

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM UM REFRAATÁRIO ALUMINOSO

Garcia, G. C. R. ⁽¹⁾, Resende, W. S. ⁽²⁾, Rodrigues, J. A. ⁽³⁾, Ribeiro, S. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ 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

⁽²⁾ Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários (IBAR)

⁽³⁾ Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)) – Departamento de
Engenharia de Materiais (DEMa)

girribeiro@yahoo.com.br

O objetivo deste trabalho foi obter uma metodologia para o estudo do comportamento da propagação de trinca em refratários por meio da avaliação da energia de fratura utilizando o método da cunha. Corpos de prova, produzidos a partir de tijolos de alta alumina (95% de Al₂O₃) queimados a 1600°C foram submetidos a carregamentos distintos, utilizando uma máquina rígida servo-hidráulica de ensaios mecânicos, MTS. Após ensaio, a trinca foi preenchida com cola instantânea à base de cianoacrilato, a fim de que preservasse o caminho da trinca para que cortes ortogonais fossem feitos no plano de propagação da mesma. As amostras foram lixadas e polidas para avaliação comportamento da trinca propagada a cada carregamento em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Com a aplicação da cola instantânea no caminho da trinca, foi possível observar o comportamento tanto à frente quanto atrás da ponta da trinca para posterior entendimento da fratura dos refratários.

Palavras-chave: concreto refratário, propagação de trincas, energia de fratura.

INTRODUÇÃO

A resistência ao dano por choque térmico é uma das propriedades mais importantes dos refratários, uma vez que estes materiais apresentam microestrutura heterogênea constituída de agregados e matriz, ambas com papéis fundamentais nas propriedades do refratário, e por isso sua resistência à propagação de trincas provocadas por variações bruscas de temperaturas ou por diferenças de coeficientes de expansão térmica de seus constituintes durante sua utilização deve ser analisada ^(1,2). Para avaliar essa questão crítica dos refratários há necessidade de se conhecer bem seu comportamento à propagação de trinca, principalmente quando submetido a uma tensão ^(2,3).

Percebeu-se que quando uma amostra de concreto era submetida à tensão, após o início da abertura de trinca, a tensão não caía a zero, mas diminuía com o aumento da abertura da boca da trinca, ou seja, a tensão verificada era função dessa abertura da trinca. Na Figura 1(a), Hillerborg ilustrou o modelo de Barenblatt em que se verifica regiões distintas de uma trinca ⁽⁴⁻⁷⁾. Esse modelo representa um dos métodos da mecânica da fratura adotado para estudar os fenômenos envolvidos na iniciação e propagação de uma trinca. A região em que $w < w_1$ corresponde a uma região de trincamento com algum ligamento remanescente para transferir tensão ^(6,8-10). Essa região é conhecida por zona coesiva.

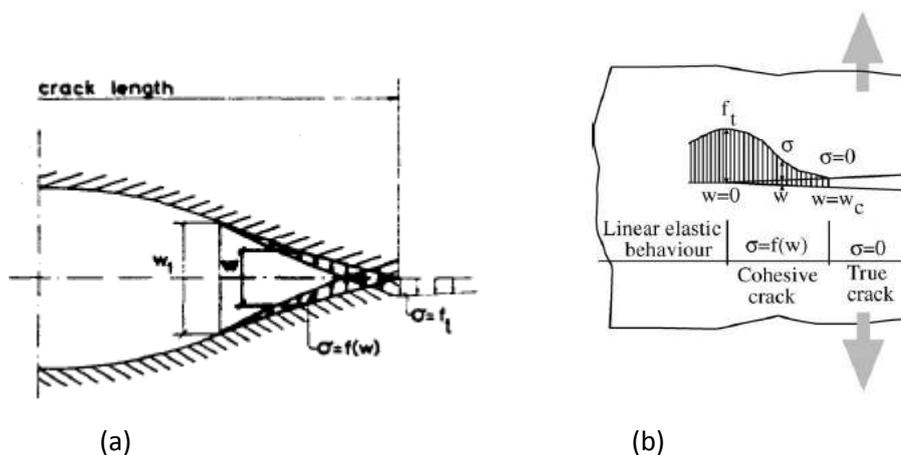


Figura 1 – (a) Modelo de Barenblatt ⁽⁶⁾; (b) Regiões de um processo de trinca em materiais cerâmicos ⁽⁷⁾.

