

ENERGIA DE FRATURA: REVISÃO, APLICAÇÃO, RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CRITÉRIOS PARA A SUA MEDIDA

S. Ribeiro⁽¹⁾, G. C. R. Garcia⁽¹⁾, E. M. B. Santos⁽¹⁾, E. C. B. Santos⁽¹⁾, J. A. Rodrigues⁽²⁾

Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de Lorena (EEL)
Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)

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

sebastiao@demar.eel.usp.br

⁽²⁾Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Departamento de Engenharia de
Materiais (DEMa) - Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais (GEMM)

iosear@ufscar.br

RESUMO

Materiais cerâmicos com microestruturas tenacificadas têm sido avaliados quanto a sua energia de fratura. Esses materiais são normalmente argamassas, concretos civís, concretos refratários e cerâmicas avançadas. A energia de fratura é uma grandeza importante na avaliação do comportamento de fratura de materiais cerâmicos, tanto em temperatura ambiente como em temperaturas elevadas, podendo ser determinada pelo método da barra entalhada sob flexão e mais recentemente pelo método da cunha. Para materiais com microestrutura grosseira, o método da cunha é mais aconselhável, porém deve ser executado cuidadosamente, pois pode ocorrer significativo espalhamento nos resultados. Nesse trabalho, é apresentada uma curta revisão sobre energia de fratura e sobre os métodos de medida da mesma, além da apresentação de resultados experimentais e orientações para a correta utilização do método da cunha.

Palavras chaves: Energia de Fratura, Trabalho de Fratura, Argamassas, Concretos, Propagação Estável de Trinca.

INTRODUÇÃO

Nesta secção será apresentada uma curta revisão sobre energia de fratura.

“Work of Fracture” ou “Effective Surface Energy” ou Energia Total de Fratura, ou simplesmente Energia de Fratura é definida como o TRABALHO realizado para criar uma NOVA UNIDADE DE ÁREA de superfície (fratura), não levando em consideração detalhes do processo de fratura⁽¹⁻⁷⁾.

A energia de fratura, muitas vezes descrita como γ_{wof} é uma somatória de várias energias, como pode ser demonstrada pela seguinte equação⁽²⁾.

$$\gamma_{wof} = \gamma_0 + \gamma_p + \gamma_R + \gamma_{ir} \quad (A)$$

em que γ_0 é a energia de superfície intrínseca resultante da quebra das ligações químicas, γ_p é a energia proveniente de microdeformações plásticas na ponta da trinca, e γ_R a energia média resultante da interação da trinca com a microestrutura do material. O termo γ_{ir} representa, no caso de refratários e compósitos, processos irreversíveis que consomem energia por fluxo viscoso, por exemplo. Sendo assim, γ_{wof} é a medida mais adequada para avaliar materiais com microestrutura como a dos refratários. No caso de um monocristal γ_{wof} se aproxima de γ_0 ou de γ_p ^(2,4,8,9).

Em muitos trabalhos, os autores apresentam a energia de fratura na forma de taxa de liberação da energia elástica armazenada na amostra e na máquina de ensaios, chamando de G_F , que também pode ser chamada de energia de fratura específica, que será vista com mais detalhes a seguir⁽¹⁰⁻²¹⁾.

Tanto para determinar γ_{wof} quanto para G_F , a propagação da trinca principal, obrigatoriamente, deve ser estável^(1,5,7,10,15,22). Para que a propagação seja estável, a relação entre o descarregamento da energia elástica e a conseqüente geração de superfície deve obedecer a equação seguinte^(1,5,7,10):

$$-\frac{d(U_M + U_S)}{dc} \leq \frac{dW_{fs}}{dc} \quad (B)$$

em que $\frac{d(U_M + U_S)}{dc}$ é a variação (no sentido de liberação) das energias elásticas armazenadas na máquina (U_M), incluindo acessórios, e na amostra (U_S), por unidade de propagação de trinca (dc) e $\frac{dW_{fs}}{dc}$ é a variação da energia de superfície (dW_{fs}) consumida, também, por unidade de propagação de trinca.

Existem dois métodos para determinação da energia de fratura, o da barra entalhada sob flexão em três pontos e o método da cunha.

A Figura 1 mostra o esquema da barra entalhada submetida à flexão em três pontos. A equação utilizada para o cálculo da energia de fratura por esse método é mostrada a seguir^(1,3-6,21-26):

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

em que γ_{wof} é a energia de fratura, F_V é a carga vertical aplicada pela máquina de ensaios e s é o deslocamento vertical do atuador da máquina.

