# METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MÚLTIPLAS TRINCAS EM MATERIAIS FRÁGEIS

Renata de Oliveira Marinho [1] (renataoliveiramm@gmail.com), Gilberto Gomes [1] (ggomes@unb.br)

[1] Universidade de Brasília (UNB); Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

RESUMO: *O uso de técnicas numéricas na análise estrutural mostra-se cada vez mais eficiente no campo da Mecânica da Fratura, como o Método dos Elementos de Contorno Dual (MECD), uma técnica bastante robusta para o tratamento de problemas envolvendo trincas. Os materiais sujeitos aos processos de fratura frágil, tais como o concreto, podem apresentar comportamento instável estando ainda sob tensões abaixo da tensão limite de projeto, resultando ou não em falhas estruturais abruptas. Assim, apropriando-se da Mecânica da Fratura Elástica Linear e do Método dos Elementos de Contorno Dual, busca-se determinar uma metodologia para avaliar os efeitos de múltiplos trincamentos críticos nesses materiais empregando-se o software caseiro de análise BEMCRACKER2D. A metodologia baseia-se num processo interativo que se fundamenta na análise e obtenção incremental do caminho de propagação da trinca, da sua deformada e dos respectivos Fatores de Intensidade de Tensão (FIT) pela técnica da Integral J, através do BEMCRACKER2D, cuja interface gráfica BEMLAB destina-se ao desenho e geração da malha de elementos de contorno. Dois exemplos clássicos da literatura são considerados para verificação e validação da metodologia, apresentando resultados plenamente coerentes com o esperado.*

PALAVRAS-CHAVE: *Trincas, Concreto, MFLE, MECD, BemCracker2D.*

# METHODOLOGY FOR SIMULATION AND EVALUATION OF MULTIPLES CRACKS IN MATERIALS FRAGILE

ABSTRACT: *The use of numerical techniques in structural analysis is proving to be increasingly efficient in the field of Fracture Mechanics, such as the Dual Boundary Element Method (DCEM), a very robust technique for treating problems involving cracks. Materials subject to brittle fracture processes, such as concrete, may present unstable behavior while still under stresses below the design limit stress, resulting or not in abrupt structural failures. Thus, appropriating Linear Elastic Fracture Mechanics and the Dual Boundary Element Method, the aim is to determine a methodology to evaluate the effects of multiple critical cracking in these materials using the BEMCRACKER2D home analysis software. The methodology is based on an interactive process based on the analysis and incremental acquisition of the crack propagation path, its deformation and the respective Stress Intensity Factors (FIT) using the Integral J technique, through the BEMCRACKER2D, whose graphical interface BEMLAB is intended for designing and meshing contour elements. Two classic examples from the literature are considered for verification and validation of the methodology, presenting results fully consistent with expectations.*

KEYWORDS: *Cracks, Concrete, LEFM, DBEM, BemCracker2D.*

## 1. INTRODUÇÃO

A união entre a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e a Mecânica Computacional trouxe notoriedade às reincidentes falhas estruturais em materiais frágeis, ainda sob atuação de tensões inferiores às tensões limites de projeto, obtidas normativamente. Dentre esta categoria de materiais, está o segundo material mais utilizado no mundo, o concreto, assim tipificado devido à disposição arbitrária de seus constituintes granulares, apresentando comportamento compósito anisotrópico e estando também sujeito a fenômenos singulares. Abreviadamente, é denotado como a aglutinação de pasta cimentícia, agregados e uma zona de transição entre eles formada sob um elevado acumulo de água e convertido em uma região de material já fragilizado mesmo antes de solicitado mecanicamente (ROTS; BLAAUWENDRAAD, 1989; WILLIAMS, 1957).

Há uma metodologia de análise de fratura coesiva em vigas parede de concreto com propagação de múltiplas trincas críticas à luz da MFLE e do MECD desenvolvida por Parvanova e Gospodinov (1993). Tal metodologia retrata que, em casos de vigas parede biapoiadas de concreto simples ou armado, não carregadas, pode haver o surgimento e a evolução de trincas de tração diagonal dominantes até a falha, alocando-se principalmente na região dos apoios. Quando carregadas inicialmente é esperado o surgimento e a propagação de trincas de flexão em modo I de abertura. Separadamente, ambos os casos são de simples análise e, a determinação dos Fatores de Intensidade de Tensão (FITs ou $K$), são via modelo de trinca discreta e metodologias da MFLE. Entretanto, em situações em que há combinação da abertura de trinca com esforços de deslizamento e fricção, devido ao intertravamento dos agregados nas faces da trinca, há o surgimento de uma trinca diagonal denominada crítica, ou de cisalhamento, que requer maiores cuidados na análise (PARVANOVA; GOSPODINOV, 1993; PORTELA; ALIABADI, 1993; ANDERSON, 2005; KUMAR, 2009).

