

## INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE AGREGADOS NA ENERGIA DE FRATURA DE UM CONCRETO.

R. P. L. Mota, K. R. Silva, G. C. Ribeiro, S. Ribeiro  
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 12600-907, CP 116  
Lorena-SP  
[rodpelucio@gmail.com](mailto:rodpelucio@gmail.com)

### RESUMO

*Concretos são materiais com microestruturas heterogêneas e complexas. O objetivo deste trabalho foi avaliar os mecanismos de propagação estável de trincas em argamassa de cimento Portland com agregados de alumina, em 3 proporções distintas, utilizando o método da cunha. A mistura foi preparada em argamassadeira planetária e colocada em molde específico. Após cura de 28 dias, as amostras foram retificadas e submetidas a testes em uma máquina de ensaios universal eletromecânica, gerando dados que proporcionaram a construção de curvas carga-deslocamento para posterior cálculo da energia de fratura. Foi observado que o aumento da energia de fratura foi proporcional ao aumento da quantidade de agregados. Considerando 45%, 67,5% e 90% em massa de agregado, em função da massa de cimento utilizada, foram obtidos, respectivamente, os seguintes resultados para a energia de fratura: 50,97J/m<sup>2</sup>; 54,52J/m<sup>2</sup> e 57,65J/m<sup>2</sup>. Realizou-se a contagem dos agregados arrancados/fraturados, verificando uma elevada quantidade de agregados arrancados.*

Palavras-chave: energia de fratura, concreto, método da cunha

## INTRODUÇÃO

Concretos são materiais cerâmicos com microestruturas heterogêneas e complexas, constituídos para uma parte fina chamada de matriz e outra grossa chamada de agregado <sup>(1)</sup>. Os concretos, em função de suas aplicações são produzidos com matérias-primas diversas, por exemplo: concretos para a construção civil usam-se cimento Portland e areia como formadores de matriz e brita como agregados, já os concretos refratários usam as mais diversas matérias primas, mas tendo como ligante o cimento de aluminato de cálcio <sup>(1,2)</sup>.

O agregado oferece influência significativa nas propriedades mecânicas do concreto, uma vez que tanto a geometria como a superfície do agregado devem ser considerados <sup>(3)</sup>. A quantidade de agregados na amostra é de fundamental importância, visto que variação nessa quantidade interfere na energia de fratura do material<sup>(4)</sup>.

A razão água/cimento talvez seja um dos parâmetros mais relevantes no preparo de argamassas, pois à relação das reações de hidratação com o tempo e as propriedades finais estão intimamente ligadas a essa razão. A hidratação dos aluminatos e dos silicatos confere resistência as argamassas <sup>(3)</sup>. As reações de hidratação acontecem no processo de cura. O tempo de cura para concretos é variável, porém com sete dias, eles geralmente atingem 80% da resistência final, sendo que em 28 dias, alcançam sua máxima resistência, isso para concretos com cimento Portland <sup>(4)</sup>.

Sob aspectos da mecânica da fratura os concretos são considerados quase-frágeis, pois durante a propagação de uma trinca podem aparecer mecanismos que não permitem sua ruptura frágil, como acontece nos materiais frágeis como cerâmicas avançadas e vidros <sup>(5,6)</sup>.

A Figura 1 ilustra o comportamento de uma trinca em propagação estável. Observa-se que existem duas regiões distintas: a primeira é a região a frente da ponta da trinca, onde se tem a “zona de processo frontal” constituída por microtrincas e trincas maiores formando as ramificações que são trincas maiores, a segunda região é a que está atrás da ponta da trinca, chamada também de rastro da trinca. Para os concretos essa última é a mais importante, pois nela é que está a resistência a propagação da trinca propriamente dita <sup>(7,8,9)</sup>.

