

INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA PROPAGAÇÃO ESTÁVEL DA TRINCA DE UM CONCRETO REFRAATÁRIO ALUMINOSO AUTOESCOANTE

Ribeiro, G. C. ⁽¹⁾, Resende, W. S. ⁽²⁾, Ribeiro, S. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de Lorena (EEL)
Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) - Estrada Santa Lucrecia s/nº,
Bairro Mondezir, CEP 12600-970, CP 116, Lorena SP

⁽²⁾ Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários (IBAR)

girribeiro@yahoo.com.br

RESUMO

Devido à complexidade da estrutura dos concretos refratários, o método da cunha é o mais indicado para a análise da energia de fratura desses materiais. O comportamento das regiões à frente da ponta da trinca e atrás da ponta da trinca sempre foi muito discutido, pois previu-se uma zona de processo em que vários mecanismos podiam estar presentes, tais como microtrincamento e transformações de fases que absorviam energia da ponta da trinca aumentando a resistência à propagação da trinca principal, porém sempre fazendo uso de esquemas e simulações. O objetivo desse trabalho foi propor um estudo experimental do comportamento da propagação de trinca em um refratário aluminoso autoescoante, a partir da observação das curvas carga-deslocamento e do acompanhamento do caminho da trinca, in loco, com auxílio de um microscópio digital, identificando nas mesmas os estados estacionário e transiente.

Palavras-chave: propagação estável de trinca, concreto refratário, energia de fratura, método da cunha, curva carga-deslocamento.

INTRODUÇÃO

Concretos refratários são materiais largamente empregados nas indústrias de aço, cimento e vidro, devido à elevada resistência a altas temperaturas, bem como a resistência ao choque térmico. Isso só é conseguido devido às suas formulações

especiais que requerem alta qualidade das matérias primas, tamanhos precisos de agregados e aditivos modificadores da matriz. Basicamente, os concretos refratários são produzidos pela mistura do cimento à base de aluminato de cálcio, CAC, agregados, matérias primas de alta área superficial, aditivos e água. Esse material pode passar pelos processos de moldagem, cura, secagem e tratamento térmico, para posterior ensaio mecânico e análises microestruturais, dentre outras ⁽¹⁻³⁾.

No processo de sinterização ocorrem as transformações necessárias para que as propriedades, a composição e a microestrutura sejam as mais ajustadas ao tipo de aplicação projetada para os produtos. A sinterização é regida via transporte de massa, podendo ocorrer via fase sólida, quando a temperatura de processamento é sempre menor que a temperatura de fusão de seus componentes, ou líquida, quando algum componente ou produto de reação é líquido na temperatura de sinterização ⁽⁴⁾.

Os concretos autoescoantes são aqueles com capacidade de fluir sem esforços externos e foram desenvolvidos para resolver o problema de acomodação no interior de moldes complexos, isto é, substituem com grande vantagem os concretos convencionais. Um concreto é considerado autoescoante quando sua fluidez está na faixa de 80 a 120% ⁽⁵⁾.

A resistência à propagação de uma trinca pode ser avaliada pela sua energia de fratura que permite fazer previsões sobre a resistência ao dano por choque térmico de materiais refratários. A energia de fratura tem sido utilizada com grande sucesso para descrever a fratura dos refratários formados e concretos de maneira geral ^(6,7). Ela (γ_{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:

$$\gamma_{wof} = \frac{1}{2A} \int_{s=0}^{s_{máx.}} F_V ds \quad (A)$$

em que A é a área geométrica da superfície de fraturada, F_V é a carga vertical aplicada pela máquina de ensaios e s é o deslocamento do atuador da máquina ⁽⁸⁻¹⁰⁾.

O valor da integral $\int F_V ds$ 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. Para executar essa medida o método mais importante é o método da cunha em que são usadas amostras de tamanhos suficientes para que a propagação da trinca seja estável. A Figura 1 ilustra o conjunto corpo de prova e dispositivo para execução desse teste (12,13).

