

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DO DANO EM MATERIAIS QUASE FRÁGEIS

por

Leonardo Pontes Flor

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, outubro de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Página obrigatória com a ficha catalográfica que consiste na descrição dos dados internacionais de catalogação na publicação, sendo sua elaboração de responsabilidade do aluno a partir da utilização do Catalográfica disponível na página do Sistema de Bibliotecas da UFRGS (SBUFRGS).

A ficha catalográfica gerada pelo sistema deve ser copiada como imagem e colada no verso da folha de rosto.

Flor, Leonardo Pontes
Estudo da evolução do dano em materiais quase frágeis / Leonardo Pontes Flor. -- 2022.
26 f.
Orientador: Ignacio Iturrioz.

Coorientador: Cirilo Seppi Bresolin.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Materiais quase frágeis. 2. Emissão Acústica. 3. Método dos Elementos Discretos, . 4. Método dos Elementos Finitos. I. Iturrioz, Ignacio, orient. II. Bresolin, Cirilo Seppi, coorient. III. Título.

Leonardo Pontes Flor

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DO DANO EM MATERIAIS QUASE FRÁGEIS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. CIRILO SEPPI BRESOLIN
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos

Sólidos Orientador: Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Porto Alegre, outubro de 2022

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Wilson (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, por me dar todo o apoio necessário nessa longa jornada.
Agradeço ao meu orientador, Prof. Ignacio Iturrioz, pelos ensinamentos, apoio e paciência.

Flor, L. P. **ESTUDO DA EVOLUÇÃO DO DANO EM MATERIAIS QUASE FRÁGEIS**. 2022. 28 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

No presente trabalho, foram analisadas simulações de duas aplicações com materiais quase frágeis por meio de diversos métodos, dentre eles uma versão do Método de Elementos Discretos, a Técnica de Emissão Acústica para avaliar a evolução do processo de dano através de vibrações, além do Método dos Elementos Finitos para validação dos outros métodos e como confirmação de suposições. No primeiro caso, uma simulação de 1500 barras fixas em uma extremidade e unidas por um suporte formado por elementos discretos em que foi aplicado um deslocamento constante, foram comparados os resultados obtidos com o mesmo material considerando três rigidez diferentes. Através do Método de Elementos Discretos, foi apontado que o suporte rígido, com módulo de Young $E = 1 \text{ Pa}$, suportou carga máxima de 18,6 N e energia elástica máxima de 0,99 J. O suporte semirrígido, de $E = 1/50 \text{ Pa}$, suportou carga máxima de 17 N e armazenou energia elástica máxima de 6 J. O suporte de rigidez $E = 1/250 \text{ Pa}$ suportou carga máxima de 16,1 N e armazenou energia elástica máxima de 18,5 J. Pela Técnica de Emissões Acústicas, foi constatada a importância do efeito de localização na propagação de trincas de materiais, analisando os padrões de frequência e amplitude dos sinais de emissões acústicas. No segundo caso analisado, simulação de ensaio em um corpo de prova prismático, foi observado uma ondulação nos valores de energia cinética de cerca de 900 Hz durante a etapa de carregamento. Através do Método de Elementos Finitos, foi calculado que a frequência natural de vibração do corpo de prova é 1343 Hz, sugerindo que a velocidade de carregamento provocou danos que se propagaram gerando a ondulação medida. Pela técnica de emissão acústica, foi observado que a ondulação tornou os sinais instáveis conforme o material se aproximava do ponto de colapso, gerando um ruído secundário, acima da *threshold* observada no início do carregamento.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais quase frágeis, Emissão Acústica, Método dos Elementos Discretos, Método dos Elementos Finitos.

Flor, L. P. **STUDY OF DAMAGE GROWTH ON QUASE-BRITTLE MATERIALS**. 2022. 28 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

In the present work, simulations of two applications with quasi-brittle materials were analyzed using several methods, among them a version of the Discrete Element Method, the Acoustic Emission Technique to evaluate the evolution of the damage process through vibrations, in addition to the of Finite Elements for validation of other methods and as confirmation of assumptions. In the first case, a simulation of 1500 bars fixed at one end and joined by a support formed by discrete elements in which a constant displacement was applied, the results obtained with the same material considering three different stiffnesses were compared. Through the Discrete Element Method, it was seen that the rigid support, with Young's modulus $E = 1 \text{ Pa}$, supported a maximum load of 18.6 N and a maximum elastic energy of 0.99 J. The semi-rigid support, of $E = 1/50 \text{ Pa}$, supported a maximum load of 17 N and stored a maximum elastic energy of 6 J. The stiffness support $E = 1/250 \text{ Pa}$ supported a maximum load of 16.1 N and stored a maximum elastic energy of 18.5 J. Acoustic Emissions, the importance of the location effect in the propagation of material cracks was verified, analyzing the patterns of frequency and amplitude of the acoustic emission signals. In the second case analyzed, a test simulation on a prismatic specimen, an undulation was observed in the kinetic energy values of about 900 Hz during the loading step. Through the Finite Element Method, the natural frequency of vibration of the specimen was calculated, resulting in 1343 Hz, suggesting that the loading speed caused damage that propagated generating the measured ripple. Using the acoustic emission technique, it was observed that the ripple made the signals unstable as the material approached the point of collapse, generating a secondary noise, above the threshold observed at the beginning of loading.

KEYWORDS: Quasi-brittle materials, Acoustic Emissions, Discrete Elements Method, Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Mecanismos de tenacificação usualmente desenvolvidos no caso de materiais quase frágeis. | 1 |
| Figura 2 - Materiais com comportamento quase frágil típicos, (a) Metalografia de um ferro fundido nodular (b) Material compósito, (c) Mecanismo de tenacificação em cerâmica utilizada em aplicações biomecânicas, (d) Espécimen de concreto submetido a compressão. | 2 |
| Figura 3 - Modelo Bundle: (a) suporte rígido; (b) suporte flexível (HANSEN; HEMMER; PRADHAN, 2015)..... | 3 |
| Figura 4 - Modelo de discretização usado o LDEM, versão do método dos elementos discretos utilizado no presente trabalho. É mostrado em (a) o elemento básico; em (b) um exemplo de corpo prismático formado por vários elementos; em (c) a Lei constitutiva de cada barra. (KOSTESKI, 2012) | 5 |
| Figura 5 - (a) representação da formação de ruptura no material e propagação da energia; (b) representa como um mesmo evento de emissão acústica é captado de formas distintas por sensores a distâncias diferentes da fonte; (c) um sinal típico com seus parâmetros característicos indicados (TANZI, 2020) | 6 |
| Figura 6 - Bundle Model de um sistema de 1500 barras em paralelo: (a) descrição do modelo e principais parâmetros adotados (TANZI <i>et al.</i> , 2022); (b) distribuição estatística das deformações limite consideradas para a população de 1500 elementos..... | 8 |
| Figura 7 - Corpo de prova prismático prefissurado: (a) esquema com dimensões e geometria estabelecida ; (b) modelo de elementos discretos utilizado, indicando as condições de contorno aplicadas (TANZI <i>et al.</i> , 2022); (c) malha de elementos finitos utilizada, com deformação do primeiro modo de vibração ($f_1 = 1343$ Hz)..... | 8 |
| Figura 8 – (a) curva força x deslocamento para o suporte rígido (verde), suporte semirrígido (vermelho), suporte flexível (azul); (b) configurações deformadas das três simulações consideradas..... | 10 |
| Figura 9 - Balanços de energias para os três sistemas simulados: (a) suporte rígido(verde); (b) suporte semirrígido (vermelho) e suporte flexível (azul). Sendo E energia elástica armazenada no suporte, D energia de dano nas barras e K energia cinética no suporte. | 10 |
| Figura 10 - Sinal de EA capturado nos suportes rígido (verde), semi rígido (vermelho) e flexível (azul): (a) evolução dos sinais <i>versus</i> o deslocamento prescrito aplicado; (b) detalhe dos sinais no suporte rígido. | 11 |
| Figura 11 - Configurações de deformação do prisma com uma prefissura inclinada, comparação entre simulações e experimento em um espécimen similar. Em vermelho as barras rompidas, em azul as que tem dano parcial. | 12 |
| Figura 12 – (a) Balanço de energia obtido na simulação; (b) detalhe na região onde o colapso instável acontece. | 12 |
| Figura 13 - Evolução das derivadas temporais da energia, da carga e do sinal de emissão acústica | 14 |

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de entradas adotados no modelo numérico do LDEM para a aplicação
2. 9

NOMENCLATURA

Símbolos

| | | |
|----------|--------------------------------------|-------------------|
| CP | Corpo de prova | |
| E | Energia elástica | [N/m] |
| K | Energia cinética | [N/m] |
| D | Energia de dano | [N/m] |
| A | Área | [m ²] |
| U | Energia elástica | [N/m] |
| EA | Emissão acústica | |
| TEA | Técnica de Emissões Acústicas | |
| MEF | Método dos Elementos Finitos | |
| L_n | Comprimento do elemento longitudinal | [m] |
| L_d | Comprimento do elemento diagonal | [m] |
| δ | Deformação da barra do elemento | |