A Figura 1(b) ilustra o comportamento de uma trinca propagante, com as regiões à frente da ponta da trinca, zona coesiva e com a região atrás da ponta

da trinca. Nessa figura observam-se as três regiões de um processo de trincamento: a região chamada de trinca verdadeira onde se presume não haver mais tensão ($\sigma = 0$) – não há nenhum ligamento entre a matriz e os agregados, no caso dos concretos; a segunda, onde se vê a chamada zona coesiva – nessa região a tensão segue um perfil que depende do tamanho da respectiva trinca coesiva, por último tem-se a região denominada de linear elástico, ou seja, o material ainda está na região de deformação elástica ^(7,9,10). Tanto na Figura 1(a) quanto na 1(b), observa-se que na região coesiva em que a tensão é função da abertura da trinca w e que tem-se uma tensão máxima no ponto em que f_t é igual a zero, ou seja f_t é igual a σ ⁽¹⁰⁾. Como há tensão adicional para a abertura da trinca, a energia é absorvida, e essa quantidade de energia por unidade de área de trinca aberta (w) de zero a w_1 pode ser escrita como mostrado na seguinte equação:

$$\int_0^{w_1} \sigma \cdot dw \quad (A)$$

O valor dessa equação pode ser obtido pela integração da área da curva f_t versus w , vista na Figura 2, cujo resultado é a energia de fratura, conhecida por G_c . Assim a Equação A pode ser escrita na forma a seguir:

$$\int_0^{w_1} \sigma \cdot dw = G_c \quad (B)$$

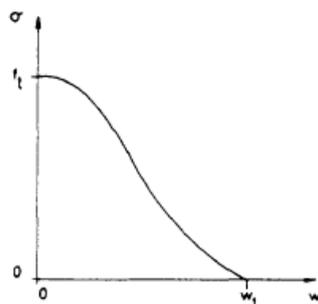


Figura 2 – Curva carga-deslocamento para a região coesiva da trinca ⁽⁶⁾.

A energia de fratura é uma propriedade muito importante dos materiais, principalmente daqueles com microestruturas complexas. Essa propriedade mede a resistência de um material à propagação de trinca ou fratura e pode ser determinada por meio de ensaios de propagação estável de trinca, dos quais são obtidas curvas carga-deslocamento e a partir da integração da área sob as

mesmas, obtém-se o trabalho de fratura, $\int P_M d\delta$. Essa grandeza dividida por duas vezes a área projetada da superfície fraturada da amostra, A , resulta na energia total de fratura, γ_{wof} , que é expressa pela seguinte equação⁽¹¹⁻¹⁵⁾:

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

em que P_M é a carga vertical aplicada pela máquina de ensaios e δ é o deslocamento do atuador da máquina.

A Figura 3 ilustra um esquema da zona de processo total ao redor da trinca, tanto à frente como atrás da ponta da trinca em avanço no material⁽²⁾. Nota-se um microtrincamento na ponta da trinca, em que as microtrincas coalescem e formam trincas maiores que se propagam. Atrás da ponta da trinca são observados mecanismos que tentam reter o avanço da trinca, sendo eles: os ligamentos por formação de silicatos com altas viscosidades (silicate flow and bridging), desde que o refratário contenha substâncias formadoras desses silicatos; e a formação de pontes de agregados, que provocam o intertravamento das duas faces da peça não deixando separar catastróficamente uma parte da outra (aggregate bridging). Quando se avalia a evolução da propagação da trinca a temperatura ambiente, somente a formação de pontes de agregados está presente no processo.

