

USO DOS ELEMENTOS FINITOS ESTENDIDOS (X-FEM) PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA FRATURA PELO MÉTODO DA CUNHA EM MATERIAL REFRAATÁRIO

Guilherme da Cunha Mendonça^{1*}, Rafael Vargas^{1,4}, Vinicius Fiocco Sciuti²,
Ricardo Afonso Angélico³, Rodrigo Bresciani Canto^{1,2}

- 1 - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, SP, Brasil.
- 2 - Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, SP, Brasil.
- 3 - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Aeronáutica, Av. João Dagnone, 1100 - Santa Angelina, São Carlos, SP, Brasil.
- 4 - Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, França
guilherme.mendonca@estudante.ufscar.br;

RESUMO

A mecânica da fratura deve ser considerada no projeto estrutural de componentes cerâmicos, sobretudo para os materiais refratários que são comumente susceptíveis ao trincamento devido às altas variações de temperatura em suas aplicações. A fratura de refratários pode ser analisada a partir de ensaios mecânicos, dentre estes, o ensaio do método da cunha (MC), o qual permite obter crescimento estável de trinca, mesmo em materiais frágeis. Este ensaio foi inicialmente proposto para a medição da energia de fratura do corpo de prova, mas o caminho de propagação da trinca pode também ser analisado a partir de medidas de campo. A medição dos campos de deslocamento pode trazer ganhos importantes como a possibilidade de se estudar a curva de resistência à propagação de trincas a partir da Curva-R. Neste sentido, a simulação computacional pode estimar a propagação da trinca, desde que os parâmetros intrínsecos ao modelo sejam identificados e validados com auxílio de experimentos. Neste contexto, o Método dos Elementos Finitos Estendidos (X-FEM - eXtended Finite Element Method) pode ser utilizado, uma vez que possibilita a propagação de trincas em meios considerados contínuos e homogêneos. Neste trabalho, o X-FEM, disponível no software AbaqusTM, foi aplicado a um ensaio utilizando o MC em um material refratário sílico-aluminoso comercial. A curva experimental da força horizontal em função do deslocamento de abertura na altura da aplicação de carga foi utilizada como referência para a calibração dos parâmetros de um modelo de propagação de trinca para a simulação computacional do ensaio. Alguns parâmetros do modelo de material foram variados para analisar a sensibilidade na resposta da curva numérica, proveniente do modelo computacional, frente a curva experimental. Esta análise possibilitou entender a contribuição de cada um dos três parâmetros do modelo de material, sendo estes o módulo elástico, a tensão limite para iniciação do dano e a energia de fratura. Com auxílio da análise de sensibilidade, um conjunto de parâmetros foi estabelecido por tentativa-erro, obtendo uma correspondência satisfatória entre as curvas experimental e numérica. O modelo computacional permitiu avaliar com maior nível de detalhamento o estado de tensões no corpo de prova e contribuiu para a identificação de parâmetros que permitem simular o fenômeno de trincamento de materiais refratários.

Palavras-chave: método da cunha, simulação computacional, X-FEM, mecânica da fratura

INTRODUÇÃO

Concretos refratários são materiais aplicados em ambientes de alta temperatura e de nocividade química, mantendo suas propriedades mecânicas e térmicas em níveis funcionais, no entanto, nessas condições, o crescimento de trinca é inevitável⁽¹⁾. Estes materiais possuem uso em diversos setores da indústria, viabilizando a produção de vários materiais como vidros, metais, cimentos e produtos petroquímicos⁽²⁾. Assim, o entendimento dos mecanismos de início e propagação de trincas é de extrema importância para avanços tecnológicos nesta área. O Método da Cunha (MC) é um ensaio mecânico que visa obter propagação estável de trinca. É usualmente aplicado em materiais frágeis, como concretos refratários, nos quais a fratura tende a ser catastrófica. Esse método foi patenteado por Tschegg⁽³⁾ em 1986 para obter a energia de fratura dos materiais⁽⁴⁾.