SUMÁRIO

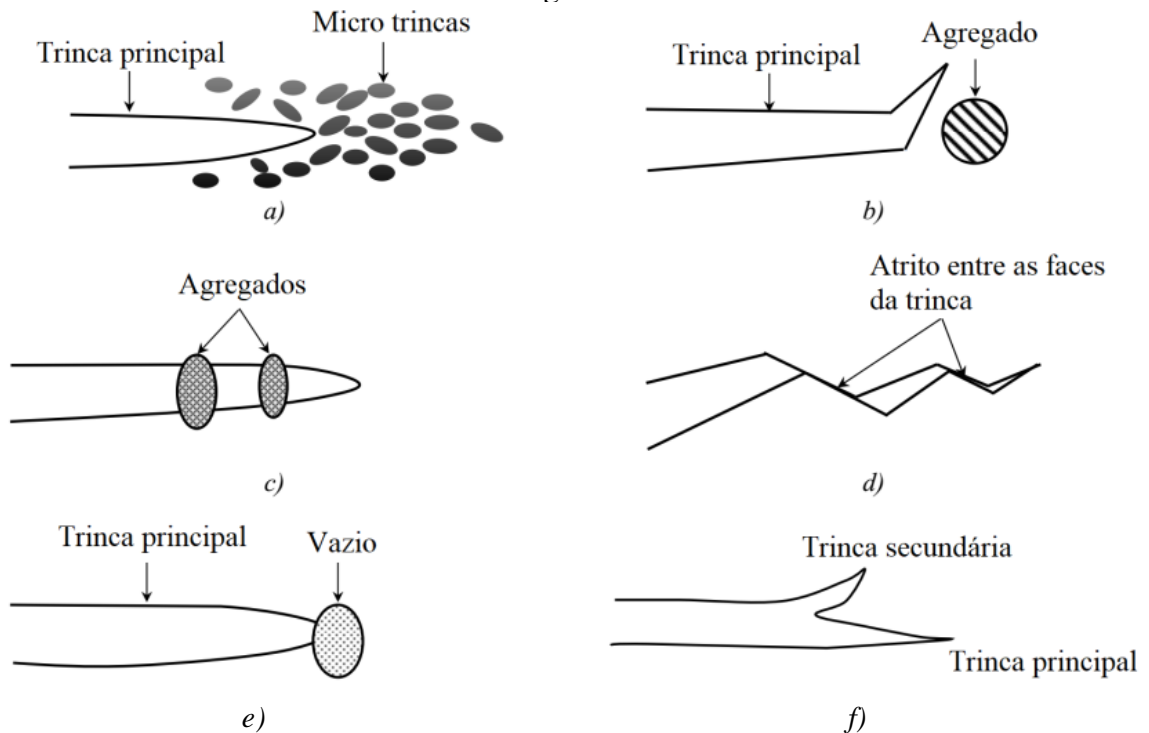
| | | |
|-----|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 3 |
| 2.1 | MECÂNICA DA FRATURA..... | 3 |
| 2.2 | TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA..... | 6 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 7 |
| 3.1 | UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS..... | 7 |
| 3.2 | UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS..... | 7 |
| 4 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 7 |
| 5 | APLICAÇÕES..... | 8 |
| 5.1 | Aplicação 1: Sistema de barras em paralelo (Bundle Model)..... | 8 |
| 5.2 | Aplicação 2: Corpo de prova prismático pré-fissurado de material quase-frágil..... | 8 |
| 6 | RESULTADOS..... | 9 |
| 6.1 | APLICAÇÃO 1..... | 9 |
| 6.2 | APLICAÇÃO 2..... | 11 |
| 7 | CONCLUSÃO..... | 14 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 16 |

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos processos de falha em materiais quase frágeis é uma questão ainda não totalmente resolvida em mecânica dos sólidos. Define-se como material quase frágil aqueles que o mecanismo que governa a deterioração do material é o dano devido à microfissuração, não à plasticidade. São exemplos o concreto, rochas naturais como basalto ou granito, materiais biológicos como ossos ou nácar, cerâmicas e alguns materiais nano-estruturados com propriedades de grande interesse tecnológico.

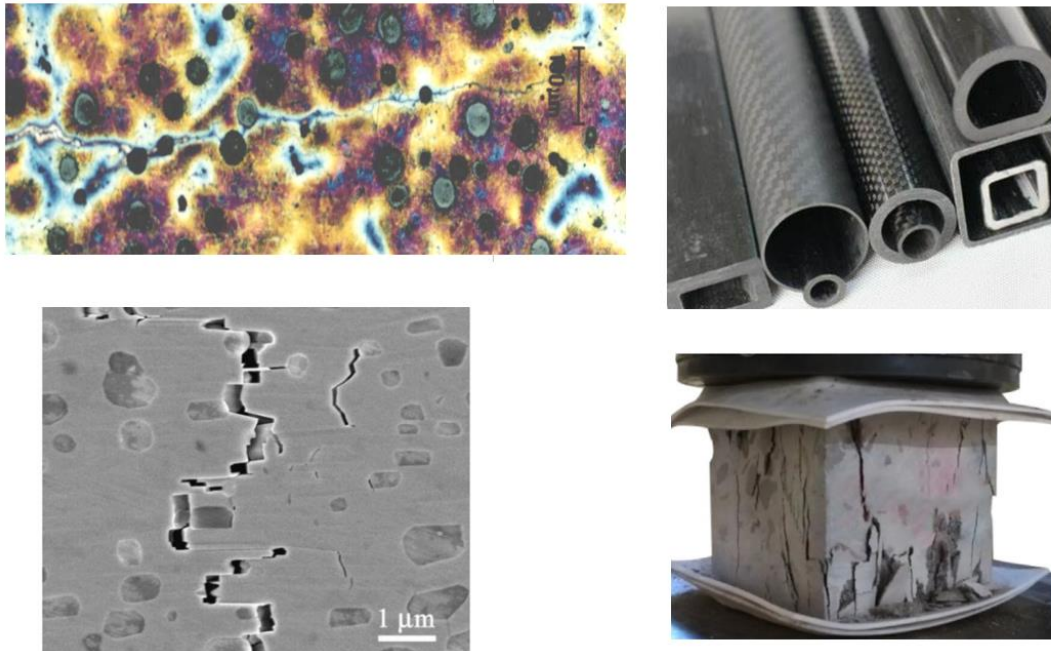
Quando um material frágil sofre esforços que originam uma macro fissura, não existem resistências contra a propagação desta, ao contrário dos materiais plásticos, que originam uma região de plasticidade na ponta da trinca criando tensões residuais que dificultam o avanço da falha. Em materiais quase frágeis, a propagação da trinca não é restrita pela plasticidade, mas sim por outros mecanismos que podem se desenvolver na região próxima, como os apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Mecanismos de tenacificação usualmente desenvolvidos no caso de materiais quase frágeis.



Os materiais quase frágeis têm, como característica geral, a alta resistência mecânica, grande estabilidade em altas temperaturas e baixa tenacidade dos materiais frágeis. Por conta desta, são realizados estudos do processo de dano nesse tipo de material, tendo como propósito tanto a compreensão dos mecanismos de tenacificação, como a criação de materiais novos com foco na redução da propagação de trincas por meio desses mecanismos. A Figura 2 contém exemplos de materiais com comportamento quase frágil.

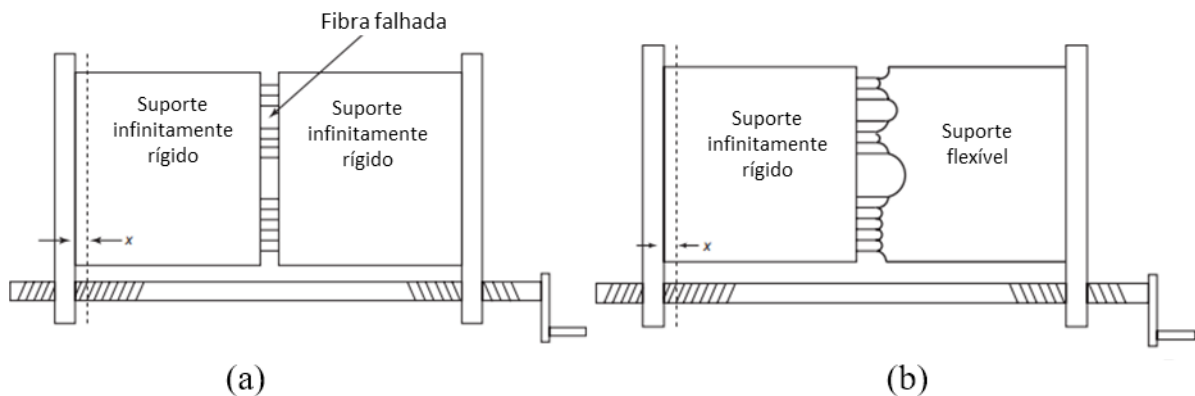
Figura 2 - Materiais com comportamento quase frágil típicos, (a) Metalografia de um ferro fundido nodular (b) Material compósito, (c) Mecanismo de tenacificação em cerâmica utilizada em aplicações biomecânicas, (d) Espécimen de concreto submetido a compressão.