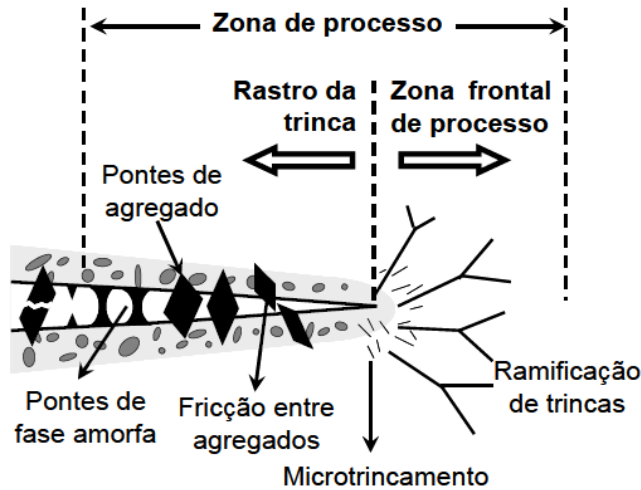


Figura 1–Trinca em propagação e os diversos mecanismos de tenacificação <sup>(8)</sup>.

A resistência à propagação de uma trinca pode ser avaliada pela sua energia de fratura que é uma propriedade muito importante dos materiais cerâmicos principalmente os de microestrutura grosseira e complexa permitindo previsões de estabilidade de trincas. A energia de fratura tem sido utilizada com grande sucesso para descrever a fratura dos concretos de maneira geral <sup>(7,9)</sup>. A energia de fratura total ( $\gamma_{wof}$ ) pode ser definida como o trabalho médio por unidade de área projetada de fratura para propagar uma trinca, representada pela soma de energias associadas a diferentes mecanismos de consumo de energia. A energia de fratura total pode ser determinada a partir da curva carga-deslocamento resultante de um ensaio de propagação estável de trinca, e da seguinte equação <sup>(2,10,11)</sup>.

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

Em que  $A$  é a área geométrica da superfície de fraturada,  $F_M$  é a carga vertical aplicada pela máquina de ensaios e  $\delta$  é o deslocamento do atuador da máquina. O valor da integral  $\int F_M d\delta$  é determinado pela área sob a curva carga-deslocamento, que é obtida a partir da carga indicada pela máquina de ensaios e pelo deslocamento vertical do atuador da referida máquina. O valor desta integral é chamado Trabalho de Fratura.

Para executar essa medida, o método mais importante é o chamado “*wedge splitting test*” ou método da cunha em que são usadas amostras de

tamanhos suficientes para que a propagação seja estável. A Figura 2 ilustra o conjunto corpo de prova-dispositivo para execução deste teste <sup>(10)</sup>.

