ENERGIA DE FRATURA DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM CIMENTO PORTLAND: RESULTADOS INTERLABORATORIAIS

S. Ribeiro[(1)], E. M. B, Santos[(1)], G. C. R, Garcia[(1)], J. A. Rodrigues[(2)]
[(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
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)
josear@power.ufscar.br

RESUMO

Argamassas e concretos são materiais com estrutura bastante complexa de ampla aplicação no mundo inteiro, que merecem estudos mais aprofundados para seu completo entendimento. Recentemente, foi instalado no GEMM/DEMa/UFSCar o método da cunha para estudar energia de fratura de materiais do tipo argamassas e concretos civis e concretos refratários. Está em fase de implantação, de maneira otimizada o mesmo método no DEMAR/EEL/USP. Nesse trabalho são mostrados os resultados de energia de fratura de argamassas obtidas nos dois laboratórios, com o objetivo de validar o método, que sem dúvida trará grandes benefícios para a área de materiais de fratura quase-frágil, além da contribuição científica para a mecânica da fratura de argamassas e concretos civis e também refratários. Os valores de energia de fratura encontrados nas duas instituições foram da ordem de 30 $J.m^{-2}$, para argamassa 1:2 e 25 $J.m^{-2}$, para argamassa 1:3.

Palavras-chave: Energia de fratura, carga máxima, propagação estável de trinca, método da cunha, argamassa.

INTRODUÇÃO

Argamassas e concretos são materiais heterogêneos, formados por uma estrutura dura de cimento e partículas de rocha, os agregados, que exibe comportamento quase-frágil[1,2,3]. É o material mais comumente usado na construção civil no mundo inteiro, daí a necessidade crescente do entendimento do seu comportamento mecânico, das propriedades de seus componentes e, particularmente, do comportamento de fratura[4,5].

A energia de fratura é uma propriedade muito importante dos materiais, principalmente daqueles com microestruturas complexas como é o caso das argamassas e concretos para a construção civil. 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 de fratura, γ_{wof}, que é expressa pela seguinte equação[6, 7, 8]:

$$\gamma_{wof} = \frac{1}{2A}\int P_M \, d\delta \qquad , \qquad \text{(A)}$$

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

O método mais conhecido para determinação da energia de fratura é o da barra entalhada e flexionada em três ou quatro pontos. O grande problema desse método é a relação tamanho do agregado/área fraturada da amostra, pois sendo a barra de pequenas dimensões (25x25x150 mm^3, tipicamente utilizada na área de refratários) pode apresentar um agregado de dimensão próxima à dimensão da área fraturada e o resultado final ser fortemente afetado[6]

No método da cunha essa relação 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 dessa citada relação, a razão entre o tamanho da amostra e o tamanho da zona de processo é muito crítica, sendo minimizado seu efeito com a utilização do método da

cunha. Várias publicações mostram a importância dessa zona de processo e sua influência nos resultados de energia de fratura [2,5,7,8,9,10,11].

A Figura 1 ilustra o sistema amostra-dispositivo para o teste de propagação estável de trinca pelo método da cunha.

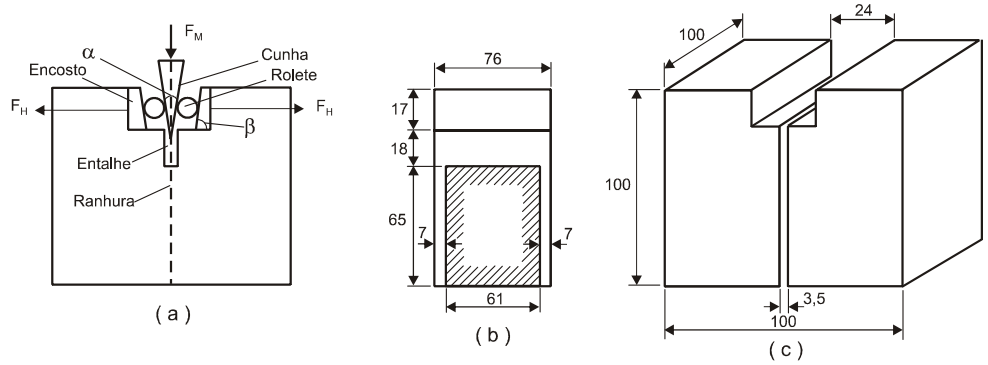

Figura 1 – (a) Arranjo esquemático do método da cunha. α e β são, respectivamente, os ângulo da cunha e dos encostos[8], (b) secção transversal da amostra passando pelo entalhe e ranhuras laterais e (c) geometria e dimensões da amostra (mm)[10].