Como ferramentas para o estudo da evolução do dano neste tipo de material, se pode citar o Método dos elementos discretos, que pode ser definido como um conjunto de estratégias numéricas para simular com naturalidade a ruptura em estruturas. No contexto deste trabalho, será utilizado uma versão deste método chamada de LDEM (Lattice Element Methods) proposta originalmente por Riera em 1984. Outra ferramenta que será utilizada é a Técnica de Emissões Acústicas (TEA), que consiste em capturar os sinais produzidos nos corpos quando modificações internas acontecem, foi estudada relacionando a materiais quase frágeis por Grosse e Ohtsu em 2008. Os fundamentos teóricos destes métodos serão apresentados na próxima seção.

O método Bundle, relacionado com a simulação de materiais quase frágeis, proposto por DANIELS em 1945 e exaustivamente explorado por (HANSEN; HEMMER; PRADHAN, 2015), consiste em representar um sistema de elementos em paralelo com tensão última definida como uma variável randômica com distribuição estatística específica. A rigidez do suporte que aplica o deslocamento prescrito no sistema é um dos parâmetros que influenciam nos resultados obtidos. Na Figura 3, dois esquemas mostram a principais características deste modelo: o suporte rígido, na Figura 3 (a), ao romper um elemento, a solicitação liberada é distribuída igualmente em todo o sistema; o suporte flexível, na Figura 3 (b), ao romper um elemento, os adjacentes são sobrecarregados que os mais distantes no resto da estrutura.

Figura 3 - Modelo Boundle: (a) suporte rígido; (b) suporte flexível (HANSEN; HEMMER; PRADHAN, 2015)



Após a contextualização realizada, é possível escrever os objetivos do trabalho:

Objetivo Geral: O presente trabalho tem como objetivo geral explorar as características e comportamentos de estruturas formadas por materiais quase frágeis quando as condições de carregamentos e deformações tendem ao colapso da estrutura.

Os objetivos específicos são:

- Entender que o modelo de Bundle pode representar o processo de dano de materiais quase frágeis;
- Entender as bases do Método dos Elementos Discretos e como este pode servir para representar o comportamento de uma estrutura formada por materiais quase frágeis;
- Entender como a emissão acústica pode ministrar informação sobre o comportamento de uma estrutura formada por material quase frágil;
- Aplicar as ferramentas aqui apresentadas em exemplos específicos que simulam o processo de dano de um sistema formado por material quase frágil.

Estrutura do trabalho: Após a presente introdução, na seção 2 se apresenta a fundamentação teórica, na seção 3 as ferramentas utilizadas neste trabalho são descritas, na seção 3, é apresentada a revisão bibliográfica, e na seção 5 as duas aplicações que foram realizadas. Finalmente, na seção 6 são apresentadas as conclusões da presente monografia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MECÂNICA DA FRATURA

Na verificação clássica de resistência dos materiais para o critério de falha do material, apresentada na Eq.(1), uma tensão de comparação (S_{com}) é calculada (sendo, esta, uma simplificação do estado tensional determinado em um tensor de tensões que é representado por um escalar) a partir da geometria e condições de contorno da estrutura avaliada e de teorias de falhas clássicas como von Mises, Tresca e Rankine. Em contrapartida, a tensão do material (S_{mat}) depende do material e das condições de ensaio: temperatura, velocidade de carregamento etc.

$$S_{com}(\text{geometria}, \text{Cond. de contorno}) \leq S_{mat}\left(\text{material}, T, \frac{\partial u}{\partial t}\right) \quad (1)$$

A mecânica da fratura vem sendo desenvolvida para estudar o comportamento de materiais na presença de descontinuidades internas e/ou superficiais. Caso o sistema tenha uma fissura no domínio, o critério anterior não pode ser utilizado e a mecânica da fratura procura uma alternativa para avaliar quando a trinca no material se propaga de forma instável, não baseando o parâmetro apenas nos valores de tensões. Então, na Eq.(2) é criada uma propriedade que depende da geometria, das condições de contorno e do tamanho do defeito (a). Ela será comparada com um valor X_{mat} que depende apenas do material e das condições de ensaio. É importante ressaltar que tanto X_{mat} quanto S_{mat} são valores determinados em corpos de prova de geometrias e condições de contorno simples, deixando a parcela de responsabilidade do material como a mais importante.

$$X_{calc} (geometria, Cond. de contorno, a) \leq X_{mat} \left(material, T, \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2)$$

A resistência à propagação de trincas, então, é uma propriedade intrínseca do material. Para determiná-la, define-se uma *taxa de liberação* de energia de deformação (G), que relaciona a variação da energia de deformação interna pela variação da *área* da trinca segundo a Eq.(3). Tal como σ_c , existe propagação da trinca quando $G > G_f$, que é um valor especificado para cada material chamado Tenacidade à fratura (G_f) (BRANCO; CASTRO; FERNANDES, 1999).

$$G_f = \frac{\partial U}{\partial A} \quad (3)$$

O Método dos Elementos Discretos (em inglês Discrete Element Method, DEM) consiste na previsão numérica dos movimentos e interações entre um particulado introduzido em um meio contínuo. Existem diversas estratégias que podem ser consideradas dentro deste conjunto de métodos: em estudos relacionados com estruturas biológicas existe a Técnica de Dinâmica Molecular (DROR *et al.*, 2012; PERILLA *et al.*, 2015); utilizados a nível macroscópico como a Peridinâmica (SILLING, 2000); ou o Método de Elementos Distintos (CUNDALL; STRACK, 1979).

Especialmente, tem-se o Lattice Element Methods (LDEM) (RIERA, 1984) que também é utilizada no nível macroscópico e assume cada módulo como tendo nove nós e vinte barras (conforme exemplificado na Figura 4), sendo metade da massa total desse módulo atribuída ao nó central e a outra metade distribuída igualmente nos nós dos vértices. Logo, a distribuição de massa entre os nós depende apenas da densidade do material e da dimensão de cada elemento discreto. Os comprimentos dos elementos longitudinais e diagonais são L_n e L_d , respectivamente, com L_d sendo representado na Eq.(4). Em um material elástico isotrópico, A_n é a área da seção transversal do elemento longitudinal no modelo discreto equivalente, A_d a área transversal correspondente às barras diagonais, sendo representadas pelas Eq.(5) e Eq.(6), sendo ν o coeficiente de Poisson do sólido. É importante salientar que somente para $\nu=0,25$ a equivalência com o contínuo isotrópico é completa. Quando $\nu \neq 0,25$, surgem diferenças nos termos de cisalhamento (KOSTESKI, 2012).

$$L_d = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) L_n, \quad (4)$$

$$A_n = \frac{1}{2(1+\nu)} L_n^2 \quad (5)$$

$$A_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \delta A_n \quad (6)$$

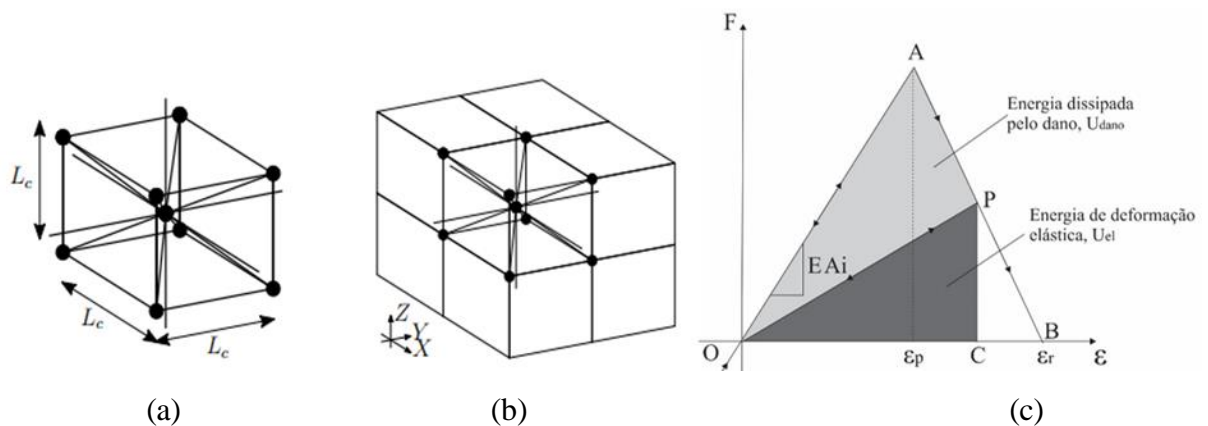
Como a área da seção transversal dos elementos longitudinais no modelo depende da dimensão da aresta e do coeficiente de Poisson do material, quando ocorre rompimento de alguma barra da treliça do elemento, é gerada uma área de fratura equivalente liberando energia de fratura. Essa é a grande vantagem do LDEM frente ao MEF: poder representar as trincas como descontinuidades que são formadas ao longo do carregamento.

