



APLICAÇÃO DA CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS PARA A ANÁLISE DO EFEITO DAS RANHURAS LATERAIS DO CORPO DE PROVA NO MÉTODO DA CUNHA

Matheus W. P. Cardoso^{1*}, Rafael V. Maginador^{2,3} e Rodrigo B. Canto^{1,2}

1 - Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.

2 - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.

3 - Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette, França

matheuswpc@estudante.ufscar.br

RESUMO

Concretos refratários são materiais cerâmicos de extrema importância para a indústria de transformação devido à capacidade de suportarem elevadas temperaturas e ambientes corrosivos, mantendo suas propriedades de interesse em níveis funcionais, como a resistência mecânica necessária aliada à baixa condutividade térmica e elétrica. Entretanto, o surgimento e propagação de trincas nestas condições extremas é praticamente inevitável. Diante disso, o entendimento acerca da mecânica da fratura é fundamental, visto que esses defeitos podem comprometer a funcionalidade de uma estrutura, gerando prejuízos financeiros e riscos graves à segurança do ambiente de trabalho. Um dos estudos nesse contexto é o da resistência à propagação de trincas pela análise da curva-R, que indica o quanto o aumento do tamanho da trinca dificulta a propagação da mesma, caracterizando mecanismos de tenacificação. Por exemplo, o ensaio mecânico pelo método da cunha permite a obtenção de uma propagação estável de trincas em concretos refratários, permitindo tais estudos. No entanto, pouco se sabe sobre o efeito causado na curva-R pelas ranhuras laterais do corpo de prova, que podem ser empregadas para guiar a propagação da trinca principal no plano central da amostra. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da presença de tais ranhuras nos resultados a partir de dois experimentos, sendo um corpo de prova com e outro sem ranhuras, produzidos a partir de um mesmo concreto comercial sílico-aluminoso. Para tanto, a técnica de Correlação de Imagens Digitais (CID) foi utilizada, obtendo-se os campos de deslocamento, de deformação e resíduos de nível de cinza, que possibilitaram a caracterização da geometria das trincas e obtenção dos parâmetros de fratura como o fator de intensidade de tensão no modo de abertura, que permitiram obter curvas-R. No caso do ensaio com corpo de prova com ranhuras laterais, em que o caminho da trinca é induzido, a análise dos campos de deslocamento possibilitou encontrar a posição da ponta da trinca e, com isso, a aplicação da CID-Integrada às séries de Williams. Para o caso sem ranhuras laterais, os caminhos e posições de ponta da trinca obtidos pela CID convencional foram utilizados para definir a utilização das séries de Williams, calcular a curva-R e compará-la ao caso com ranhuras laterais. Assim, foi possível compreender melhor o comportamento do material perante a propagação de trincas e quais os benefícios e desvantagens da presença das ranhuras laterais nos corpos de prova na caracterização da fratura em amostras submetidas ao método da cunha.

Palavras-chave: Correlação de imagens digitais, método da cunha, curva-R, ranhuras.

INTRODUÇÃO

Concretos refratários são materiais cerâmicos que suportam elevadas temperaturas mantendo suas características físico-químicas e propriedades em níveis funcionais⁽¹⁾. Em razão do caráter frágil desses materiais⁽²⁾, estudos na área da mecânica da fratura são relevantes, visto que refratários são submetidos a choques térmicos e prolongados gradientes de temperatura, sendo inevitável o surgimento de trincas. Nesse sentido, a curva-R está associada à resistência à propagação de trincas e indica a dissipação de energia ao longo do processo de fratura. O método da cunha (WST, do inglês *Wedge Splitting Test*), aliado à técnica de correlação de imagens digitais (CID), é um de ensaio mecânico que possibilita a caracterização da curva-R⁽³⁻⁵⁾ pois proporciona uma propagação estável (*i.e.*, não catastrófica) de trincas, mesmo em materiais frágeis, por minimizar a energia elástica armazenada no aparato experimental⁽⁶⁾, possibilitando que seja medido, com maior precisão, o comprimento instantâneo da trinca, bem como a quantidade de energia necessária para sua propagação. Para propagação estável, a taxa de liberação de energia elástica armazenada em relação à superfície (G) deve ser menor ou igual à resistência à propagação de trincas (R), para cada incremento de trinca⁽⁷⁾:

$$\frac{dG}{da} \leq \frac{dR}{da} \quad (A)$$

sendo a o comprimento da trinca. Para uma propagação estável de trincas (Equação (A)), R pode ser aproximado à G , sob hipótese de um estado plano de deformações^(7,8), por:

$$G = \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) \cong R \quad (B)$$

sendo K_I o fator de intensidade de tensão referente a uma solicitação de abertura (modo I), E , o módulo elástico e ν , o coeficiente de Poisson. A técnica de CID é fundamentada na análise de imagens digitais sucessivas de superfície(s) do corpo de prova (CP) durante o ensaio mecânico. Por meio do rastreamento, baseado no nível de cinza, e comparação de conjuntos de pixels, é possível obter os campos de deslocamento, medindo o grau de similaridade entre uma imagem correspondente a um estado carregado e a imagem de referência (estado sem carregamento). A partir dos campos de deslocamento, é possível determinar os campos de deformação e, conseqüentemente, fatores de intensidade de tensão para o modo I (abertura, K_I) e para o modo II (cisalhamento, K_{II}), além da posição da ponta da trinca para cada incremento de tempo⁽³⁾. Visando avaliar a influência das ranhuras laterais que podem ou não estarem presentes nos CPs empregados no WST, foram caracterizadas as curvas-R em dois ensaios por meio da técnica de CID e CID-Integrada, sendo o primeiro com ranhuras (ECR = ensaio com ranhuras) e o segundo sem (ESR = ensaio sem ranhuras). Além da curva-R, a evolução dos parâmetros K_I e K_{II} durante a propagação também foram analisados e discutidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Método da cunha (WST)

No WST, é aplicada uma carga vertical que é convertida horizontalmente por meio de apoios e cilindros presentes no sulco central do CP, gerando um carregamento de abertura (modo I). A geometria do CP está apresentada na Figura 1, podendo ser empregadas, ou não, ranhuras laterais (regiões destacadas em vermelho) que visam guiar as trincas.

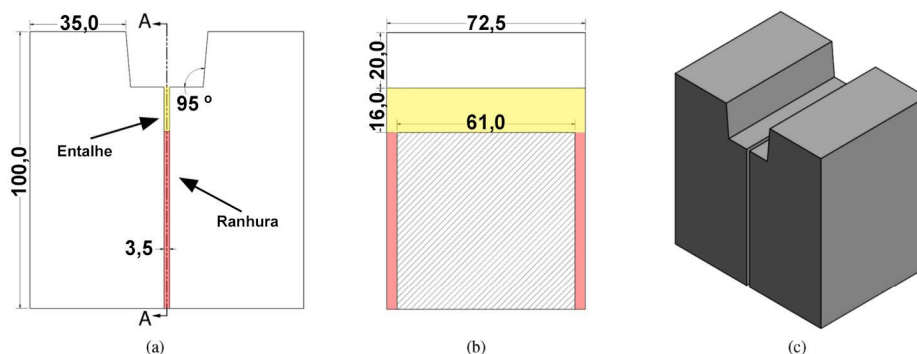


Figura 1: Geometria do corpo de prova e dimensões (em mm). (a) Vista frontal, (b) corte A-A da seção transversal e (c) perspectiva isométrica. Adaptada⁽⁹⁾.

O ECR e o ESR foram realizados a velocidades de deslocamento do atuador da máquina de ensaios constantes, 0,66 e 1,33 $\mu\text{m/s}$, respectivamente. Ambos foram interrompidos ao atingirem 10% do carregamento máximo após o pico. As curvas de força-deslocamento do atuador para os dois tipos de ensaios podem ser observadas na Figura 2.

