

## **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FRATURA DE CONCRETOS COM AGREGADOS DE SEIXOS UTILIZANDO O MÉTODO DA CUNHA (WEDGE SPLITTING) PARA PROPAGAÇÃO ESTÁVEL DE TRINCA**

D.C. Ribeiro, G. C. R, Garcia, E. M. B, Santos, E. C. B, Santos, S. Ribeiro  
*diegoribeiro@alunos.eel.usp.br*  
**Departamento de Engenharia de Materiais - DEMAR, Escola de Engenharia de Lorena - EEL,  
Universidade de S. Paulo - USP, Lorena, SP 12600-970**

### RESUMO

*Concretos são materiais com estrutura complexa, por isso merecem estudos aprofundados para seu melhor entendimento. Nesse trabalho são mostrados os resultados de energia de fratura de concretos utilizando agregados de seixos. Para isso foram preparadas amostras com cimento Portland, areia e água, moldadas, curadas a 25°C por 7 dias e secas a 50°C por 24 h. Foram utilizadas proporções de areia:cimento de 2:1 e de agregados, sendo de 20%, 30% e 40% da massa seca. Além de aprimorar a técnica de propagação estável de trinca pelo método da cunha, esse trabalho teve como objetivo entender o comportamento da trinca em relação aos agregados com características esféricas (seixos) e como esse comportamento influencia a energia de fratura, além de contribuir cientificamente no estudo da mecânica da fratura de materiais com microestruturas grosseiras e complexas. Os resultados mostram influencia da interface no comportamento da trinca e nos valores de energia de fratura.*

Palavras-chave: Energia de fratura, propagação estável de trinca, método da cunha, interface, seixo.

## INTRODUÇÃO

Concreto é um material heterogêneo, formado por uma estrutura dura de cimento e partículas de rocha, os agregados, que exhibe comportamento de deformação amortecida, falha progressiva por dano localizado e quebra de seus componentes. 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 o trincamento e comportamento à fratura<sup>(1-2)</sup>.

Sob o ponto de vista da engenharia a energia de fratura é uma das mais importantes propriedades para o projeto de grandes estruturas de concreto<sup>(3)</sup>.

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,  $\gamma_{wof}$ , que é expressa pela seguinte equação<sup>(1-2)</sup>.

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

em que  $A$  é a área projetada da superfície de fratura,  $P_M$  é a carga vertical aplicada pela máquina de ensaios e  $\delta$  é o deslocamento do atuador da máquina.

Para avaliar a energia de fratura total, a condição de propagação estável da trinca deve ser rigorosamente obedecida e para isso, a energia acumulada na amostra e na máquina de ensaios durante a deformação elástica deve ser a menor possível e transformada em energia de superfície de modo muito bem controlado, sendo que a condição necessária para tal pode ser descrita pela seguinte equação:

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

onde  $\frac{d(U_M + U_S)}{dc}$  é a variação (no sentido de liberação) das energias elásticas armazenadas na máquina ( $U_M$ ) 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<sup>(4-6)</sup>.

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

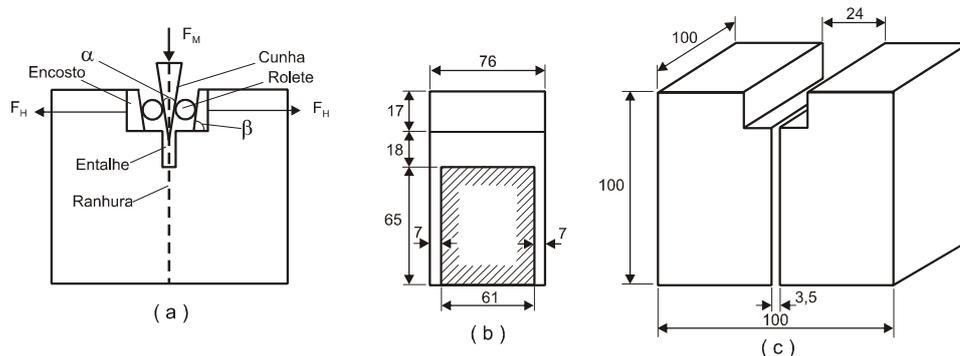


Figura 1 – (a) Arranjo esquemático do método da cunha.  $\alpha$  e  $\beta$  são, respectivamente, os ângulo da cunha e dos encostos, (b) secção transversal da amostra passando pelo entalhe e ranhuras laterais e (c) geometria e dimensões da amostra (mm)<sup>(7)</sup>.