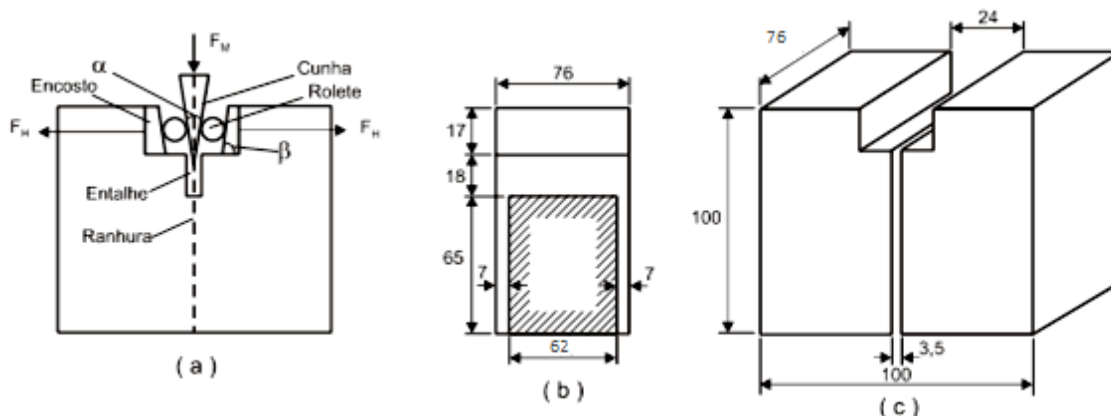


Figura 2 - Arranjo para o método da cunha: (a) Disposição dos encostos, dos roletes e da cunha no corpo de prova a ser ensaiado; (b) seção transversal do corpo de prova mostrando o entalhe e as ranhuras laterais; e (c) geometria com as dimensões do corpo de prova. Todas as dimensões apresentadas estão em milímetros <sup>(10)</sup>.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar a variação da energia de fratura de um concreto em função da variação da quantidade de agregados adicionados a argamassa, por meio do método da cunha, bem como observar o comportamento da superfície de fratura das amostras.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado foi um concreto a base de cimento Portland CP III e areia fina de rio cem por cento passante em uma peneira de malha 20, contendo agregados de Alumina Eletrofundida grão 4/8 que foram fornecidos pela empresa Elfusa Geral de Eletrofusão Ltda.

### Procedimento Experimental

Primeiramente preparou-se as amostras de concreto com agregados de alumina, seguindo um padrão pré-estabelecido, como relação de cimento:areia sendo 1:2 e a quantidade de água sendo de 50% da quantidade da massa de cimento. As quantidades de agregados foram 90%, 67,5% e 45% da massa de

areia, visando uma futura comparação de resultados em função da composição. Com o auxílio de uma argamassadeira planetária realizou-se a interação das matérias-primas com a água resultando em uma mistura que foi transferida para um molde de aço inoxidável específico para produção de corpos de prova já entalhados e ranhurados. O conjunto foi vibrado em mesa vibratória para ajudar a acomodar o concreto e remover alguma quantidade de ar retida na argamassa e posteriormente colocado em um recipiente fechado para realizar o processo de cura, a temperatura ambiente e atmosfera saturada de água (realizada com o auxílio de um béquer contendo água e um pano molhado dentro do béquer) ficando por sete dias para acontecer as reações de hidratação (deixou-se um dia com o molde, desmoldou-se, e posteriormente a amostra ficou mais seis dias sem o molde dentro da caixa). Após sete dias, as amostras foram retiradas do recipiente e guardadas a temperatura e atmosfera ambiente por mais vinte e um dias, para que o corpo de prova possa atingir sua máxima resistência. Após o término das reações de hidratação (total de vinte e oito dias), as amostras tiveram suas bases retificadas para permitir melhor alinhamento na Máquina de Ensaio Mecânicos Eletromecânica (EMIC), Modelo DL - 3000, que foi equipada com uma célula de carga de 5kN, com velocidade de deslocamento do atuador de 0,03 mm/minuto.

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 (máquina) na direção horizontal. A Figura 3 ilustra as peças necessárias para montagem do corpo de prova na EMIC:

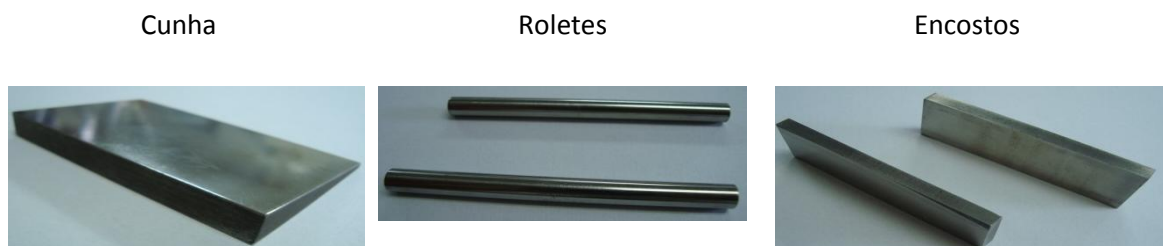


Figura 3 – Peças necessárias para realização do teste de propagação de trinca pelo método da cunha.