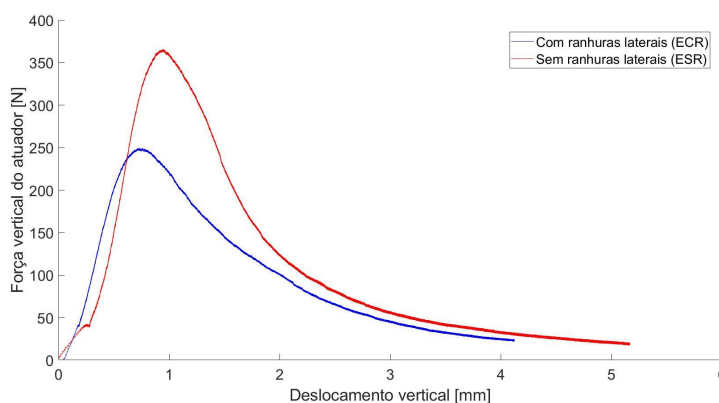


Figura 2: Curvas de força vertical do atuador vs. deslocamento vertical do atuador do ECR e ESR.

Os CPs submetidos ao WST são constituídos de uma cerâmica refratária comercial anti-erosiva, com baixíssimo teor de cimento (entre 0,2 e 1,0%), 45% de alumina, 1,2% de hematita e 50% de sílica (percentuais mássicos). No que tange às propriedades mecânicas, o módulo elástico é de 17 GPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,2⁽³⁾.

Correlação de Imagens Digitais (CID)

Foram capturadas imagens de ambas as faces dos CPs, sendo 578 capturadas para o ECR e 361 para o ESR. As imagens antes da aplicação do carregamento foram utilizadas como referência para aplicação da CID. As malhas utilizadas são constituídas de elementos T3 (triangulares de três nós) de mesmo comprimento médio, com ~18 pixels (1,75 mm) para o ECR e 15 pixels (0,69 mm) para o ESR. A técnica de CID convencional foi aplicada em ambos os ensaios para obtenção dos campos de deslocamento, campos de deformação e resíduos de nível de cinza. Para o ECR, o caminho da trinca foi definido como sendo uma linha reta sobre a ranhura a partir do entalhe (em amarelo na Figura 1). As posições da ponta da trinca e os parâmetros K_I , K_{II} e a tensão-T foram obtidos diretamente com a aplicação da CID-Integrada. Tal método baseia-se em integrar as séries de Williams, que são funções analíticas que fornecem a base de deslocamentos à rotina que minimiza os resíduos de níveis de cinza entre duas imagens, de modo que os parâmetros de fratura sejam diretamente

obtidos, não havendo necessidade de pós-processamento do campo de deslocamentos. Em relação ao ESR, as posições da ponta da trinca foram determinadas com base no MCOD (*Mean Crack Open Displacement*)⁽¹⁰⁾, considerando elementos trincados para $MCOD \geq 6 \mu m$. As posições da ponta da trinca não foram obtidas diretamente com a CID-Integrada pois no ESR a propagação da trinca acontece de maneira não retilínea.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são observados os parâmetros obtidos com a CID-Integrada para ambas as faces dos CPs e na Figura 4 as curvas-R. Nota-se que, para o ECR, o K_I e a tensão-T são crescentes, enquanto o K_{II} possui valores próximos de zero, de acordo com a hipótese de modo I para o WST. Em relação ao ESR, o K_I apresenta oscilações, o K_{II} da face frontal possui valores próximos a zero na maioria dos incrementos, enquanto o medido para a face traseira apresenta um comportamento decrescente a partir de cerca do centésimo incremento. A tensão-T demonstrou um comportamento oscilatório e resultados menos próximos entre as faces.