A estabilidade da propagação de uma trinca pode ser perfeitamente avaliada a partir da curva carga-deslocamento gerada durante o ensaio.

A energia de fratura não está ligada somente aos agregados e à argamassa em si, mas a maneira em que eles interagem. A qualidade da interface agregado-matriz é muito importante para as propriedades dos concretos, e para a energia de fratura que eles apresentam. É a região que corresponde ao limite de onde se termina a superfície de um agregado e onde se inicia a região composta pela matriz. Sendo assim, a interface une o agregado à matriz, podendo ser mais resistente ou não, tanto em relação à matriz quanto ao agregado.

Agregados irregulares normalmente apresentam regiões de interface mais forte, e agregados esféricos apresentam regiões de interface mais fraca<sup>(3-8)</sup>.

Esses agregados podem ser descolados da matriz, ou simplesmente fraturados. Geralmente concretos com interfaces fracas apresentam grande número

de agregados descolados, e interfaces fortes apresentam grande número de agregados fraturados<sup>(3-8)</sup>.

Muito se diz sobre a qualidade de concretos utilizando seixos como agregado, embora não existam estudos na literatura comprovando ou não a qualidade desse tipo de concreto. Devido a isso, esse artigo mostra e discute a energia de fratura para concretos com agregados de seixos, utilizando o método da cunha para propagação estável de trinca, visando difundir e incentivar cada vez mais os estudos relacionados à fratura de materiais com argamassas e concretos.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Foram produzidas amostras com cimento Portland CP II – E - 32, areia lavada com tamanho médio de partículas de 500  $\mu\text{m}$  e tamanhos máximo e mínimo de 2800  $\mu\text{m}$  e 53  $\mu\text{m}$ , respectivamente, água potável e seixos rolados. Esses seixos tem tamanhos entre 4,8 e 9,5 mm e corresponde a brita zero, ABNT.

A relação entre cimento/areia foi de 1/2 e a quantidade de água foi de 0,46 da quantidade da massa de cimento. As quantidades de agregado (seixos) foram de 20, 30 e 40% da massa seca (areia e cimento). A areia e o cimento foram pesados e misturados previamente em uma argamassadeira de laboratório. Logo em seguida, a água foi adicionada permitindo uma perfeita interação entre os três constituintes da argamassa. Após a mistura, os seixos foram adicionados e misturados manualmente à argamassa.

A mistura foi vertida em um molde de aço inoxidável, contendo lâminas para produção de corpos de prova já entalhados e ranhurados durante a moldagem. O entalhe e as ranhuradas têm perfis em “V”.

O conjunto, molde e concreto moldado, foi introduzido em uma câmara onde a cura ocorreu por sete dias a 25°C, em um ambiente saturado de umidade. A desmoldagem foi realizada vinte e quatro horas após a moldagem do concreto.

Após os sete dias de cura, o corpo de prova foi seco em estufa a 50°C, por 24 horas, com a finalidade de interromper as reações de hidratação num mesmo tempo para todas as amostras. Após isso, as amostras foram retificadas para preparação das bases das mesmas permitindo um perfeito alinhamento na Máquina Universal de Ensaio Mecânicos.

Após 28 dias da moldagem foram realizados testes de propagação estável de trinca utilizando a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos Servo Hidráulica (MTS),

Modelo 810M, que foi equipada com uma célula de carga de 5 kN, com velocidade de deslocamento do atuador de 0,03 mm/minuto.

O dispositivo da cunha é composto pelos encostos, roletes e a cunha. Os encostos são montados no rebaixo do corpo de prova. A cunha é a responsável pela transmissão da carga da máquina de ensaios para o corpo de prova e os roletes tem a função de transferir a carga que vem da cunha na direção horizontal.

Os ensaios mecânicos geraram dados referentes à carga utilizada e o deslocamento, e a partir disso obteve-se a curva carga-deslocamento e calculou-se, utilizando o software OriginPro, a área sob essa curva (trabalho).

