

AVALIAÇÃO DA ENERGIA DE FRATURA PELO MÉTODO DA CUNHA EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DOS ROLETES

E. C. B, Santos ⁽¹⁾, E. M. B, Santos ⁽¹⁾, G. C. R, Garcia ⁽¹⁾, W. S. Resende ⁽²⁾, S. Ribeiro ⁽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
ecbs@ppgem.eel.usp.br

⁽²⁾ Indústria Brasileira de Artigos Refratários – IBAR
Avenida IBAR, 2, CEP 08559-470 – Poá-SP

RESUMO:

Refratários são materiais de estrutura heterogênea, constituída basicamente por duas fases, uma de granulometria fina denominada matriz e a outra de granulometria grosseira chamada agregado. Devido a sua fragilidade, são susceptíveis a fratura catastrófica, por isso o conhecimento de seu comportamento mecânico é tão importante. Uma de suas principais propriedades é a energia de fratura que tem sido uma ferramenta muito importante para o estudo destes materiais, sendo comumente determinada pelo do método da cunha (wedge splitting test) patenteado por Tschegg. Este trabalho visa à caracterização da energia de fratura utilizando o método da cunha em função das posições dos roletes do dispositivo de teste, para tal foram utilizados corpos de prova de 113x100x75 mm³. Os resultados mostraram que quanto maior a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe menor é a carga máxima necessária para iniciar a propagação estável da trinca.

Palavras-chave: Refratário, Método da Cunha, Energia de Fratura.

INTRODUÇÃO:

Refratários são materiais cerâmicos com estrutura complexa contendo basicamente duas partes, uma das partes é constituída por matérias primas com granulometria mais fina, chamada de matriz, a outra mais grosseira chamada de agregados. As quantidades e as composições químicas e mineralógicas das matérias-primas que constituem as partes de um refratário são fundamentais para produzir as propriedades desejadas para esses materiais durante o trabalho. As principais propriedades dos refratários são: módulo de ruptura, módulo elástico, resistência a compressão, energia de fratura, coeficiente de expansão térmica, além das propriedades químicas (resistência à corrosão) e resistência à erosão^(1,2).

Dentre estas propriedades, a energia de fratura, γ_{wof} tem uma importância particular porque é uma grandeza requerida na estimativa dos parâmetros de resistência ao dano por choque térmico, R''' e R_{st} e tem servido de guia para o desenvolvimento de refratários em geral e, em particular, de concretos refratários⁽³⁾.

A energia de fratura pode ser definida como o trabalho requerido por unidade de área para que haja propagação estável da trinca, e é representada pela soma de diversas energias que são consumidas durante o processo⁽²⁾. O valor de γ_{wof} pode ser determinada pela curva carga-deslocamento obtida nos testes de propagação estável da trinca e a partir da equação, a seguir⁽²⁻⁶⁾:

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

em que A é a área projetada da superfície de fratura, P_V é a carga vertical aplicada pela máquina de teste e s é o deslocamento do atuador da máquina. O valor da integral da equação (A) é determinado pela área total em baixo da curva carga-deslocamento.

O método mais conhecido para a determinação de energia de fratura é o de barra entalhada flexionada em três ou quatro pontos. O grande problema deste método é a relação de tamanho de agregado/área de fratura, pois como a barra apresenta pequenas dimensões pode apresentar um agregado de dimensão próxima à dimensão da área de fraturada e o resultado final pode ser fortemente afetado⁽⁵⁻⁷⁾. Por outro lado, uma desvantagem de se utilizar grandes amostras está no acúmulo de energia elástica e quando ocorre propagação da trinca essa se faz de modo instável^(5,7).

Para trabalhar com amostras relativamente grandes sem o problema de armazenamento de grandes quantidades de energia Tschegg patenteou o “Método da Cunha (Wedge Splitting Test)⁽⁸⁾. Neste método a relação: tamanho de agregado/área de fratura, é bem maior promovendo a obtenção de resultados mais confiáveis e com menor dispersão, pois a área de fratura é bem mais representativa da microestrutura grosseira do material. Além de que a razão entre o tamanho da amostra/ tamanho da zona de processo, que antes era muito crítica, tem seu efeito minimizado com a utilização do método da cunha^(2,6,9). A importância desta zona de processo pode ser vista em várias publicações^(6,10).