A Figura 4 mostra o corpo de prova, já devidamente montado e pronto para iniciar o ensaio de propagação de trinca pelo método da cunha:

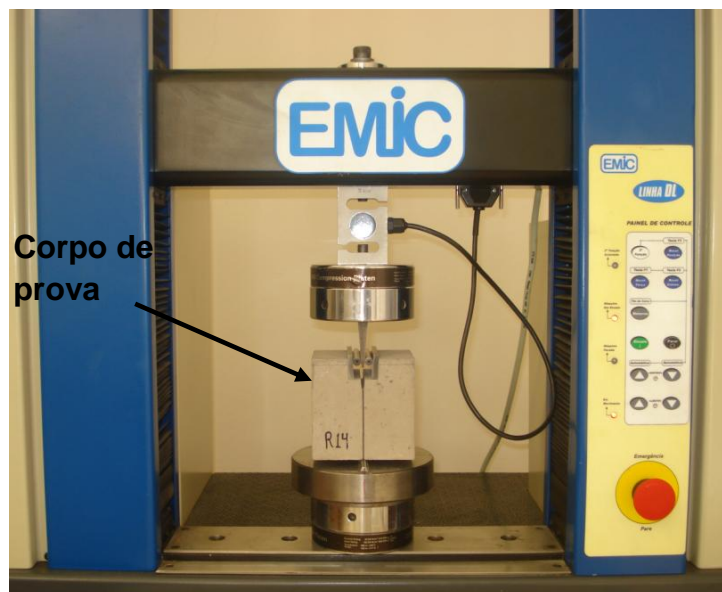


Figura 4 – Arranjo da amostra na máquina de propagação estável de trincas.

Posteriormente, as amostras foram submetidas aos testes mecânicos, visto que a máquina gera dados referentes à carga utilizada e o deslocamento. Sendo que a partir destes dados, foi construído uma curva carga – deslocamento, sendo a área sob esta curva o trabalho de fratura. Foi medido a largura e o comprimento da sessão fraturada da amostra com o auxílio de um paquímetro digital, para posteriormente calcular a área fraturada. De posse destes dados, trabalho de fratura e a área fraturada calculou-se a energia de fratura para as amostras com o auxílio da Equação A.

Foram também retiradas porções das amostras a fim de caracterizar a microestrutura do concreto estudado. As porções foram lixadas, polidas com suspensão de diamante até  $1\mu\text{m}$  e recobertas com filme fino de ouro para posterior análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Também foi realizada a análise em MEV da superfície de fratura do corpo de prova.

Posteriormente aos ensaios, foram contados os agregados de alumina fraturados e os arrancados dos corpos de prova visando calcular o número de fraturados/arrancados por  $\text{cm}^2$  de área.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 ilustra uma curva típica carga-deslocamento de concretos, obtida no ensaio de propagação estável da trinca pelo método da cunha:

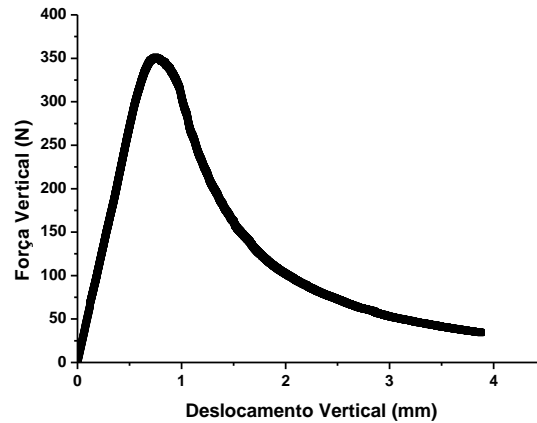


Figura 5 – Curva carga-deslocamento concreto ensaiado pelo método da Cunha

Percebe-se, que quanto maior a área abaixo da curva carga-deslocamento, maior é o trabalho de fratura e conseqüentemente a energia de fratura do concreto. Observa-se também, que o trabalho realizado até a carga máxima aplicada é bem inferior ao trabalho total de fratura, concluindo que esse material ainda resiste à propagação de trinca por um período longo mesmo após o início da propagação da trinca.