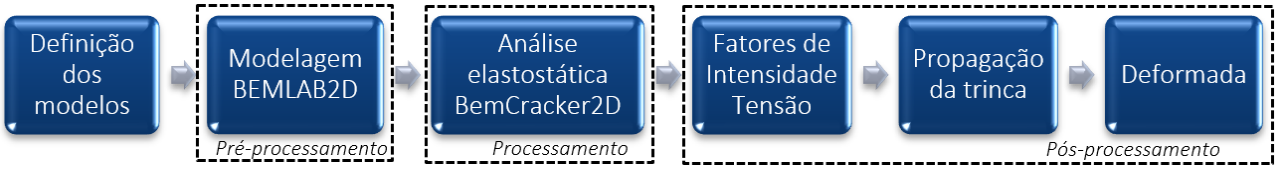
Portanto, este trabalho busca apresentar uma metodologia de análise, através do emprego da GUI BEMLAB2D e do software de processamento BemCracker2D, para simular e avaliar a propagação de múltiplas trincas críticas em elemento de concreto simples, deliberando-se mediante a MFLE e o MECD.

São capacidades do software BEMCRACKER2D a determinação incremental dos FITs, associados ao cálculo da integral J, da direção de trincamento, utilizando o método da Máxima Tensão Circunferencial (MTC), bem como das respostas de tensão e deformação a cada incremento. Complementarmente, a GUI BEMLAB2D imprime, por meio dos dados obtidos anteriormente, a deformada e o caminho do trincamento (GOMES *et al*, 2016; GOMES; MIRANDA, 2018; DELGADO NETO, 2017).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma proposta de metodologia para simulação e avaliação de propagação de múltiplas trincas críticas, usando um processo de interação entre os programas BEMLAB2D, BemCracker2D e o pacote MATLAB, conforme ilustrado no esquema da Figura 1.

**FIGURA 1:** Fluxograma de aplicação da metodologia.




**Fonte:** Autor (2023).

Os procedimentos realizados dentro de cada etapa são:

- **Pré-processamento**: será realizada a modelagem, geração de malha e definição das condições de contorno, para os modelos de referência utilizados no estudo, por meio do BEMLAB2D. Com isso, busca-se obter uma análise precisa e confiável do comportamento das trincas e suas interações em diversos cenários de referência.
- **Análise incremental ou processamento**: os arquivos de origem gerados pelo software de interface gráfica BEMLAB2D são aplicados ao software de processamento BEMCRACKER2D. Isso permite a realização de análises numéricas lineares-elásticas ajustadas à Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e ao Método dos Elementos de Contorno Dual (MECD). O objetivo é obter os campos de tensão e deformação, os Fatores de Intensidade de Tensão (FITs) por meio do calculado da Integral J, as direções de propagação da trinca transmitidas pelo critério da Máxima Tensão Circunferencial (MTC) e as atualizações incrementais dos deslocamentos, forças, geometria e malha. O processo envolve o avanço de cada incremento de trinca, permitindo uma análise detalhada das trincas em resposta às condições de carregamento. Essas etapas fornecem informações essenciais para entender o comportamento das estruturas em relação às trincas, confiantes para uma abordagem precisa e confiável no estudo de fraturas e falhas em materiais e elementos externos.
- **Pós-processamento**: com base nos dados de saída obtidos, são geradas imagens e gifs do caminho de propagação das trincas e da deformação de cada modelo por meio do software BEMLAB2D. Essas visualizações permitem uma análise mais clara e intuitiva dos resultados.