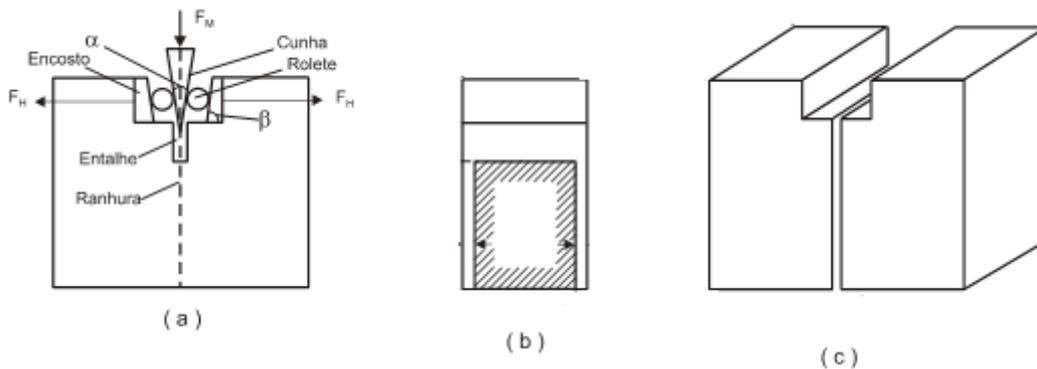


Figura 1 - (a) Arranjo esquemático do método da cunha. α e β são, respectivamente, os ângulo da cunha e dos encostos (13), (b) secção transversal da amostra passando pelo entalhe e ranhuras laterais e (c) geometria da amostra (mm) (12).

O comportamento das regiões à frente da ponta da trinca e atrás da ponta da trinca sempre foi muito discutido, pois era prevista uma zona de processo em que vários mecanismos podiam estar presentes, como exemplos podem ser citados o microtrincamento e transformações de fases que absorviam energia da ponta da trinca aumentando a resistência à propagação da trinca principal. Isso é mostrado na literatura tanto em trabalhos experimentais quanto em simulações utilizando métodos de elementos finitos (7,14,15).

A Figura 2 ilustra um esquema da zona de processo total ao redor da trinca, tanto à frente como atrás da ponta da trinca em avanço no material (6). Nessa figura são destacadas as regiões de:

- microtrincamento na ponta da trinca, que é responsável pelo comportamento não-linear de fratura;
- coalescimento de microtrincas e formação de trincas maiores que propagam;
- pontes de agregado consistem ao ancoramento por agregados da separação das superfícies da trinca, que continua engastado no refratário;

- destacamento ou rompimento do agregado da matriz com consumo de energia;
- quando a composição do material for propensa à geração de fase amorfa e a temperatura estiver acima da temperatura de transição de fase vítrea e se esta ainda estiver com alta viscosidade, a abertura da trinca é dificultada. Isso só ocorre em faixas de temperaturas específicas.

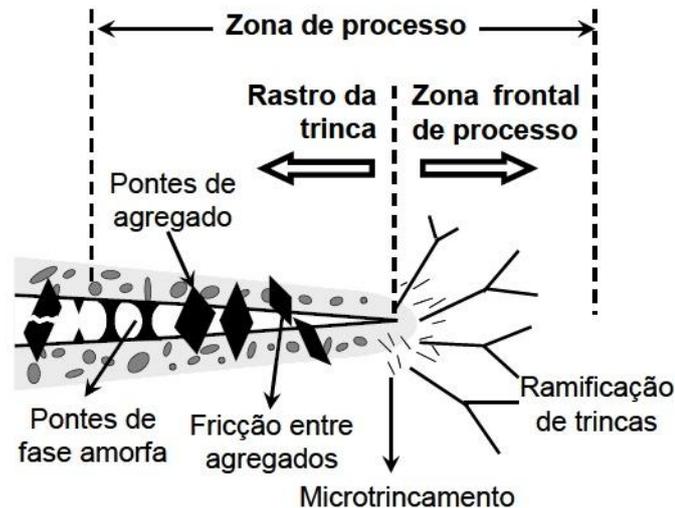


Figura 2 - Trinca em propagação e os diversos mecanismos de tenacificação, de acordo com Bradt ^(6,16).

