição de ZPEC à alumina proporcionou um aumento proporcional na resistência mecânica dos compósitos. Por exemplo, a alumina pura sinterizada a 1.500°C possui resistência mecânica de 314 MPa, enquanto o ZPEC puro sinterizado nessa mesma temperatura possui resistência de 310 MPa. Seus compósitos nessas condições apresentam resistência mecânica crescente entre 330 a 337,5 Mpa, de acordo com o teor de ZPEC adicionado;
- Observou-se uma relação entre a taxa de erosão e a densidade dos compósitos. Há uma redução gradual da taxa de desgaste erosivo em relação ao teor de ZPEC adicionado. A amostra composta apenas por ZPEC foi a que apresentou o menor valor de taxa de erosão, em torno de 3,3 x 10⁻⁵ cm³ de amostra/g de erodente, e a maior densidade aparente, em torno de 5,8 g/cm³.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPQ e à Capes pelo auxílio financeiro.

Referências

- ALCOA (Comp.). 2015. Alumina Calcinada APC. Disponível em: https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/download/alumina_calcinada/APC.pdf. Acesso em: 08/11/2015.
- ARAB, A.; AHMAD, A.Z.; AHMAD, R. 2015. Effects of yttria stabilized zirconia (3Y-TZP) percentages on the ZTA dynamic mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **50**:157-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.01.005>
- ASSIS, J.M.K. 2007. *Estudo comparativo de compósitos alumina – zircônia tetragonal e de cerâmicas de alumina aditivada com nióbia para aplicações estruturais*. São José dos Campos, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 105 p.
- CARGNIN, M.; SOUZA, S.M.A.G.U. de; SOUZA, A.A.U. de; NONI JR., A. de. 2011. Determinação de parâmetros cinéticos da sinterização de revestimentos cerâmicos de monoqueima do tipo BIIa. *Cerâmica*, **57**(344):461-466. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132011000400014>
- CHIANG, Y.M.; BIRNIE D.P.; KINGERY, W.D. 1997. *Physical ceramics: principles for ceramic science and engineering*. 1ª ed., New York, John Wiley & Sons, Inc., 544 p.
- CHOI, S.R.; BANSAL, N.P. 2005. Mechanical behavior of zirconia/alumina composites. *Ceramics International*, **31**(1):39-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2004.03.032>
- DE AZA, A.H.; CHEVALIER, J.; FANTOZZI, G.; SCHEHL, M.; TORRECILLAS, R. 2002. Crack growth resistance of alumina, zirconia and zirconia toughened alumina ceramics for joint prostheses. *Biomaterials*, **23**(3):937-945. [http://dx.doi.org/10.1016/S0142-9612\(01\)00206-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00206-X)
- GONÇALVES, L.R.G. 2011. *Erosimetria a quente: equipamento, adequações e correlações dos valores obtidos com as propriedades de concretos refratários*. São Carlos, SP. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 147 p.
- MAGNANI, G.; BRILLANTE, A. 2005. Effect of the composition and sintering process on mechanical properties and residual stresses in zirconia–alumina composites. *Journal of The European Ceramic Society*, **25**(15):3383-3392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.09.025>
- MARQUES, C.M. 2006. *Relação entre microestrutura e desgaste erosivo a frio e a quente em materiais cerâmicos à base de alumina*. Porto Alegre, RS. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 170 p.
- MATOVIĆ, B.; STOJMENOVIĆ, M.; PANTIĆ, J.; VARELA, J.; ŽUNIĆ, A.M.; JIRABORVORNONGSA, N.; YANO, T. 2014. Electrical and microstructural properties of Yb-doped CeO₂. *Journal Of Asian Ceramic Societies*, **2**(2):117-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jascer.2014.01.008>
- MITRA, A.; MISHA, K.M.; SAHA, J.; DE, G. 2015. Design of mesoporous alumina–ceria films on glass: Compositional tuning leads to mesoscopic transformations. *Microporous And Mesoporous Materials*, **203**:151-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.10.014>
- NAGA, S.M.; HASSAN, A.M.; AWAAD, M. 2015. Physical and mechanical properties of Ta₂O₅ doped zirconia-toughened alumina (ZTA) composites. *Ceramics International*, **41**(5-Part A): 6248-6255. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.039>
- PAPINI, C.J. 2003. *Estudo comparativo de métodos de determinação do tamanho de partícula*. São Paulo, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), 130 p.
- PIERRI, J. J.; MAESTRELLI, S.C.; PALLONE, E.M.