O ensaio do MC consiste na aplicação de uma carga vertical através da cunha que a transmite para os roletes, os quais exercem uma força horizontal no sentido de abrir a trinca. Pelo ângulo pequeno da cunha, a força horizontal é amplificada em relação à força vertical aplicada pela máquina de ensaios, diminuindo assim a energia elástica armazenada na máquina de ensaios, o que contribui na estabilidade da propagação da trinca.

O projeto de componentes refratários pode ser realizado com auxílio de simulações computacionais. Em particular, de simulações que permitam prever o comportamento mecânico em fratura, a partir da nucleação e propagação de trincas. Diferentes estratégias computacionais podem ser utilizadas para simular a propagação de trinca. Nesse contexto, esse artigo visa investigar a viabilidade do uso do método elementos finitos estendidos (do inglês *eXtended Finite Element Methods X-FEM*) para criação de um modelo virtual do MC. Tal viabilidade será analisada a partir dos resultados dessas simulações com outros que usam método análogo de elementos coesivos⁽⁵⁾ e dados experimentais obtidos via Correlação de Imagens Digitais (CID).

Foi utilizado o software de elementos finitos AbaqusTM para o uso da técnica de X-FEM, os dados experimentais foram obtidos via CID de outro trabalho do grupo de pesquisa⁽⁶⁾. Estes deslocamentos foram aplicados como condições de contorno do modelo, bem como a curva força vs. deslocamento experimental foi utilizada para a aferição dos parâmetros utilizados no X-FEM e validação do modelo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material

O material utilizado é um concreto refratário comercial de ultrabaixo teor de cimento, fornecido pela empresa IBAR (Super Castibar DD40). Consiste no mesmo material discutido em Vargas et al.⁽⁷⁾, com um módulo de elasticidade de 17 GPa e coeficiente de Poisson de 0,2, mais detalhes da composição química desse material pode ser observada em Vargas et al.⁽⁵⁾.

Modelo computacional

O modelo numérico de elementos finitos foi desenvolvido a partir do software AbaqusTM. O CDP possui as dimensões de 100 x 100 x 72,5 mm³ e foram utilizados elementos quadriláteros sob hipótese de estado plano de tensões (CPS4).

Definido o elemento, foi feita uma análise de convergência de malhas com elementos de tamanhos médios de 2,0, 1,75, 1,5, 1,25, 1,0, 0,75 e 0,5 mm, para otimizar o custo computacional e reduzir o tempo da simulação. Foi determinado que elementos de dimensões de 0,75 mm na região de aplicação do X-FEM foram suficientes para obter uma convergência de malhas. Na região externa, foram utilizados elementos de dimensão média de 4,0 mm, conforme pode ser observado na Figura 1.