Qualquer que seja o método de determinação da energia de fratura, a propagação da trinca durante o teste deve ser, obrigatoriamente, estável, ou seja, a inequação abaixo tem que ser obedecida[6,12]:

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

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 assessórios 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 por unidade de propagação de trinca.

O método da cunha foi implantado no Grupo de Engenharia de Microestruturas de Materiais, GEMM, no Departamento de Engenharia de Materiais, DEMa, da Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, no período de 2006-2007[6] e está em fase de implantação, também, no Departamento de Engenharia de Materiais, DEMAR, da Escola de Engenharia de Lorena, EEL, da Universidade de São Paulo, USP, financiado pela FAPESP, processo 07/55964-3.

Este artigo mostra e discute as duas fases do projeto de instalação do método nos dois laboratórios bem como os resultados de energia de fratura obtidos, com o objetivo de fortalecer e incentivar, sob os pontos de vista experimental e acadêmico, estudos mais aprofundados em fratura de materiais do tipo argamassas e concretos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção das amostras, foram usados: areia média lavada, com tamanho médio de partículas de 500 μm e tamanhos máximo e mínimo de 2800 μm e 53 μm, respectivamente; cimento Portland CPII-Z-32, da Companhia de Cimento Portland Itaú e água potável.

Foram utilizadas duas composições mássicas em termos de cimento:areia de 1:2 e 1:3. A água foi baseada em 0,46 da massa de cimento. A areia e o cimento foram pesados e misturados previamente, com adição da água logo depois, permitindo perfeita interação entre os três constituintes da argamassa. O material foi despejado em molde de PVC no GEMM e de aço inoxidável no DEMAR, produzindo amostras de 100 x 100 x 75 mm^3 (Figura 1(c)). A Figura 2 mostra as fotografias de dois corpos de prova moldados, cada um num local.

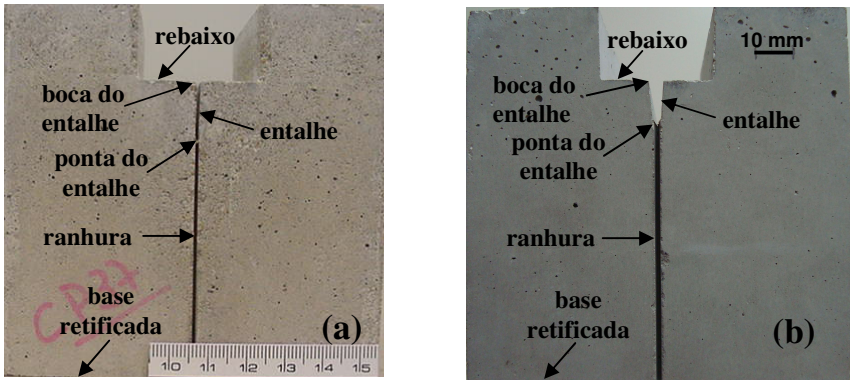

Figura 2 – Fotografias das amostras moldadas e curadas, com seus respectivos detalhes: (a) produzida no GEMM e (b) produzida no DEMAR.

Pequenas diferenças são notadas com relação ao rebaixo, entalhe e ranhuras em que nas amostras moldadas no GEMM, as paredes do entalhe e das ranhuras são verticais, enquanto nas amostras moldadas no DEMAR essas paredes são levemente inclinadas. Essas modificações foram feitas no novo projeto com a finalidade de facilitar a desmoldagem das amostras.

Nas Figuras 3, 4 e 5 são mostrados o macho para conformação do rebaixo e as lâminas, na forma de cunha, utilizadas para gerar corpos de provas com as características daquele da Figura 2(b). Para a produção da amostra da Figura 2(a) foi utilizado um macho com faces paralelas para a conformação do rebaixo.