Com o auxílio de um paquímetro digital, mediu-se a largura e comprimento da sessão fraturada, e calculou-se a área fraturada. O cálculo da energia de fratura foi feito utilizando a equação A. Foi realizada manualmente a contagem dos agregados na seção de fratura das amostras. A análise da microestrutura foi feita com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), onde pode-se utilizar as imagens ampliadas para entender a distribuição entre agregados na matriz, e também a sua região de interface. Para isso, as amostras foram cortadas, embutidas em resina epóxi, lixadas e polidas com suspensão de diamante até 1 µm. A superfície polida foi metalizada com ouro, e então observada no MEV, utilizando voltagem de 10 kV e um detector de elétrons retro espalhados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados das análises feitas por EDS nos respectivos pontos indicados na Figura 4.

Tabela 1 – Pontos referentes à Figura 3 e suas respectivas composições químicas obtidas por EDS.

Pontos	Composto (%)							
	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MnO	FeO
1	100,00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	65.93	0.00	21.83	0.27	6.25	5.85	0.00	0.05
3	66.79	0.0	15.78	16.95	0.59	0.0	0.00	0.06
4	100,00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
5	73.48	0.15	15.52	2.35	4.14	3.66	0.00	0.70
6	41.64	1.72	9.96	1.79	0.73	39.43	0.40	4.34

A Figura 2 apresenta a estrutura geral de uma amostra de concreto com seixos, podendo ser observado os agregados graúdos (seixos) e os miúdos (grãos de areia) e a matriz de cimento com partículas mais finas. As regiões marcadas com os respectivos números foram submetidas a análise químicas via EDS (Energy Dispersive Spectrometer), cujos resultados se encontram na Tabela 1. Também, nessa figura pode-se ver claramente as interfaces agregados/matriz além dos defeitos (trincas naturais) nos agregados.

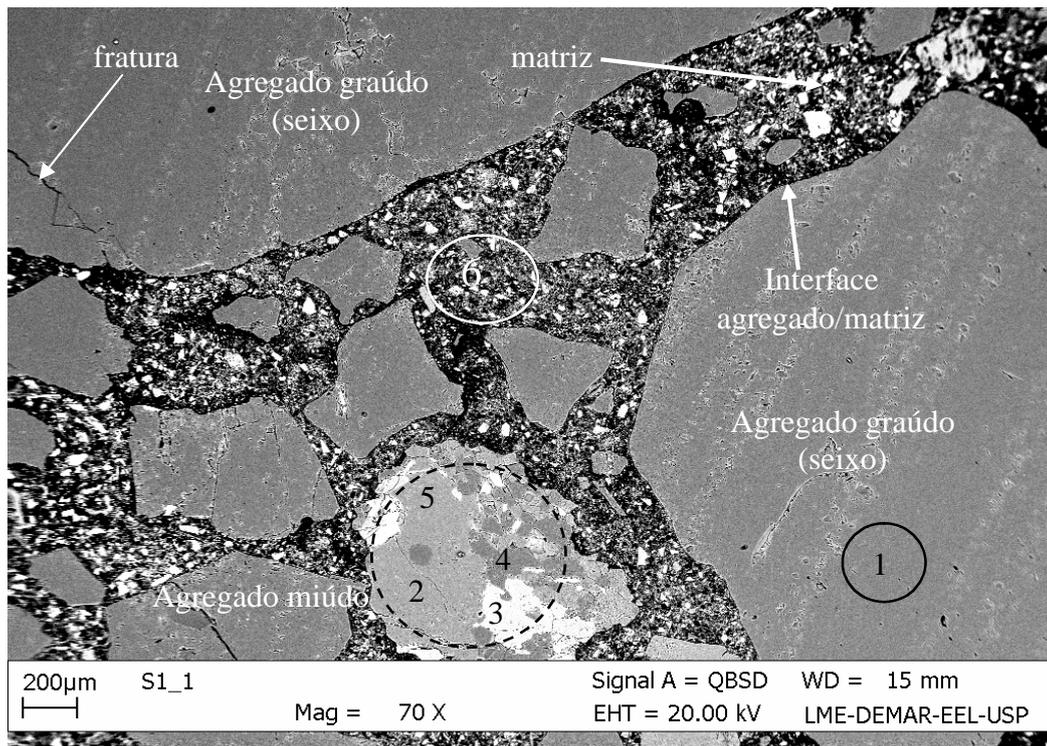


Figura 2 – Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura de um concreto produzido com seixos: (1) agregado de seixo; (5) agregado miúdo mostrando três composições químicas diferentes, pontos 2, 3 e 4; e (6) matriz de cimento e areia fina.