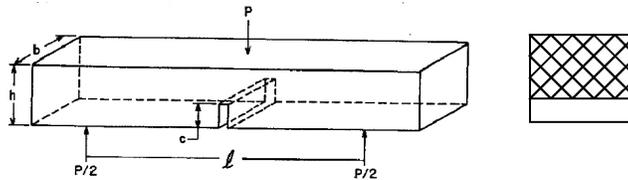


Figura 1 - (a) Geometria e dimensões da amostra para medida da energia de fratura pelo método da flexão em três pontos⁽⁵⁾ e (b) seção transversal, mostrando a região por onde a trinca se propaga⁽²²⁾.

A grande desvantagem desse método é a relação tamanho do agregado/área fraturada da amostra, principalmente quando se trabalha com concretos produzidos com agregados de grandes dimensões, por exemplo, da ordem de 20 mm. Esse efeito pode ser observado na Figura 2.



Figura 2 - Fotografia da superfície de fratura de um concreto refratário com agregados de até 22 mm, com um entalhe simulado.

Para sanar os problemas em relação ao método explicitado anteriormente, em 1986, Tschegg patenteou o método da cunha⁽²⁷⁾. Como pode ser visto na Fig. 3a, a cunha transmite carga para dois roletes laterais e estes para os encostos que produzem as forças horizontais, F_H . Na Fig. 3b vêem-se os detalhes do entalhe, das ranhuras laterais e da secção de fratura após o teste, em corte que passa justamente pelo entalhe e ranhuras laterais. A Fig. 3c apresenta a geometria da amostra e suas dimensões típicas^(7,10-12,28).

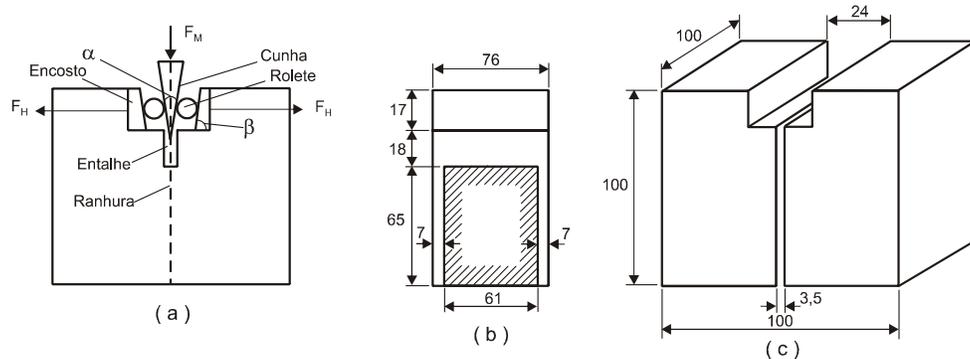


Figura 3 - (a) Arranjo esquemático do método da cunha. α e β são, respectivamente, os ângulo da cunha e dos encostos⁽²⁸⁾, (b) secção transversal da amostra passando pelo entalhe e ranhuras laterais e (c) geometria e dimensões da amostra (mm)⁽¹⁰⁾.

No método da cunha podem ser utilizadas duas formas para avaliar a abertura ou o crescimento da trinca: (a) adotar o deslocamento do atuador da máquina e a força vertical, utilizando a Equação (C) para o cálculo da energia de fratura ou (b) utilizando a força horizontal produzida pela ação da cunha e o deslocamento horizontal dessa força, medido pela ação de um extensômetro. Nesse caso, a energia avaliada é chamada de energia específica, G_F , assim chamada por vários pesquisadores e a seguinte equação é utilizada para esse cálculo^(7,10,11,13,21):

$$G_F = \frac{1}{A} \int F_H d\delta \quad (D)$$

em que A é a área fraturada projetada da amostra; F_H é a força horizontal resultante da ação da cunha nos roletes e, conseqüentemente, na amostra para promover a abertura da trinca; e $d\delta$ é a variação da abertura do extensômetro. F_H está relacionada a F_V por meio da equação seguinte^(10,13,21):

$$F_H = \frac{F_V}{2tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (E)$$

em que α é o ângulo da cunha.