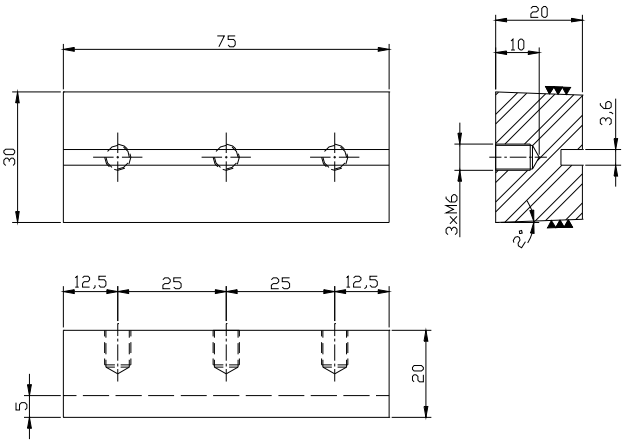

Figura 3 - Macho do molde de aço inoxidável, mostrando detalhes construtivos e medidas para produção da amostra da Figura 2(b).

O novo macho apresenta uma importante mudança que foi feita em relação ao projeto original que é o ângulo de 2º de inclinação de suas laterais. Com essa modificação a desmoldagem foi facilitada significativamente, pois com um simples toque o corpo de prova solta-se do sistema, eliminado a possibilidade de geração de defeitos, e até mesmo fratura, durante essa operação.

O desenho das novas lâminas para a produção das ranhuras laterais no corpo de prova da Figura 2(b) está mostrado na Figura 4. Essa peça, no projeto utilizado para moldar a amostra da Figura 2(a) era de faces paralelas e, nessa nova concepção, foi mudada para tipo cunha, cuja geometria facilita a desmoldagem, conforme explicado anteriormente.

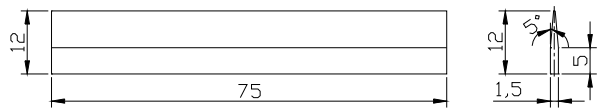

Figura 4 – Desenho da lâmina de aço para produção das ranhuras laterais nos corpos de prova, mostrando suas dimensões, detalhes construtivos e ângulo de inclinação produzindo uma cunha.

O desenho da lâmina na forma de uma cunha para produção do entalhe que funciona como iniciador da trinca no corpo de prova para o teste da cunha pode ser visto na Figura 5. Essa lâmina utilizada para moldar a amostra da Figura 2(a), também, era de faces paralelas (apenas com a sua borda afinada como numa faca) e muitas vezes causava defeitos nos corpos de prova, durante a desmoldagem, levando a conseqüências insatisfatórias durante o teste de propagação de trinca.

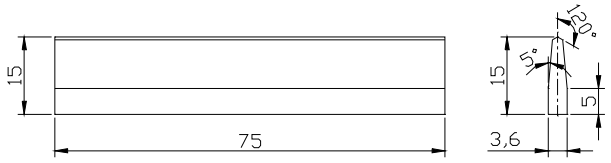

Figura 5 – Desenho da cunha para produção do entalhe nos corpos de prova, mostrando suas dimensões, detalhes construtivos e ângulo de inclinação para dar a forma da cunha.

As Figuras 6 e 7 mostram fotografias de montagem dos moldes de PVC e de aço inoxidável, indicando as suas diferentes partes. Os números de figuras indicadas nessas fotografias se referem ao desenho técnico de peças já mostradas anteriormente (Figuras 3, 4 e 5).