A Figura 3 mostra uma curva carga-deslocamento escolhida aleatoriamente dentre as amostras com 20%, 30% e 40% (da massa seca) de agregado. Todas as curvas apresentaram um comportamento estável, fundamental para o cálculo da energia de fratura, já que possuem uma região elástica sendo que a integral da área sob essa curva produz o trabalho elástico ( região que se inicia em 0 e se estende até o início da curvatura no topo do gráfico), a formação de microtrincas, caracterizada pela curvatura no topo do gráfico e a diminuição da carga aplicada

com um aumento do deslocamento, representada pela curva suave, a partir do topo da curvatura, caracterizando assim um material quase-frágil.

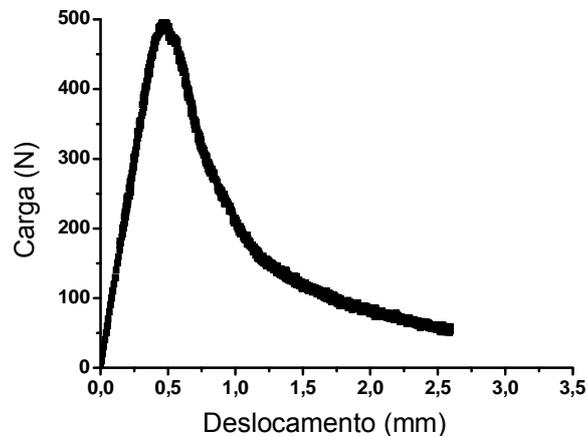


Figura 3 – Curva carga – deslocamento para amostras de concreto com seixo.

Os dados obtidos de energia de fratura, carga máxima e número de agregados estão descritos na Tabela 2, com seus respectivos desvios.

Pode-se perceber que a energia de fratura não variou com a porcentagem de agregado nas amostras. Embora exista uma pequena diminuição, as diferentes composições estudadas não mostraram nenhuma tendência em relação à energia de fratura, sendo praticamente idênticos os valores encontrados, como visto na Tabela 2.

Após os ensaios mecânicos das amostras, e da análise da região de fratura, percebeu-se que a interação entre o agregado e a trinca, ocorreu de três maneiras diferentes: alguns agregados foram totalmente fraturados, outros descolados e alguns apresentaram os dois comportamentos ao mesmo tempo (parte do agregado fraturado e outra parte descolado), sendo chamados de agregados de comportamento misto.

Tabela 2 – Resultados obtidos de energia de fratura, carga máxima e números de agregados utilizando 20%, 30% e 40% de agregado nas amostras.

Código da amostra	$\gamma_{wof}$ (J/m <sup>2</sup> )	P <sub>máx</sub> (N)	Número de agregados	Faturados	Descolados	Mistos
20%	49,124 ± 4,5	396 ± 44	21 ± 3,8	4,8 ± 2,2	10,8 ± 1,8	5,6 ± 2,6
30%	48,572 ± 5,9	340,08 ± 16	29,4 ± 3,1	7,2 ± 3,1	15,4 ± 4,3	6,8 ± 5
40%	48,1 ± 5,7	325,88 ± 5,2	33,7 ± 2,9	7,7 ± 2,1	15 ± 5,5	6 ± 1

Quando o agregado é fraturado, a trinca simplesmente atravessa o agregado, deixando parte do agregado em um lado da amostra e a outra parte do outro lado da mesma. Agregados descolados são aqueles em que a trinca atravessa apenas sua interface, contornando todo o agregado e descolando-o de um lado da amostra, onde ficam apenas seus contornos e mantendo-o inteiro do outro lado da amostra.

Já os agregados mistos tem a trinca atravessando sua interface em um primeiro momento, descolando parte do agregado, e após isso a trinca fratura o agregado, proporcionando assim os dois comportamentos ao mesmo tempo.

