

## **INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE FRATURA ESPECÍFICA E COMPRIMENTO CARACTERÍSTICO NA RESISTÊNCIA À EROÇÃO DE CONCRETO REFRAATÁRIO ANTIEROSIVO**

E. M. B. Santos <sup>(1)</sup>, G. C. R. Garcia <sup>(1)</sup>, W. S. Resende<sup>(2)</sup>, S. Ribeiro<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de Lorena (EEL)

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)

Estrada Santa Lucrecia s/n, Bairro Mondezir, CEP 12600-970, CP 116, Lorena SP

<sup>(2)</sup> Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários – IBAR

Avenida IBAR, 2 , CEP 08559-470 – Poá - SP

[esoly@ppgem.eel.usp.br](mailto:esoly@ppgem.eel.usp.br)

### **RESUMO**

*O objetivo deste trabalho foi determinar influencia da energia de fratura, comprimento característico e resistência à erosão de um concreto refratário antierosivo utilizado na indústria petroquímica. Para isso foi utilizado um concreto refratário com dois tamanhos de agregados. Os corpos de prova foram moldados, curados, secos e tratados em diferentes temperaturas. Foi determinada energia de fratura e a resistência à erosão. Os resultados mostraram que o volume erodido não variou com o tamanho de agregado enquanto que a energia de fratura aumentou com o tamanho de agregado. Houve diminuição do volume erodido com o aumento da temperatura de queima enquanto que a energia de fratura ocorre uma diminuição a 600°C e um aumento a 1000°C. A partir dos resultados conclui-se que não existe correlação linear entre a energia de fratura específica nem o comprimento característico com a resistência a erosão para as condições avaliadas neste trabalho.*

Palavras-chave: energia de fratura, erosão, comprimento característico.

## INTRODUÇÃO

Segundo a norma ASTM G 40-42, a erosão é definida como a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre a superfície e um fluido, sendo este, multicomponente ou contendo partículas líquidas ou sólidas impactantes<sup>(1)</sup>

O modelo mais aceito na descrição da erosão de concretos refratários é conhecido como “efeito sombra”. Este modelo aproxima os agregados a esferas e supõe que estas são completamente resistentes à erosão. Assim, somente a área da matriz localizada entre as esferas é erodida por impacto direto das partículas. À medida que a erosão da matriz ocorre, os agregados se sobressaem em relação à superfície, protegendo a matriz por meio do “efeito sombra”<sup>(2)</sup>.

A energia de fratura total pode ser determinada a partir da curva carga-deslocamento resultante de um ensaio de propagação estável de trinca, e da seguinte equação:

$$\gamma_{wof} = \frac{1}{2A} \int P_M ds \quad (A)$$

em que A é a área geométrica da superfície de fraturada,  $P_M$  é a carga vertical aplicada pela máquina de ensaios e s é o deslocamento do atuador da máquina<sup>(3,4,5)</sup>.

O valor da integral  $\int P_M ds$  é determinado pela área sob a curva carga-deslocamento. A energia de fratura contribui para caracterizar a fragilidade do concreto. Hillerborg propôs um parâmetro ( $\beta$ ) que leva em consideração a influência do material e do tamanho do corpo de prova pela razão:

$$\beta = \frac{L}{l_{ch}} \quad (B)$$

em que: L é o dimensão do corpo de prova que a trinca se propaga e  $l_{ch}$  é um parâmetro do material denominado comprimento característico<sup>(6)</sup>.

O  $l_{ch}$  está relacionado com  $G_f$  pela a seguinte equação:

$$I_{ch} = \frac{G_f \cdot E}{\sigma_f^2} \quad (C)$$

em que:  $G_f$  é a energia de fratura específica,  $E$  é o módulo de Young e  $\sigma_f$  é o módulo de ruptura <sup>(7)</sup> <sup>(8)</sup>.

Além desta, para concretos, pode ser utilizada também a seguinte relação empírica para a determinação do  $I_{ch}$ :

$$I_{ch} = \frac{600\alpha}{\sigma_c^{0,3}} \quad (D)$$

em que:  $\alpha$  é um coeficiente empírico que leva em consideração o tamanho máximo de agregado e  $\sigma_c$  é a tensão de resistência a compressão em Mpa <sup>(8)</sup>

A equação (D) é válida para uma faixa de tensão compressiva entre 5 e 100 MPa. Entretanto a relação foi melhor documentada para um tamanho máximo de agregado entre 12 mm e 20 mm. Quando atendida esta exigência, a correlação entre o  $I_{ch}$  e a resistência à erosão foi descrita por regressão linear com o coeficiente de regressão  $R^2 = 0,915$ . Neste caso, quanto maior foi  $I_{ch}$ , menor a resistência à erosão <sup>(8)</sup>.