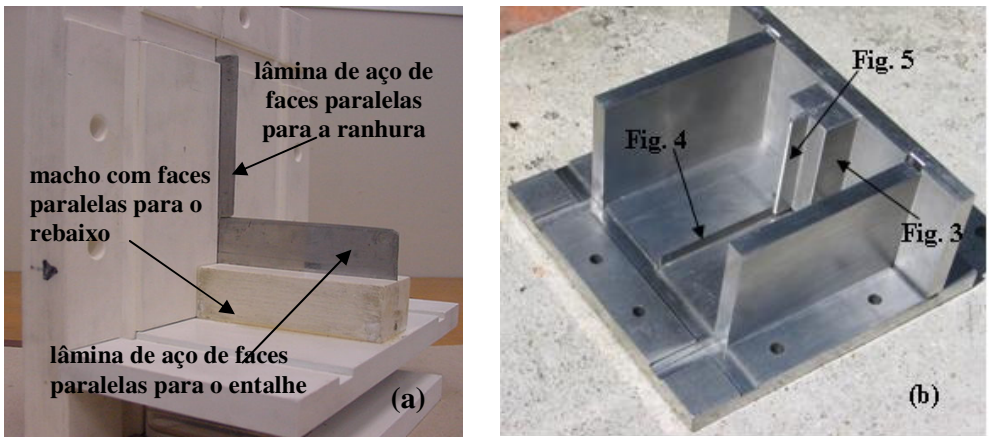

Figura 6 – Fotografias de partes dos moldes para confecção dos corpos de prova para o teste da cunha: a) molde de PVC (GEMM) e b) molde de aço inoxidável (DEMAR), indicando figuras mencionadas anteriormente.

É importante esclarecer que os moldes utilizados nas moldagens, as máquinas e dispositivos utilizados nos ensaios de propagação de trinca, bem como as

bateladas de matérias-primas e de argamassas utilizadas, não foram as mesmas, porém o executor de todas as tarefas foi sempre o mesmo.

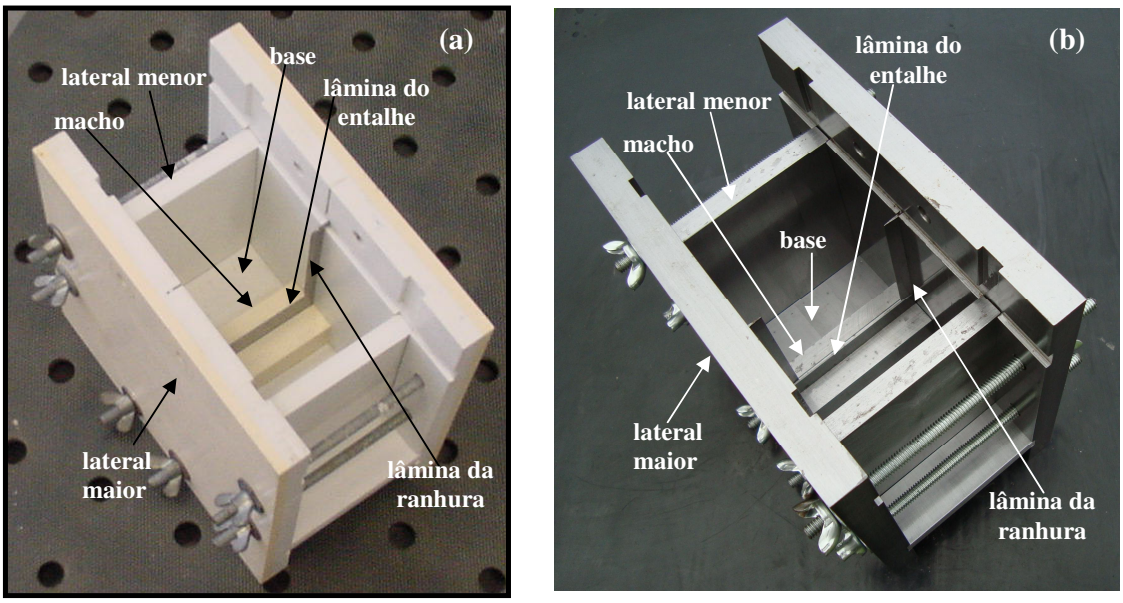

Figura 7 – (a) Molde confeccionado em PVC rígido (GEMM) munido de lâminas de aço para produzir as ranhuras laterais e o entalhe nas amostras moldadas e (b) idem, confeccionado inteiramente em aço inoxidável (DEMAR).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As alterações realizadas na geometria do macho do rebaixo, das lâminas para produção das ranhuras e entalhe foram bem sucedidas, pois facilitou muito a desmoldagem da amostra. Com essa modificação, nenhum esforço é necessário para essa operação, produzindo amostras com menos chances de se quebrarem já durante a desmoldagem.

