

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CAROLINE BREMM

**ANÁLISE NUMÉRICA DA CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE DANO EM
MATERIAIS COMPÓSITOS**

**Alegrete
2022**

CAROLINE BREMM

**ANÁLISE NUMÉRICA DA CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE DANO EM
MATERIAIS COMPÓSITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo Kostaski
Coorientador: Prof. Me. Leandro Ferreira Friedrich

**Alegrete
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

836	Bremm, Caroline Análise numérica da caracterização do processo de dano em materiais compósitos / Caroline Bremm. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2022. "Orientação: Luis Kostaski". 1. Resumo. 2. Introdução. 3. Fundamentação Teórica. 4. Metodologia. 5. Resultados. I. Título.
-----	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

CAROLINE BREMM

ANÁLISE NUMÉRICA DA CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE DANO EM MATERIAIS
COMPÓSITOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Dissertação defendida e aprovada em: 16, Março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostascki
Orientador
Unipampa

Prof. Dr. Thiago da Silveira
Unipampa

Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia
Unipampa

Assinado eletronicamente por **THIAGO DA SILVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em



24/03/2022, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/03/2022, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **VICENTE BERGAMINI PUGLIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/03/2022, às 19:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0764409** e o código CRC **BBCD6E20**.

RESUMO

Os materiais na engenharia estão em constante avanço tecnológico na busca por propriedades mecânicas que resistam a diferentes condições de carregamentos e ambientes. Para atender a uma parcela da demanda das necessidades atuais do mercado desenvolveu-se uma nova gama de materiais chamados de compósitos. Estes são compostos heterogêneos formados por diferentes materiais, ou duas ou mais fases do mesmo material, que buscam combinar as propriedades para se obter as melhores características físicas e mecânicas de ambos em um mesmo material. Assim, devido a sua grande aplicação, conhecer a forma que o dano se propaga nesses materiais ainda é um tema aberto na comunidade científica. Algumas alternativas para quantificar o dano e ajudar no projeto desses materiais são os métodos numéricos e os ensaios não destrutivos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo simular o comportamento de materiais compósitos reforçados com fibras de vidro distribuídas de forma unidirecionais e aleatórias utilizando a teoria Peridinâmica (PD). O comportamento global do material bem como a configuração de ruptura obtidas são comparados com resultados experimentais disponíveis. No compósito reforçado com fibras de vidro distribuídas de forma aleatória buscou-se simular também o ensaio de Emissão Acústica (EA), e comparar a atividade registrada com dados de EA experimentais. Os resultados mostram que a PD apresenta-se como uma boa ferramenta para o estudo de materiais compósitos capturando as características mecânicas e a forma de colapso dos mesmos. A análise dos dados de EA da amostra simulada segue os padrões observados no ensaio experimental, conseguindo identificar a eminência de falha.

Palavras chave: Materiais compósitos, Peridinâmica, Emissão acústica.

ABSTRACT

Materials in engineering are in constant technology advancing, looking for mechanical properties that satisfy different loading conditions and environments. To meet a portion of the demand of the current market needs, a new range of materials called composites was developed. These are heterogeneous formed by different materials, or two or more phases of the same material, which seek to combine the properties to obtain the best physical and mechanical characteristics of both in the same material. Thus, due to its wide application, knowing how the damage propagates in these materials is still an open topic in the scientific community. Some alternatives to quantify the damage and help in the design of these materials are the numerical methods and non-destructive testing. Thus, the present work aims to simulate the behavior of composite materials reinforced with glass fibers distributed in a unidirectional and random way using the classical Peridynamic (PD) theory. The global behavior of the material as well as the rupture configuration obtained are compared with available experimental results. In the composite reinforced with randomly distributed glass fibers, it is also sought to simulate the Acoustic Emission (AE) test, and to compare the activity recorded with experimental AE data. The results show that PD presents itself as a good tool for the study of composite materials, capturing the mechanical characteristics and the collapse shape. The analysis of the AE data of the simulated sample follows the patterns observed in the experimental test, managing to identify the imminence of failure.

Keywords: Composite materials, Peridynamics, Acoustic emission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicações dos materiais compósitos.	11
Figura 2 - Aplicações do método dos elementos finitos, a) componente mecânico e b) modelo de uma ponte.....	13
Figura 3 -Tipos de distribuição de fibras em materiais compósitos.	16
Figura 4 –Aplicações da peridinâmica a) placa de material laminado com furo b) placa reforçada com fibras c) concreto.	17
Figura 5 – a) Parâmetros utilizados na PD. b) Lei constitutiva uniaxial utilizada para simular o dano.	18
Figura 6 - Energias envolvidas durante o processo de dano de acordo com a lei bi linear.	20
Figura 7 – Modelos PD com: a) G_f constante, b) campo aleatório não correlacionado e, c) Campo aleatório correlacionado.....	21
Figura 8 – Criação do campo aleatório no modelo PD.	22
Figura 9 – Aplicações da emissão acústica.	23
Figura 10 – Princípios da detecção do sinal de emissão acústica.....	24
Figura 11 - Características de uma onda de EA.	25
Figura 12- Variação do <i>valor-b</i> em um processo de dano.....	26
Figura 13- Fabricação do compósito reforçado com fibras de vidro unidirecionais.	27
Figura 14- Dimensões do corpo de prova.....	28
Figura 15- Discretização do modelo PD e condições de contorno.....	29
Figura 16- Ensaio experimental de três pontos.	31
Figura 17- Ensaio experimental de três pontos.	31
Figura 18- Comparação do comportamento global em termos de Carga x CMOD para as amostras experimentais e numéricas.	33
Figura 19- Comparação das configurações de ruptura: a) experimental e b) PD.....	34
Figura 20- Comparação da resposta do modelo PD com controle “forçado” do CMOD.	35
Figura 21- Comparação do comportamento do controle do CMOD a) experimental e b) numérico.	36
Figura 22- Curvas carga x deslocamento.	37
Figura 23- Configuração de ruptura: a) experimental e b) numérico.....	38
Figura 24- Carga x Deslocamento experimental e numérico utilizando a lei uniaxial.....	39
Figura 24- Comparação da atividade de EA a) experimental e b) numérico.	40
Figura 25- Comparação do <i>valor-b</i> a) experimental e b) numérico.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas e parâmetros do modelo.	29
Tabela 2. Propriedades mecânicas e parâmetros do modelo.	32

LISTA DE ABREVIATURAS

EA – Emissão Acústica

END – Ensaio não Destrutivo

MED – Método dos Elementos Discretos

MEF – Método dos Elementos Finitos

PD – Peridinâmica

TEA – Técnica de Emissão Acústica

CMOD- *Crack Mouth Opening Displacement*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Materiais Compósitos	15
2.2	Peridinâmica.....	17
2.2.1	Lei de dano para materiais heterogêneos.	20
2.2.2	Geração de propriedades mecânicas aleatórias no modelo PD	21
2.3	Emissão acústica	23
2.3.1	Valor- <i>b</i>	25
3	METODOLOGIA	27
3.1	Aplicação I	27
3.1.1	Descrição do ensaio experimental.....	28
3.1.2	Descrição do modelo PD.....	29
3.2	Aplicação II.....	30
3.2.1	Descrição do ensaio experimental.....	30
3.2.2	Descrição do modelo PD.....	31
4	RESULTADOS	32
4.1	Aplicação I	32
4.1.1	Comportamento Global.....	33
4.1.2	Configurações de ruptura	34
4.1.3	Simulação do processo de carga e descarga.....	35
4.2	Aplicação II.....	36
4.2.1	Comportamento global.....	37
4.2.2	Configuração de ruptura.....	38
4.2.3	Atividade de EA	38
5	CONCLUSÕES	42
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
7	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Na evolução tecnológica constante em que o mundo vive, existe uma frequente necessidade de materiais com características cada vez mais específicas sobre as propriedades mecânicas como uma maior resistência a ruptura, tenacidade, corrosão, limite de fadiga, entre outras. Entre as diferentes classes de matérias que buscam atender a essa demanda estão os materiais compósitos. Esses materiais são compostos heterogêneos formados por diferentes materiais, ou duas ou mais fases do mesmo material. Segundo Zhou, *et al.* (2017) os materiais compósitos são amplamente utilizados na construção civil, na indústria aeroespacial e na indústria automotiva, pois possuem, além das ótimas propriedades mecânicas, baixo peso, o que contribui para o projeto de componentes e estruturas. A Figura 1 mostra as diferentes aplicações em que os materiais compósitos podem ser encontrados, como na estrutura de aviões, carros e motos de alta performance, na indústria militar, usinas eólicas, e bicicletas de última geração.