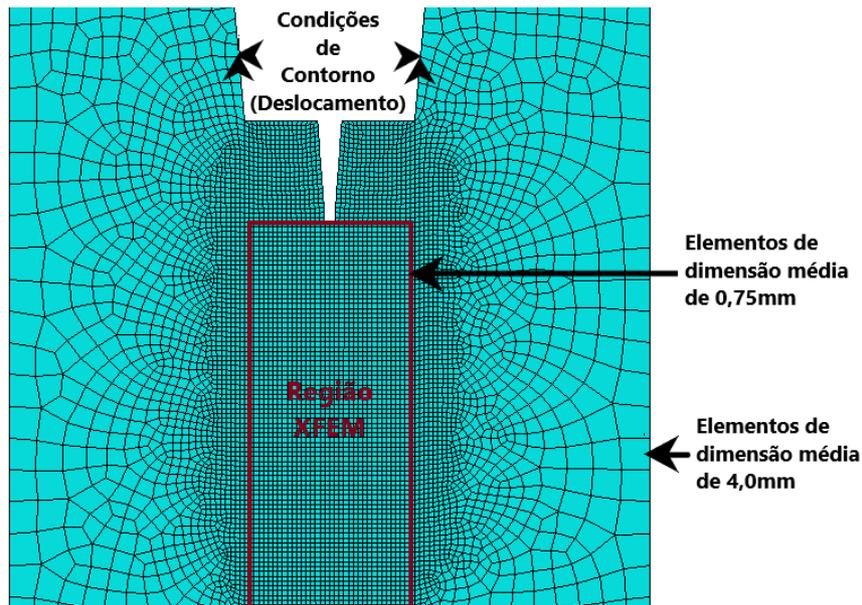


Figura 1: Modelo de Elementos Finitos: geometria, região do X-FEM, malha e as condições de contorno.

Como condição de contorno na região superior de aplicação de carga (onde, no experimento, se situam a cunha, roletes e placas metálicas), foram aplicados os deslocamentos da abertura da boca da trinca (CMOD) obtido via CID na direção horizontal e os deslocamentos verticais nestes pontos foram restringidos para simplificar o modelo, após verificação da sua baixa influência nos resultados, que é esperada neste ensaio concebido para um carregamento predominantemente de abertura.

A aplicação do X-FEM permite, a partir da adição de funções de enriquecimento, modelar descontinuidades (trincas) sem a necessidade de remalhamento⁽⁸⁾. Como critério de iniciação do dano foi utilizada a tensão principal máxima, considerando uma tensão limite de 2 MPa, assim como uma energia de fratura de 136 J/m². Estes parâmetros foram obtidos da literatura⁽⁵⁾ para elementos coesivos. Foi realizado um teste de sensibilidade dos parâmetros: módulo de elasticidade (E); energia de fratura (U_s) e tensão principal máxima limite (σ_1), fazendo uma variação de -10, 10 e 20% em relação aos valores obtidos de referência⁽⁵⁾, visando chegar o mais próximo da curva experimental.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

É possível observar o efeito de cada um dos três parâmetros analisados na Figura 2. Cabe aqui salientar que a velocidade do atuador foi constante durante o ensaio (80 $\mu\text{m}/\text{min}$) e as curvas são apresentadas em função do tempo. As regiões sombreadas representam as respostas obtidas, variando-se os parâmetros de interesse de -10% a +20% em relação aos parâmetros de referência, mantendo os restantes inalterados. O aumento de σ_1 (em verde) aumenta a força próxima à região do pico de carga. O aumento da U_s (em lilás), relacionado à quantidade de

energia necessária para a falha após o início do dano no material, tende a deslocar a curva para a direita. Por fim, incrementos em E (em azul) alteram positivamente a carga, visível principalmente na parcela inicial antes do pico (ver zoom na Figura 2).