Na Figura 8 estão ilustradas as curvas carga-deslocamento para as duas argamassas, escolhidas aleatoriamente entre todas as obtidas no trabalho experimental. Nessas curvas nota-se que ambas apresentam comportamento de propagação ou crescimento de trinca estável, condição obrigatória para a determinação da energia de fratura.

Para calcular a energia de fratura foi utilizada a equação (A). Foram usadas cinco amostras de cada grupo, cujas médias e seus respectivos desvios compõem os dados da Tabela I.

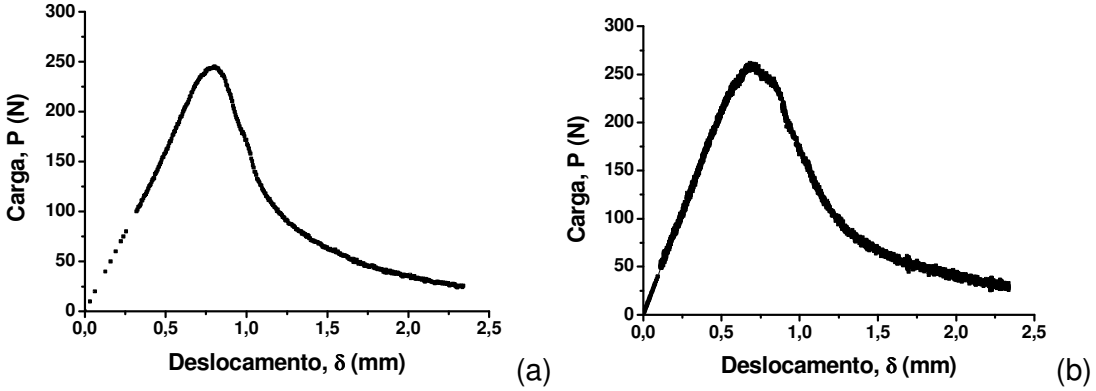

Figura 8 – Curvas carga-deslocamento de argamassas de composição 1:2: (a) curva obtida no GEMM e (b) obtida no DEMAR.

Tabela I – Resultados de energia de fratura de amostras produzidas com argamassa 1:2 e 1:3, no GEMM e no DEMAR.

Argamassa	Laboratório			
	GEMM		DEMAR	
	$P_{máx.}$ (N)	γ_{wof} (J.m^{-2})	$P_{máx.}$ (N)	γ_{wof} (J.m^{-2})
1:2	228 ± 39	30 ± 5	250 ± 32	30 ± 1
1:3	182 ± 43	25 ± 3	160 ± 28	24 ± 1

Os resultados obtidos estão de acordo com os encontrados na literatura, verificando que a argamassa com maior quantidade de cimento mostra resultados superiores de carga máxima e de energia de fratura. Esse comportamento pode ser justificado pela maior quantidade relativa de hidratos formados em função da hidratação de uma maior quantidade de cimento presente na argamassa 1:2.

É importante observar que tanto para a carga máxima quanto para a energia de fratura, os desvios mostrados pelos resultados obtidos no DEMAR são menores que os obtidos no GEMM. Uma sugestão para esse comportamento pode ser atribuída ao molde usado no DEMAR que com a nova geometria do macho, das lâminas geradoras do entalhe e das ranhuras diminuíram muito os esforços necessários para a desmoldagem das amostras, evitando a criação de defeitos adicionais.

Além do exposto anteriormente, ainda mais importante foi verificar a concordância entre os resultados encontrados nos dois laboratórios, tanto de carga máxima quanto de energia de fratura, levando a conceituar o método da cunha como

uma técnica reprodutível em laboratórios diferentes, inclusive com diferenças nos procedimentos de moldagem (moldes otimizados) e máquinas de ensaios com diferentes capacidades nominais de carga, sendo a do DEMAR de 250 kN e a do GEMM de 50 kN.

CONCLUSÕES

O método da cunha é simples, porém requer muito cuidado em todas as etapas de preparação dos corpos de prova e os mínimos detalhes devem ser observados.