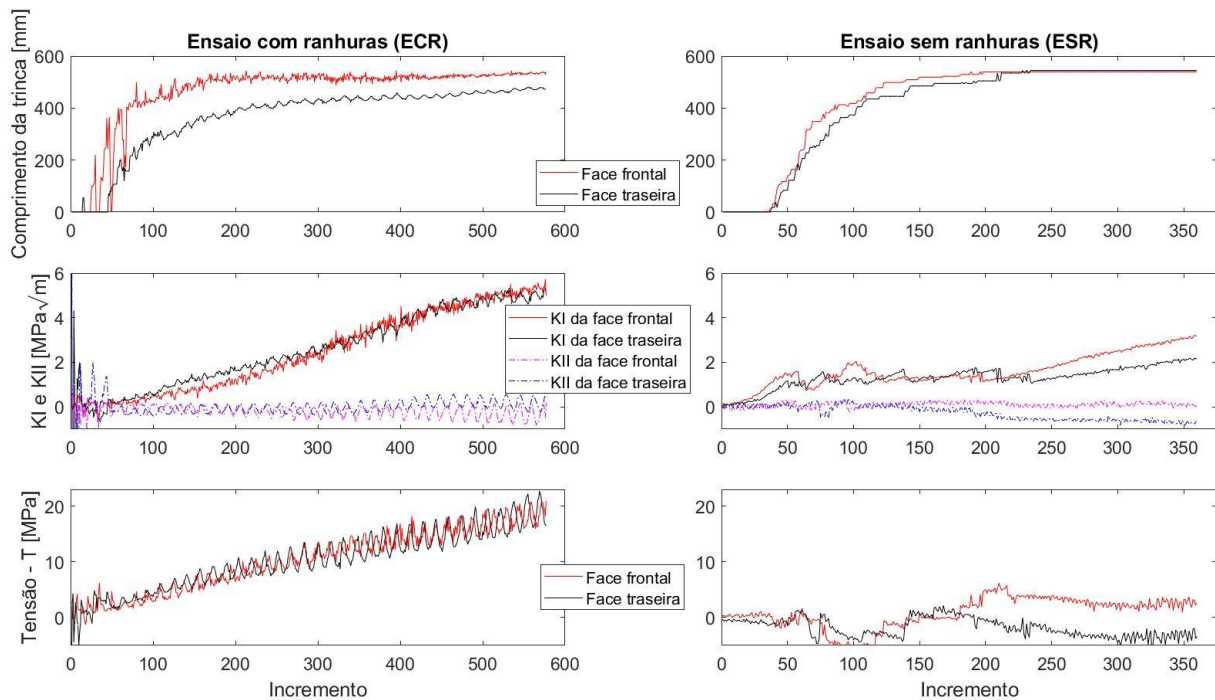


Figura 3: Comprimento da trinca, K_I , K_{II} e tensão-T do ECR e ESR.