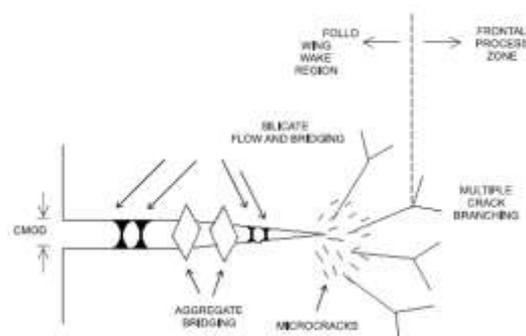


Figura 3 – Esquema da zona de processo da trinca para materiais refratários⁽²⁾.

A lacuna existente nesse estudo refere-se à avaliação da propagação e do caminho real percorrido pela trinca. O que se tem feito é estimar os valores de tamanho de trinca, tamanho da região coesiva, entre outras variáveis por simulações utilizando elementos finitos, mas experimentalmente praticamente

nada se tem de concreto. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi obter uma metodologia para o estudo do comportamento da propagação de trinca em refratários, visando entender os mecanismos de resistência à propagação de trinca, caminho das trincas propagantes e avaliação da energia de fratura, utilizando o método da cunha, avaliando desde o estágio inicial, trinca principal muito pequena, até decaimento de 10% da carga máxima.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado foi um tijolo refratário aluminoso, conformado e queimado a 1600°C, comercial (Alumibar 95 ES), fornecido pela Indústria Brasileira de Artigos Refratários (IBAR), cuja composição química é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Análise química do tijolo refratário

Composto	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂
% Nominal	95,0	0,1	0,2	2,5

Foram preparados corpos de prova nas medidas de 100 mm x 100 mm x 75 mm, sendo os mesmos retificados, entalhados e ranhurados conforme mostra a Figura 4.

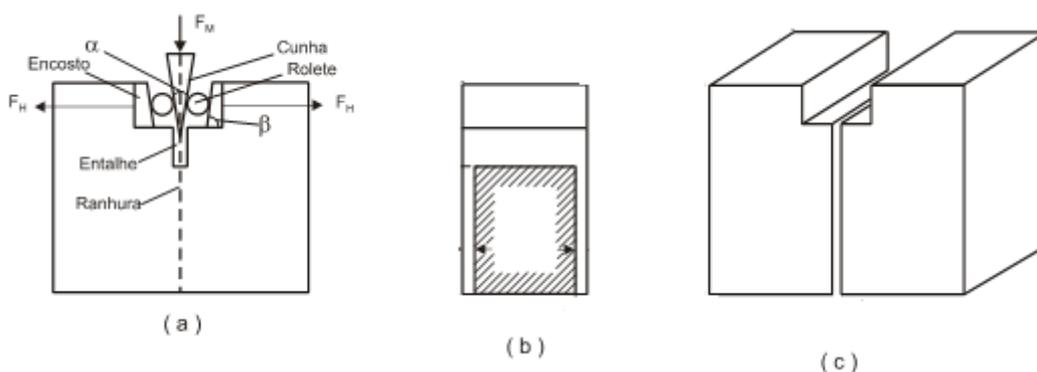


Figura 4 – (a) Arranjo esquemático do método da cunha. α e β são, respectivamente, os ângulo da cunha e dos encostos ⁽¹³⁾, (b) secção transversal da amostra passando pelo entalhe e ranhuras laterais e (c) geometria e dimensões da amostra (mm) ⁽¹²⁾.

Cinco corpos de prova foram submetidos ao ensaio de energia de fratura pelo método da cunha em uma Máquina de Ensaio Universal MTS, servo-

hidráulica, modelo 810M com carregamento específico variando entre 95% e 10% da carga máxima. Após ensaio, cola instantânea à base de cianoacrilato, foi aplicada na ranhura a fim de que preenchesse o caminho percorrido pela trinca e que resguardasse a superfície de fratura do corpo de prova, uma vez que, primeiramente foram usadas resinas de embutimento o que não gerou resultado satisfatório, pois as mesmas não infiltram toda a amostra devido à viscosidade e a abertura da trinca. Já com cola instantânea foi possível realizar o procedimento com sucesso.