Em quaisquer dos métodos de determinação da energia de fratura é muito importante que se verifique a rigidez da máquina de ensaios, que pode ser alta, e que se desconte a energia de deformação da máquina, utilizando a equação seguinte:

$$\gamma_{wof} = \frac{U - U_0}{2A} \quad (F)$$

em que, U é o trabalho total de deformação do sistema amostra/máquina e U_0 é o trabalho de deformação da máquina⁽²⁴⁾.

Ainda são muito contraditórios e duvidosos os resultados de energia de fratura apresentados na literatura. Muitos autores sequer colocam os desvios nos resultados apresentados em seus trabalhos^(7,10,16,17,20,30). O trabalho de Rosselló⁽¹⁹⁾ mostrou um desvio de 12%, enquanto o de Menou⁽¹⁸⁾ mostrou desvios bem superiores. Apesar de tudo isso a energia de fratura é uma grandeza muito importante para avaliar materiais de comportamento elástico não linear e é parte integrante das equações utilizadas nos estudo de choque térmicos^(3,12,21,23,26)

MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado para propagação estável da trinca e conseqüente avaliação da energia fratura foi o da cunha⁽²⁷⁾. Vale ressaltar que todas as etapas desse trabalho foram realizadas por uma única pessoa e com minuciosos detalhes para minimizar os possíveis erros experimentais.

Para obtenção das 6 amostras de argamassa deste trabalho, foram usados: areia média lavada para construção civil, cimento Portland CII-E-32, da Empresa Cimento Montes Claros, e água potável. As proporções, em massa, desses materiais foram: 2 partes de areia, 1 parte de cimento e 0,46 parte de água em relação a massa de cimento.

Primeiramente, a areia e o cimento foram misturados em uma cuba de aço inoxidável por cinco minutos, a seco. Em seguida foi adicionada, ao poucos, a água, deixando misturar por mais cinco minutos.

Após mistura, a argamassa foi vertida em um molde de aço dotado de lâminas para produzir amostras entalhadas e ranhuradas e vibrado.

O conjunto, molde e argamassa moldada, foi introduzido em uma caixa plástica fechada hermeticamente, contendo estopa umedecida com água, cuja finalidade foi manter uma atmosfera saturada de água. A cura ocorreu por sete dias em atmosfera saturada à temperatura de 25°C. A desmoldagem foi realizada vinte e quatro horas após a moldagem da argamassa. Após o período de cura as amostras foram envelhecidas por 28 dias para o teste de propagação estável de trinca.

A superfície livre de moldagem das amostras foram retificadas para perfeito assentamento no ressalto do dispositivo da cunha e, conseqüentemente, perfeito alinhamento do sistema amostra-dispositivo-máquina de ensaios

Para os testes de propagação estável de trinca foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos, MTS (Material Testing System), modelo 810.

Nesse trabalho, foi utilizada uma cunha com 10° e os encostos com 5°, ficando a força transmitida horizontalmente, F_H , 5,7150 vezes a força aplicada pela máquina de ensaios, na vertical, F_M . Deve-se lembrar da grande vantagem de se utilizar esse método, em que pouca energia potencial fica armazenada na máquina de ensaios e na amostra, facilitando assim uma propagação estável da trinca.

As condições de operação da máquina foram: célula de carga de 5 kN, controle do ensaio por deslocamento do atuador, rampa de 0,020 mm.min⁻¹, aquisição de dados a cada 5 µm, e pré-carga de 15 N.

O programa computacional da máquina de ensaios emite uma tabela de dados, na extensão Excel que é transferida para o programa Origin Pro e a partir deste são construídas as curvas carga-deslocamento. A integral (feita com o Origin-Pro) abaixo da curva de carga-deslocamento fornece o valor do trabalho total de fratura, que dividido por duas vezes a área fraturada projetada da amostra, caso da equação (C), e por uma vez essa área, caso da equação (D), produzem a energia de fratura e a energia específica de fratura, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra uma amostra de argamassa 2:1 entalhada, ranhurada e curada pronta para ser submetida ao teste de propagação de trinca e as seis curvas obtidas nos testes de propagação estável de trinca das seis amostras da argamassa preparadas conforme descrito anteriormente.