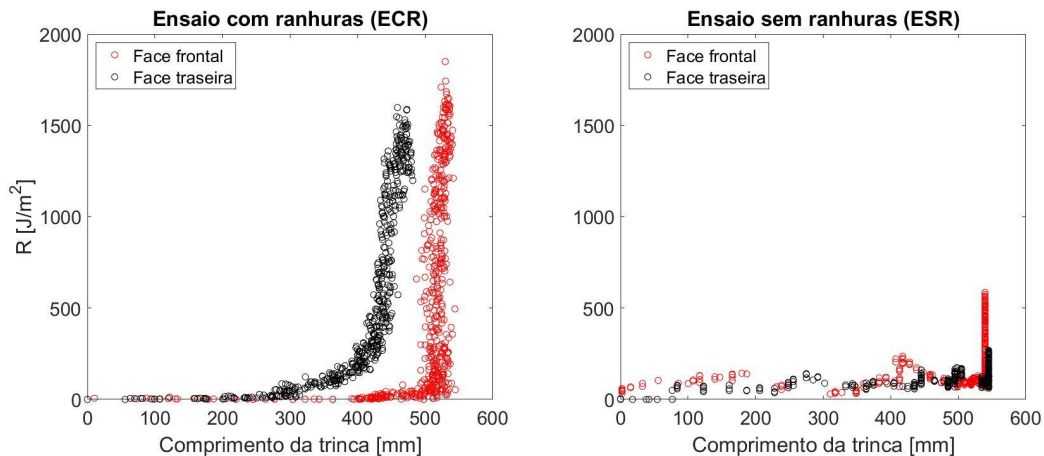


Figura 4: Curvas-R do ECR e ESR.

Os valores de R (Equação (B)), do CP do ECR são maiores que do CP do ESR, alcançando $R = 2000 \text{ J/m}^2$ para a face frontal do ECR (Figura 4), enquanto para o ESR tem-se $R = 600 \text{ J/m}^2$. Em ambos os ensaios, há uma discrepância dos valores máximos das curvas entre as faces de cerca de 300 J/m^2 . É notável que as curvas- R do ESR apresentaram oscilações não vistas nas curvas- R do ECR. Considerando um valor médio para R , obtém-se $\sim 69 \text{ J/m}^2$ e $\sim 120 \text{ J/m}^2$ para o caso da face frontal e traseira do ECR, e $\sim 95 \text{ J/m}^2$ e $\sim 75 \text{ J/m}^2$ no caso da face frontal e traseira do ESR, respectivamente. A discrepância entre os resultados nas faces do mesmo ensaio foram de $\sim 40\%$ para o ECR e $\sim 20\%$ no caso do ESR. A energia de fratura, medida pela maneira clássica, do ECR e ESR é de $\sim 105 \text{ J/m}^2$ e $\sim 122 \text{ J/m}^2$, respectivamente.

CONCLUSÕES

A aplicação da CID e da CID-Integrada permitiu a determinação do comprimento da trinca e de K_I e K_{II} a partir dos campos de deslocamento e de deformação obtidos para o ECR e ESR, para as duas faces fotografadas em cada ensaio. No ECR, a partir da utilização da CID-Integrada, foi possível determinar as posições da ponta da trinca (seus comprimentos para cada incremento de imagem) e os parâmetros de fratura através da aproximação do caminho da trinca propagada no material como sendo uma reta no centro do entalhe da amostra. Em relação ao ESR, os campos de deslocamento foram utilizados para definir um MCOD limite que possibilitou a determinação das posições da ponta da trinca e os seus comprimentos e, conseqüentemente, a obtenção dos parâmetros de fratura por meio da aplicação da CID-integrada. Utilizando os valores de K_I e os comprimentos de trinca definidos, as curvas- R de ambas as faces dos ensaios puderam ser traçadas e a resistência à propagação de trincas para o ECR e ESR puderam ser caracterizadas. As magnitudes dos resultados para o K_I do ECR e ESR nas faces dos CPs aproximaram-se das obtidas na Ref.(3), enquanto a tensão- T do ECR apresentou valores cerca de três vezes maiores e do ESR exibiu valores negativos, referentes à compressão, não observados na referência citada. Esta discrepância pode ser atribuída por conta de os ensaios analisados nesse caso terem sido realizados até que atingissem um carregamento de 10% da carga máxima após o pico de força, sendo mais longos em relação ao da Ref. 3, cujo ensaio teve a propagação interrompida em 70% da carga máxima após o pico de força. A presença das ranhuras laterais no CP facilita a obtenção dos parâmetros de fratura, uma vez que a posição da ponta da trinca pode ser determinada diretamente com a CID-integrada. Foi necessária uma maior quantidade de energia para que a trinca se propagasse no ECR em relação ao ESR, indicando que as ranhuras laterais impõem aumento de R .

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos nº 2021/03315-9, 2018/23081-0 e 2020/08077-6.