Sakai e Ichikawa ⁽¹⁷⁾ usaram uma modelagem matemática da energia de fratura relacionando o estado estacionário de tenacificação com o crescimento da trinca, mostrando diferenças para o estado transiente, que é uma consequência da relação entre comprimento de trinca e dimensão da amostra. Existe distinção entre os efeitos na frente de propagação e no rastro da trinca, que ocorrem simultaneamente e de modo bastante complexo ⁽¹⁶⁾.

Quando uma trinca se propaga em um sólido suficientemente longo, no qual todos os mecanismos, tanto na região à frente da trinca como no rastro, são acionados e desabilitados, conforme ocorre o aumento do comprimento da trinca, diz-se que a mesma encontra-se no estado estacionário. Assim, a uma taxa de consumo de energia por unidade de área, R^∞ , é constante em função do tamanho da trinca ^(16,17). No modo transiente, o desenvolvimento dos mecanismos não é completo, pois existe interferência do tamanho do corpo. Logo, a taxa de energia consumida por unidade de área em função do tamanho de trinca, não atinge um valor constante (patamar).

Considerando dois materiais semelhantes contendo uma trinca bidimensional em propagação, a Figura 3 mostra um esquema para os tipos de estado estacionário e transiente. Em 3a) e 3b): a_0 é o comprimento inicial de trinca; Δa_1 é o comprimento de ligação transiente; Δa_2 é o comprimento de ligação estacionário; b_0 é o comprimento total de ligação remanente, mas que é igual ao comprimento inicial de ligação, quando a trinca tem o tamanho do entalhe e ainda não se propagou; L_p é o comprimento de ligação crítico para o desenvolvimento completo dos processos da zona frontal; h é a altura da zona de processo. Para as partes c) e d) tem-se: Δa é o comprimento de trinca propagado; L_b é o comprimento do efeito de ponte em estado estacionário. O modo estacionário só será atingido quando b_0 for suficientemente mais longo que L_p e L_b ($b_0 > L_p$ e $b_0 > L_b$ na Figura 3a, 3c) de maneira que se garanta o desenvolvimento de toda a zona de processo. No caso em que L_p e L_b sejam maiores que b_0 (Figura 3b, 3d), tem-se o estado transiente, em que uma trinca inicia uma propagação, mas já está na iminência de encontro com a extremidade do corpo (16,17).

A avaliação da propagação e do caminho percorrido pela trinca durante um ensaio, de energia de fratura, por exemplo, é algo bem complexo de se estudar, uma vez que estudos por simulação são realizados, mas experimentalmente, há muito o que investigar. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi propor um estudo experimental do comportamento da propagação de trincas em um refratário aluminoso autoescoante, a partir da observação das curvas carga-deslocamento e do acompanhamento do caminho da trinca, in loco, com auxílio de um microscópio digital.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado foi um concreto refratário aluminoso, autoescoante, com tamanho máximo de agregado de 8 mm, fornecido pela Indústria Brasileira de Artigos Refratários (IBAR), cuja composição química, por fluorescência de raios X, é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Análise química do concreto refratário.

Composto	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SiO_2
% Nominal	95,0	0,3	2,0	3,5