A Tabela 1 mostra os valores para o trabalho de fratura e energia de fratura dos corpos de prova ensaiados, em função da quantidade adicionada de agregados a argamassa:

Tabela 1 – Trabalho de fratura e Energia de fratura para os corpos de prova

% agregados no corpo de prova	Trabalho de fratura (J.m)	Energia de fratura (J/m <sup>2</sup> )
45	407,76 ± 16,50	50,97 ± 2,52
67,5	449,3 ± 28,76	54,52 ± 1,52
90	485,75 ± 28,54	57,65 ± 1,32

Esses valores são interessantes, pois estão nos níveis de concretos refratários curados, e queimados a temperaturas superiores a 1000°C. Entende-se que trabalho de fratura é o trabalho necessário para realizar a propagação da trinca. Sabendo que a formação de pontes de agregados (ver Figura 1) atrás da ponta da trinca em avanço é fundamental para a resistência ao crescimento da trinca em concretos, percebe-se que quanto maior a quantidade de agregados presentes na amostra de concreto, maior será a formação dessas pontes de agregados, e conseqüentemente, maior deverá ser o trabalho realizado para propagar a trinca, o que esta de acordo com os resultados apresentados.

Percebeu-se que quanto maior a quantidade de agregados adicionados à amostra de concreto, maior é o trabalho de fratura realizado para ter-se a propagação da trinca, e conseqüentemente maior é a energia de fratura do material, o que significa que maior é a sua resistência a propagação da trinca.

Posteriormente ao cálculo da energia de fratura, foi realizada a contagem dos agregados fraturados e arrancados dos corpos de prova visando obter a quantidade dos mesmos, por cm<sup>2</sup> de área da amostra. As amostras fraturadas foram colocadas de modo que as duas partes formassem uma imagem-espelho, sendo possível fazer a distinção entre agregados fraturados e arrancados. A Figura 6 mostra a imagem espelho para uma amostra.

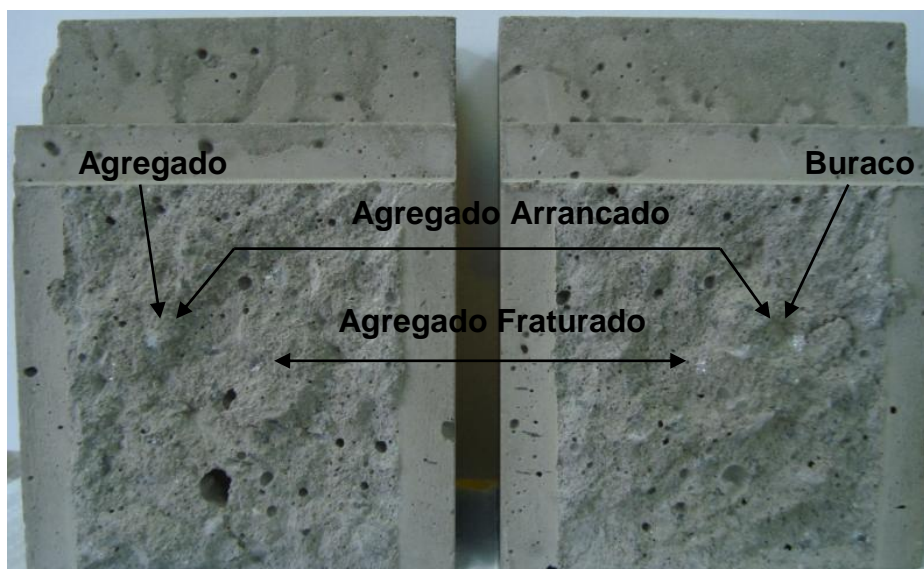


Figura 6 – Imagem – espelho de uma amostra para contagem dos agregados.



O processo de contagem foi realizado cinco vezes e calculou-se a média entre os valores obtidos. O valor da média encontrado foi dividido pelo valor da área fraturada de cada amostra individualmente e chegou-se ao valor da quantidade de agregados arrancados e fraturados das amostras. Os resultados estão expressos na Tabela 2