Figura 1 - Aplicações dos materiais compósitos.



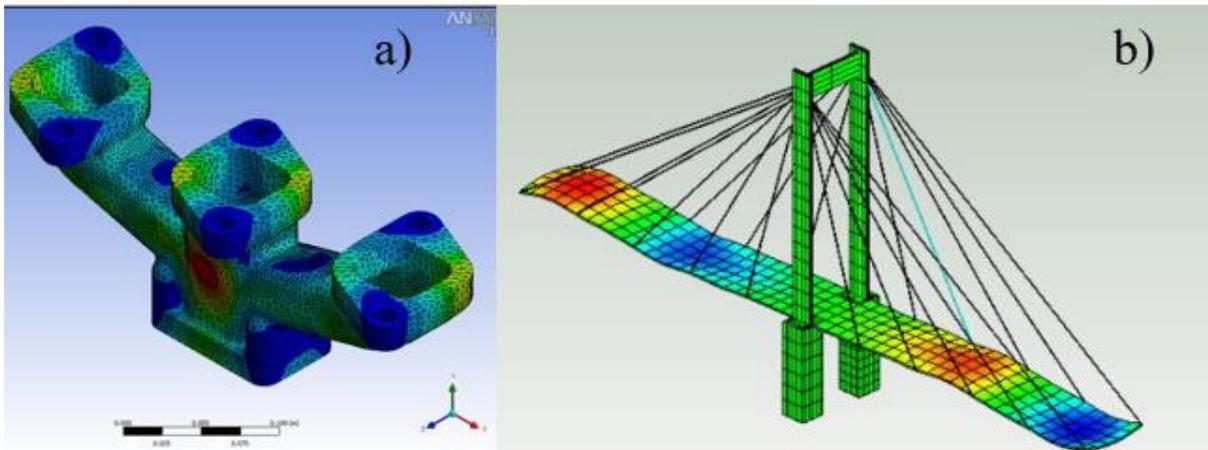
Fonte: Ventura, 2012.

Com o surgimento dos materiais compósitos e o aumento de sua utilização, foi necessário desenvolver formas para prever o comportamento mecânico, e representar o processo de dano nesses materiais para assim melhorar o projeto, e manutenção de máquinas e estruturas. Devido ao grande número de variáveis envolvidas no projeto como constituintes, frações volumétricas,

orientações das lâminas ou fibras, número de camadas ou comprimento das fibras, a abordagem experimental torna as pesquisas custosas, requerendo recursos financeiros elevados [VIGNOLI, 2020]. O experimento pode ser então utilizado apenas como uma prova do conceito baseado em modelos analíticos e numéricos. O método analítico mais simples para a previsão de algumas características do compósito é dada pela Lei das Misturas clássicas, que tem por objetivo prever uma propriedade do compósito, como a resistência à ruptura por exemplo, levando em consideração as características individuais dos materiais que compõem o compósito, inclusive, o processo de fabricação do produto [CASARIL *et al.*, 2007]. Os métodos numéricos utilizados para a previsão das características do material bem como para a estimativa da falha dos mesmos, podem ser divididos em duas grandes áreas, a primeira que possuem como base a mecânica do contínuo, como o método dos elementos finitos, e a segunda se refere ao método dos elementos discretos (MED).

A mecânica do contínuo estuda a deformação por meio das tensões internas do material utilizando equações diferenciais parciais que envolvem derivadas espaciais que consideram um meio contínuo, ou seja, o meio é coeso sem a presença de vazios ou trincas por exemplo (ORTEKUS; MADENCI, 2012). O Método dos elementos finitos (MEF) é baseado na teoria da mecânica do contínuo sendo utilizado na solução de vários problemas de engenharia como vibrações, escoamento de fluidos, troca de calor e análise de estruturas (incluindo compósitos), por exemplo. A Figura 2 mostra a aplicação do MEF no dimensionamento de pontes e componentes mecânicos, onde destacam-se em vermelho as regiões de maior tensão, e em azul as de menor tensão. Porém, o MEF utiliza derivadas parciais, quando o material possui descontinuidades, as derivadas são indefinidas o que faz com que não seja possível obter solução para esses casos. Assim o método clássico não consegue simular o processo de dano do material (SILLING, 2000). Uma forma de resolver esse problema é empregar o métodos dos elementos discretos (MED), em que a fratura e a fragmentação podem ser capturadas de forma espontânea sem o uso de critérios externos para isso. A peridinâmica (PD) clássica, desenvolvida por Silling 2000 é uma particularização do MED e pode ser utilizada para contornar a dificuldade de simular materiais que possuem descontinuidades, substituído as derivadas parciais por integrais. Como os materiais compósitos possuem vazios entre outros defeitos devido a composição do material, a peridinâmica se torna uma opção viável também pois permite inserir a heterogeneidade do material no modelo.

Figura 2 - Aplicações do método dos elementos finitos, a) componente mecânico e b) modelo de uma ponte.



Fonte: a) Mirlisenna, 2016 e b) Agua, 2015.

Outra forma de estudar a evolução do dano em materiais compósitos acontece através da realização de ensaios não destrutivos (END), não invasivos, como o ensaio de Emissão Acústica (EA). Esse ensaio é realizado por meio da captura das ondas elásticas produzidas por mudanças internas no material, como o surgimento de trincas, deslocações, reação química entre outros que ocorrem durante o processo de dano da estrutura estudada. Essas ondas são capturadas por sensores localizados na superfície da amostra e convertem as ondas em sinal elétrico. O ensaio de EA também pode ser simulado pela PD, tornando a teoria uma forma completa para análise da evolução do dano em materiais oferecendo diferentes formas de análise.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a evolução do processo de dano em materiais compósitos reforçados com fibras de vidro utilizando como método numérico a teoria peridinâmica. Entre os objetivos específicos estão:

- I. Caracterizar o processo de dano de compósitos reforçados com fibras de vidro unidirecionais por meio da peridinâmica verificando os resultados por meio da comparação com dados experimentais.
- II. Analisar o comportamento de compósitos reforçados com fibras de vidro distribuídas de forma aleatória por meio da PD. Comparar a resposta global do material e a forma de fratura com os resultados experimentais.