REFERÊNCIAS

1. LEE, W. E. *et al.* Castable refractory concretes. *Int. Mat. Rev.*, v. 46, n. 3, p. 145-167, 2001.
2. CHIANG, Y-M.; BIRNIE, D. P.; KINGERY, W. P. *Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1997.
3. VARGAS, R.; NEGGERS, J.; CANTO, R.B.; RODRIGUES, J. A.; HILD, F. Analysis of wedge splitting test on refractory castable via integrated DIC. *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 36, n. 16, p. 4309-4317, 2016.

4. VARGAS, R.; NEGGERS, J.; CANTO, R. B.; RODRIGUES, J. A.; HILD, F. Analysis of a castable refractory using the wedge splitting test and cohesive zone model. *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 39, n. 13, p. 3903-3914, 2019.
5. DAI, Y.. *et al.* R-curves determination of ordinary refractory ceramics assisted by digital image correlation method. *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 40, p. 4655-4663, 2020.
6. BRÜHWILER, E.; WITTMANN, F. The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. *Eng. Fract. Mech.*, v. 35, n. 1-3, p. 117-125, 1990.
7. MAZZEI, A. C.; RODRIGUES, J. A.; PANDOLFELLI, V. C. Alumina-mullite-zirconia composites obtained by reaction sintering Part II. *J. Mater. Sci.*, v. 35, p. 2815-2824, 2000.
8. VARGAS, R.; NEGGERS, J.; CANTO, R. B.; RODRIGUES, J. A.; HILD, F. Comparison of two full-field identification methods for the wedge splitting test on a refractory. *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 38, n. 16, p. 5569-5579, 2018.
9. VARGAS, R.; CANTO, R. B.; HILD, F. Fracture energy evaluation of refractories in wedge splitting tests from notch opening displacements. *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 41, n. 10, p. 5367-5379, 2021.
10. SCIUTI, V. F.; HILD, F.; PANDOLFELLI, V. C.; SANTOS, T.; SMANIOTTO, B. *et al.* Digital Image Correlation applied to in situ evaluation of surface cracks upon curing of MgO-containing refractory castables. *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 41, n. 1, p. 1003-1014, 2021.

DIGITAL IMAGES CORRELATION APPLICATION TO ANALYSIS THE GROOVES' PRESENCE IN WEDGE SPLITTING TESTS

ABSTRACT

Refractory castables are important for transformation industries due to their capacity to resist high temperatures and corrosive environments without losing the properties of interest, that remain at functional levels, such as the necessary mechanical strength, low thermal and electrical conductivity. However, the fracture growth and propagation is inevitable in such extreme conditions. It is fundamental to understand the fracture mechanics because cracks can compromise the structure functionality causing financial losses and safety risks. In this context, it is possible to study the crack propagation resistance by analyzing the R-curve, which measures the difficulty to propagate a crack as a function of the crack length, allowing better understanding of toughening mechanisms. The Wedge Splitting Test (WST) provides a stable crack propagation in refractory ceramics which is fundamental to the R-curve characterization. Nonetheless, not much is known about the effect on the R-curve caused by the specimen lateral grooves, that can be used to guide the main crack propagation in the sample central plane. This work aims to evaluate such influence on the results from grooved and ungrooved commercial silica-aluminous WSTs samples. Digital Image Correlation (DIC) was used to obtain the displacement fields, strain fields and fracture parameters as the mode I stress intensity factor, which is used to obtain R-curves. In the grooved case, the crack path is induced and the analysis of the displacement fields can be used to find the position of the crack tip by the integrated DIC application using the Williams series. For the ungrooved case, the crack path and tip position obtained by the conventional DIC were used together with the Williams series to calculate the R-curve and compare to the grooved one. Thus, it was possible to understand the influence of grooves' presence on crack propagation and the benefits and disadvantages for obtaining fracture parameters with the WST setup.

Keywords: Digital image correlation, wedge splitting test, R-curve, lateral grooves.