O objetivo deste trabalho foi correlacionar os resultados de energia de fratura com os de resistência à erosão de um concreto refratário antierosivo comercial medidos em temperatura ambiente.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção das amostras foi utilizado um concreto refratário convencional aluminoso antierosivo, com dois tamanhos de agregados diferentes PAA (agregado de menor tamanho) e PAA-G (agregado de maior tamanho), fornecido pela Indústria Brasileira de Artigos Refratários, IBAR. A mistura dos concretos com 5,5 %m/m de água foi realizada em uma argamassadeira de laboratório com capacidade nominal de 5 litros, aplicando-se as seguintes etapas: 1 minuto de homogeneização a seco a 60 rpm, 2 minutos após a adição rápida da água e 1 minuto de mistura final a 120 rpm. Foram preparados corpos de prova em molde de aço inoxidável, produzindo amostras de 100 x 100 x 75 mm<sup>3</sup> para a avaliação da energia de fratura, medindo 114 x 114 x 25 mm<sup>3</sup>, para avaliação da resistência a erosão. A moldagem por

socagem foi realizada manualmente. As amostras foram desmoldadas após as primeiras 24 horas e curadas por 48 horas a partir da moldagem. A cura ocorreu em umidade relativa entre 30 e 60% e temperatura de 25°C. Após a cura os corpos de prova foram secos por 48 horas a 110 °C e submetidos à queima a 600°C e 1000°C por 8 horas com taxa de aquecimento e resfriamento de 2 °C/minuto. Para os testes de propagação estável de trinca foi utilizada uma máquina de ensaios mecânicos, servo-hidráulica, da marca M.T.S., com célula de carga de 5 kN. Os testes foram controlados pelo deslocamento do atuador, com velocidade de 30 µm.min<sup>-1</sup>. Com os dados de deslocamento do atuador e da força instantâneos, foram elaboradas curvas P-s. A partir dessas curvas, foi determinado o trabalho de fratura, que dividido pela área de fratura projetada multiplicada por dois, de acordo com a equação (A), fornece. A integral sob a curva foi feita até o ponto em que a carga caia ao valor de 10% da força máxima atingida no ensaio,  $P_{máx}$ . Para cada condição foram determinados, no mínimo, 5 valores de energia de fratura em amostras distintas. O ensaio de erosão foi realizado de acordo com a instrução de ensaios da IBAR (TF-049), que foi baseada na norma ASTM C-704 e é equivalente à norma Petrobrás n-2367/91. Os corpos de prova foram secos até a massa constante a 110°C, foi determinada a massa com precisão de 0,01g e o volume por medição do comprimento largura e espessura, com precisão de 0,05 mm. Em seguida as amostras foram colocadas dentro da cabine do equipamento, a face 114 mm x114 mm no ângulo de 90° para o bocal de vidro. A face erodida deve ser a face que melhor represente às condições reais de operação, neste caso a superfície de socagem.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra os resultados de energia de fratura obtidos. De acordo com a literatura, o aumento no tamanho do agregado resulta em um aumento na energia de fratura<sup>(6)</sup>. Os resultados mostrados estão em conformidade com a literatura, pois, o concreto PAA-G apresentou energia de fratura maior que o PAA nas três temperaturas estudadas.

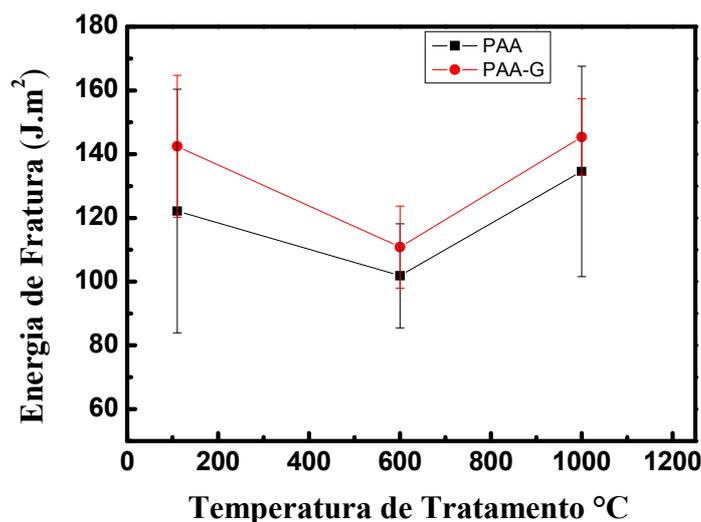


Figura 1 - Resultados de energia de fratura dos corpos de prova de concreto aluminoso antierosivo tratados a 110°C, 600°C e 1000°C.