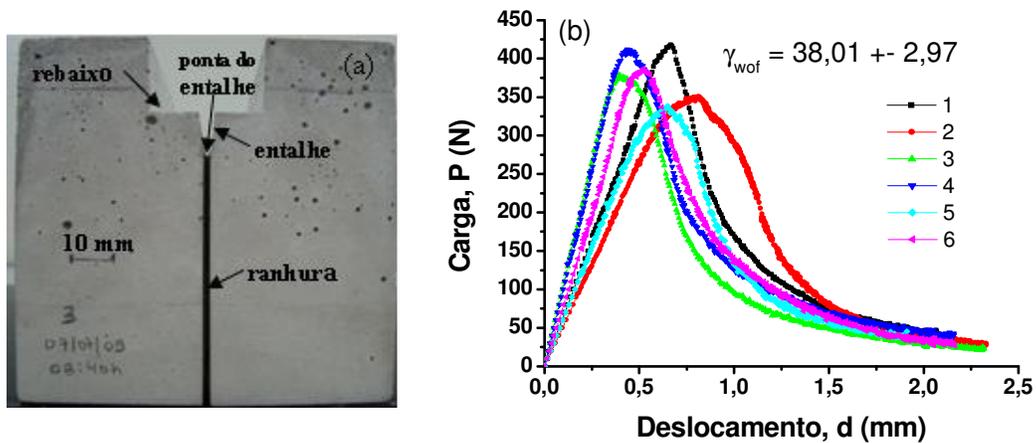


Figura 4 - (a) Fotografia de uma amostra de argamassa e (b) curvas carga-deslocamento das seis amostras de argamassa.

Na Figura 5 são mostradas fotografias de um dos lados da fratura das seis amostras.



Figura 5 - Fotografia das amostras de argamassa 2:1, mostrando a superfície de fratura, com indicação das respectivas energias de fratura. Os números apresentados nas elipses correspondem às curvas da Figura 4(b).

Os valores de γ_{wof} variaram de 33 a 42 J.m⁻², com média de 38,01 J.m⁻² e com desvio de $\pm 2,97$ J.m⁻², equivalendo a aproximadamente 12%. Para esse valor médio de γ_{wof} o desvio pode ser considerado bom quando comparado com desvios apresentados para o mesmo tipo de material e método aplicado, cujos valores de desvios estão entre 15 e 18%⁽²²⁾.

Observando as seis curvas da Figura 4(b), percebe-se comportamentos diferentes entre elas. Isso mostra que mesmo para um mesmo material e mesmo rigor na execução dos testes é praticamente impossível obter duas curvas coincidentes. O comportamento de cada curva está intimamente ligado ao caminho que a trinca percorre na amostra, pois percebe-se que para as de maior energia de fratura, as amostras apresentam um maior abaulamento da superfície de fratura, implicando em maior consumo de energia para separar integralmente as duas partes da amostra. Quanto menor a energia de fratura menos abaulada é a superfície de fratura. Isso pode ser exemplificado comparando-se as amostras 2 e 5 da Figura 5 e as curvas das respectivas amostras na Figura 4(b).

Para um determinado teste de propagação estável de trinca foram utilizadas as duas maneiras de aquisição de dados: um pelo deslocamento vertical do atuador da máquina de ensaios, chamado aqui por s e outro pelo deslocamento horizontal, medido por um extensômetro, denominado por δ , para os cálculos de γ_{wof} e G_F , para as quais foram utilizadas as equações (C) e (D), respectivamente. A Figura 6 mostra as curva carga-deslocamento para os dois modos de calcular a energia de fratura pelo método da cunha.

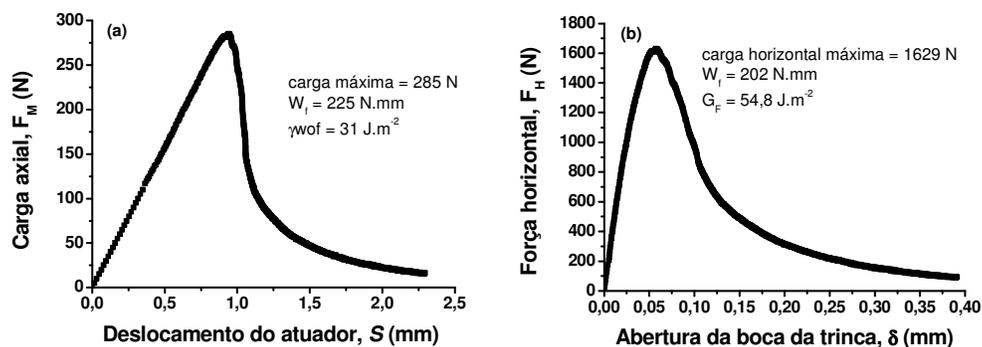


Figura 6 - Curvas típicas carga-deslocamento: (a) carga vertical-deslocamento vertical do atuador, utilizada para o cálculo de γ_{wof} e (b) carga horizontal-deslocamento horizontal, medida com extensômetro, (CMOD), utilizada para o cálculo de G_F .