O método da cunha utiliza um corpo de prova que apresenta uma configuração de entalhe iniciado, com duas ranhuras laterais para restringir o caminho da trinca no decorrer do teste⁽⁴⁾, Figura 1. O dispositivo de teste é composto por dois roletes, dois encostos inclinados e uma cunha sobre a qual é aplicada uma carga vertical F_V que é transmitida para os roletes e destes para os encostos que produzem as forças horizontais F_H ^(9,11). A partir da análise da curva força-deslocamento os parâmetros de fratura são obtidos^(4,9).

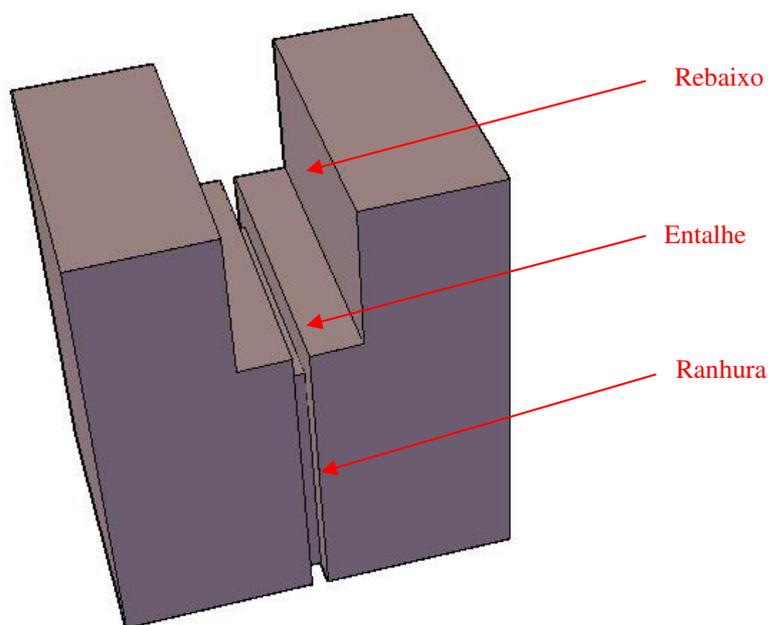


Figura 1: Detalhes da construção das amostras.

A força F_H aplicada sobre a amostra pode ser calculada a partir da equação, a seguir^(9,11):

$$F_H = \frac{F_V}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (B)$$

em que α é o ângulo da cunha e F_V é a força aplicada pela máquina de ensaios.

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da posição dos roletes do dispositivo de teste na carga necessária para o início da propagação de trinca estável (ou seja, força F_V máxima), bem como a dependência ou não da energia de fratura neste parâmetro.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de tijolos refratário de 113x100x75 mm³. Nestas foram feitos rebaixos, entalhes e ranhuras mecanicamente através de um disco diamantado, conforme ilustrado na Figura 2:

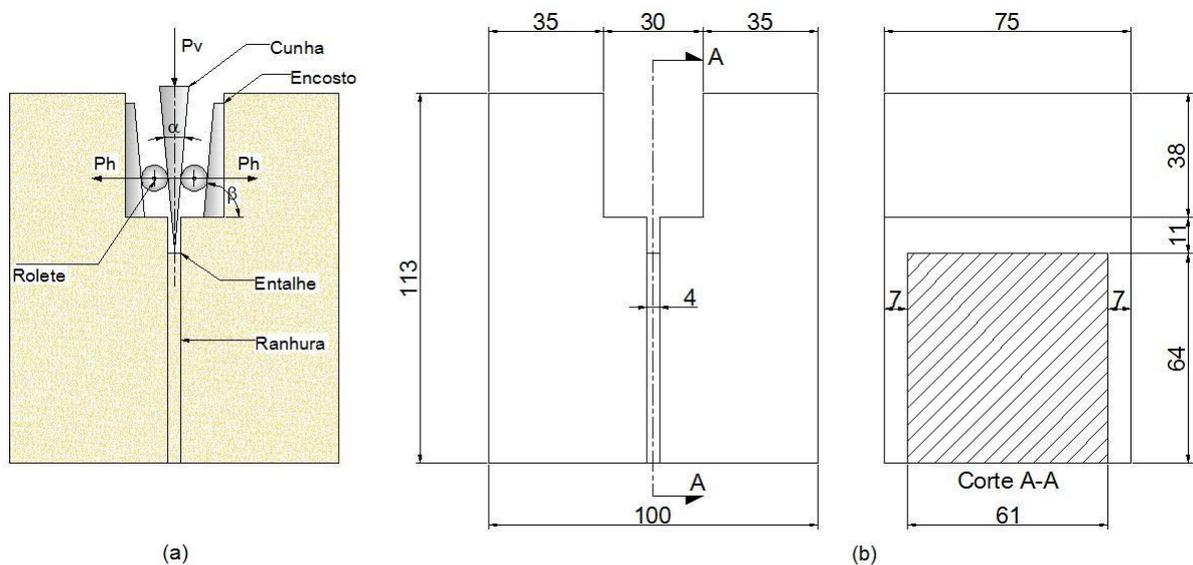


Figura 2: (a) Arranjo esquemático do método da cunha, onde α e β são os ângulos da cunha e do encosto, respectivamente. (b) Geometria e dimensões da amostra (mm).

As amostras foram submetidas ao ensaio de propagação da trinca estável pelo método da cunha utilizando-se uma Máquina Universal de ensaios, da marca MTS.

O ensaio foi realizado com diferentes posições dos roletes. Inicialmente os roletes foram posicionados com uma distância B de 33 mm entre o seu centro e o início do entalhe e posteriormente foram posicionados com uma distância B de 23 mm, como ilustra a Figura 3.

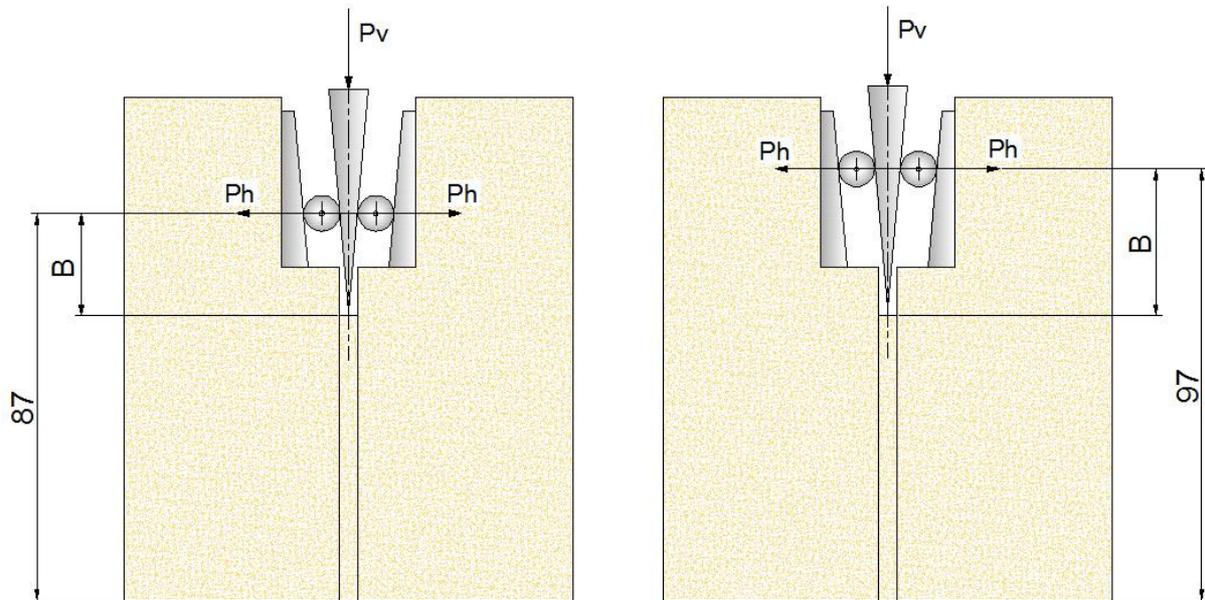


Figura 3: Posição dos roletes. Onde B é a distância entre o ponto de aplicação da força P_h e a ponta do entalhe.

Com os dados de deslocamento do atuador e da carga instantâneos, foram elaboradas curvas P - s . O trabalho de fratura foi calculado integrando-se a área em baixo destas curvas, a partir das quais foi calculada a energia de fratura γ_{wof} que é a razão entre o trabalho de fratura e a área da superfície formada, de acordo com a equação (A). Como a energia de ligação das partes da amostra é transformada em energia de superfície, a área considerada é igual a duas vezes a área da fratura, pois há formação de duas superfícies. A integral sob a curva foi feita até o ponto em que houve uma queda de 90% da carga máxima atingida durante o ensaio, $P_{m\acute{a}x}$.