Nota-se uma diminuição da energia de fratura em 600°C que pode ser atribuída as quebras das ligações de hidratação com consequente aumento da porosidade. O aumento da temperatura de tratamento térmico para 1000°C resultou em um aumento da energia de fratura. Isso pode ser devido à formação de ligações cerâmicas, que ocorrem em temperaturas de queima mais elevadas e à diminuição da porosidade.

A Figura 2 mostra os resultados de volume erodido dos corpos de prova dos concretos tratados a 110°C, 600°C, 800°C e 1000°C.

Observa-se que os concretos não apresentaram grandes variações do volume erodido com o tamanho de agregado, mas pequenas mudanças foram observadas em função da temperatura. Houve uma diminuição do volume erodido com o aumento da temperatura de tratamento até 800°C enquanto que os resultados a 1000°C mostraram um ligeiro aumento. Os resultados mostraram que a energia de fratura é mais sensivelmente afetada pela microestrutura enquanto que a erosão parece ser menos vulnerável.

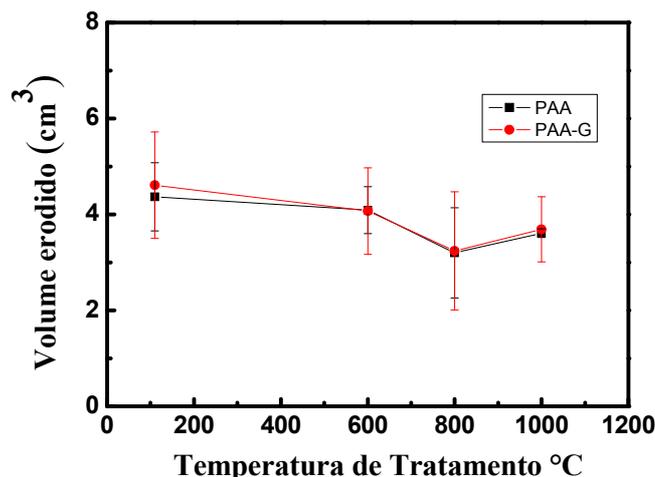


Figura 2 - Resultados da resistência à erosão do concreto aluminoso antierosivo tratados a 110°C, 600°C, 800°C e 1000°C.

Embora os resultados de resistência à erosão possam dificultar a avaliação devido ao espalhamento dos resultados, estas dificuldades foram sanadas a partir da observação das imagens mostradas na Figura 3.

Segundo o modelo mais aceito para erosão de concretos refratários, o “efeito sombra”, os agregados seriam completamente resistentes à erosão protegendo a matriz à medida que se sobressaem. Este efeito foi observado apenas nas temperaturas de tratamento de 110°C e 600°C, temperaturas em que a matriz sofre erosão preferencial. Em 800°C e em 1000°C, a matriz e o agregado são desgastados com a mesma taxa, então não se enquadra no modelo de “efeito sombra”.

O comprimento característico foi determinado a partir da equação (C). Com este parâmetro foi verificada a possibilidade de correlacionar estes dados com a resistência à erosão, conforme sugerido por MONBER. Os resultados estão mostrados nas Figuras 4 (a) e (b). Como pode ser observado, não existe uma boa correlação para os resultados de comprimento característico e resistência à erosão para o concreto estudado, indicada pelo valor do coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ).



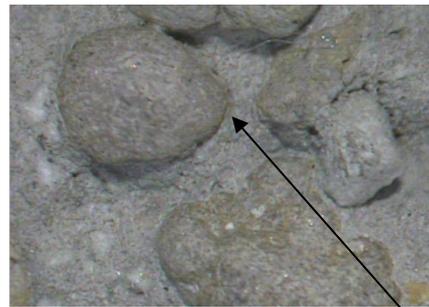
(a)



(b)



(c)



(d)

Agregado proeminente



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3 - Imagens obtidas por lupa estereoscópica da região erodida dos corpos de prova tratados a: 110°C, PAA (a) e PAA-G(b), 600°C PAA (c) e PAA-G(d), 800°C PAA (e) e PAA-G(f) e 1000°C PAA (g) e PAA-G(h).