A Figura 4 mostra a interação entre a trinca e os agregados de seixos. Na indicação 1, aparece um agregado descolado, que permaneceu na amostra, na indicação 2 os contornos mostram que o agregado também foi descolado, mas permaneceu na outra parte da amostra. O ponto 3, apresenta um agregado fraturado, e o ponto 4 indica um agregado com um comportamento misto, já que é possível ver os contornos de sua parte descolada, e também uma parte do agregado que foi fraturada e permaneceu na amostra.

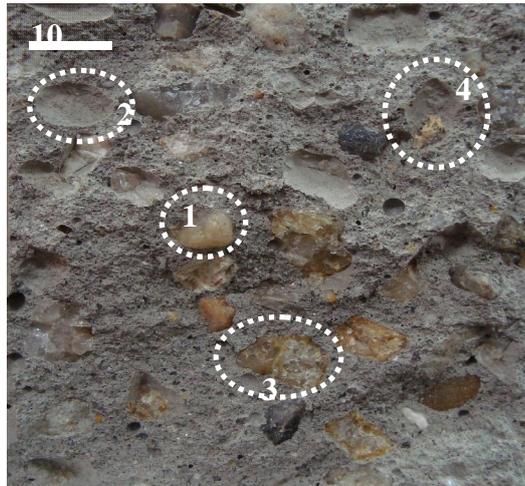


Figura 4 – Fotografia ampliada que mostra as diferentes interações entre trinca e agregado.

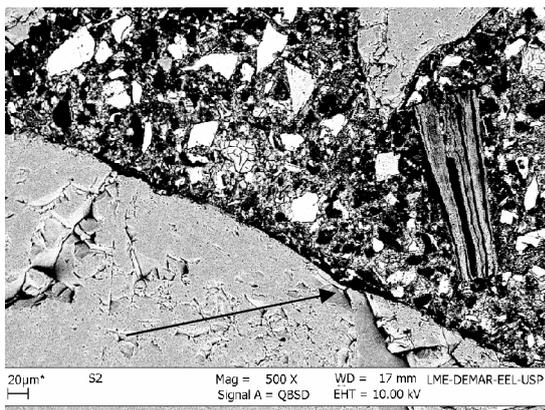
Notou-se que houve um grande número de agregados descolados na seção de fratura. As amostras apresentaram até 50% de agregados descolados, do total de agregados vistos na seção fraturada. Isso aconteceu devido à baixa resistência da interface, que talvez possa ser influenciada pela forma arredondada dos seixos e o seu baixo grau de rugosidade.

Os agregados descolados ocorrem devido ao caminho da trinca passar pela

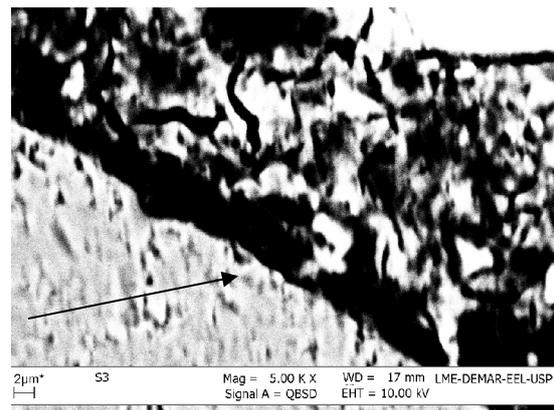
sua interface, contornando todo o agregado e assim causando um descolamento. A trinca sempre irá percorrer o caminho de menor energia, logo o lado da amostra que apresentar a menor superfície de agregado, será aquele em que haverá apenas um buraco com o seu formato, e o lado que apresentar a maior superfície. Sendo assim, quando o agregado é mais resistente que a ligação da interface, o descolamento ocorre de tal maneira que o agregado fica preso em um dos lados da amostra e o outro lado da amostra fica exposto. Geralmente o lado em que fica preso, é aquele que já possuía a maior parte do agregado.

O grande número de agregados descolados indica uma interface agregado-matriz fraca para esse tipo de concreto. A trinca sempre irá buscar um caminho que necessite de menor energia, logo o caminho pela interface (que apresenta pouca resistência) é mais viável do que a fratura do agregado, que apresenta uma maior resistência.