III. Avaliar o uso da PD na simulação do ensaio de EA, e comparar os resultados com os obtidos experimentalmente para compósitos reforçados com fibras de vidro distribuídas de forma aleatória.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

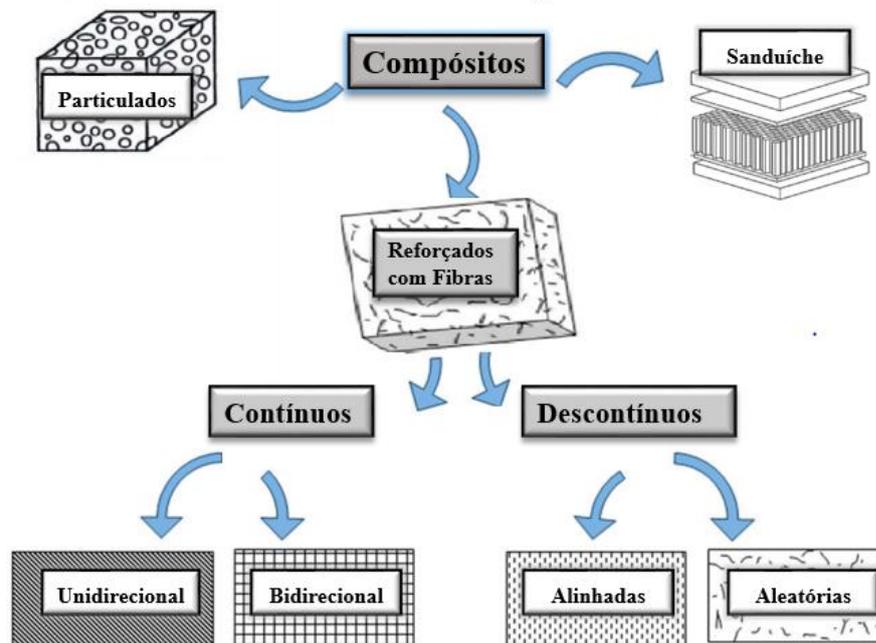
2.1 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos podem ser encontrados com frequência em nosso cotidiano pois fazem parte de componentes mecânicos, peças de aviões, partes de carros, entre outros. Esses materiais estão sendo estudados por especialistas e engenheiros a alguns anos, e conquistaram os mesmos, pois possuem entre suas características, uma ótima resistência mecânica, baixo peso, boa resistência a fadiga, boa resistência a corrosão, podendo se adaptar em diferentes meios (CALLISTER JR, 2005). Sendo assim, os materiais compósitos conseguem atender as necessidades específicas que seriam difíceis de serem alcançadas com materiais não compósitos, a um custo viável (CASARIL *et al.*, 2007).

Um material compósito busca combinar as propriedades de dois ou mais materiais para atender as necessidades desejadas. Existem dois tipos diferentes de materiais compósitos aqueles que são criados pela natureza, e aqueles que são feitos de forma artificial. Os compósitos criados pela natureza são por exemplo os ossos, que são compostos de colágeno e de apatita mineral, e a madeira composta por celulose e lignina (RAJAK *et al.*, 2019). Já os compósitos criados de forma artificial buscam atender as necessidade tecnologias modernas do mundo, onde os materiais convencionais já não dão conta (CASARIL *et al.* 2007). Essas propriedades específicas são criadas por meio da combinação de diferentes materiais. Um compósito pode possuir múltiplas fases com diferentes combinações de materiais, ou do mesmo material em fases diferentes.

A Figura 3 mostra um esquema de como os materiais compósitos podem ser divididos. Os compósitos podem ser formados de diferentes formas, a partir de estruturas do tipo sanduiche, até matrizes reforçadas com fibras ou particulados que podem ser distribuídas de diferentes formas e tamanhos dentro da matriz. Atualmente existe uma grande variedade de tipos de matrizes e reforços que formam diversos materiais, utilizados em diferentes áreas da engenharia. A matriz pode ser constituída por diferentes tipos de resinas, ou também por concreto dependendo de sua aplicação. As propriedades dos compósitos podem ser manipuladas também através do tipo de fibra, seus tamanhos e orientações. A Figura 3 mostra as formas que o reforço pode ser distribuído, as fibras podem ser contínuas ou descontínuas, distribuídas de forma aleatória, unidirecional ou multidirecional.

Figura 3 -Tipos de distribuição de fibras em materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de Rajak *et al.* 2019.

Os compósitos reforçados com partículas podem possuir partículas de diferentes formatos porém suas dimensões precisam ser parecidas, além disso, elas devem ser distribuídas de forma uniforme em todo o volume para que o compósito seja eficiente, atendendo aos esforços esperados. Um exemplo de material compósito particulado é o concreto, onde a matriz é formada pelo cimento, e a areia e o cascalho formam as partículas.

Os compósitos estruturais são classificados como laminados e do tipo sanduíche. Os compósitos laminares consistem em camadas de reforço empilhadas e cimentada juntas, possuindo uma resistência relativamente alta em várias direções no plano bidimensional. Os compósitos sanduíche são feitos para serem estruturas leves, que possuem boa rigidez e resistência pra suportarem forças de tração e compressão (CALLISTER JR, 2005).

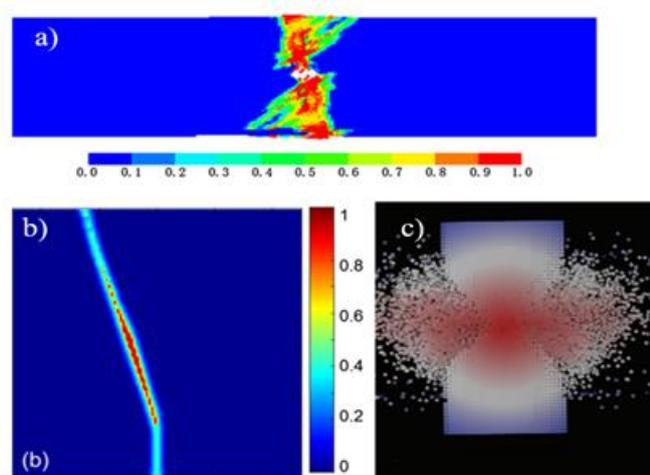
Os compósitos reforçados com fibras podem ser de fibras contínuas (longas) ou fibras descontínuas (curtas), onde as fibras podem ser de vidro, de carbono, aramida, naturais, entre outras. A forma como as partículas são distribuídas ao longo do volume influencia nas propriedades finais do material compósito formado. Os que possuem fibras contínuas possuem dois tipos de distribuição, uniforme e bidirecional, já os compósitos de fibras descontínuas podem possuir as fibras distribuídas de forma alinhada ou totalmente aleatória. As fibras conseguem gerar um aumento da resistência do material e proporcionar um boa relação peso/rigidez. Os

materiais que possuem esse tipo de reforço são aplicados em diferentes áreas da engenharia, como em partes de carroceira e do interior de automóveis, partes da carroceria e estrutura de aviões, na indústria naval, entre outras.

2.2 Peridinâmica

A peridinâmica é uma teoria não local da mecânica do contínuo, que busca minimizar as incoerências matemáticas ocasionadas pelas derivadas parciais substituindo as mesmas por integrais de força. A peridinâmica clássica, chamada de peridinâmica Baseada em Ligações (*bond-based*), foi criada por Silling 2000, e é capaz de representar a iniciação e propagação de trincas de maneira espontânea (SHEN; XIONG; GONG, 2020). Modificações implementadas nessa versão da PD desenvolvida por Cabral *et al.* (2019) permitem considerar a aleatoriedade das propriedades mecânicas, o que é fundamental para a simulação de materiais compósitos, foco de estudo desse trabalho (SCIPIONI, 2019). A PD já foi aplicada no estudo de diversos tipos de materiais com diferentes tipos de solicitações. Exemplos dessas aplicações em materiais heterogêneos são mostradas na Figura 4; onde na Figura 4a são apresentados casos da PD em uma placa de compósito laminado com furo submetida a tração; na Figura 4b, a PD foi aplicada em um material composto por fibras distribuídas de forma contínua com 15 ° de inclinação; por fim na Figura 4c é mostrado um bloco de concreto sob compressão uniaxial.

Figura 4 – Aplicações da peridinâmica a) placa de material laminado com furo b) placa reforçada com fibras c) concreto.