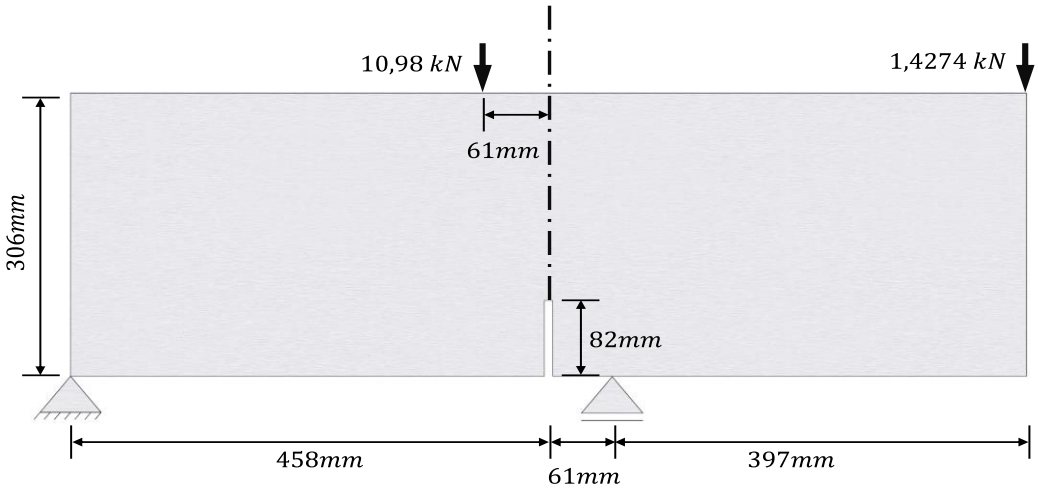
### 2.1. Exemplos de aplicação

A seguir, a metodologia denotada acima é aplicada sobre dois modelos já bem alocados academicamente. O primeiro, tido neste trabalho como Modelo 01, é devido a Parvanova e Gospodinov (1993) e, o segundo devido a Cordeiro (2015).

#### 2.1.2 Modelo 01

Este modelo apresenta uma viga de cisalhamento submetida às condições de contorno e as dimensões dispostas na Figura 2. Destaca-se que a determinação dos valores do parâmetro $K$ é realizada incrementalmente pelo software BemCracker2D.

**FIGURA 2:** Modelo 01: (a) Dados geométricos; (b) Carregamentos e restrições: dados experimentais.




**Fonte:** Parvanova e Gospodinov (1993).

O algoritmo requerido nessa etapa consiste dos seguintes passos, que será aplicado em todos os modelos executados:

**Passo 01 – Modelagem Geométrica**

Nesse passo são informados os valores do Módulo de Young, $E = 24.8GPa$, e do coeficiente de Poisson, $\upsilon = 0.18$.

**Passo 02 – Definição da Malha**

Os elementos do contorno foram assumidos como quadráticos *Countinuous*, com 19 elementos nos seguimentos superior e inferior, e 8 elementos em cada um dos seguimentos laterais, já o seguimento de trinca é automaticamente atrelado como quadrático *Discontinuous*, expresso por 2 elementos em cada uma das faces da trinca (razão 0.2-0.3-0.3-0.2), somando um total de 62 elementos.

Passo 03 – Condições de Contorno

O software apresenta condições de contorno capazes de representar trações, deslocamentos impostos e restrições de deslocamento sobre a face do elemento. As condições aplicadas para o modelo foram: deslocamento nas duas direções para o elemento 10 no nó 3 e na direção Y sobre o elemento 25 também no nó 3 e; tração no nó 1 do elemento 44 na direção Y, com módulo de 1,4274kN e no nó 3 do elemento 54 também na direção Y, com módulo de -10,9800kN.

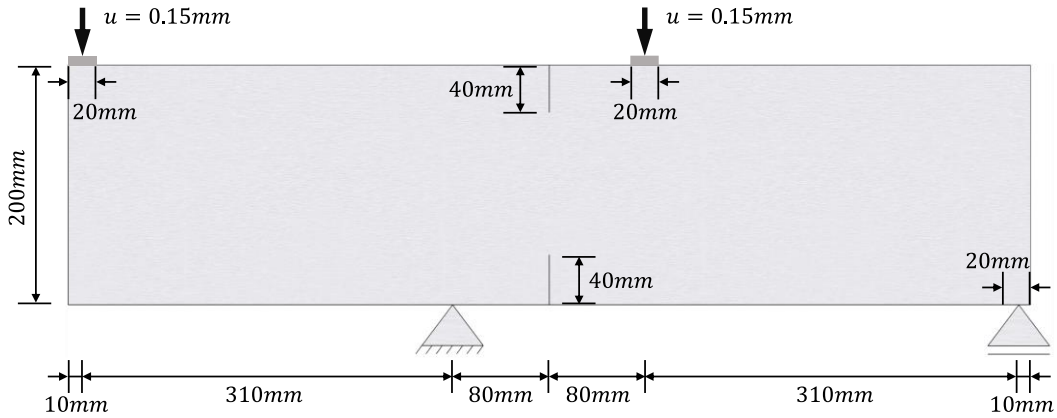
Passo 04 – Definição da Análise e das Propriedades de Propagação da Trinca