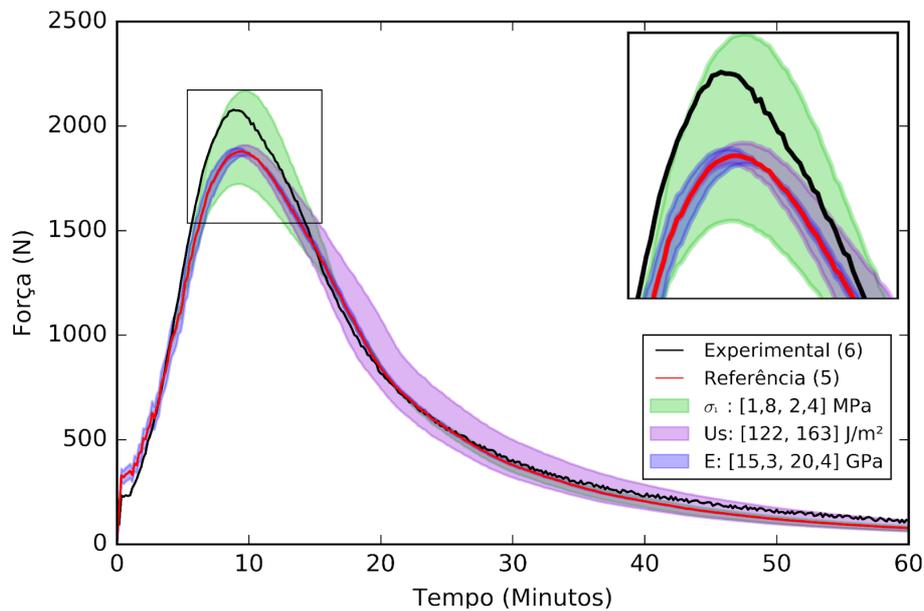


Figura 2: Curvas de força horizontal vs. tempo, com o intervalo de parâmetros simulados, comparando com a curva experimental⁽⁶⁾ e com os parâmetros da referência⁽⁵⁾

Com as curvas de sensibilidade, foi possível visualizar o comportamento mecânico do material em função de cada parâmetro, obtendo uma curva que se aproxima do que foi obtido experimentalmente (Figura 3), com $E=19,5$ GPa, $U_s=136$ J/m² e $\sigma_1=2,2$ MPa. Essa diferença significativa dos parâmetros de referência para os obtidos neste trabalho, de até 20%, pode em parte ser explicada pelo carregamento inicial, uma vez que os deslocamentos relacionados à etapa de pré-carga não foram considerados aqui.

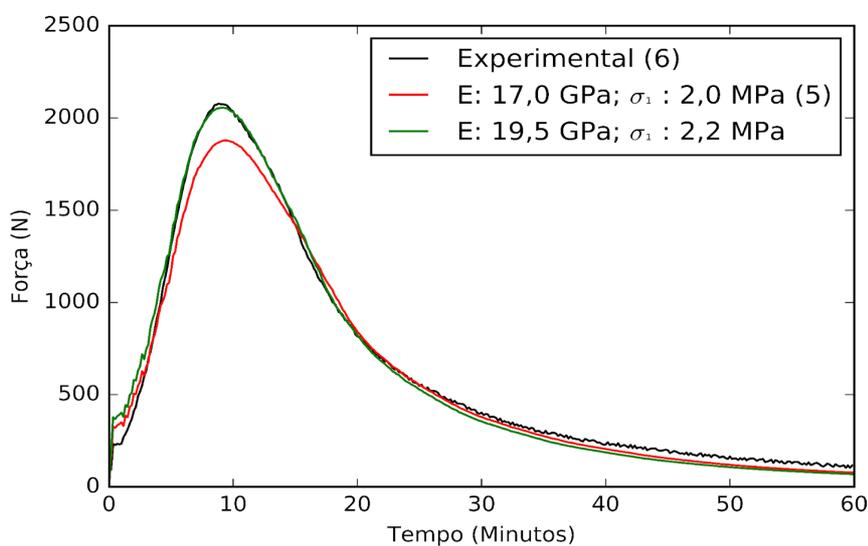


Figura 3: Curva com os parâmetros aprimorados, $E=19,5$ GPa, $U_s=136$ J/m² e $\sigma_1=2,2$ MPa, comparada às curvas experimental⁽⁶⁾ e simulada com parâmetros obtidos para elementos coesivos⁽⁵⁾.

Partindo de parâmetros obtidos para modelos coesivos⁽⁵⁾, foi possível utilizá-los como referência para modelos de X-FEM, que calibrado após pequenas variações, representou bem o experimento com a montagem do método da cunha. Desta forma, foi mostrada a viabilidade de utilização do X-FEM, cuja principal vantagem, frente aos elementos coesivos, é não necessitar de um caminho explícito (*i.e.* definido inicialmente) para a trinca.