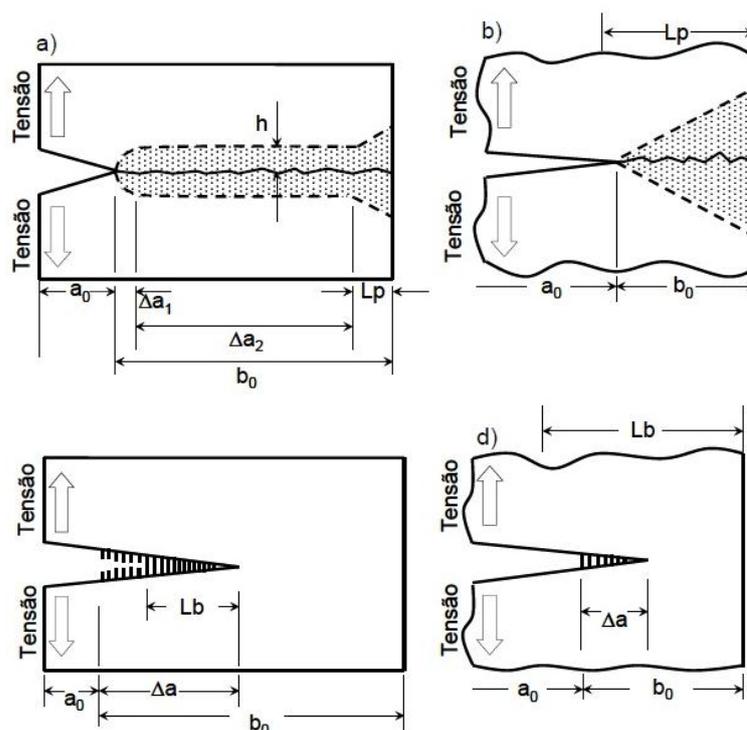


Figura 3: a) Processo na frente da trinca em propagação em estado estacionário. b) Processo da frente da trinca em propagação no estado transiente. c) Rastro de trinca em propagação em estado estacionário. d) Rastro de trinca em propagação em estado transiente ^(16,17).

Procedimento experimental

O concreto refratário foi pesado e colocado em uma argamassadeira planetária de laboratório, na qual o mesmo foi homogeneizado a seco para posterior adição de água. A quantidade de água indicada pelo fabricante foi de 6% m/m. A mistura foi vertida em um molde de aço inoxidável com entalhe e ranhuras próprios para a moldagem de corpos de prova utilizados no método da cunha com medidas de 100 mm x 100 mm x 75 mm, conforme Figura 1 ⁽¹²⁾.

Após moldagem os corpos de prova foram curados em atmosfera saturada de vapor de água, por 24 horas e, após desmoldadas mais 24 horas, totalizando 48 horas de cura a 25°C. A secagem foi por 24 horas a 110°C em estufa. Os corpos de prova foram queimados a 1000°C por 5 horas, com taxas de aquecimento e resfriamento do forno de 2°C por minuto. Após queima, os corpos de prova, tiveram a superfície livre de moldagem retificada, a fim de que as mesmas tivessem um perfeito alinhamento na máquina de ensaios mecânicos.

Os testes de propagação estável da trinca pelo método da cunha foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos, Shimadzu Autograph AG-X, célula de carga de 5 kN, com taxas de carregamento de 0,03 N/s. A investigação da trinca foi feita com microscópio digital Dino Capture 2.0/Dino-Lite.

RESULTADOS

Após ensaio de cinco corpos de prova obteve-se o trabalho de fratura, a área fraturada, com posterior cálculo da energia de fratura média para o material estudado. A Figura 4 mostra uma curva típica obtida no ensaio de um dos corpos de prova, em que a condição de propagação estável da trinca é obedecida. Os resultados médios de trabalho e energia de fratura foram de 650 ± 30 N.mm e de 92 ± 6 J/m², respectivamente.

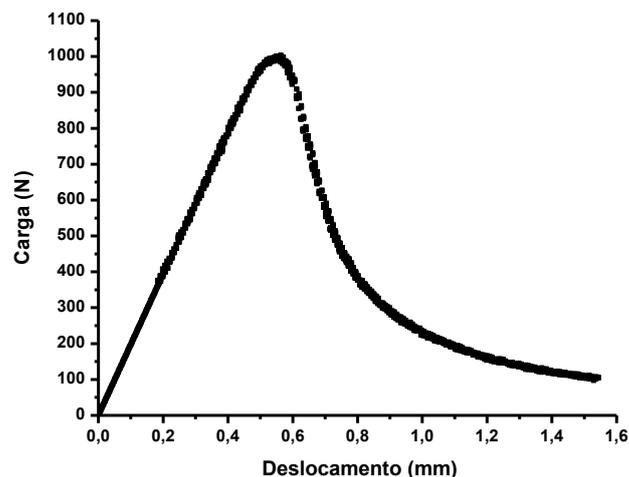


Figura 4 - Curva carga x deslocamento típica do corpo de prova do concreto estudado, obtida no ensaio de propagação estável da trinca pelo método da cunha.