Neste contexto, o particulado consiste na divisão de um sólido em diversos vértices unidos por barras, formando uma treliça de três dimensões, com cada nó tendo três graus de liberdade de acordo com as três componentes do vetor deslocamento no sistema de referência global (KOSTESKI *et al.*, 2011). O processo resulta na Eq. (7) de movimentos baseados na segunda lei de Newton.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F(t) - P(t) = 0 \quad (7)$$

Sendo x , \dot{x} , e \ddot{x} os vetores contendo os deslocamentos, velocidades e acelerações nodais, respectivamente, e M e C são as matrizes de massa e amortecimento. Por serem matrizes simétricas, é possível realizar o desacoplamento da equação, facilitando a resolução. Os vetores $F(t)$ e $P(t)$ contêm as forças internas e externas que atuam nas massas nodais. Para resolver a equação, é aplicado um esquema explícito de integração no tempo.

Figura 4 - Modelo de discretização usado o LDEM, versão do método dos elementos discretos utilizado no presente trabalho. É mostrado em (a) o elemento básico; em (b) um exemplo de corpo prismático formado por vários elementos; em (c) a Lei constitutiva de cada barra. (KOSTESKI, 2012)



A lei constitutiva não-linear uniaxial (HILLERBORG, 1978), é adotada para tratar o comportamento de materiais por meio da relação constitutiva elementar bi linear para as barras do LDEM, apresentada na Figura 4 (c), a qual permite a contabilização dos efeitos irreversíveis de nucleação e propagação de trincas. No triângulo OAB da mesma figura, é visualizada uma área fechada pela curva força *versus* deformação, que representa a densidade de energia necessária para fraturar a área de influência do elemento. Sendo assim, considerando um ponto P na curva, a densidade de energia elástica armazenada no elemento é representada pela área do triângulo OPC, que pode ser devolvida ao sistema, já a área do triângulo OAP representa a densidade de energia dissipada pelo dano. Uma vez que a densidade de energia de dano se iguale à energia de fratura, o elemento falha e perde a sua capacidade de suportar carga. Porém, na compressão, o comportamento do elemento permanece linear elástico. A lei está equacionada na Eq.(8), onde Gf é a tenacidade do material, E o módulo de elasticidade longitudinal, ε_p a deformação crítica e d_{eq} um comprimento característico do material. Quando uma fissura da ordem do comprimento d_{eq} se desenvolve numa estrutura, pode se propagar em forma instável.

Considerar o G_f como um campo randômico é fundamental para que o modelo funcione corretamente (BIRCK *et al.*, 2016).

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{G_f}{d_{eq} E}} \quad (8)$$

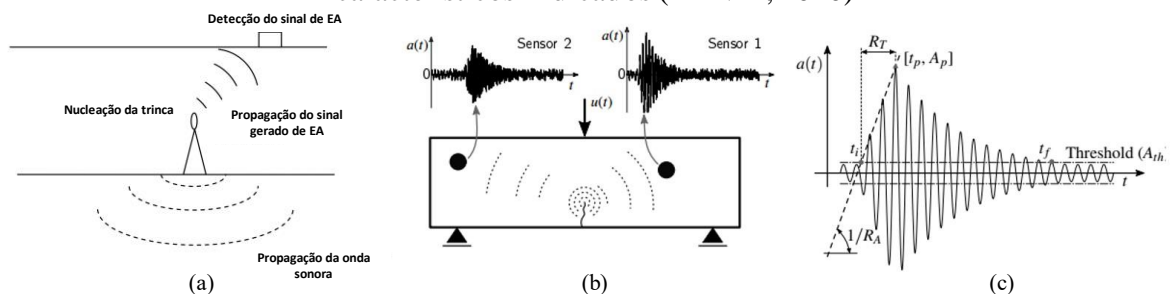
2.2 TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA

Quando ocorrem mudanças internas em estruturas, seja por consequência de uma reação química, fratura localizada em um material que está sofrendo carregamento ou deslocamento relativo, parte da energia de deformação é liberada na forma de ondas mecânicas elásticas, definidas como ondas de Emissão Acústica (EA), representadas na Figura 5 (a). Essas ondas podem ser captadas por um sensor de EA, normalmente um sensor piezoelétrico, e convertidas em sinais elétricos, amplificadas e filtradas, formando o que é conhecido como Técnica de Emissão Acústica (GROSSE; OHTSU, 2008).

A TEA é considerada um ensaio não destrutivo “passivo”, ou seja, os ensaios são realizados durante o carregamento ou o funcionamento da estrutura, e a fonte emissora de ondas é o próprio material que está sendo avaliado. Tem, como pontos positivos, a possibilidade de realizar o ensaio durante o uso normal da estrutura, avaliando como se comporta no dia a dia e prevendo possíveis processos de falhas. Os pontos negativos são a impossibilidade de avaliar defeitos produzidos previamente ao ensaio e a impossibilidade de reproduzir perfeitamente um teste particular devido à repentina e, em vezes, aleatória formação de uma trinca.

A distribuição espacial e temporal das emissões acústicas pode fornecer informações sobre o processo interno que age na estrutura estudada. Na Figura 5 (b) um esquema mostra como a ruptura dentro do material produz um evento de emissão acústica que se propaga como onda elástica até atingir os sensores, que o registram como sinais, estes exemplificados na Figura 5 (c). O estudo da distribuição temporal e espacial dos eventos de emissão acústica fornece informação de como a estrutura estudada se está deteriorando.

Figura 5 - (a) representação da formação de ruptura no material e propagação da energia; (b) representa como um mesmo evento de emissão acústica é captado de formas distintas por sensores a distâncias diferentes da fonte; (c) um sinal típico com seus parâmetros característicos indicados (TANZI, 2020)



A seguir são detalhados os principais parâmetros de EA que caracterizam um sinal: (I) Faixa Limite ou Threshold (A_{th}): é o nível de amplitude a partir do qual o sinal pode ser considerado EA. (II) Tempo de Início (t_i) e do fim (t_f): é o marco no qual o sinal é percebido pelo sensor, ou no qual é considerado um sinal de AE. (III) Amplitude máxima (\hat{A}): é a amplitude de pico do sinal de AE. Cabe destacar que a amplitude de pico não representa o valor emitido pela fonte, mas sim a resposta do sensor devida à fonte subtraída a atenuação de energia pela propagação da onda. (IV) Tempo de subida (RT): é a diferença de tempo entre o tempo de início e o de pico.

(v) Frequência do sinal (f_{ev}): é o valor da frequência que caracteriza o sinal de EA, modelando o mesmo como uma função harmônica pura. Uma vasta bibliografia existe sobre esta técnica entre ela se pode citar o livro de Grosse e Ohtsu, 2008.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aplicações do método dos elementos discretos na simulação da ruptura de materiais quase frágeis é um campo de vastas fontes, dentre elas podem ser citados os livros de O'Sullivan (2011) utilizando o método proposto por Cundall e Strack (1979) e o livro de Ha e Bobaru (2011) aplicando a Peridinâmica apresentada por Silling (2000). No contexto do grupo de pesquisa no qual este TCC se insere, pode-se citar Cabral et al. (2019), e Friedrich et al. (2022) também utilizando a Peridinâmica. No contexto da mesma versão do método dos elementos discretos utilizado, pode-se citar aqui Riera, Miguel e Iturrioz (2011). Em Iturrioz, Lacidogna e Carpinteri (2014) e Birck et al. (2016) foi também utilizado na simulação de eventos de emissão acústica.

Existe, também, muita pesquisa na proposta de parâmetros globais aplicados a partir de sinais de emissão acústica, e sua evolução permite determinar se a falha do sistema é iminente. Trabalhos nesta linha que podem ser citados são: Varotsos (2012), Friedrich et al. (2022) e Tanzi et al. (2021), sendo estes dois últimos produtos do grupo de pesquisa onde o presente trabalho se insere.

4 METODOLOGIA

4.1 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Na análise por Elementos Finitos, foi utilizado o software ANSYS® [2017] e empregado o elemento PLANE 82, indicado para modelagem em 2-D de estruturas sólidas e pode ser utilizado tanto como elemento de EPT, EPD ou axissimétrico. Possui 8 nós com dois graus de liberdade cada: translação nos eixos x e y e é recomendado para uso em formas irregulares por não perder acuracidade.