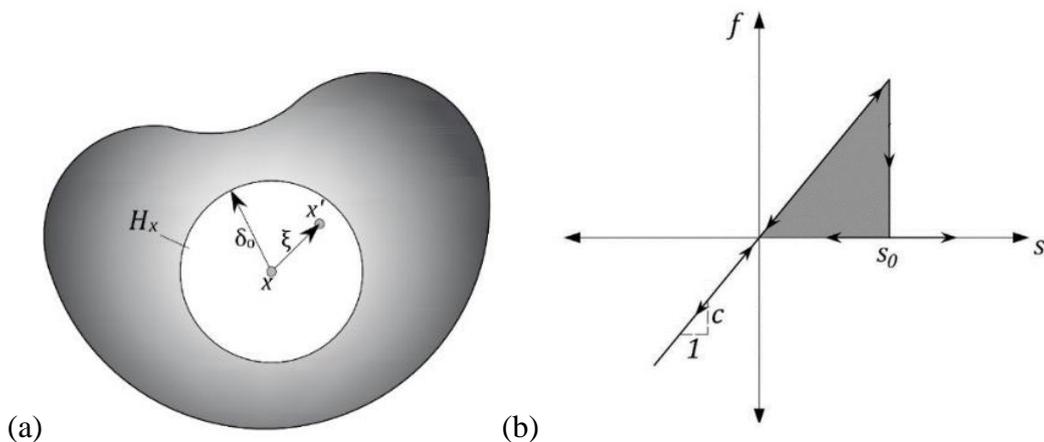
Fonte: a) Yi-le, Yin e Hai, 2013; b) Zhou *et al.*, 2017 c) Shen, Zhang e Huang, 2013.

A teoria Peridinâmica clássica, possui como referência a interação entre pontos materiais, x e x' mostrados na Figura 5a, onde essas interações ocorrem dentro de uma região limitada chamada de horizonte, δ_0 . A equação que descreve o movimento em qualquer momento t para o ponto material x pode ser expressa como mostrado na Equação (1), onde ρ é a densidade do material, u é o deslocamento e $b(x, t)$ é a força de corpo atuando no ponto x .

$$\rho(x)\ddot{u}(x, t) = \int_{H_x} f(x, x', u(x, t), u(x', t))dV_{x'}b(x, t) \quad (1)$$

A Figura 5a mostra o domínio que influência o comportamento do ponto x , delimitado pelo horizonte, δ_0 , e chamado de família de, H_x . Além disso, mostra a ligação existente entre os pontos materiais x e x' , distanciados por um valor ξ . A Figura 5b mostra como a força das ligações é descrita, ou seja, como ocorre a interação do ponto x com o ponto x' pela lei constitutiva uniaxial, onde w_0 é o trabalho necessário para quebrar um vínculo da ligação. A medida que o alongamento entre os dois pontos aumenta excedendo o alongamento crítico da ligação, s_0 , a mesma quebra cortando a interação entre os dois pontos e dá início ao processo de fratura (SHEN; XIONG; GONG, 2020).

Figura 5 – a) Parâmetros utilizados na PD. b) Lei constitutiva uniaxial utilizada para simular o dano.



Fonte: Silling, 2000.

A Equação 2 mostra a relação entre a força constitutiva f e o alongamento s da ligação, Figura 4b.

$$f(u' - u, x' - x) = cs \frac{y' - y}{|y' - y|} \quad (2)$$

onde $y = x + u$ é a posição do ponto do material na configuração deformada e y' é a posição na configuração indeformada. A Equação 3 define o módulo micro elástico c , onde E é o módulo de elasticidade do material. Sendo assim, para um material isotrópico linear, a constante de ligação é dada por:

$$c = \frac{12E}{\pi\delta_0^4} \quad (3)$$

A Equação 4 define o alongamento da ligação, s , expresso como:

$$s = \frac{|y' - y| - |x' - x|}{|x' - x|} \quad (4)$$

onde $x'-x$ é o vetor da posição relativa entre os pontos materiais. Pra que ocorra a quebra da ligação é necessário atingir uma energia por unidade de área, chamada de energia de fratura G_f , expressa pela Equação 5. Através de G_f , se pode determinar o alongamento crítico s_0 da ligação. Para um modelo 3D, os parâmetros se relacionam por:

$$G_f = \frac{\pi cs_0 \delta^5}{10} \rightarrow s_0 = \sqrt{\frac{5G_f}{6E\delta_0}} \quad (5)$$

A Equação 6 tem como finalidade computar o processo de dano, identificando o estado de conexão de cada ligação. Quando a ligação está totalmente intacta φ resulta em 0 quando a ligação for totalmente quebrada φ resulta em 1.

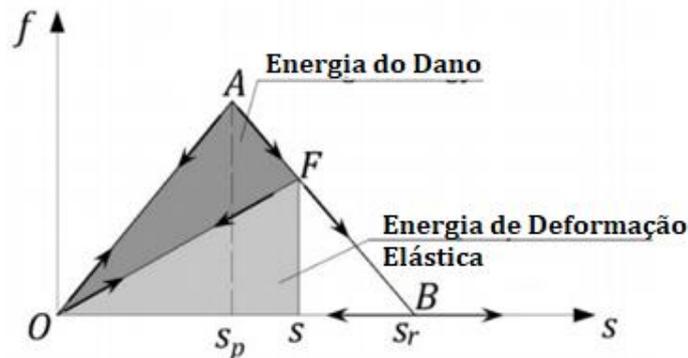
$$\vartheta(\eta, \xi, t) = \begin{cases} 1, s \leq s_0 \\ 0, s > s_0 \end{cases} \quad e \quad \varphi = 1 - \frac{\int_{H_x} \vartheta dV_\xi}{\int_{H_x} dV_\xi} \quad (6)$$

2.2.1 Lei de dano para materiais heterogêneos.

Para descrever materiais heterogêneos, é necessário modificar a forma como ocorre o comportamento das ligações PD, ilustrado na Figura 5b. A lei uniaxial que descreve a teoria clássica da PD foi então modificada por Cabral *et al.* (2019) para uma forma bilinear e é utilizada para descrever materiais heterogêneos pois é mais flexível e permite alterar o comportamento global do material.

A lei bilinear possui algumas mudanças na formulação da PD clássica, explicadas em detalhes em Cabral *et al.* (2019). A principal mudança é o conceito do horizonte (δ_0), definido como uma propriedade do material e não do modelo. Porém, como δ_0 pode ser um valor grande, é necessário adotar um horizonte computacional (δ'), para que seja possível realizar a simulação em um tempo aceitável. δ' pode ser adotado como conveniência enquanto metodologias para encontrar δ_0 são fornecidas em Cabral *et al.* (2019). A Figura 6 mostra o gráfico das energias envolvidas durante o processo de dano de acordo com a lei bilinear.

Figura 6 - Energias envolvidas durante o processo de dano de acordo com a lei bi linear.



Fonte: Adaptado Cabral *et al.*, 2019.