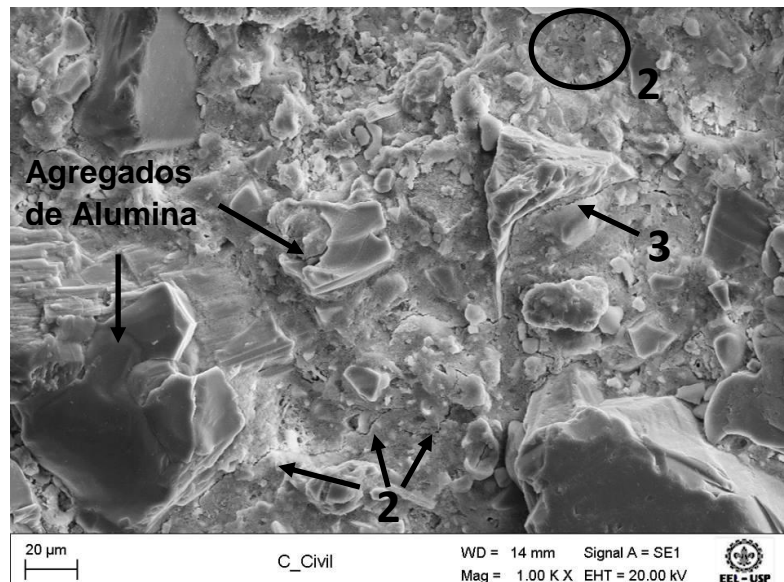
Tabela 2 – Quantidade de agregados arrancado/fraturados para as amostras

% agregados no corpo de prova	Agregados arrancados/cm <sup>2</sup>	Agregados fraturados/cm <sup>2</sup>
45	0,8128 ± 0,09	0,6508 ± 0,18
67,5	1,3477 ± 0,03	0,7299 ± 0,09
90	1,7377 ± 0,16	1,003 ± 0,06

Como pode ser observado na Tabela 2, o número de agregados arrancados/cm<sup>2</sup> é bem maior do que o número de agregados fraturados/cm<sup>2</sup>.

Este resultado pode estar relacionado à resistência da matriz e do agregado, isto é, o agregado é destacado da matriz quando a matriz é mais fraca que o agregado, sendo este comportamento observado nestas amostras. Essa elevada quantidade de agregados arrancados em relação ao total explica a elevada energia de fratura encontrada para as amostras.

Em se tratando da análise microestrutural, a Figura 7 apresenta duas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), da microestrutura do concreto composto por agregados de alumina, sendo (a) amostra lixada e polida e (b) superfície de fratura:



(a)

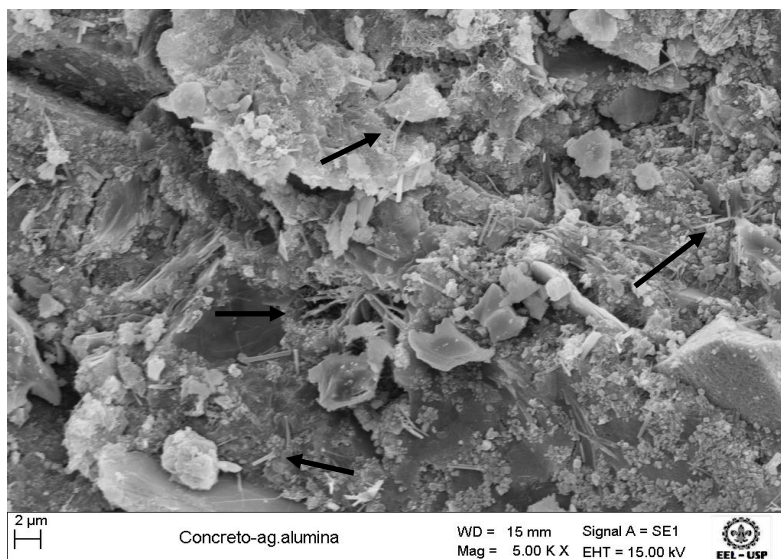


Figura 7 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, da microestrutura (a) e da superfície de fratura (b) da argamassa incorporada com agregados de alumina eletrofundida.

Na Figura 7(a), pode-se observar com detalhe a microestrutura do material, sendo possível perceber a presença de microtrincas **(2)** na matriz (microtrincas são comuns na microestrutura de argamassas e concretos) e o caminho de uma trinca propagante interagregado, isto é, a trinca contorna o agregado, o que indica que a região de interface é mais fraca que os agregados e a matriz **(3)**. Observando a Figura 7(b) nota-se as agulhas de Etringita, fruto da hidratação dos aluminatos.