Pelo método, foi determinado o parâmetro fractomecânico G_u , para o qual precisa se conhecer a energia elástica de deformação em dois modelos com entalhes levemente diferentes. Foi desdobrada a Eq. (3) e realizado uma aproximação para ser aplicada no modelo, resultando na Eq. (9), sendo B a espessura do *espécimen*, a o comprimento do entalhe, da a variação no comprimento do entalhe e U a energia elástica armazenada. Também foram calculados os modos e frequências do corpo de prova.

$$G_u = - \frac{(U_{a+da} - U_a)}{B \cdot \Delta a} \quad (9)$$

4.2 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

O LDEM, versão do método dos elementos discretos aplicado neste trabalho, foi escolhido um programa em Fortran já existente para simular e visualizar as configurações de deformação do ensaio, e foi empregado o sistema ANSYS para simular eventos de emissão acústica e registro de acelerações. Um sensor piezoelétrico sendo implementado na TEA foi emulado utilizando nós específicos da superfície do *espécimen*, possibilitando guardar um registro histórico do balanço energético da simulação e dos sinais de EA concomitantemente. A calibração deste modelo não é trivial (KOSTESKI *et al.*, 2020).

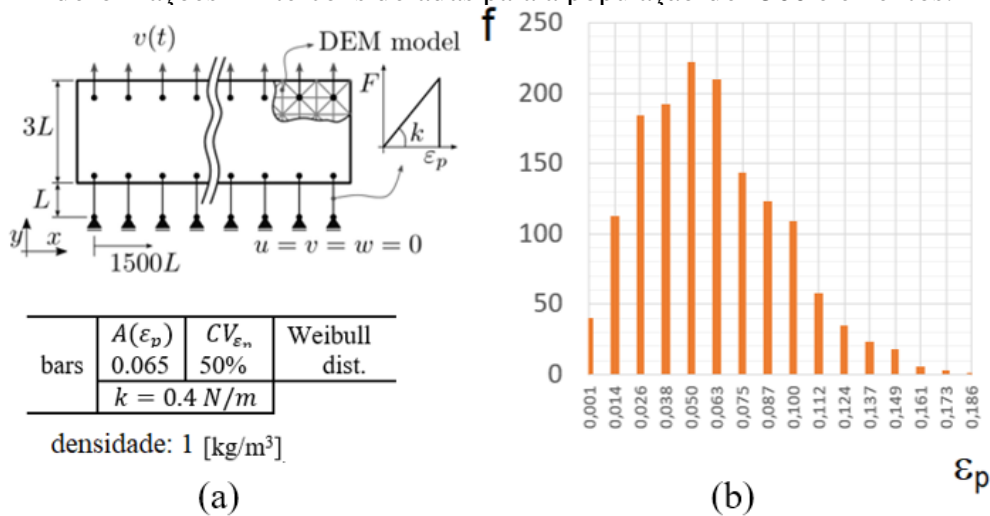
5 APLICAÇÕES

No presente trabalho se apresentam duas aplicações para ilustrar as possibilidades dos métodos numéricos para ajudar na compreensão da evolução do dano em estruturas quase frágeis. Em ambas as aplicações, as simulações feitas com LDEM foram realizadas em publicações anteriores, no mesmo grupo de pesquisa deste trabalho. O autor obteve acesso aos dados e resultados para gerar as análises realizadas a seguir.

5.1 APLICAÇÃO 1: SISTEMA DE BARRAS EM PARALELO (BUNDLE MODEL)

Na primeira aplicação, três modelos formados por sistemas de 1500 elementos uniaxiais com deformação crítica aleatória determinada a partir da distribuição Weibull com as características definidas na Figura 6 (a), sendo $L = 1\text{ m}$ e $A(\varepsilon_p)$ o valor médio da deformação crítica. O primeiro modelo, de suporte rígido, considera rigidez de $E = 1\text{ Pa}$; o segundo, de suporte semirrígido, $E = 1/50\text{ Pa}$; o terceiro, de suporte flexível, $E = 1/250\text{ Pa}$. Na Figura 6 (b) é apresentado o histograma calculado, verificando que a distribuição de deformações críticas parece seguir uma distribuição de Weibull.

Figura 6 - Bundle Model de um sistema de 1500 barras em paralelo: (a) descrição do modelo e principais parâmetros adotados (TANZI *et al.*, 2022); (b) distribuição estatística das deformações limite consideradas para a população de 1500 elementos.



5.2 APLICAÇÃO 2: CORPO DE PROVA PRISMÁTICO PRÉ-FISSURADO DE MATERIAL QUASE-FRÁGIL

Nesta segunda aplicação, um CP prismático com pré-fissura inclinada foi simulado. As dimensões do corpo de prova, condições de contorno consideradas e detalhes dos modelos de elementos discretos e do modelo de elementos finitos são apresentados na Figura 7, com o modelo de EF apresentando o modo 1 de vibração, obtido resolvendo um problema de autovalores no sistema ANSYS, sendo a frequência $f_1 = 1,343\text{ kHz}$. As propriedades de entrada assumidas no modelo de elementos discretos estão detalhadas na Tabela 1. O deslocamento prescrito no modelo é $u(t) = 0,08333\text{ m/s}$.

Figura 7 - Corpo de prova prismático prefissurado: (a) esquema com dimensões e geometria estabelecida ; (b) modelo de elementos discretos utilizado, indicando as condições

de contorno aplicadas (TANZI *et al.*, 2022); (c) malha de elementos finitos utilizada, com deformação do primeiro modo de vibração ($f_1 = 1343$ Hz).

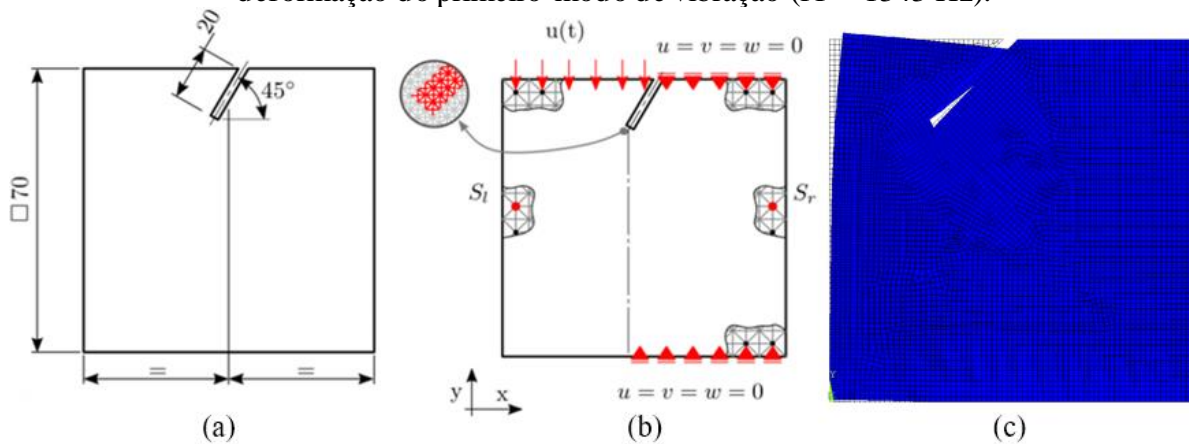


Tabela 1 - Parâmetros de entradas adotados no modelo numérico do LDEM para a aplicação 2.

| Dimensões (mm) | L (mm) | E (GPa) | ν | ρ (kg/m ³) | G_{fr} (N/m) | L_{cor} (mm) | CV_{G_f} (%) |
|----------------|----------|-----------|-------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 71 × 71 × 26 | 1 | 0.95 | 0.25 | 2456 | 3690 | 1 | 60 |

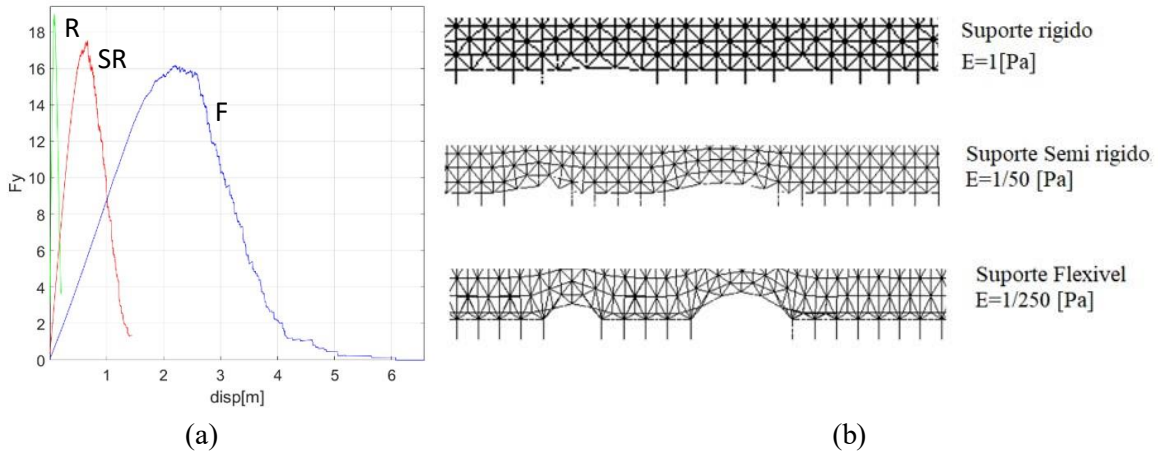
6 RESULTADOS

6.1 APLICAÇÃO 1

Os resultados obtidos nesta aplicação foram inteiramente baseados nos dados das simulações feitas por TANZI *et al.* (2022), os quais o autor teve pleno acesso. As configurações deformadas podem ser visualizadas na Figura 8 (b) para os três tipos de suporte. Para o suporte rígido, quando uma barra rompe, a energia que estava sendo absorvida por ela tende a ser distribuída entre todas as restantes. No modelo semirrígido essa tendência muda, e a distribuição dessa energia fica mais concentrada conforme a proximidade da barra que sofreu a falha, simulando um efeito de localização. Por fim, no modelo de suporte flexível, o efeito é acentuado.