Na curva (a), percebe-se que o trabalho de fratura encontrado é 10% maior que em (b), podendo essa diferença ser atribuída aos diferentes processos de atrito, pois quando da utilização do extensômetro para medir o deslocamento elimina-se quaisquer situações de atrito nas partes envolvidas no dispositivo utilizado pelo método da cunha. Eliminando a questão do atrito suposto como possível causador do aumento do trabalho de fratura quando se utiliza o deslocamento do atuador, as energias de fratura calculadas mostram-se de acordo com a literatura que indica uma relação $G_F/\gamma_{wof} = 2^{(21)}$, ou seja, $G_F = 54,8 \text{ J.m}^{-2}$ e $\gamma_{wof} = 31 \text{ J.m}^{-2}$.

Também, é importante notar que a curva obtida com o auxílio do extensômetro mostra maior estabilidade, principalmente quando se avalia a região da carga máxima, essa região para a curva (b) é mais arredondada que a apresentada na curva (a).

Com esse trabalho pode-se concluir que mesmo com o máximo cuidado na medida da energia de fratura, mesmo utilizando o método da cunha, que promove uma propagação mais estável, o desvio nas medidas são significativos e que isso se deve a heterogeneidade estrutural do próprio material e não do método em si.

CONCLUSÕES

O método da cunha pode ser aplicado seguramente na determinação da energia de fratura de materiais com comportamento elástico não-linear.

O método da cunha é tecnicamente melhor conceituado quando se utiliza um extensômetro para a medida do deslocamento da força horizontal do que quando se utiliza o deslocamento axial do atuador, pois no primeiro, elimina-se toda a interferência do atrito das partes envolvidas na transmissão do carregamento, ou seja, atrito no dispositivo da cunha.

O método da cunha é preferencial em relação ao método da barra entalhada e flexionada a três pontos devido a estrutura dos concretos, ou seja, relação tamanho do agregado/área fraturada.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP, processo 07/55964-3, ao CNPq, pela bolsa de Mestrado, processo 135921/2008-2, pela bolsa de Doutorado, processo 140202/2009-9 e pelas bolsas de Produtividade em Pesquisa, processos 302387/2007-2, 303061/2009-0 e 301073/2006-6.

REFERÊNCIAS

1. KOLYER, M. T.; CAMPBELL, M. P. The work of fracture of epoxy resins. **Cryogenics**, v.5, p.281-283, 1974.
2. BARINOV, S. M. The work-of-fracture of brittle materials: Principle, determination, and applications. **J. Mater. Res.**, v.9, n.6, p.1412-1424, 1994.
3. RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A. The influence of microstructure on the maximum load and fracture energy of refractory castable. **Ceramics International**, v.36, p.263-274, 2010.
4. SAKAI, M.; BRADT, R. C. Fracture toughness testing of brittle materials. **Int. Mat. Reviews**, v.38, n.2, p.53-78, 1993
5. NAKAYMA, J.; ABE, H.; BRADT, R. C. Crack stability in the work-of-fracture test: Refractory applications. **Journal of the American Ceramic Society**, v.64, p.671-675, 1981.
6. CHOU, C-C.; CHENG, I-L.; CHEN, K-J.; KO, Y-C. Fracture energy and thermal stress resistance parameter of high alumina brick. **Ceramic Bulletin**, v.65, 1642-1646, 1986.
7. HARMUTH, H. Stability of crack propagation associated with fracture energy determined by wedge splitting specimen. **Theoretical and applied fracture mechanics**, v.23, p.103-108, 1995.
8. SAKAI, M., ICHIKAWA, H. Work of fracture of brittle materials with microcracking and crack bridging. **Int. J. Fracture**, v.55, p.65-79, 1992.
9. SAKAI, M. Fracture mechanics of refractory materials. **Taikabutsu**, v.39, n.11, p.604-612, 1987.
10. HARMUTH, H.; RIEDER, K.; KROBATH, M.; TSCHEGG, E. Investigation of the nonlinear fracture behavior of ordinary ceramic refractory materials. **Mater. Sci. Eng. A** **214**, p.53-61, 1996.
11. AUER, T.; MANHART, C.; HARMUTH, H. Contributions to refractory fracture mechanical and fractographic investigations. **RHI Bulletin**, n.1, p.28-31, 2006.
12. TSCHEGG, E. K.; FENDT, K. T.; MANHART, C.; HARMUTH, H. Uniaxial and biaxial fracture behaviour of refractory materials. **Engineering Fracture Materials**, v.76, p.2249-2259, 2009.