Os corpos de prova utilizados no ensaio de energia de fratura pelo Método da Cunha, Figura 5(a), foram cortados na seção longitudinal, Figura 5(b). Após cortes (Figura 5(c), a face central do corpo de prova foi lixada e polida com suspensões de diamante de 15 μm a 1 μm e recobertas com película de ouro para análise em microscópio eletrônico de varredura, MEV (LEO, modelo 1450 VP). Uma das amostras carregadas até 10 % da carga máxima foi aberta para cálculo da energia de fratura sem avaliação do caminho da trinca.

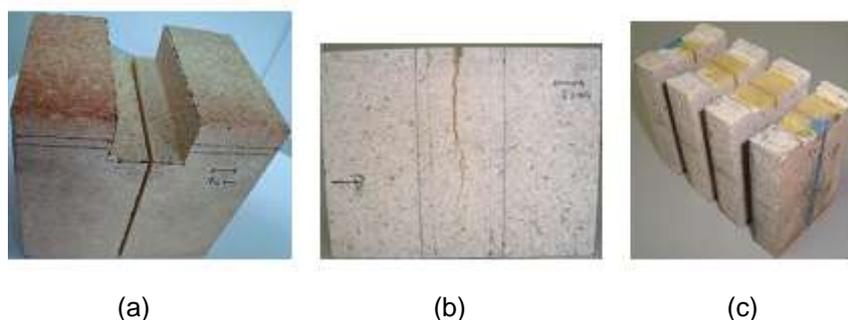


Figura 5 – (a) Corpo de prova utilizado no ensaio de energia de fatura pelo método da cunha; (b) Corte central na secção longitudinal do corpo de prova infiltrado; (c) Vista do corpo de prova após três cortes longitudinais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 mostra a curva carga-deslocamento de um corpo de prova ensaiado pelo método da cunha, em MTS, até 10% da carga máxima. Após ensaio esse corpo de prova foi aberto para cálculo da área fraturada, a fim de se calcular a energia de fratura pela Equação (C). O resultado de energia de fratura foi de 109,2 J/m².

A Figura 7 mostra as curvas carga-deslocamento dos corpos de prova ensaiados até 95% (a), 45% (b), 40% (c) e 10% (d) da carga máxima. Após foi infiltrada cola instantânea na região de entalhe para preenchimento do caminho da trinca para posterior análise da mesma.

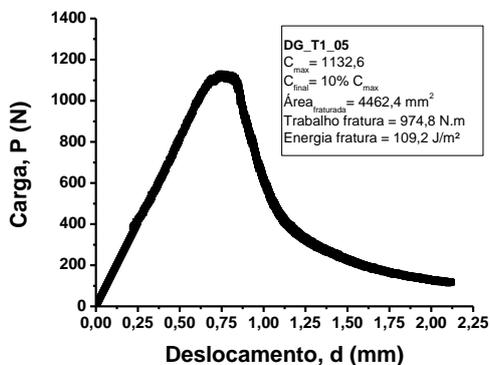


Figura 6 – Curva carga-deslocamento do corpo de prova ensaiado até 10% da carga máxima.