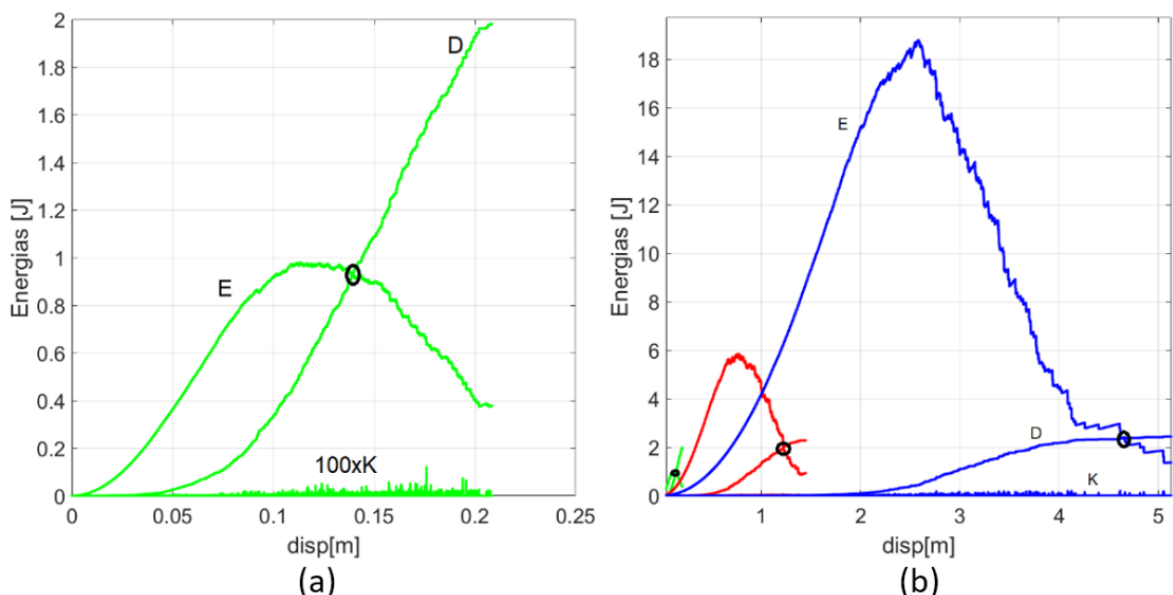
A Figura 8 (a) apresenta a variação da resistência de cada sistema *versus* o deslocamento prescrito aplicado. O modelo de suporte rígido é mais resistente porque não apresenta o efeito de localização. Nos casos semirrígido e flexível este efeito acontece, resultando na diminuição da carga máxima que o modelo suporta.

Figura 8 – (a) curva força x deslocamento para o suporte rígido (verde), suporte semirrígido (vermelho), suporte flexível (azul); (b) configurações deformadas das três simulações consideradas.



Estes mesmos resultados podem ser vistos avaliando o balanço de energia: o cruzamento das curvas de dano e elástica acontece logo após o pico de energias no suporte rígido [Figura 9 (a)] quando comparado com o cruzamento no final da curva nos suportes semirrígido e flexível [Figura 9 (b)]. Com isso, pode ser observado que os suportes armazenam como energia elástica o que virá a ser a energia de dano nas barras. No suporte rígido, essa energia armazenada é menor e é transmitida para as barras (como energia de dano) com um deslocamento menor do carregamento. Já no sistema flexível, a energia elástica é maior porque o suporte funciona como um acumulador de energia disponível para romper as barras do sistema.

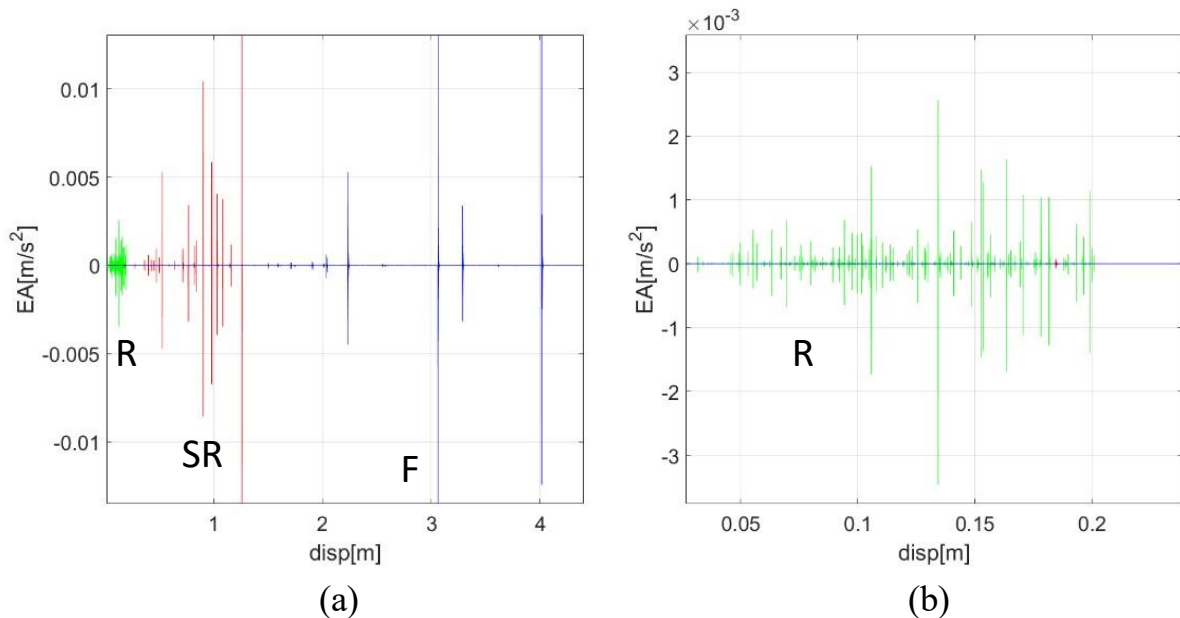
Figura 9 - Balanços de energias para os três sistemas simulados: (a) suporte rígido(verde); (b) suporte semirrígido (vermelho) e suporte flexível (azul). Sendo E energia elástica armazenada no suporte, D energia de dano nas barras e K energia cinética no suporte.



Os resultados dos sinais de EA podem ser vistos na Figura 10 (a). Observa-se, em detalhe na Figura 10 (b), que a quantidade de eventos é muito maior no caso com suporte rígido, e pode ser interpretado como motivo o rompimento isolado das barras. No sistema flexível, a tendência muda e temos sinais de maior amplitude. Fazendo uma associação da ruptura simultânea de um

conjunto de barras como uma avalanche, pode-se dizer que no suporte rígido houve diversas avalanches pequenas, comparado com poucas avalanches grandes no suporte flexível.

Figura 10 - Sinal de EA capturado nos suportes rígido (verde), semi rígido (vermelho) e flexível (azul): (a) evolução dos sinais *versus* o deslocamento prescrito aplicado; (b) detalhe dos sinais no suporte rígido.