Posteriormente foi analisada a dependência da força P_v , necessária para a propagação estável da trinca, em relação à distância B , veja Figura 3, entre a ponta do entalhe e a aplicação da força (posição dos roletes).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 4 tem-se a fotografia de uma amostra de tijolo refratário fraturado, observa-se que a trinca circundou a maioria dos agregados, resultando no aumento da área de fratura real.



Figura 4 – Superfície de fratura de uma amostra de tijolo refratário

Na Figura 5 estão ilustradas as curvas carga-deslocamento de uma amostra com os roletes a uma distância de 33 mm e 23 mm da ponta do entalhe, respectivamente. Ambas apresentam um comportamento de propagação e crescimento estável da trinca, o que garante o monitoramento completo do crescimento da trinca através da microestrutura da amostra, condição necessária para a determinação da energia de fratura.

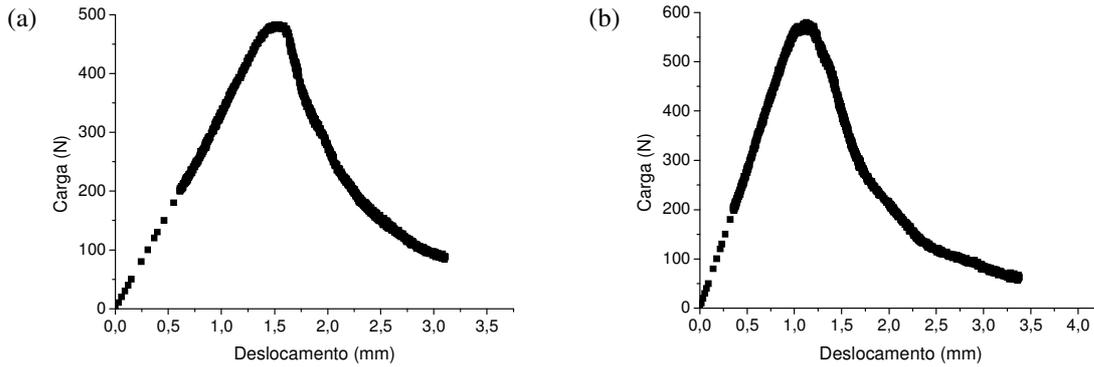


Figura 5: Curvas carga-deslocamento de amostras de tijolo refratário ensaiadas pelo método da cunha com distância entre a aplicação da força (posição dos roletes) e o início da trinca de 33 mm (a) e 23 mm (b).

A partir dos valores de carga máxima e dos gráficos obtidos durante o ensaio e utilizando a equação (A), foram calculadas as energias de fratura das amostras para cada posição de rolete, tais dados compõem a Tabela 1.

Tabela 1: Resultado de carga máxima e energia de fratura de amostra de tijolo refratário, ensaiadas com distância entre a aplicação da força (posição dos roletes) e o início da trinca de 33 mm e 23 mm.

Distância do centro do rolete até a ponta do entalhe - B (mm)	$P_{\text{máx}}$ (N)	γ_{wof} (J.m⁻²)
33	482,65	92,90
23	579,29	103,83

É possível notar que a amostra que foi ensaiada com maior distância B (entre a aplicação da força e o início da trinca) apresentou menor carga necessária para o início da propagação da trinca. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de que a força aplicada P_h a uma distância B do início da trinca produz um torque que deve ser proporcional à força e a distância B, aumentando-se a distância a força necessária para o mesmo torque tende a ser reduzida.

Conforme literatura os valores de energia de fratura devem ser equivalentes, porém os valores obtidos apresentam uma pequena variação que pode ser devida a quantidade de amostras ensaiadas e possivelmente essa variação está dentro do

desvio esperado no ensaio. Porém estes resultados são preliminares e mais testes deverão ser realizados para sua compreensão total. Além de maior número de amostras e testes, serão também avaliadas outras distâncias entre os roletes e a ponta do entalhe.

CONCLUSÃO:

No ensaio do método da cunha a posição em que os roletes são colocados não interfere na energia de fratura, porém a carga máxima durante o ensaio (carga necessária para o início da propagação da trinca) é diferente de acordo com a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe, sendo que, quanto maior essa distância menor é a carga máxima necessária.