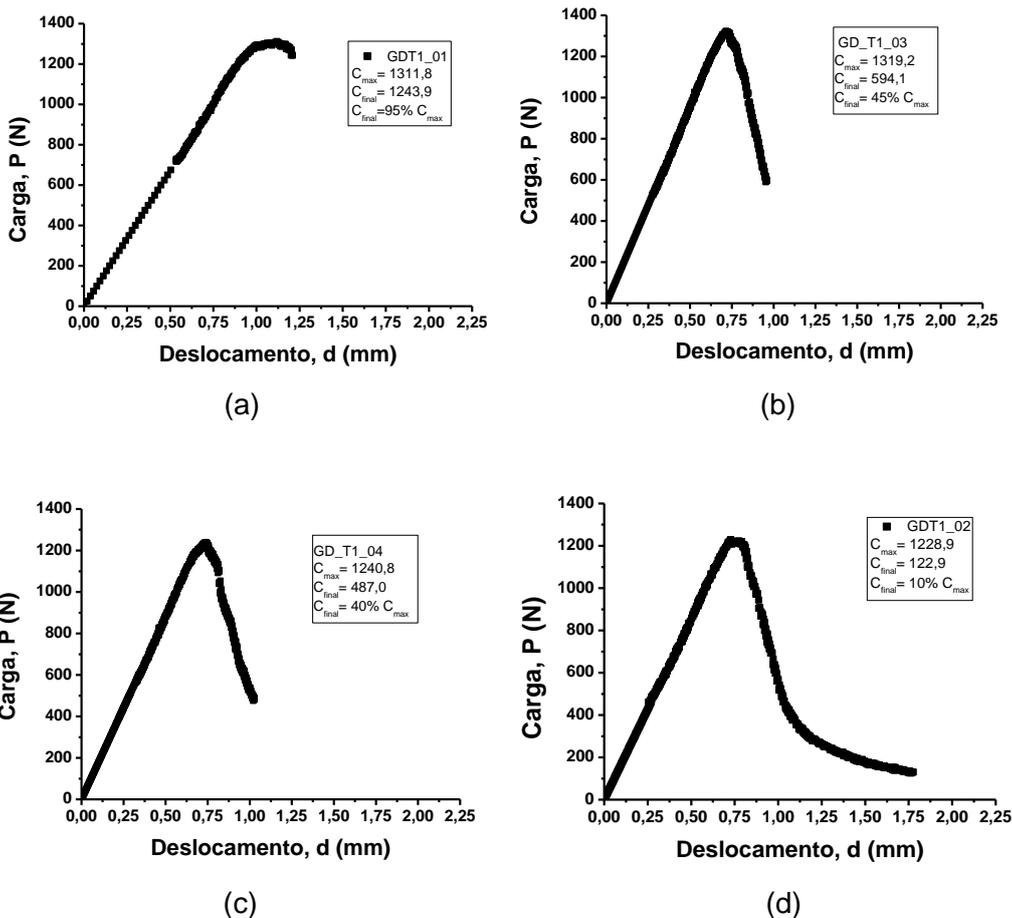


Figura 7 – Curva carga-deslocamento dos corpos de prova ensaiados até 95% (a), 45% (b), 40% (c) e 10% (d) da carga máxima.

A Figura 8 é uma micrografia obtida em MEV, no modo elétrons secundários, que mostra a trinca percorrendo uma região de intertravamento, cortando agregado e passando pela matriz.

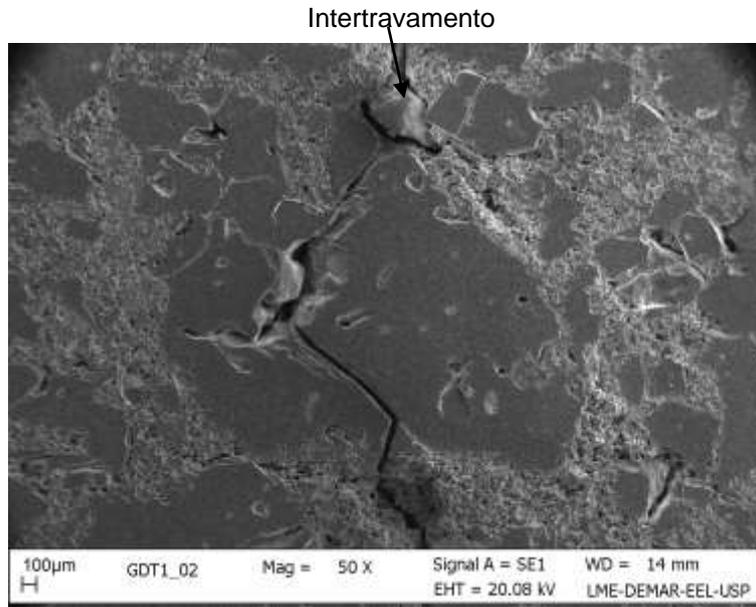


Figura 8 – Micrografia, em MEV, do caminho da trinca.

A Figura 9 mostra micrografias obtidas em MEV no modo elétrons secundários: (a) do percurso da trinca contornando os agregados próximo ao seu término, e (b) da região da ponta da trinca com microtrincas.