Na lei bilinear a condição crítica ocorre quando o estiramento, s , é igual ou maior que o estiramento de ruptura, s_r :

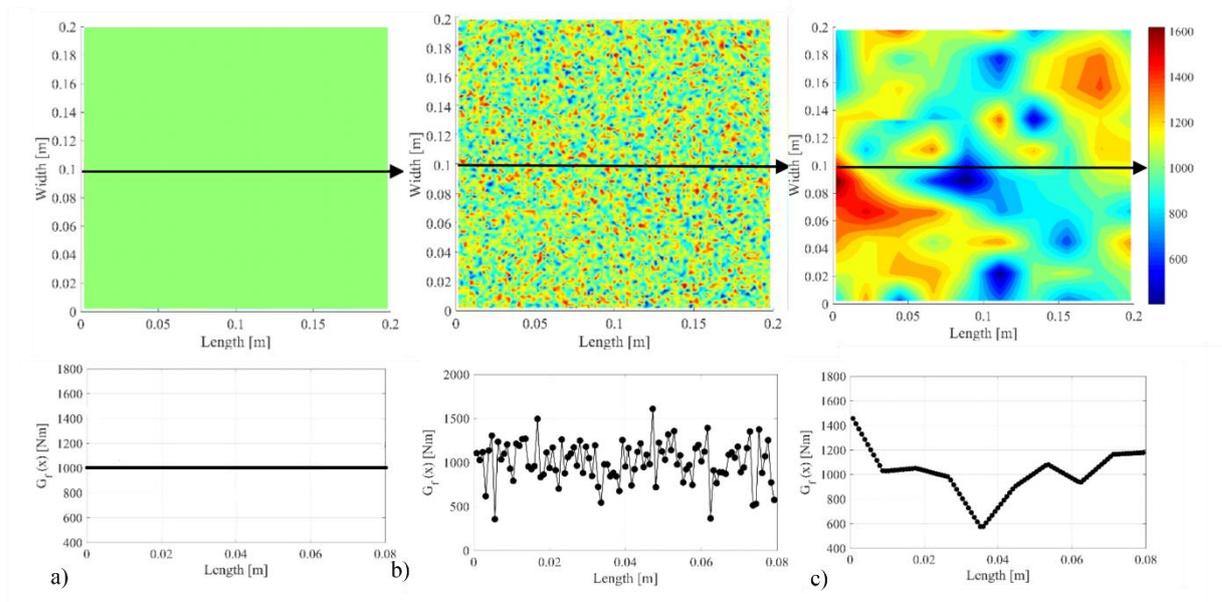
$$s_r = K_r s_p, \quad K_r = \frac{s_0 \delta_0}{s_p \delta'} \quad (7)$$

onde K_r faz a relação entre o trecho linear máximo, s_p , e o trecho descendente na lei bilinear s_r . O parâmetro s_p pode ser definido, quando os resultados experimentais estiverem disponíveis, como a deformação na qual a estrutura perde sua linearidade, por exemplo.

2.2.2 Geração de propriedades mecânicas aleatórias no modelo PD

Para simular como ocorre o dano nos materiais compósitos é necessário levar em conta sua heterogeneidade. De acordo com Callister (2008), os materiais possuem naturalmente defeitos intrínsecos que proporcionam uma variabilidade nas propriedades mecânicas constantes ao longo de sua geometria. Quando trata-se de materiais compósitos esta variabilidade fica acentuada pois são compostos de materiais com diferentes propriedades, ou seja, cada ponto é composto por diferentes propriedades que em conjunto definem o material. Uma forma de simular a heterogeneidade do mesmo é através da inserção de campos aleatórios correlacionados. Estes campos tem como finalidade realizar a distribuição das propriedades mecânicas do material, fazendo com que as propriedades variem de um ponto material a outro de acordo com um comprimento de correlação. A Figura 7 mostra um comparativo entre um modelo PD que possui G_f constante, outro que utiliza um campo aleatório não correlacionado e outro que utiliza campos aleatórios correlacionados. Nota-se que o campo aleatório correlacionado atenua as flutuações das propriedades, no caso, a energia de fratura do material, G_f .

Figura 7 – Modelos PD com: a) G_f constante, b) campo aleatório não correlacionado e, c) Campo aleatório correlacionado.

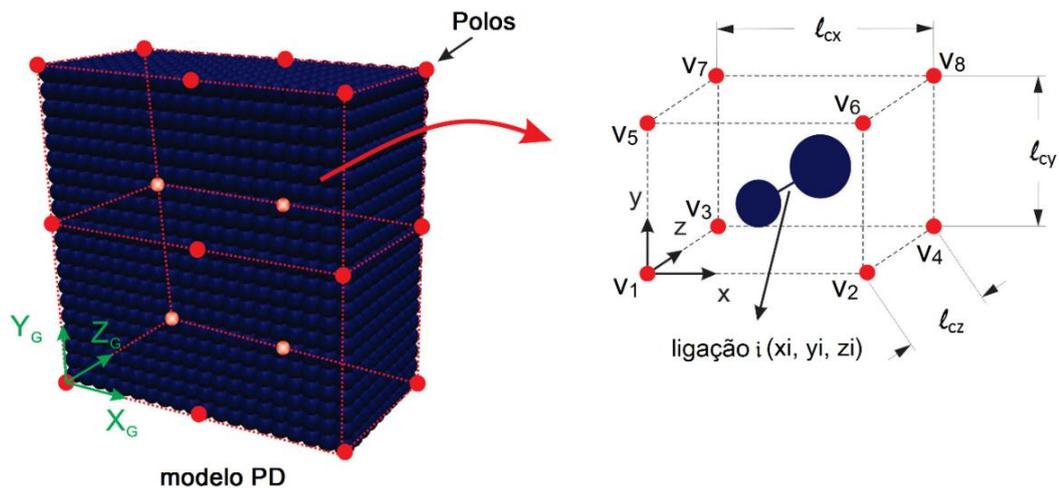


Fonte: Autor, 2022.

A metodologia utilizada para aplicar a aleatoriedade dos materiais compósitos é a mesma descrita por Friedrich *et al.* (2019) e Bremm *et al.* (2020), onde a geração de campo de tenacidade (G_f) aleatório não é atrelado a discretização utilizada no modelo PD. O volume do domínio é separado em pequenos prismas de lados l_{cx} , l_{cy} , l_{cz} , chamados de comprimentos de correlação, podendo estes valores serem diferentes nas três direções, ver Figura 8, em que X_G, Y_G, Z_G representam o eixo de coordenadas do sistema. No vértice de cada prisma se encontram os polos, que recebem um valor aleatório de G_f , energia de fratura, distribuídos de acordo com uma distribuição de probabilidades do tipo *Weibull*. Para cada ligação PD i dentro do prisma um valor de G_f é calculado a partir de uma interpolação tridimensional, $\varphi_v(x_i, y_i, z_i)$, Equação 8. A localização espacial da ligação é caracterizada pelas coordenadas do seu baricentro x_i, y_i, z_i .

$$\begin{aligned} \varphi_v(x_i, y_i, z_i) = & V_1 + \frac{V_2 + V_1}{l_{cx}} + \frac{V_3 - V_1}{l_{cy}} + \frac{V_5 - V_1}{l_{cz}} + \frac{V_4 - V_3 - V_2 + V_1}{l_{cx}l_{cy}} x_i y_i + \\ & \frac{V_6 - V_5 - V_3 + V_1}{l_{cx}l_{cz}} x_i z_i + \frac{V_7 - V_5 - V_3 + V_1}{l_{cx}l_{cz}} y_i z_i + \\ & \frac{V_8 - V_7 - V_6 + V_5 - V_4 + V_3 + V_2 + V_1}{l_{cx}l_{cy}l_{cz}} x_i y_i z_i \end{aligned} \quad (7)$$

Figura 8 – Criação do campo aleatório no modelo PD.



Fonte: Friedrich *et al.* 2019.

2.3 Emissão acústica

As máquinas, equipamentos e estruturas são submetidas constantemente a diferentes carregamentos, como cargas estáticas e fadiga, que ao atingirem um nível de tensão crítico dão início ao surgimento de trincas. Uma forma de monitorar se o material resiste aos carregamentos sem sofrer um dano significativo (ruptura), é por meio do ensaio de Emissão Acústica (EA). A EA é capaz de monitorar estruturas, máquinas e equipamentos de diferentes tamanhos, como no caso de estruturas e componentes mecânicos de grande porte, normalmente inacessíveis por outros métodos tornando a inspeção por outros métodos um desafio pelo qual a emissão acústica é capaz de superar e atender aos requisitos desejados. Isto é possível pois a mesma consegue realizar o monitoramento de forma global, sem ser invasiva, e detectar exatamente onde se localiza o dano. A Figura 9 mostra alguns exemplos de aplicações da técnica de emissão acústica, que pode ser realizada em pontes, guindastes, vasos de pressão e aviões.