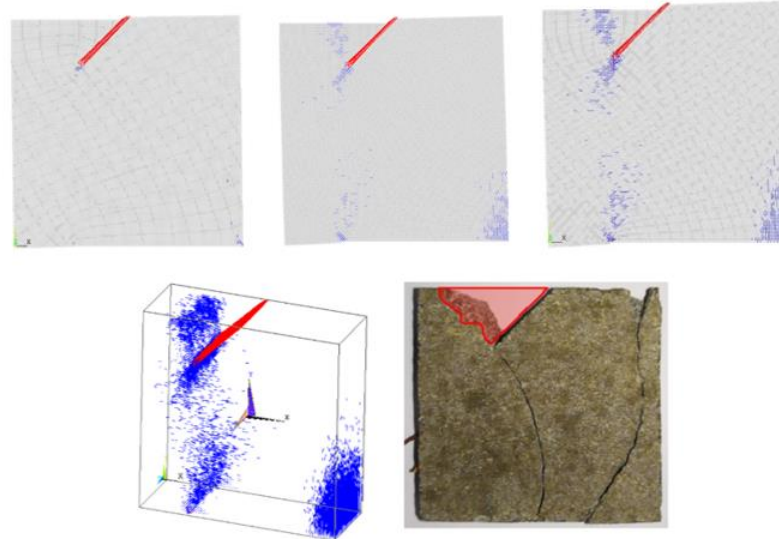


Finalmente, salienta-se que é possível observar, nestes simples sistemas, como a geometria e as condições de contorno podem induzir que a localização de deformações aconteça, facilitando a formação de uma microfissura que pode se propagar em forma instável. Evidentemente, em estruturas reais a interação entre os elementos que participam para definir a ruptura se relacionam em forma mais complexa, como se vê no próximo exemplo.

6.2 APLICAÇÃO 2

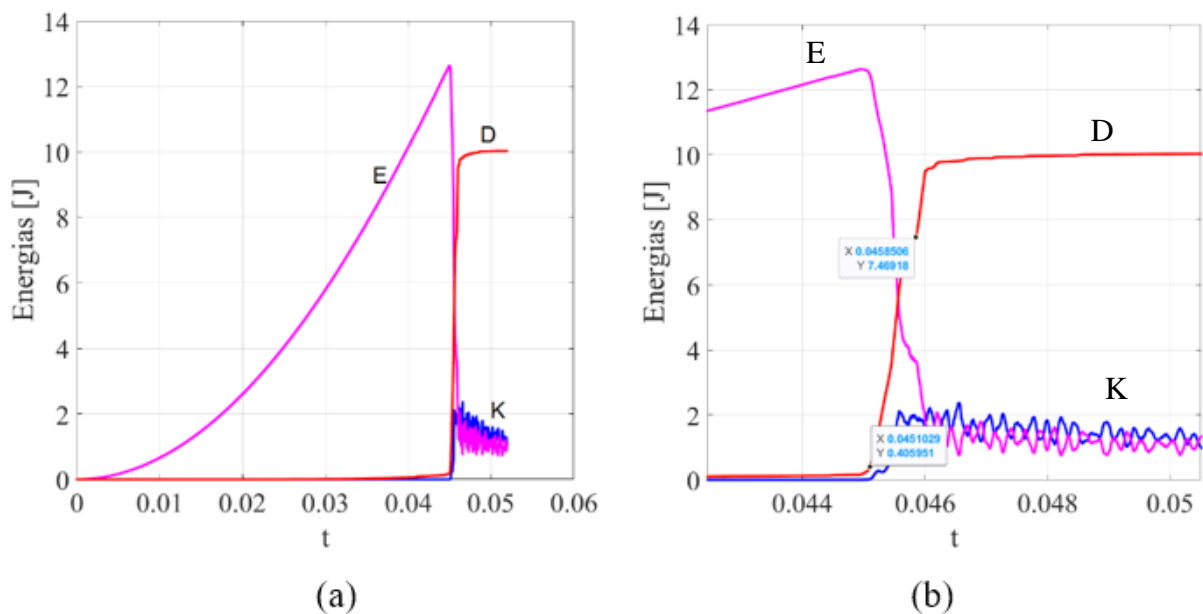
Na figura 11 estão as configurações parciais obtidas na simulação e a configuração final obtida num experimento de um espécimen similar.

Figura 11 - Configurações de deformação do prisma com uma prefissura inclinada, comparação entre simulações e experimento em um espécimen similar. Em vermelho as barras rompidas, em azul as que tem dano parcial.



Na Figura 12 (a), estão apresentados os resultados obtidos com o modelo de elementos discretos em termos do balanço energético, E significa energia elástica, D energia dissipada e K energia cinética.

Figura 12 – (a) Balanço de energia obtido na simulação; (b) detalhe na região onde o colapso instável acontece.



Utilizando informações apresentadas na Figura 12, é possível avaliar a coerência dos resultados obtidos com o modelo numérico. Com o incremento abrupto identificado na Figura 12 (b), é possível calcular a variação da energia dissipada ($\Delta D = 7 \text{ N/m}$) e relacioná-la com a área de fissura aberta vista na Figura 11. Assumindo que a menor área é uma fratura perfeitamente plana e perfeitamente ortogonal ao comprimento do espécimen, descobre-se que a área é, no mínimo, $\Delta A = 0,025 * 0,07 - 0,02 \cos(45^\circ) = 1,369 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Utilizando a

Eq.(3) para obter o valor $G_f \leq 5000 \text{ N/m}$, então é possível comparar com o que é apresentado na Tabela 1: a tenacidade à fratura do modelo é de $Gf = 3690 \text{ N/m}$. Essa divergência pode ser explicada pela área de fratura na qual a energia é dissipada não ser claramente determinada, e pelo fato de o CP apresentar diversos outros focos de dano que interagem no processo, não apenas na região da evolução da fratura (conforme Figura 11). Outras verificações similares às aqui apresentadas podem ser conferidas em Kostaski (2012).

Foi feita uma verificação sobre o modelo, empregando um modelo de elementos finitos para calcular o valor de G . Foi aplicado um deslocamento prescrito conhecido de 0,41mm, produzindo uma reação de 3755,25N. Utilizando a Eq. (9) para achar o valor de G :

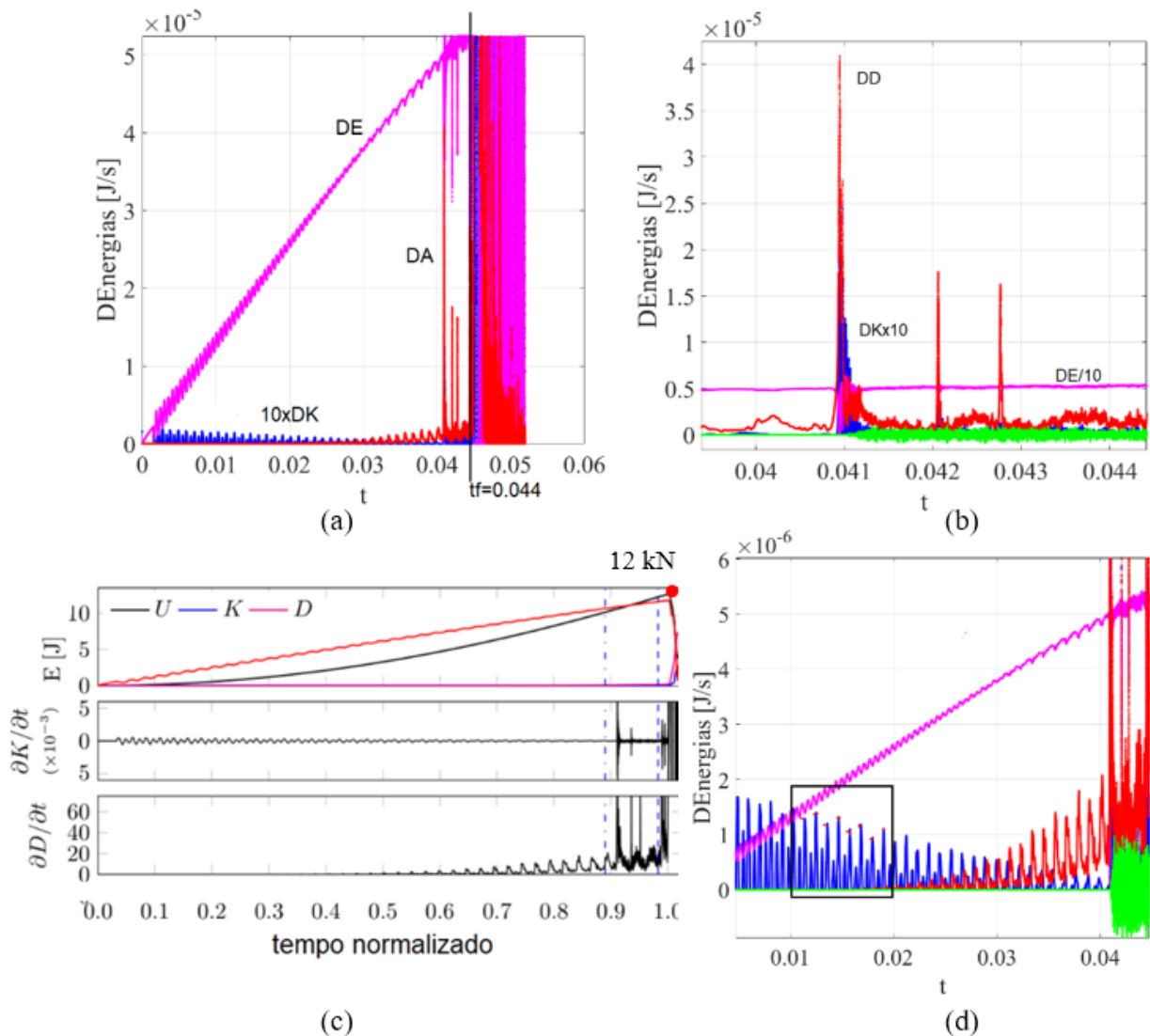
$$G = -\frac{(U_{a+da} - U_a)}{\partial a} = -\frac{(30,775 - 31,293)}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 1033 \quad (10)$$

Com o valor de G na condição crítica definido, na Figura 13 (c) é possível observar que a reação vertical no momento da ruptura é de 12000N. Desta forma, com uma simples relação matemática se obtém $G_f = (1033 * 12000)/3755,25 = 3300 \text{ N/m}$, próximo do $G_f = 3690 \text{ N/m}$ considerado como parâmetro de entrada no modelo de elementos discretos.