Resultados satisfatórios foram obtidos nos dois laboratórios, entretanto, é ainda muito cedo para indicar o método como norma, mas é um começo para um maior aprofundamento na caracterização de argamassas e concretos, em relação a características de fratura.

Os resultados numéricos mostram uma relação estreita entre a carga máxima e a energia de fratura para as condições estudadas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto de instalação do método da cunha no DEMAR, processo 07/55964-3.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de pós-doutorado para implantação do método da cunha no GEMM, processo 150038/2006-2.

Ao CNPq pelas bolsas de Produtividade em Pesquisa dos Professores Sebastião Ribeiro e José de Anchieta Rodrigues, processos 135921/2008-2 e 301073/2006-6 respectivamente, e pela bolsa de mestrado da aluna Giseli Cristina Ribeiro Garcia.

À CAPES pela bolsa de doutorado da aluna Ésoly Madeleine Bento dos Santos, e, projetos Probral 258/07 e Procad 0136050.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) GUINEA, G. V.; SAYED, K. E.; ROCCO, C. G.; 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 Concrete Research, v.32, p.1961-1970, 2002.

(2) KARIHALOO, B. L.; ABDALLA, H. M.; XIAO, Q. Z. Deterministic size in the strength of cracked concrete structures. Cement and Concrete Research, v.36, p.171-188, 2006.

(3) 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.

(4) ROSSELLÓ, C.; ELICES, M. Fracture of model concrete: 1 – Types of fracture and crack path. Cement and Concrete Research, v.34, p.1441-1450, 2004.

(5) XIAO, J.; SCHNEIDER, H.; DÖNNECKE, C.; KÖNIG, G. Wedge splitting test on fracture behaviour of ultra high strength concrete. Construction and Building Materials, v.18, p.359-365, 2004.

(6) 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, vol.54, p.418-426, 2008.

(7) ZHAO, Z.; KWON,S. H.; SHAH, S. Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy. Cement and Concrete Research, v.38, p.1049-1060, 2008.

(8) ALAPIN, B.; OLLIG, M.; PÖTSCHKE, J. Thermochemical properties of selected refractory materials up to 1500ºC: In: 46th Inter. Coll. Refr. Eurogress Aachen, Germany, 2003.

(9) RIBEIRO, S.; VIEIREA, J. S. C.; EXPOSITO, C. C. D.; RODRIGUES, J. A. Fracture energy of a refractory castable measured by the wedge splitting method. In: 10th Unified International Technical Conference on Refractories (UNITECR), Dresden, Alemanha, 2007.

(10) HARMUTH, H.; RIEDER. K.; KROBATH, M.; TSCHEGG, E. Investigation of the nonlinear fracture behaviour of ordinary ceramic refractory materials. Materials Science & Engineering A, v.214, p.53-61, 1996.

(11) CUSATIS, G.; CEDOLIN, L. Two-scale study of concrete fracture behavior. Engineering Fracture Mechanics, vol.74, p.3-17, 2007.

(12) NAKAYAMA, J.; ABE, H.; BRADT, R. C. Crack stability in the work-of-fracture test: Refractory applications. Journal of the American Ceramic Society, vol.64, n.11, p.671-675, 1981

FRACTURE ENERGY OF MORTARS WITH PORTLAND CEMENT: INTER-LABORATORY RESULTS

ABSTRACT

Mortars and concretes are materials with complex structures employed in construction all over the world that demand detailed studies to its complete understanding. Recently was installed at GEMM/DEMa/UFSCar the wedge splitting method to the measurement of the fracture energy of materials like mortars and building concretes, and refractory castables. The wedge splitting method is being also implanted at DEMAR/EEL/USP with some modifications. In this work, fracture energy results obtained for mortars at the two laboratories, GEMM and DEMAR, are showed with the aim to validate the wedge splitting method. This technique presents advantages to quasi-brittle materials relative to the understanding of fracture. This study will also get an important scientific contribution to the fracture mechanics of the mortars and building concretes as well as refractory castables. The fracture energy results obtained in the two laboratories were near 30 $J.m^{-2}$ for 1:2 mortar and 25 $J.m^{-2}$ for 1:3 mortar.

Key-words: Fracture energy, maximum load, stable crack propagation, wedge splitting method, mortar.