Figura 9 – Aplicações da emissão acústica.



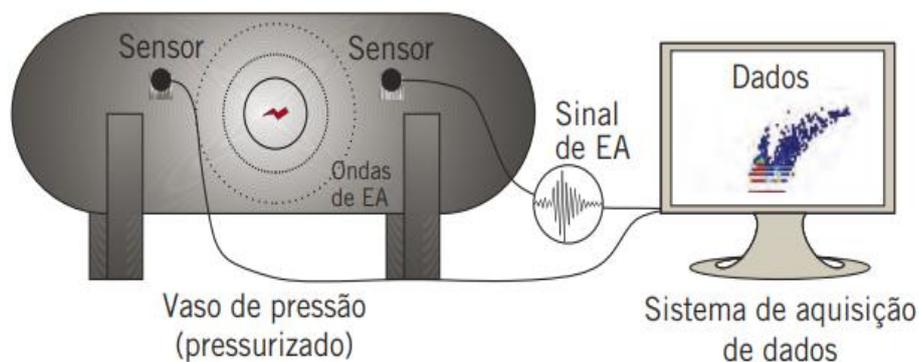
Fonte: a) Mistras, 2016; b) DB 2019; c) Mistras, 2016; d) Aero Magazine, 2019.

A EA é um Ensaio Não Destrutivo (END) que permite que a análise das condições internas de equipamentos e estruturas, para assegurar a resistência detectando trincas e afinamento da parede, evitando a quebra e possíveis desastres (NAKAMURA, 2016). Além disto a AE também é capaz de detectar desgastes parciais, vazamentos, processos corrosivos,

entre outros. Por ser um END a técnica de EA permite que grandes áreas de inspeção sejam analisadas, em tempo real, sem interromper o serviço, proporcionando assim uma diminuição do custo de manutenção das indústrias (ANDRADE, 2017).

O dano em estruturas ou equipamentos mecânicos ocorre quando a energia potencial não é dissipada na forma de energia potencial elástica, ou é superior a suportável. A energia potencial elástica, acumulada pelos campos de tensões, é liberada por todo o material gerando ondas mecânicas transientes que são captadas por sensores piezoelétricos localizados na superfície da amostra monitorada. Os sensores convertem as ondas elásticas captadas em ondas elétricas através do sistema de aquisição. A partir dos dados coletados é possível separar os eventos de EA que são responsáveis por trazerem informações da integridade da estrutura ou componente monitorado. Além disso, é possível também analisar a forma de onda (assunto tratado na próxima subseção), bem como, a localização da origem do dano, que é associado ao tempo que a onda leva para chegar aos sensores (AGGELIS, 2011). A Figura 10 mostra os princípios da detecção do sinal de emissão acústica, onde podemos observar um ensaio realizado em um vaso de pressão.

Figura 10 – Princípios da detecção do sinal de emissão acústica.

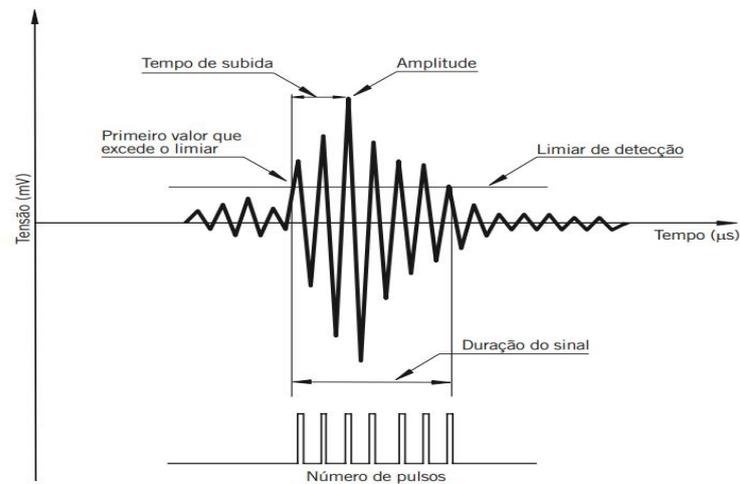


Fonte: Andrade, 2017.

Cada tipo de material possui características específicas, como por exemplo tenacidade, elasticidade, densidade, que influenciam na resposta dos sensores que podem captar diferentes eventos e em quantidades diferentes (ANDRADE, 2017). Em geral, as características predominantes nos eventos são: tempo de subida (RT), amplitude (A), duração do sinal (DUR) e número de pulsos (CONT). Essas características são definidas a partir de uma linha limite,

chamada de *Threshold*, quando o sinal ultrapassa esta linha limite de amplitude um evento é considerado, como mostrado no exemplo da Figura 11. Nem todos os pulsos captados pelos sensores podem ser considerados eventos pois o ruído e perturbações que ocorrem durante a captação do sinal é inerente aos ensaios de emissão acústica (AGUIAR, 2004). Assim, o limiar de detecção tem por objetivo descartar os eventos que estão abaixo da linha de frequência estabelecida.

Figura 11 - Características de uma onda de EA.



Fonte: Andrade, 2017.

2.3.1 Valor-*b*

O valor-*b* é conhecido por ser aplicado na previsão de possíveis terremotos, reconhecido como coeficiente de Gutenberg-Richter (1958). Esse parâmetro realiza uma análise estatística da distribuição de amplitude dos eventos. O valor-*b* muda ao longo da propagação do dano, pois no início do ensaio é comum os eventos possuírem uma amplitude menor, diferentemente do fim, onde os eventos possuem grande amplitude. A Equação 8 mostra como é calculada a magnitude do evento, *m*, utilizada para caracterizar um sinal elétrico, através do logaritmo da amplitude *A*.

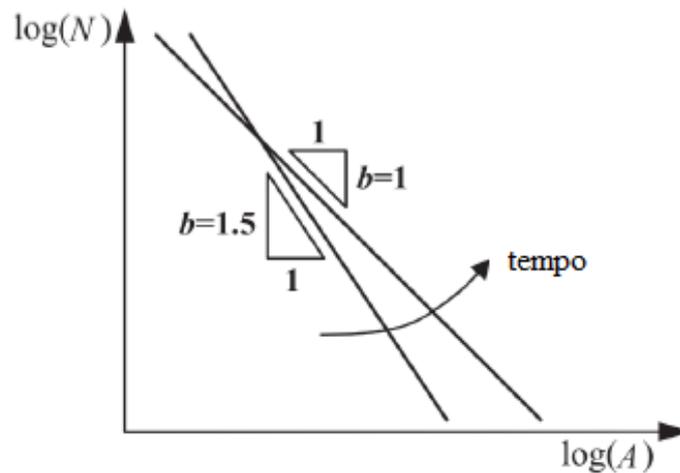
$$m = \log A \quad (8)$$

Substituindo a Equação 8 na Equação 9 é possível determinar o valor-*b*, onde *N* representa o número de eventos acumulados, *m* é a magnitude do evento de EA, *α* é uma constante que caracteriza o comportamento do modelo, e *b* é o valor-*b*.

$$\log N (\geq) = \alpha - bm \quad (9)$$

A relação mostrada na Equação 9, pode ser visualizada na Figura 12. No início do ensaio de emissão acústica é comum detectar inúmeras microfissuras que são registradas como uma amplitude menor no sinal de EA. Como a amplitude está relacionada com o valor- b , este aumenta sua inclinação, em geral registrando valores de 1.5 ou maiores. Quando uma macro fissura aparece na amostra, um menor número de eventos são registrados porém, os eventos tem uma amplitude maior, diminuindo portanto o valor- b para valores próximos a 1. Sendo assim, quando o valor- b tende a reduzir chegando próximo de 1 pode indicar que a falha do material está próxima (OLIVEIRA, 2014). É importante destacar que para diferentes materiais e tipos de ensaios os valores de b podem ser diferentes do intervalo [1.5-1] tipicamente encontrados para materiais heterogêneos como concreto, rochas entre outros (Friedrich *et al.*, 2020).