13. NILICA, R. HARMUTH, H. Mechanical and fracture mechanical characterization of building materials used for external thermal insulation composite systems. **Cement and Concrete Research**, v.35. p.1641-1645, 2005.
14. HARMUTH, H. Investigation of the adherence and the fracture behaviour of polymer cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v.25. p.497-502, 1995.
15. FAN, C.; BEN JAR, P. Y.; ROGER CHENG, J. J. Prediction of energy release rates for crack growth using FEM-based energy derivative technique. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 74, p.1243-1254, 2007.
16. 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.171-188, 2006.
17. WU, K-R.; CHEN, B.; YAO, W.; ZHANG, D. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v.31. p.1421-1425, 2001.
18. MENO, A.; MOUNAJED, G.; BOUSSA, H.; PINEAUD, A.; CARRE, H. Residual fracture energy of cement past, mortar and concrete subject to high temperature. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v.45, p.64-71, 2006.
19. ROSSELLÓ, C.; ELICES, M.; GUINEA, G. V. Fracture of model concrete: 2. Fracture energy and characteristic length. **Cement and Concrete Research**, v.36. p.1345 -1353, 2006.
20. XU, S.; ZHANG, X. Determination of fracture parameters for crack propagation in concrete using an energy approach. **Engineering Fracture Mechanics**, v.75, p.4292-4308, 2008.
21. HARMUTH, H.; TSCHEGG, E. K. Fracture mechanical characterization of ordinary ceramic refractory materials. **Veitsch-Radex Rundschau**, v.1, p.465-542, 1994.
22. 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.
23. QUINTELA, M. A.; MELO, T. M. F.; LAGE, I. J.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A. Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono. **Cerâmica**, v.47, p.174-179, 2001.
24. BARINOV, S. M. High-temperature fracture behavior of porous zircônia ceramics. **Materials Science and Engineering A**, v.54, L11-L14, 1992.

25. CUNHA-DUNCAN, F. N.; BRADT, R. C. Fratura de refratários. **Cerâmica**, v. 49, p.199-215, 2003.
26. LARSON, D. R.; COPOLLA, J. A.; HASSELMAN, D. P. H. Fracture toughness and spalling behavior of high-Al₂O₃ refractories. **Journal of the American Ceramic Society**, v.57, p.417-421, 1974.
27. TSCHEGG, E.: Republik Österreich, **Patent** number 390328B, registered 1986.
28. ALAPIN, B.; OLLIG, M.; PÖTSCHKE, J. Thermochemical properties of selected refractory materials up to 1500°C: In: 46th Inter. Coll. Refr. Eurogress Aachen, Germany, 2003.
29. TSCHEGG, E. K.; ELSER, M.; TSCHEGG, S. E. Biaxial fracture tests on concrete – development and experience. **Cement and Concrete Composite**, v.17, p. 57-75, 1995.
30. APPA RAO, G.; RAGHU PRASAD, B. K. Fracture energy and softening behavior of high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, v.326. p.247-252, 2002.

FRACTURE ENERGY: REVIEW, APPLICATION, EXPERIMENTAL RESULTS AND MEASUREMENT'S CRITERIA

ABSTRACT

Ceramic materials with toughed microstructures have been studied with respect to fracture energy. These materials are usually mortars, concretes, castables and advanced ceramics. The fracture energy is important to the evaluation of the fracture behavior of ceramic materials at room and high temperatures. It can be determined through the three point bending test, and more recently, through the wedge splitting test. For materials with coarse microstructure, the wedge splitting method is more recommended, but it may show results with wide deviation if not applied carefully. This work presents a short review about fracture energy and its measurement, besides experimental results and advices to the correct use of the wedge splitting method.

Key words: Fracture energy, work of fracture, mortars, concretes, crack stable propagation.