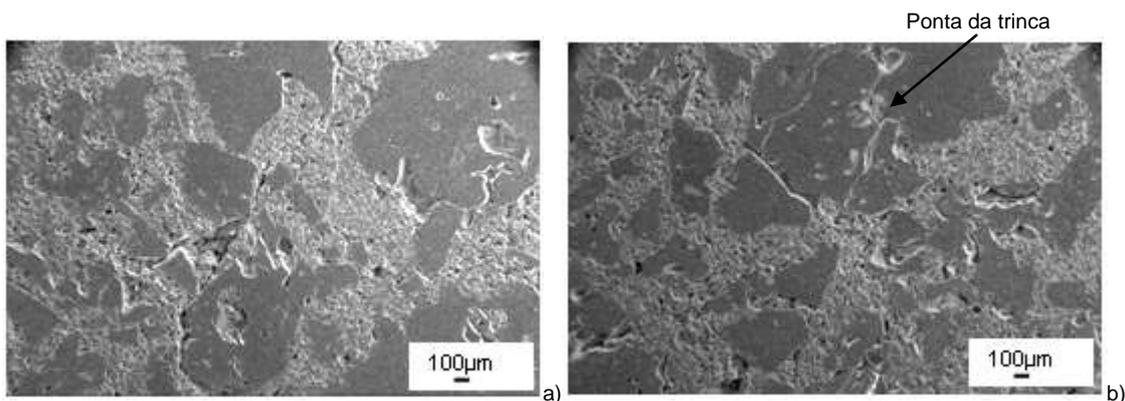


Figura 9 – Micrografias do percurso da trinca (a) e da ponta da trinca (b).

A Tabela 2 mostra a avaliação linear do comprimento da trinca principal de acordo com os carregamentos do ensaio de energia de fratura pelo método da cunha, conforme as curvas da Figura 7. A amostra GDT-01 com decaimento de apenas 5% da carga máxima (Fig.7a), a GDT-03 com decaimento de 55%

(Fig.7b), a GDT-04 com decaimento de 60% (Fig.7c), e a GDT-02 (Fig.7d), ensaiada até atingir decaimento de 90% da carga máxima.

Tabela 2 – Avaliação do comprimento geométrico da trinca principal em termos de percentagem do comprimento da amostra.

Amostra	GDT_01	GDT_03	GDT_04	GDT_02
% Carga Máx.	95	45	40	10
% L _{trinca}	52	60	71	93

Com decaimento de apenas 5% da carga máxima de ensaio, a trinca já havia percorrido cerca de 52% do comprimento da amostra, sendo que ao final do ensaio (10% da carga máxima), esse comprimento chegou a 93%. Mesmo a trinca tendo percorrido quase toda a amostra, a mesma ainda tem grande resistência à separação das duas partes, devido interligação dos agregados na matriz. Haja vista as micrografias apresentadas, no início da propagação, quando a energia elástica armazenada no corpo de prova é alta, a trinca corta (intra) os agregados, enquanto que ao final, conforme essa energia vai sendo consumida, a trinca percorre o contorno (inter) do agregado, passando pela matriz que é menos resistente.

CONCLUSÃO

Com a aplicação da cola instantânea a base de cianoacrilato no caminho da trinca, foi possível observar o caminho da trinca, uma vez que a resina de embutimento utilizada para concretos refratários, apesar de não ser tão viscosa, não penetrava até o final da trinca, já com a cola instantânea isso foi possível.

A partir da interrupção em pontos estratégicos no teste de propagação estável de trinca, consegue-se obter dados significativos para avaliação do comportamento da propagação de trincas na amostra.

Carregamentos intermediários serão realizados em trabalhos futuros a fim de que se trace um perfil de propagação da trinca nesse tipo de material, bem como análise microestrutural das regiões de propagação.

AGRADECIMENTOS

Às Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários, IBAR, pelo material fornecido; ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa, processo 304760/2010-2, a CAPES, pela bolsa de Doutorado, processo 33002088001-P4 e a FAPESP, processo 07/55964-3.