Figura 12- Variação do *valor-b* em um processo de dano.



Fonte: Adaptado de Carpinteri *et al.* 2009.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho a investigação do dano em materiais compósitos foi realizada em duas aplicações. A primeira aplicação utiliza a teoria peridinâmica para simular uma viga entalhada de um material compósito reforçado com fibras de vidro distribuídas de forma unidirecional. A segunda aplicação trata-se da análise de uma placa de material compósito reforçada com fibras de vidro distribuídas de forma aleatória. Além disso, nesta segunda aplicação a placa é monitorada através da simulação do ensaio de emissão acústica. Em ambas as aplicações os resultados numéricos são comparados com dados experimentais. A seguir as aplicações são descritas em detalhes.

3.1 Aplicação I

Para esta aplicação foram utilizados dados experimentais fornecidos pela Universidade de Parma-Itália de ensaios de três pontos em corpos de prova de um compósito formado por 60% poliamida PA6, que constitui a matriz, e 39% de fibras de vidro longas, como reforço. O compósito é formado de camadas, que possuem mesma orientação e propriedades mecânicas, reforçado com fibras longas e alinhadas de forma unidirecional. O fato das fibras serem alinhadas em uma direção proporciona ao material melhores propriedades mecânicas nessa direção. A Figura 13 mostra como o compósito é formado através da junção da sobreposições de camadas.

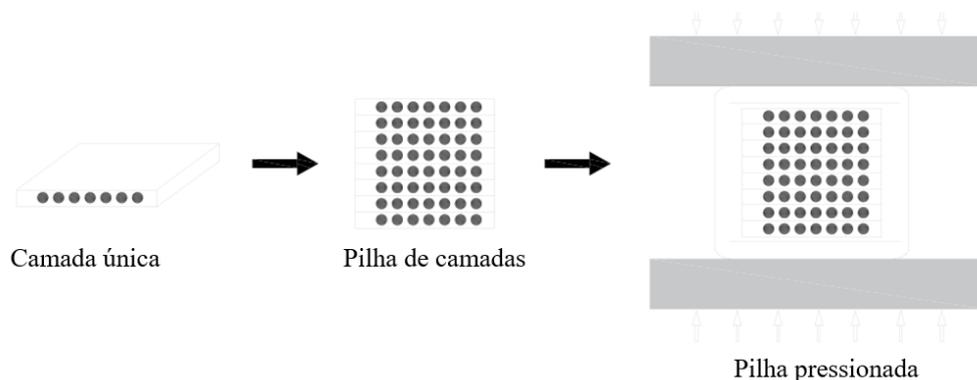


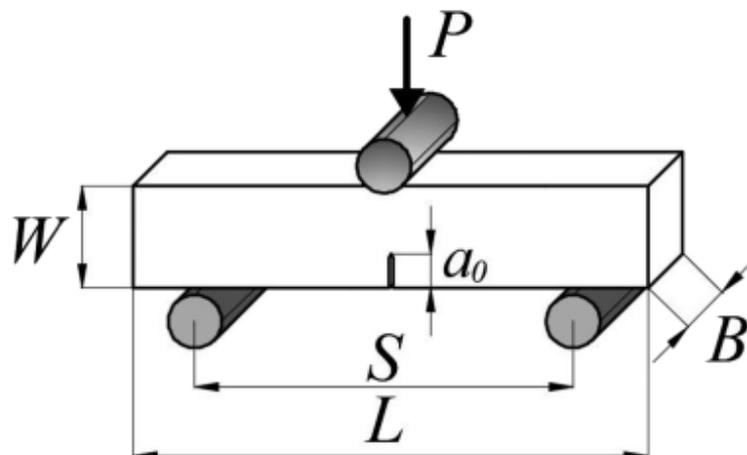
Figura 13- Fabricação do compósito reforçado com fibras de vidro unidirecionais.

As fibras possuem um diâmetro de aproximadamente $17 \mu\text{m}$, uma densidade de $2,54 \text{ g/cm}^3$, módulo de elasticidade de 73 GPa , além de uma resistência a tração de 2400 MPa . A matriz possui uma densidade de $1,13 \text{ g/cm}^3$, um módulo de elasticidade de $3,3 \text{ GPa}$, além de uma resistência ao cisalhamento de $75,8 \text{ Mpa}$.

3.1.1 Descrição do ensaio experimental

O ensaio realizado teve por objetivo calcular tenacidade a fratura do material compósito utilizando uma metodologia modificada do *Two-Parameter Fracture Model* (TPM), chamada *Modified Two-Parameter Fracture Model* (MTPM) proposta por Vantadori (2016) e Carpinteri (2017). A geometria do corpo de prova é mostrada na Figura 14 onde $W=20 \text{ mm}$, $B=10 \text{ mm}$, $S=80 \text{ mm}$, $L=100 \text{ mm}$ e $a_0=7 \text{ mm}$ (largura do entalhe é igual a 4 mm). O ensaio consiste basicamente em: inicialmente aplicar uma carga com controle da velocidade de deslocamento do pistão, para manter a velocidade da abertura da boca da trinca (do inglês *Crack Mouth Opening Displacement* - CMOD) constante e assim evitar uma propagação instável da fissura; O corpo de prova é carregado até o valor de carga máxima (P_{max}), e logo o valor da carga começa a diminuir pelo fato da propagação da trinca iniciar. Quando o valor da carga atinge o patamar de 95% de P_{max} , o corpo de prova começa a ser descarregado até que a carga seja igual a zero e, em seguida, é carregado novamente até o material falhar completamente. Cinco amostras foram ensaiadas na campanha experimental.

Figura 14- Dimensões do corpo de prova.

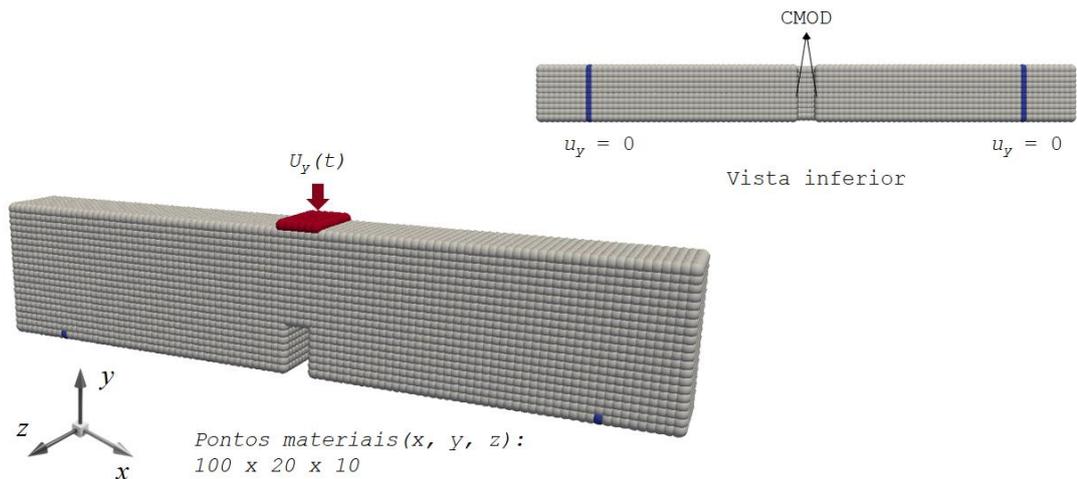


Fonte: Vantadori *et al.*, 2020.