É possível observar pela Figura 5, uma região preta, indicada pela seta (interface) que contorna o seixo. Essa região mostra que os agregados não estão fortemente colados na matriz. Essa interface fraca causa o grande número de agregados descolados, obtidos experimentalmente. Devido à interface ter uma baixa resistência (provavelmente devido ao baixo grau de rugosidade e à forma arredondada do seixo), a trinca atravessa essa região (de menor energia), e por isso não se pode obter maiores valores de energia de fratura.



a)



b)

Figura 5– Micrografia obtida através do Microscópio Eletrônica de Varredura de um concreto utilizando seixos: a) imagem ampliada 500 vezes, b) imagem ampliada 5000 vezes.

Como se pode ver indicado na Figura 5, a microestrutura dos concretos utilizando seixos apresenta uma região de interface agregado-matriz muito fraca. Devido a essas características, a energia de fratura não apresentou grandes variações para as diferentes porcentagens de agregados, e observou-se ainda um grande número de agregados descolados, ou seja, na maioria dos casos a trinca interagiu com a interface e não com o agregado em si, descolando-o.

Os dados se apresentaram muito coerentes de acordo com a literatura. Os agregados com características esféricas apresentaram grande número de descolamentos, o mesmo resultado indicado por outros autores. As amostras apresentaram um valor médio de energia de fratura próximo a  $50 \text{ J/m}^2$ , um valor coerente baseado na literatura, considerando que se trata do estudo em que os agregados são mais resistentes que interface.

Em geral, os resultados obtidos experimentalmente foram satisfatórios e estão de acordo com a literatura consultada, apresentando valores similares para energia de fratura e para a quantidade de descolamento dos agregados.

## **CONCLUSÃO**

A energia de fratura não varia de maneira considerável para as diferentes porcentagens de agregados nas amostras estudadas, ela permanece constante e independente da quantidade de agregados na seção de fratura.

A interação entre a trinca e o agregado pode se dar de três maneiras diferentes. A maioria dos agregados foi arrancada durante os ensaios utilizando o método da cunha, e poucos agregados foram completamente fraturados, impossibilitando a obtenção de maiores valores de energia de fratura.

Resultados satisfatórios foram obtidos para o entendimento com relação ao grande número de agregados descolados e aos valores idênticos de energia de fratura. A fraca resistência da interface agregado-matriz influencia fortemente a interação entre trinca e agregado, que por sua vez influencia de maneira direta a energia de fratura.

A baixa resistência da interface pode ocorrer possivelmente pela forma arredondada do seixo, pelo seu grau de rugosidade relativamente baixo e pela inexistência de interações químicas na interface agregado-argamassa.

## 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, e ao Grupo Santander pela auxílio financeiro com bolsa de Iniciação Científica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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.
- (2) G. V. GUINEA, K. E. SAYED, C. G. ROCCO, M. ELICES, J. PLANS. 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.
- (3) K. R. WU, B. CHEN, W. YAO, D. ZHANG. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v.31. p.1421-1425, 2001.
- (4) HARMUTH, H. Investigation of the adherence and the fracture behaviour of polymer cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v.25. p.497-502, 1995.
- (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) 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.
- (7) 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.
- (8) 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

## TITLE

### EVALUATION OF BEHAVIOR TO FRACTURE OF CONCRETE WITH AGGREGATES OF PEBBLES USING THE WEDGE SPLITTING METHOD FOR STABLE CRACK PROPAGATION

## ABSTRACT

*Concrete are materials with complex structure, so they deserve in-depth studies for your understanding. This work shows the results of fracture energy of concrete using aggregates of pebbles. For this purpose samples were prepared with Portland cement, sand and water, molded, cured at 25 ° C for 7 days and dried at 50 ° C for 24 h. We used proportions of sand / cement and aggregates of 2:1, and 20%, 30% and 40% of dry weight. Besides improving the technique of stable crack propagation by wedge method, this study aimed to understand the behavior of crack compared to spherical aggregates with characteristics (pebbles) and how this behavior influences the fracture energy, and contribute to scientific study of fracture mechanics of materials with coarse microstructures and complex. The results show the influence of interface on crack behavior and fracture energy values.*

Key-words: fracture energy, stable crack propagation, wedge splitting method, interface, pebble.