REFERÊNCIAS

- (1) LEE, W. E.; VIEIRA, W.; ZHANG, S.; AHARI, K. G.; SARPOOLAKY, H.; PARR, C. Castable refractory concretes. **International Materials Reviews**, v. 46, n.3, p. 145, 2001.
- (2) CUNHA-DUNCAN, F. N.; BRADT, R. C. Fratura de refratários. **Cerâmica**, v.49, p. 199-215, 2003.
- (3) NAKAYAMA, J.; ABE, H.; BRADT, R. C. Crack Stability in the Work-of-Fracture Test: Refractory Applications. **Journal of the European Ceramic Society**, v.64, n.11, p.671, 1981.
- (4) HARMUTH, H.; BRADT, R. C. Investigation of refractory brittleness by fracture mechanical and fractographic methods. **Interceram Refractories**, Special Edition, 2010.
- (5) SAKAI, M., BRADT, R. C. Fracture toughness testing of brittle materials. **Int. Mat. Reviews**, v.38, n.2, p.53-78, 1993.
- (6) HILLERBORG, A.; MODÉER, M.; PETERSSON, P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. **Cement and Concrete Research**, v.6, p.773-782, 1976.
- (7) GUINEA, G. V.; EL-SAYED, K.; ROCCO, G. C.; ELICES, M.; PLANAS, J. The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete. **Cement and Concrete Research**, v.32, p.1961-1970, 2002.
- (8) CARPINTERI, A.; CHIAIA, B.; NEMATI, K. M. Complex fracture energy dissipation in concrete under different loading conditions. **Mechanics of Materials**, v. 26, p.93-108, 1997.

- (9) HU, X.; DUAN, K.; Influence of fracture process zone height on fracture energy of concrete. **Cement and Concrete Research**, v.34, p.1321-1330, 2004.
- (10) GÁLVEZ, J. C.; CERVENKA, J.; CENDÓN, D. A.; SAOUMA, V. A Discrete crack approach to normal/shear cracking of concrete. **Cement and Concrete Research**, v.32, p.1567-1585, 2002.
- (11) RIBEIRO, S.; EXPOSITO, C. C. D.; RODRIGUES, J. A. Projeto, adaptação, instalação e testes preliminares para um sistema de medida de energia de fratura de materiais cerâmicos pelo método da cunha. **Cerâmica**, v.54, p. 418-426, 2008.
- (12) ALAPIN, B.; OLLIG, M.; PÖTSCHKE, J. Thermomechanical properties of selected refractory materials. In: INTER. COLL. REFR. EUROGRESS AACHEN, 46., 2003Germany, **Proceedings Inter. Coll. Refr. Eurogress Aachen**. p.107-112.
- (13) KARIHALOO, B. L.; ABDALLA, H. M.; XIAO, Q. Z. Deterministic size effect in the strength of cracked *concrete* structures. **Cement and Concrete Research**, v.36, p.171, 2006.
- (14) XIAO, J.; SCHENEIDER, H.; DÖNNECKE, C.; KÖNIG, G. Wedge splitting test on fracture behavior of ultra high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v.18, p.359-365, 2004.
- (15) EINSFELD, R. A.; VELASCO, M. S. L. Fracture parameters for high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v.36, p.576-583, 2006.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE BEHAVIOUR OF CRACK PROPAGATION IN THE ALUMINOUS REFRACTORY

ABSTRACT

The goal of this work was to get a methodology to study the behaviour of the crack propagation in the refractory using fracture energy determined by wedge splitting method. The samples were produced from high alumina bricks (95% of Al_2O_3) fired at 1600°C. The samples were submitted a specific loading using a servo-hydraulic machine MTS. Before test, the produced crack was full with instantaneous glue with cianocrlite composition with objective to preserve the integrity of the material beyond of the crack. The samples were grinded and polished to evaluate the behaviour of the propagated crack at each loading using scanning electronic microscope (SEM). With application of the instantaneous glue in the way of the crack, was possible to observe the behaviour as much a head of the tip of the crack as much behind of the tip of the crack to subsequent understanding of the refractories fracture.

Key-words: castable, crack propagation, fracture energy.