Estes resultados estão de acordo com a Lei de Alavanca desenvolvida por Arquimedes. Quando aplicamos a força P_h através dos roletes é formado um braço de alavanca entre o ponto de aplicação de P_h e o local que sofre maior tensão (ponto onde a trinca é iniciada, devido à concentração de tensões resultante da geometria da amostra). Essa tensão é proporcional a força e a distância entre o ponto de aplicação da mesma e o ponto sob tensão. Sabe-se, também, que a tensão necessária para quebrar as ligações de um determinado material deve ser um valor fixo, logo se mantendo a tensão constante, temos que a força necessária para que esta tensão seja atingida é inversamente proporcional à distância a que a mesma está sendo aplicada.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, processo 07/55964-3, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPQ, pela bolsa de Mestrado, processo 135921/2008-2, pela bolsa de Doutorado, processo 140202/2009-9, pela bolsa de Produtividade em Pesquisa, processo 302387/2007-2.

REFERÊNCIAS

- [1] LEE, W. E.; VIEIRA, W.; ZHANG, S.; AHARI, K. G.; SARPOOLAKY, H.; PARR, C. Castable refractory concretes. **International Materials Reviews**, v.3, n. 46, p. 145-167, 2001.
- [2] RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A.: The influence of microstructure on the maximum load and fracture energy of refractory castables. **Ceramics International**, v. 36, p. 263-274, 2010.
- [3] SOUZA, H. L.; FORTES, G. M.; PAIVA, A. E. M.; RODRIGUES, J.A.: Caracterização da energia de fratura de corpos de prova de concreto refratário com entalhe de diferentes profundidades. In. 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – 18 CBECiMat, 2008, Porto de Galinhas. **Anais do 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – 18 CBECiMat**, v. 1, p. 484-495, 2008.
- [4] CUNHA-DUNCAN, F. N.; BRADT, R. C. Fratura de refratários. **Cerâmica**, v.49, p.199-215, 2003.
- [5] RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A.: Influência da forma e do processo de obtenção do entalhe na carga máxima e na energia de fratura de argamassas utilizando o método da cunha para a propagação estável da trinca. **Cerâmica**, v. 55, p. 181-189, 2009.
- [6] RIBEIRO, S.; SANTOS, E. M. B.; GARCIA, G. C. R.; RODRIGUES, J. A.: Energia de fratura de argamassas produzidas com cimento Portland: Resultados Interlaboratoriais. In. 53º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2009, Guarujá-SP. **Anais do 53º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. São Paulo: ABC, p. 1-11, 2009.
- [7] VIEIRA, J. S. C.; PAIVA, A. E. M.; RIBEIRO, S.; DENTE, C.C.E.; FORTES, G.; RODRIGUES, J. A. Estudo comparativo entre métodos de determinação da energia de fratura de concretos refratários.
- [8] TSCHEGG, E. Patent number 390328B, Republic Österreich, p. 3-4, registered 1986.
- [9] RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A. Determinação da influência da composição no comportamento de fratura de argamassas utilizando o método da cunha. In. 52º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2008, Florianópolis-SC. **Anais do 52º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. São Paulo-SP, p. 1-12, 2008.

[10] MURALIDHARA, S.; PRASAD, B.K. RAGHU; ESKANDARI, HAMID, KARIHALOO; B.L. Fracture process zone size and true fracture energy of concrete using acoustic emission. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 479-486, 2010.

[11] BRÜHWILER, E.; WITTMANN, F. H.: The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. **Engineering Fracture Mechanics**, v.35, n. 1/2/3, p. 117-125, 1990.

EVALUATION OF THE FRACTURE ENERGY BY THE WEDGE SPLITTING TEST DEPENDING ON THE POSITION OF THE ROLLER

ABSTRACT

Refractories are materials with heterogeneous structure, consisting basically of two parts, one with fine particles called matrix and the other of large sized called aggregate. Due to their fragility, they are susceptible to catastrophic fracture, so the knowledge of their mechanic behavior is so important. One of their main properties is the fracture energy which has been a very important tool to study these materials, it is determined by the wedge splitting test patented by Tschegg. This work intend to characterize the fracture energy using the wedge splitting test depending on the positions of the rollers of the device test, were used samples with dimensions of 113x100x75 mm³. The results showed that the greater distance between the centers of rollers and the tip of the notch lower the maximum load required to initiate stable crack propagation.

Key-words: Refractory, Wedge Splitting Test, Fracture energy.