CONCLUSÃO

Foi simulado computacionalmente um ensaio de propagação de trinca em um concreto refratário pelo método da cunha, o qual havia sido realizado experimentalmente com o auxílio da técnica de correlação de imagens digitais. Os parâmetros utilizados neste modelo computacional, como o módulo de elasticidade, a energia de fratura e a tensão máxima limite, tiveram suas sensibilidades investigadas. Além disso, foi também encontrado um conjunto de parâmetros que melhor representou o ensaio, ou seja, o qual permitiu resposta próxima à resposta experimental. Com esse novo modelo foi possível analisar a viabilidade do uso da técnica do X-FEM, obtendo uma curva muito próxima ao resultado experimental, com as vantagens do uso X-FEM em relação à modelagem por elementos coesivos, em que não é necessário impor, inicialmente, o caminho da trinca.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 130232/2021-1, com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelos processos nº 2018/23081-0 e 2020/08077-6, e também com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

1. LEE, W.E.; VIEIRA, W.; ZHANG, S.; GHANBARI, K.; AHARI, K.; SARPOOLAKY, C.P. Castable refractory concretes. *International Materials Reviews*, v. 46, n. 3, p. 145-167, 2001.
2. WACHTMAN, JOHN B. *Materials and Equipment-Whitewares-Refractory Ceramics-Basic Science*, Volume 16, Issue 1. John Wiley & Sons, 2009.
3. TSCHEGG, E. Prüfeinrichtung zur Ermittlung von bruchmechanischen Kennwerten sowie hierfür geeignete, Prüfkörper, Austrian Pat. AT 390328B, registered, 1986.
4. SEITL, S., GARCÍA, B.N., MERTA, I. Wedge splitting test method: quantification of influence of glued marble plates by two-parameter fracture mechanics. *Frattura ed Integrita Strutturale* 2014;8(30):174–181
5. 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. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 39, n. 13, p. 3903-3914, 2019.
6. SCIUTI, V.F.; VARGAS, R.; CANTO, R.B.; HILD, F. Pyramidal adaptive meshing for Digital Image Correlation dealing with cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 256, p. 107931, 2021.
7. VARGAS, R.; NEGGERS, J.; CANTO, R.B.; RODRIGUES, J.A.; HILD, F. Analysis of wedge splitting test on refractory castable via integrated DIC. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 36, n. 16, p. 4309-4317, 2016.
8. BUDYN, É.; ZI, G.; MOËS, N.; BELYTSCHKO, T. A method for multiple crack growth in brittle materials without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 61, n. 10, p. 1741-1770, 2004.

USE OF THE EXTENDED FINITE ELEMENT METHOD (X-FEM) FOR THE NUMERICAL SIMULATION OF FRACTURE BY THE WEDGE SPLITTING TEST IN A CASTABLE REFRACTORY

ABSTRACT

The fracture mechanic analysis is essential when designing structural ceramics components, mainly on refractory materials, which are commonly susceptible to crack initiation due to significant temperature variations. The wedge splitting test (WST) can achieve stable crack propagation and analyze the fracture phenomena even on brittle materials such as refractory castables. This test aims to obtain the fracture energy, and the crack path can be measured. Thus, measuring displacement fields can bring substantial benefits, such as the possibility of studying the R-Curve during one test. Predicting crack propagation by numerical simulation is possible if the model parameters are identified and validated by mechanical tests. The so-called eXtended Finite Element Method (X-FEM) can be applied to simulate crack propagation considering continuous and homogenous specimens. The X-FEM is available on the software AbaqusTM, and it was applied to simulate a WST of a siliceous and aluminous commercial refractory castable. The experimental curve was considered through the crack opening displacement as a function of the horizontal force used in the damage model calibration. Some parameters of the model were varied to analyze the sensitivity in the response of the numerical model, comparing the virtual and the experimental curves. This analysis enables an understanding of the contribution of each of the three model parameters: the elastic modulus, the maximum principal stress for the damage initiation, and the fracture energy. A set of parameters was established by trial and error, obtaining a satisfactory correspondence between the experimental and numerical results. The virtual model allowed the evaluation of the stress in the specimen in greater detail and contributed to the identification of parameters that allow simulating the phenomenon of crack propagation of refractory materials.

Keywords: *Wedge splitting test, numerical simulation, X-FEM, fracture mechanics*