Após avaliação do comportamento à propagação de trinca pelo método da cunha nesse material, foi utilizado um microscópio digital, Dino-Lite, a fim de que se pudesse analisar e, posteriormente, relacionar o comportamento da curva carga-deslocamento com o comprimento e comportamento da trinca propagada. A Figura 5 mostra a curva carga-deslocamento típica desse ensaio com as seguintes regiões:

- 1) Fim do regime elástico e início da propagação da trinca.
- 2) Carga máxima.
- 3) Início do regime estacionário.

- 4) Fim do regime estacionário e início do transiente.
- 5) Trinca atravessa a amostra.

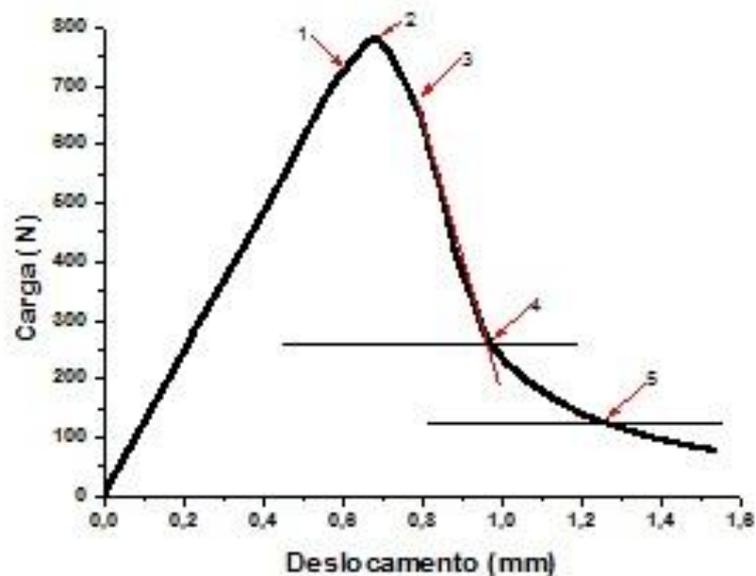


Figura 5 - Curva carga x deslocamento do concreto estudado, com acompanhamento do crescimento de trinca com microscópio digital.

Vale ressaltar que a ampliação utilizada foi de 90 vezes, máxima para esse modelo de microscópio, e que nessas condições foram determinados os comprimentos da trinca em cada estágio citado anteriormente. A Figura 6 mostra a montagem das imagens obtidas após o ensaio, sendo que as mesmas foram capturadas durante todo o ensaio, acompanhando o crescimento da trinca. Os números representam os fenômenos citados anteriormente na Figura 5.

Após estudo das curvas, viu-se que, aproximadamente, o estado estacionário termina quando há decaimento de cerca de 70% da carga máxima atingida no ensaio. Nesse ponto do ensaio, a trinca já havia atravessado pelo menos 50% do comprimento íntegro da amostra, isto é, o que foi possível observar com ampliação de 90 vezes do microscópio digital in loco ao ensaio.

É válido dizer que já foi observado em um tijolo refratário de alta alumina e em um outro tipo de concreto, que o regime estacionário também teve seu término após decaimento de 70% da carga máxima do ensaio.



Figura 6 - Montagem das imagens obtidas com microscópio digital do concreto em estudo após ensaio pelo método da cunha.

CONCLUSÕES

Este estudo mostra, claramente, a complexidade envolvida no estudo do comportamento de propagação de trincas em materiais refratários, bem como a identificação desses regimes de energia por meio da associação das curvas com o comportamento da trinca.