Para a definição do modelo de Análise Elastostática são três as opções ofertadas pelo software: STANDARD BEM, WITH NO CRACKS GROWTH e WITH CRACKS GROWTH. A opção adotada será a terceira, em que, por padrão do software, é realizada predição do trincamento por meio do DBEM. Para os passos da trinca: número de incrementos igual a 10 e o valor do comprimento de cada passo como 20mm; para análise de Fadiga, os coeficientes de Paris foram assumidos como: $C = 8.59e^{-13}$, $m = 3.3$ e a Razão de carga $= 0.500$.

### 2.1.3. Modelo 02

Este modelo apresenta uma viga de cisalhamento sob as condições de contorno e as dimensões representadas na Figura 3. Como percebido, este modelo destoa-se do anterior, tendo-se em vista que expressa imposições de deslocamento ao invés de trações sobre o contorno do elemento, o que ainda assim não impede os procedimentos empregues anteriormente, sendo os mesmos também devidamente empregues para este modelo.

**FIGURA 3:** Modelo 02: (a) Dados geométricos; (b) Carregamentos e restrições: dados experimentais.



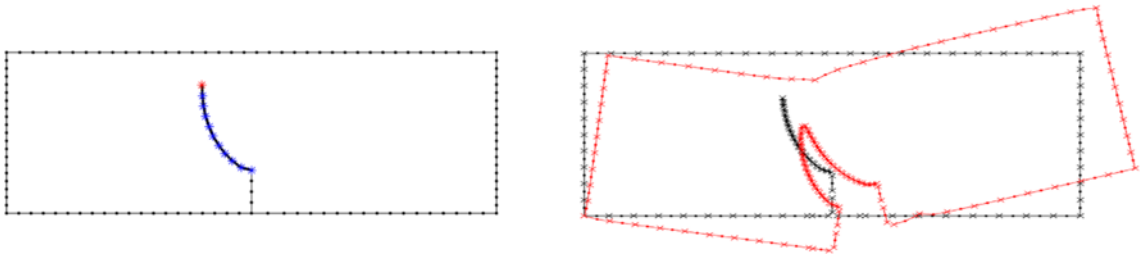

**Fonte:** Cordeiro (2015).

## 3. RESULTADOS

Os dois modelos, já explicitados no item anterior, foram acordados conforme a metodologia desenvolvida neste trabalho e expressa anteriormente. Inicialmente, a análise dos resultados foi realizada por meio da constatação visual dos dados de saída fornecidos pelo software de processamento BemCracker2D. Sendo, respectivamente, as respostas incrementais de tensão, de deformação e da geometria da malha, bem como os valores, também incrementais, das coordenadas das faces da trinca e do parâmetro $K$, na ponta da trinca. Sendo possível averiguar o comportamento do elemento estrutural e da trinca diretamente nos dados de saída, sem a constante necessidade de geração de representações gráficas.

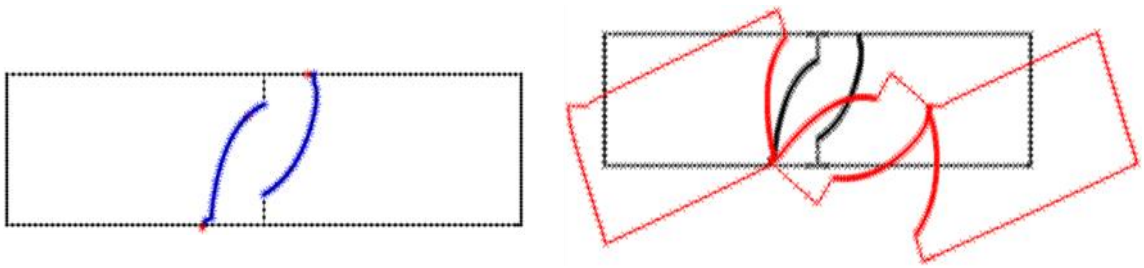
Deste modo, percebida a aproximação dos resultados numéricos àqueles de referência, viabilizou-se a utilização da GUI BEMLAB2D para obter-se o resultado gráfico do caminho de propagação da trinca e da condição deformada do elemento, respectivamente representados pelas Figuras 4 e 5. Como manifesto nas Figuras 4 (a) e 5 (a), o comportamento diagonal percebido sobre o caminho de propagação das trincas críticas enquadra-se assertivamente com o esperado para trincas propagadas em modo misto. Ressalta-se ainda nessas figuras, a visível ocorrência simultânea dos fenômenos de abertura em modo I e o deslizamento das faces da trinca, conforme expectado.