## CONCLUSÕES

Verificou-se que se tem uma elevação da energia de fratura à medida que a quantidade de agregados adicionados as argamassas é aumentada.

Percebeu-se uma elevada quantidade de agregados arrancados para os corpos de prova, o que explica o alto trabalho de fratura e conseqüentemente a alta energia de fratura para esse material.

Por meio da análise das curvas carga-deslocamento, percebe-se que esse material resiste à propagação de trinca por um período longo mesmo após o início da abertura da trinca.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico (CNPq-152078/2012-6) pela bolsa de Iniciação Científica e o Processo 304.706/2010-2, à FAPESP- (Processo 2007/55964-3), à empresa Elfusa Geral de Eletrofusão Ltda, ao Departamento de Engenharia de Materiais da EEL-USP e ao orientador Sebastião Ribeiro pela oportunidade de ingresso como aluno de iniciação científica no grupo de Materiais Cerâmicos.

## 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) HARMUTH, H.; RIEDER, K.; KROBATH, M.; TSCHEGG, E. Investigation of the nonlinear fracture behavior of ordinary ceramic refractory materials. *Materials Science Engineering A*, v.214, p.53-61, 1996.
- (3) GARCIA, G. C. R.; SANTOS, E. M. B.; RIBEIRO, S. Efeito do tempo de cura na rigidez de argamassas produzidas com cimento Portland. *Cerâmica*, v.57, p.94-99, 2003.
- (4) RIBEIRO, S.; RIBEIRO, D. C.; DIAS, M. B. S.; GARCIA, G. C. R.; SANTOS, E. M. B. Study of the fracture behavior of mortar and concretes with crushed rock or pebble aggregates. *Materials Research*, v.14, p.46-52, 2011.
- (5) ELICES, M.; ROCCO, C. G. Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, v.75, p.3839-3851, 2008.
- (6) ELICES, M.; ROCCO, C.; ROSSSELÓ, C. Cohesive crack modelling of a simple concrete: Experimental and numerical results. *Engineering Fracture Mechanics*, v.76, p.1398, 2009.
- (7) HARMUTH, H.; BRADT, R. C. Investigation of refractory brittleness by fracture mechanical and fractographic methods. *Interceram*, special edition, p.5, 2010.
- (8) MIYAJI, D. Y. Concretos refratários contendo eutéticos eletrofundidos: Energia de fratura e resistência ao dano por choque térmico. Tese de Doutorado, UFSCar, São Carlos, SP, p.172, 2012.

- (9) CUNHA-DUNCAN, F. N.; BRADT, R. C. Fratura de refratários. Cerâmica, v.49, p.199-215, 2003.
- (10) 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.
- (11) HARMUTH, H.; MANHART, C. Fractographic investigations of ordinary ceramic refractory materials with reduced brittleness. Key Engineering Materials, v.409, p.209, 2009.

### **INFLUENCE OF THE AMOUNT OF AGGREGATES IN THE FRACTURE ENERGY OF CONCRETES**

Concretes are materials with complex and heterogeneous microstructure. The goal of this study was evaluate the stable crack propagation mechanisms in Portland cement mortars with Alumina aggregates with 3 different proportions by using the "Wedge Splitting Test". The mixture was prepared in a planetary mixer and then it was put in a specific mold. After curing time of 28 days, the samples were machined and subjected to test by using an electromechanical universal testing machine, producing data that provided the building of load-displacement curves for further calculation of fracture energy. At the present study was noted that the increase of fracture energy was proportional to the increase in a quantity of aggregates. Considering *45%, 67.5% and 90% in weight of aggregates relative to the weight of cement, the following results were obtained* for fracture energy respectively: 50.97J/m<sup>2</sup>; 54.52J/m<sup>2</sup> and 57.65J/m<sup>2</sup>. It was performed the count of detached/fractured aggregates noting a high amount of aggregates detached.

Key-words: fracture energy, concrete, Wedge Splitting Test