- J.A.; TOMASI, R. 2005. Dispersão de nanopartículas de ZrO_2 visando produção de nanocompósitos de ZrO_2 em matriz de Al_2O_3 . *Cerâmica*, **51**(317):8-12.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132005000100003>
- RÊGO, S.A.B.C. 2012. *Desenvolvimento e produção de cerâmica $Al_2O_3 - TiO_2$ reforçada com óxido de terras raras (céria e lantânio) para revestimento inerte de peças metálicas da indústria petrolífera*. Recife, PE. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 100 p.
- RICE, R.W. 1996. The porosity dependence of physical properties of materials: a summary review. *Key Engineering Materials*, **115**:1-20.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.115.1>
- SCHUBERT, A.; ZEIDLER, H.; HAHNA, M.; HACKERT-OSCHÄTZCHENA, M.; SCHNEIDER, J. 2013. Micro-EDM milling of electrically nonconducting zirconia ceramics. *Procedia Cirp*, **6**:297-302.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.026>
- STEVENS, R. 1986. An introduction to zirconia: zirconia and zirconia ceramics. 2ª ed., Nova York, Magnesium Electrum, Twickenham, 113 p.
- TADOKORO, S.K.; MUCCILLO, E.N.S. 2001. Zircônia tetragonal policristalina. Parte II: Microestrutura e resistividade elétrica. *Cerâmica*, **47**(302):100-108.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132001000200007>
- TANAKA, S.; TAKABA, M.; ISHIURA, Y.; KAMIMURA, E.; BABA, K. 2014. A 3-year follow-up of ceria-stabilized zirconia/alumina nanocomposite (Ce-TZP/A) frameworks for fixed dental prostheses. *Journal of Prosthodontic Research*, **59**(1):55-61.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpor.2014.11.006>
- TEIXEIRA, L.H.P.; SANTOS, C.; DAGUANO, J.K.M.F.; KOIZUMI, M.H.; ELIAS, C.N. 2007. Sinterização e propriedades mecânicas do compósito Y-TZP/ Al_2O_3 . *Cerâmica*, **53**(327):1-4.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132007000300003>
- TIBONI, G.B. 2011. *Estudos preliminares para a aplicação da técnica de emissão acústica em ensaios de desgaste erosivo*. Curitiba, PR. Tese de Doutorado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 122 p.
- VALLEA, J.; ANGLADAB, M.; FERRARIA, B.; BAUDÍNA, C. 2015. Processing, nanoindentation and scratch testing of alumina-coated YTZP. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, **54**(4):133-141.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.07.002>
- VIANA, J.H.M. 2009. Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos. *Comunicado Técnico*, **1**:65-76.
- VILLANOVA, J.C.O.; LIMA, T.H.; SANTIAGO, P.; PEREIRA, F.V.; AYRES, E. 2012. Síntese e caracterização de beads acrílicos preparados por polimerização em suspensão visando aplicação como excipiente farmacêutico para compressão direta. *Química Nova*, **35**(1):124-131.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422012000100023>
- YOSHIMURA, H.N.; MOLISANI, A.L.; SIQUEIRA, G.R.; DE CAMARGO, A.C.; NARITA, N.E.; CESAR, P.F.; GOLDENSTEIN, H. 2005. Efeito da porosidade nas propriedades mecânicas de uma alumina de elevada pureza. *Cerâmica*, **51**(319):239-251.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132005000300011>
- ZENG, J.; YANG, J.; WAN, W.; LIU, X. 2014. Effect of Al_2O_3 particle size on preparation and properties of ZTA ceramics formed by gelcasting. *Ceramics International*, **40**(4):5333-5338.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.10.111>
- ZHONG, B.; ZHAO, G.L.; HUANG, X.X.; XIA, L.; TANG, X.H.; ZHANG, S.C.; WEN, G.W.. 2015. Microstructure and mechanical properties of ZTA/BN machinable ceramics fabricated by reactive hot pressing. *Journal Of The European Ceramic Society*, **35**(2):641-649.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.09.002>

Submetido: 27/01/2016

Aceito: 29/03/2016