Na Figura 13 são apresentadas as evoluções das derivadas das energias elástica, dissipada e cinética durante a simulação e o sinal de emissão acústica. Note que, devido à alta velocidade utilizada na aplicação da carga, o sinal de emissão acústica obtido ficou prejudicado, porque os eventos que acontecem na estrutura se superpõem, dificultando sua análise. Mesmo assim, é possível verificar a possibilidade de medir o sinal de emissão acústica como a derivada da energia dissipada, mostrando como o padrão de ruptura acontece ordenado até o tempo $s = 0,04 \text{ segundos}$. Após este tempo, o sinal entra em regime crítico, sinalizando que a instabilidade do sistema é iminente. É possível, também, verificar como as ondas apresentadas na derivada temporal da energia cinética tem uma frequência próxima à primeira frequência de vibração da estrutura representada na Figura 7 ($f_1 = 1343 \text{ Hz}$). Este valor pode ser obtido da Figura 13 contando o número de picos vermelhos e dividindo pelo intervalo de tempo considerado $f = (9 \text{ picos}/0.01 \text{ segundos}) = 900 \text{ Hz}$. Esta hipótese deverá ser verificada na continuação deste trabalho.

Finalmente, é possível ver na Figura 13 como é a interação entre as derivadas temporais das energias de dano, elástica e cinética, quando um evento de emissão acústica acontece. Nota-se que há um atraso na aparição do sinal de emissão acústica (indicado em verde na figura) porque a onda emitida pelo evento deve viajar pelo meio até chegar ao sensor de emissão acústica que está posicionado na superfície da estrutura, ponto s1 indicado na Figura 7 (b).

Figura 13 - Evolução das derivadas temporais da energia, da carga e do sinal de emissão acústica



7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi explorado o processo de dano em materiais quase frágeis utilizando como ferramentas o método dos elementos discretos, o método dos elementos finitos e a técnica da emissão acústica, esta feita apenas por simulação. Foram realizadas duas aplicações: a primeira consistiu em um sistema de barras em paralelo, onde a deformação crítica contou com uma componente randômica de distribuição de Weibull, na qual foi avaliado a influência da flexibilidade do suporte no caso. Na segunda aplicação, um corpo prismático com uma pré-fissura inclinada foi simulado. Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- À medida que a flexibilidade do suporte do sistema em paralelo aumenta, a reação máxima diminuí ao se induzir um processo de localização da sollicitação na vizinhança das barras já falhadas. Chega-se a uma conclusão similar à análise do balanço de energia das simulações realizadas e a distribuição temporal dos eventos de emissão acústica.

- Na segunda aplicação, se pode confirmar que o modelo de elementos discretos é coerente com os resultados esperados segundo a mecânica elástica linear da fratura.

- Devido à alta taxa de aplicação da carga, o sinal de emissão acústica ficou contaminado. Mesmo assim, foi possível obter informação equivalente a partir do cálculo das derivadas das energias de dano e cinética.

- A oscilação nos valores de energia é devido à alta taxa de aplicação da carga, por isso coincidem em forma aproximada com a primeira frequência natural de vibração do corpo, que foi calculada com o método dos elementos finitos.

- Considera-se que foi possível, no percurso do trabalho, verificar as possibilidades de aplicar o método dos elementos discretos e a técnica de emissão acústica na compreensão do processo de dano nos tipos de materiais estudados.

- Como possível continuação do trabalho, se pretende, a partir de um sinal de emissão acústica simulado, obter parâmetros globais e verificar seu potencial como precursor do regime crítico (falha final).

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS®. Academic Research Mechanical, Release 18.0, Help System, ANSYS Inc, 10. Canonsburg, PA, [s. l.], v. 15317, n. November, 2017.

BIRCK, G. *et al.* **Damage process in heterogeneous materials analyzed by a lattice model simulation.** [S. l.: s. n.], 2016.

BRANCO, C. M.; CASTRO, P. M. S. T. de; FERNANDES, A. A. Fadiga de estruturas soldadas. [s. l.], 1999. Disponível em: Acesso em: 19 ago. 2022.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Geotechnique**, [s. l.], v. 29, n. 1, 1979.

DANIELS, H. E.; JEFFREYS, H. The statistical theory of the strength of bundles of threads. I. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, [s. l.], v. 183, n. 995, p. 405–435, 1945. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1945.0011>. Acesso em: 17 set. 2022.

DROR, R. O. *et al.* **Biomolecular simulation: A computational microscope for molecular biology.** [S. l.: s. n.], 2012.

FRIEDRICH, L. F. *et al.* Long-Range Correlations and Natural Time Series Analyses from Acoustic Emission Signals. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 4, 2022.

GROSSE, C. U.; OHTSU, Masayasu. **Acoustic emission testing: [basics for research, applications in civil engineering]**. [S. l.]: Springer, 2008. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Acoustic_Emission_Testing.html?id=HxsJ39eEg20C. Acesso em: 7 set. 2022.

HA, Y. D.; BOBARU, F. Characteristics of dynamic brittle fracture captured with peridynamics. **Engineering Fracture Mechanics**, [s. l.], v. 78, n. 6, 2011.

HANSEN, A.; HEMMER, P. C.; PRADHAN, S. The Fiber Bundle Model: Modeling Failure in Materials. [s. l.], p. 1–236, 2015.

HILLERBORG, A. **A model for fracture analysis.** [S. l.: s. n.], 1978. Disponível em: <https://portal.research.lu.se/en/publications/f3c732f8-6897-473e-8a73-846f9f14c749>. Acesso em: 18 set. 2022.

ITURRIOZ, I.; LACIDOGNA, G.; CARPINTERI, A. Acoustic emission detection in concrete specimens: Experimental analysis and lattice model simulations. **International Journal of Damage Mechanics**, [s. l.], v. 23, n. 3, 2014.

KOSTESKI, L. E. Aplicação do método dos elementos discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas. [s. l.], 2012.

KOSTESKI, L. E. *et al.* Size effect in heterogeneous materials analyzed through a lattice discrete element method approach. **Engineering Fracture Mechanics**, [s. l.], v. 232, 2020.

KOSTESKI, L. *et al.* The truss-like discrete element method in fracture and damage mechanics. **Engineering Computations (Swansea, Wales)**, [s. l.], v. 28, n. 6, p. 765–787, 2011. Disponível em: Acesso em: 4 set. 2022.

O’SULLIVAN, C. Particle-Based Discrete Element Modeling: Geomechanics Perspective. **International Journal of Geomechanics**, [s. l.], v. 11, n. 6, 2011.

PERILLA, J. R. *et al.* **Molecular dynamics simulations of large macromolecular complexes.** [S. l.: s. n.], 2015.

RIERA, J. D. Local effects in impact problems on concrete structures. *Em*: 1984, Brazil. **Proceedings of the Conference on Structural Analysis and Design of Nuclear Power Plants v 3.** Brazil: [s. n.], 1984. p. 412. Disponível em: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:17006854.

RIERA, J. D.; MIGUEL, L. F. F.; ITURRIOZ, I. Strength of brittle materials under high strain rates in DEM simulations. **CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences**, [s. l.], v. 82, n. 2, 2011.

ROSSI CABRAL, N. *et al.* An alternative bilinear peridynamic model to simulate the damage process in quasi-brittle materials. **Engineering Fracture Mechanics**, [s. l.], v. 216, 2019.

SILLING, S. A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, [s. l.], v. 48, n. 1, 2000.

TANZI, B. N. R. **Análise do processo de dano com a técnica de emissão acústica e métodos discretos**. Porto Alegre: [s. n.], 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/218617>. Acesso em: 19 ago. 2022.

TANZI, B. N. R. *et al.* Damage evolution analysis in a “spaghetti” bridge model using the acoustic emission technique. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 6, 2021.

TANZI, B. N. R. *et al.* **Damage Process study using the Discrete Element Method**. [S. l.: s. n.], 2022.

VAROTSOS, P. A.; SARLIS, N. v.; SKORDAS, E. S. Order parameter fluctuations in natural time and b-value variation before large earthquakes. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 11, 2012.