Foi possível observar que o regime estacionário pode terminar antes da trinca ter atravessado todo o corpo de prova.

Estudos futuros serão feitos comparando esses outros materiais com possível observação do comportamento da trinca, que poderá variar significativamente de um material para outro.

AGRADECIMENTOS

Às Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários, IBAR, pelo material fornecido; ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa, processo 304760/2010-2, a CAPES, pela bolsa de Doutorado, processo 33002088001-P4 e a FAPESP, processo 07/55964-3.

REFERÊNCIAS

1. LEE, W. E.; VIEIRA, W.; ZHANG, S.; AHARI, K. G.; SARPOOLAKY, H.; PARR, C. **International Materials Reviews**, v. 46, nº.3, p. 145, 2001.
2. HARMUTH, H.; RIEDER, K.; KROBATH, M.; TSCHEGG, E. **Materials Science Engineering A**, v. 214, p.53-61, 1996.
3. BOCCACCINI, D. N.; CANNIO, M.; VOLKOV-HUSOVIAE, T. D.; DLOUHY, I.; ROMAGNOLI, M.; VERONESI, P.; LEONELLI, C. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, p.1941-1951, 2008.
4. FONSECA, A. T. **Tecnologia do Processamento Cerâmico**. Lisboa: Universidade Aberta, 2000, P. 489-495.
5. OTROJ, S.; SAGAEIAN, A.; DAGHIGHI, A.; NEMATI, Z. A. **Ceramics International**, v. 36, p. 1411-1416, 2010.
6. CUNHA-DUNCAN, F. N.; BRADT, R. C. **Cerâmica**, v.49, p.199-215, 2003.
7. HARMUTH, H.; BRADT, R. C. **Interceram, Special Edition**, 5p. 2010.
8. HARMUTH, H.; RIEDER, K.; KROBATH, M.; TSCHEGG, E. **Mat. Sci. Eng. A**, 214 (1996) 53.

9. HARMUTH, H. **Theoretical and Applied. Fracture Mechanics**, v.23 (1), p.103-108, 1995.
10. HARMUTH, H.; MANHART, C. **Key Engineering Materials**, v.409 (2009), p.209.
11. RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A, **Ceramics International**, v.36, p.263-274, 2010.
12. ALAPIN, B.; OLLIG, M.; PÖTSCHKE, J., **Proceedings Inter. Coll. Refr. Eurogress Aachen**. p.107-112.
13. KARIHALOO, B. L.; ABDALLA, H. M.; XIAO, Q. Z., **Cement and Concrete Research**, v.36, p.171, 2006.
14. SAKAI, M., BRADT, R. C., **Int. Mat. Reviews**, v.38, n.2, p.53-78, 1993.
15. HU, X.; DUAN, K., **Cement and Concrete Research**, v.34, p.1321-1330, 2004.
16. MIYAJI, D. Y. Concretos refratários contend agregados eutéticos eletrofundidos: energia de fratura e resistência ao dano por choque térmico. 2012, 172p. Tese (Doutorado) Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP.
17. SAKAI, M. ICHIKAWA, H. **Int. Journal of Fracture**, v.55, p. 65-79, 1992.

INVESTIGATION OF STABLE CRACK PROPAGATION BEHAVIOUR OF THE ONE SELF-FLOWING CASTABLE

ABSTRACT

Due to complex structure of the castable, the wedge splitting method is the most indicated to evaluate the fracture energy of these materials. The behavior of the regions in front of the crack and back of the crack always was very discussed, in this way was supposed a process zone where various mechanism could be present, as microcracking and phases transformation which absorb energy from the tip of the principal crack, however always using simulations. The goal of this work was suggest a experimental study of the crack propagation behavior using a self-flowing castable, using the observation of the load-displacement and observation of the crack path, in loco, using a digital microscope, identifying in the cracks the stead state na transiente behavior.

Key-words: stable crack propagation, castable, fracture energy, wedge splitting method, load-displacement curve.