**FIGURA 4:** Modelo 01: (a) Propagação da trinca e (b) Malha deformada: dados experimentais.



**Fonte:** Autores (2023).

**FIGURA 5:** Modelo 02: (a) Propagação da trinca e (b) Malha deformada: dados experimentais.



**Fonte:** Autores (2023).

## 4. CONCLUSÕES

Por meio da metodologia apresentada neste trabalho, foi possível desenvolver os dois modelos propostos inicialmente, tidos como Modelo 01 e o Modelo 02. Deste modo, tornou-se possível concluir que o *software* BEMLAB2D apresentou-se suficiente para realização das fases metodológicas referentes ao pré- e pós-processamento, como é possível visualizar nas Figuras 4 e 5. De mesmo modo, o *software* BemCracker2D atuou de forma precisa e assertiva no processamento dos dados vindos do *software* BEMLAB2D, na geração dos resultados numéricos e na determinação do comportamento do elemento estrutural frente à propagação de trincas críticas em vigas de cisalhamento.

Portanto, conclui-se que a metodologia desenvolvida apresenta a aptidão necessária para o desenvolvimento de modelos estruturais constituídos por material frágil, em especial o concreto, através do emprego dos *softwares* BEMLAB2D e BemCracker2D.

## REFERÊNCIAS

Anderson, T. L. "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications". CRC Press - Taylor & Francis, Third edition, pp. 1-10, 16-17, 42-45, 103, 156-158, 219-243, 249-250, 2005.

Cordeiro, S. G. F. "Formulações do Método dos Elementos de Contorno Aplicados à Análise Elástica e à Fratura Coesiva de Estruturas Compostas Planas". MSc dissertation, University of São Paulo, pp. 142, 2015.

Delgado Neto, A. M. "BEMLAB2D: Interface Gráfica de Modelagem, Visualização e Análise com Elementos de Contorno – Uma Aplicação em Problemas Elastostáticos". MSc dissertation, University of Brasília, pp. 34, 36-63, 2017.

Gomes, G.; Miranda, A. C. O. "Analysis of Crack Growth Problems Using the Object-Oriented Program BEMCracker2D. Frattura Ed Intregrità Strutturale", Issue 45, The International Journal of Gruppo Italiano Frattura - IGF, vol. XII, pp. 67-69, 2018.

Gomes, G.; Silva, G.; Paiva, G.; Martins, A. "Avaliação Numérica de FITs em Problemas de Múltiplas Trincas". Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering - XXXVII, pp. 1-6, 2016.

Kumar, P. "Elements of Fracture Mechanics". McGraw Hill, New Delhi, pp. 1-10, 35-36, 45-47, 69-71, 2009.

Miranda, A. C. O. "Propagação de Trincas por Fadiga em Geometrias 2D Complexas Sob Cargas Cíclicas Variáveis". PhD thesis, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, pp. 1, 8-9, 17-18, 34-39, 2003.

Parvanova, S.; Gospodinov, G. "A Dual Boundary Element Procedure for Analysis of Fracture in Concrete". Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Issue 1, vol. 37, pp. 1, 1993.

Portela, A.; Aliabadi, M. H.; Rooke, D. P. "Dual Boundary Element Incremental Analysis of Crack Propagation". Computers & Structures, vol. 46, Number 2, pp. 239, 1993.

Rots, J. G.; Blaauwendraad, J. "Crack Models for Concrete: Discrete or Smeared? Fixed, Multi-Directional or Rotating?". Heron, vol. 34, n. 1, pp. 7-20, 1989.

Williams, M. L. "On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack. Journal of Applied Mechanics", pp. 113, 1957.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo apoio financeiro a esta pesquisa. Os autores também agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.