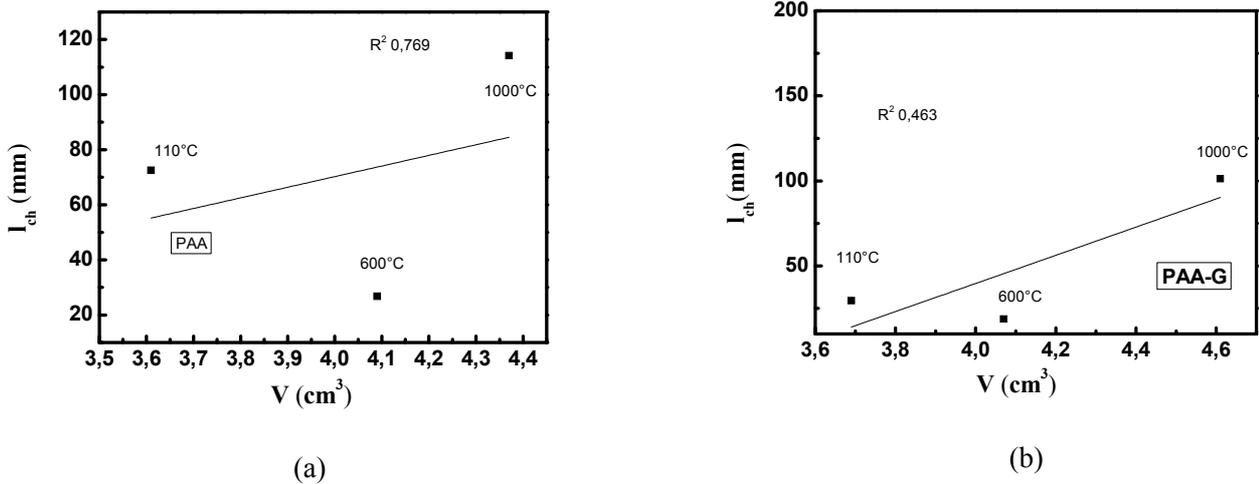


Figura 4 - Resultados do comprimento característico em função do volume erodido indicando o coeficiente de correlação para o concreto PAA.

De acordo com os resultados, não existe correlação linear entre energia de fratura específica e a resistência à erosão. A literatura mostra resultados de correlação do  $I_{ch}$  com a resistência à erosão com  $R^2$  aproximadamente igual a 0,915 quando foi utilizado agregado com tamanho variando entre 12 e 20 mm, sendo estes os melhores valores encontrados.

A Figura 5 (a) e (b) mostram a relação entre volume erodido e energia de fratura.

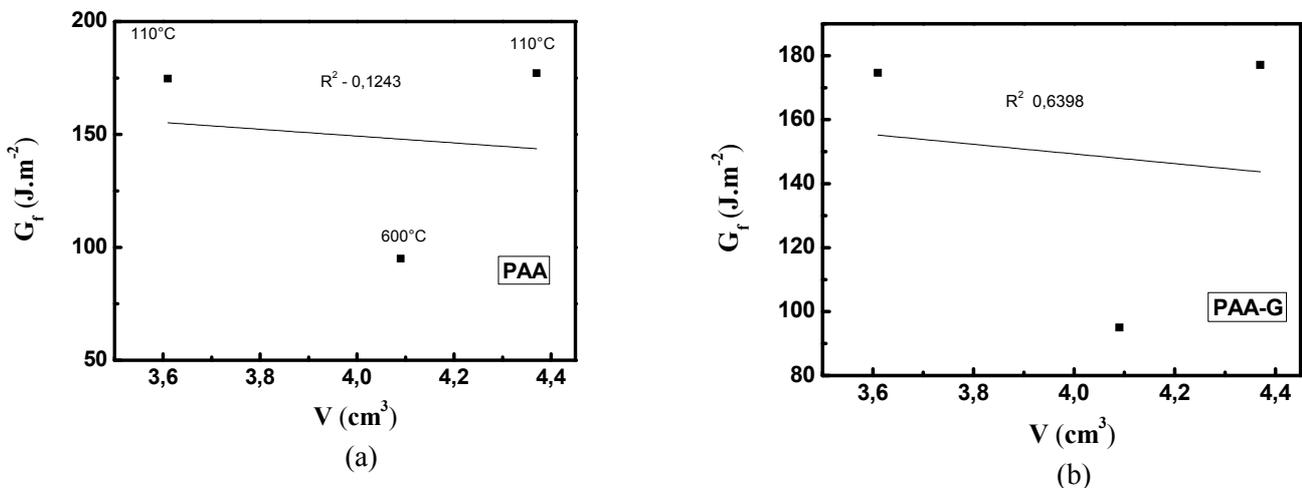


Figura 5 - Resultados energia de fratura específica em função do volume erodido indicando o coeficiente de correlação para os concretos PAA e PAA-G.

Como o concreto utilizado neste trabalho não se encontra nesta faixa de tamanho, não foi possível determinar a correlação entre  $l_{ch}$  e a resistência à erosão. Sabendo da correlação entre a  $l_{ch}$  e resistência à erosão, este trabalho propôs a verificação da correlação de  $G_f$  com a resistência à erosão uma vez que o  $l_{ch}$  é um parâmetro calculado e dependente de  $G_f$ . Nesse caso também não mostrou correlação entre  $G_f$  e resistência à erosão para os concretos estudados.

## CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados conclui-se que:

- a energia de fratura aumenta com o aumento do tamanho de agregado para o concreto estudado;
- a resistência à erosão aumenta com a temperatura de tratamento térmico devido a ceramização da matriz, conforme análise das imagens;
- a não correlação entre  $l_{ch}$  e  $G_f$  com a resistência à erosão provavelmente foi devido à faixa de tamanho de agregados escolhidos para produção do concreto;
- a correlação de energia de fratura e de resistência à erosão pode ter o mesmo comportamento que a correlação entre comprimento característico e resistência à erosão para faixas específicas de tamanho de agregado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro recebido da CAPES, FAPESP processo 07/55964-3, CNPq 302387/2007-2, 135921/2008-2, 140202/2009-9 e À IBAR pela doação do concreto refratário.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. VICENZI, J., MARQUE, C. M., BERGMANN, C. M. Desgaste erosivo a frio e a quente em revestimentos de aspergidos termicamente: influência da porosidade e da oxidação. CBECIMat, 17., 2006, Foz do Iguaçu, 2006, p. 6215-6226.
2. ENGMAN, U. Erosion testing of refractories - a new testing procedure. Wear, v. 95. 186-187 p. 215-223, 1995.
3. AKSEL, C.; WARREN, P. D.; RILEY, F. L. Magnesia - spinel microcomposites, Journal of the European Ceramic Society, v.24, p. 2407, 2004.
4. LARSON, D. R.; COPPOLA, J. A.; HASSELMAN, D. P. H. Fracture toughness and spalling behavior of high-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> refractories. Journal of the American Ceramic Society, v. 57, p. 417, 1974.
5. SANTOS, E. M. B., SILVA, V. M. S., GARCIA, G. C. R. RESENDE, W. S RIBEIRO, S. Estudo do comportamento da energia de fratura em função do tamanho do agregado e da temperatura de queima de um concreto aluminoso antierosivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 54., Foz do Iguaçu, PR, 2010. Anais...São Paulo, ABC, 2010
6. ROCCO, C. G., ELICES, M. Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. Engineering Fracture Mechanics, v. 76, p. 286–298, 2009.
7. HILLERBORG, A., MODÉER, M., PERTERSON, P. E. Analysis of crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research, v. 6, p.773–782, 1976.
8. MONBER, A. W.; KOVECEVIC, R. Hydro-abrasive erosion of refractory ceramics, Journal of Materials Science, v. 38, p. 2861-2874, 2003

## INFLUENCE OF FRACTURE ENERGY AND CHARACTERISTIC LENGTH IN THE EROSION RESISTANCE OF ANTIEROSIVE CASTABLE REFRACTORY

### ABSTRACT

The goal this work was determinate the influence of fracture energy, characteristic length and erosion resistance of the castable used in industry petrochemical. For this was used the refractory castable with two aggregate size. The samples was molded, cured, dried and thermal treated in several temperature. Was determined the energy fracture and erosion resistance. The results showed that the eroded volume not varied with the aggregate size while the fracture energy increased with the aggregate size. The eroded volume decreased with the increased of treatment temperature while the fracture energy decreased at 600°C and increased at 1000°C. Bases on of the results, it can be concluded that was not observed linear relationship between the characteristic length and fracture energy and erosion resistance for conditions evaluated in this work.

Key-words: refractory castable, fracture energy, erosion, characteristic length.