3.1.2 Descrição do modelo PD

O modelo 3D da PD consiste em $100 \times 20 \times 10$ pontos materiais. Um espaçamento entre pontos igual a 1×10^{-3} m foi utilizado. A Figura 15 mostra a discretização do modelo PD e as condições de contorno aplicadas: os pontos em azul indicam restrição do movimento na direção y e os pontos em vermelho os locais de aplicação do deslocamento prescrito na direção $-y$. É importante mencionar que não há controle de carga como acontece no ensaio experimental descrito anteriormente. A abertura da boca da trinca, CMOD, é realizada medindo a distância entre dois pontos de cada lado oposto no entalhe, veja o detalhe na Figura 15.

Figura 15- Discretização do modelo PD e condições de contorno.



Fonte: Autor 2022.

As propriedades do material, modelo e parâmetros da lei bilinear são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas e parâmetros do modelo.

E^*	ν	ρ^*	G_f^*	dx	s_p	K_r	δ'	δ_0
[GPa]		[kg/m ³]	[N/m]	[m]			[m]	[m]
13,3	0,25	1670	98418	0,001	$7,83(10)^{-2}$	3	$3,015dx$	0,045

*Vantadori *et al.*, 2020.

Para aplicar o campo aleatório, um coeficiente de variação igual a 150% foi definido, e os comprimentos de correlação são $l_{cx}=0,02\text{ m}$ e $l_{cy}=l_{cz}=0,0005\text{ m}$. A escolha dos comprimentos de correlação teve como objetivo simular a presença das fibras no modelo. Outras variações foram analisadas mas a apresentada foi a que apresentou melhores resultados.

Assim como no experimento, 5 amostras foram simuladas na PD alterando a semente de geração do campo aleatório.

Os resultados da PD serão comparados em termos do comportamento global de Carga x CMOD e também em termos da configuração de ruptura.

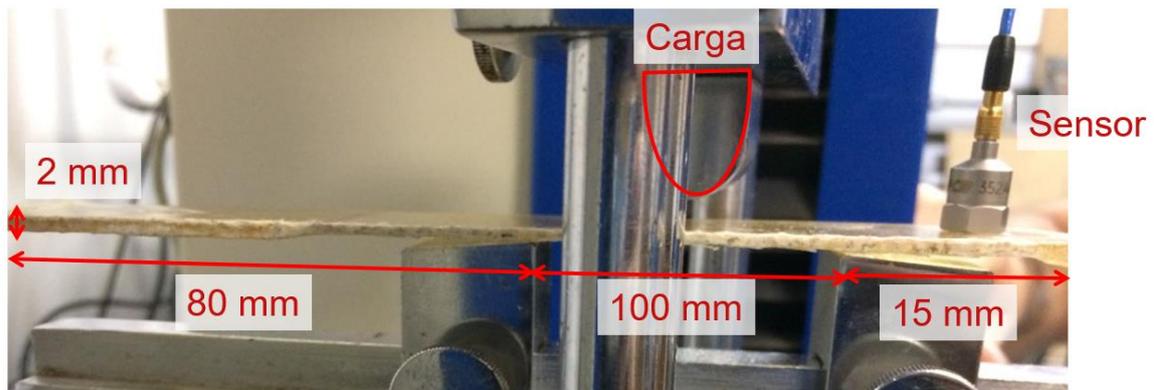
3.2 Aplicação II

Os dados experimentais utilizados para a Aplicação II foram obtidos junto a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) de um compósito reforçado com fibras de vidro. Esse material é fabricado por meio de laminação manual e possui uma matriz de resina de poliéster com fibras distribuídas de forma aleatória em seu interior.

3.2.1 Descrição do ensaio experimental

O ensaio teve por objetivo o monitoramento da amostra de compósito por meio da técnica de emissão acústica. Apenas uma amostra do compósito reforçado com fibras de vidro distribuídas de forma aleatórias foi ensaiada. O experimento constituiu de um ensaio experimental de flexão de três pontos. A geometria da amostra e a configuração do ensaio é mostrado na Figura 16 (largura da amostra igual a 40 mm). Para o ensaio de EA um acelerômetro modelo PCB 352A60 que consegue captar frequências até 20 kHz foi posicionado em uma das extremidades da amostra (Figura 16). O ensaio foi realizado com uma taxa de deslocamento de 0,1 mm/s.

Figura 16- Ensaio experimental de três pontos.

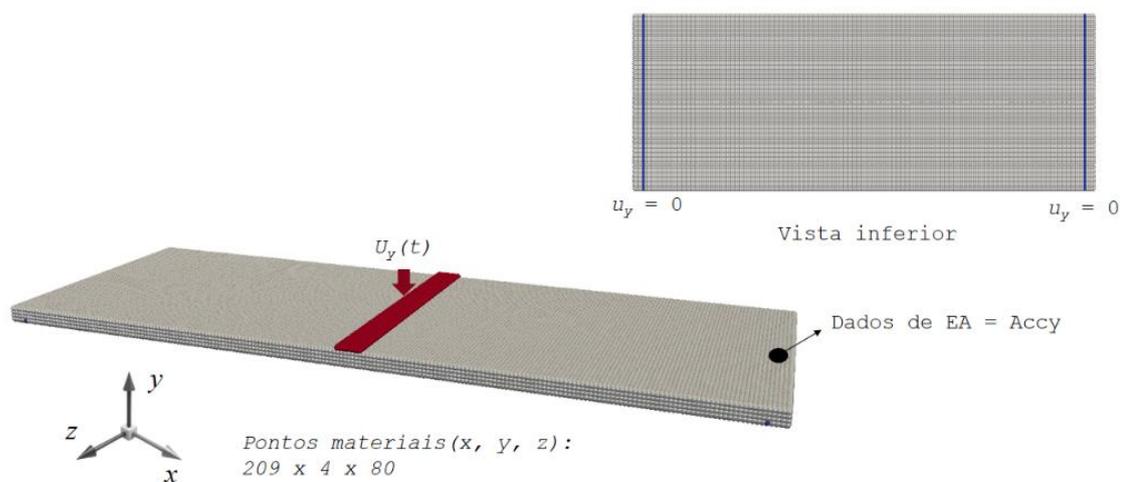


Fonte: Adaptado de Friedrich *et al.*, 2022.

3.2.2 Descrição do modelo PD

O modelo 3D da PD consiste em $209 \times 4 \times 80$ pontos materiais. Um espaçamento entre pontos igual a 5×10^{-4} m foi utilizado. A Figura 17 mostra a discretização do modelo PD e as condições de contorno aplicadas: os pontos em azul indicam restrição do movimento na direção y e o pontos em vermelho os locais de aplicação do deslocamento prescrito na direção $-y$. O ensaio de emissão acústica foi simulado na PD capturando as acelerações perpendiculares a superfície do ponto material selecionado, como mostrado na Figura 17.

Figura 17- Discretização do modelo PD e condições de contorno.



Fonte: Autor 2022.

As propriedades do material, modelo e parâmetros da lei bilinear são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas e parâmetros do modelo.

E^* [GPa]	ν	ρ^* [kg / m ³]	G_f^{**} [N / m]	dx [m]	s_p	K_r	δ' [m]	δ_0 [m]
74,5	0,25	1450	25000	0,0005	$0,308(10)^{-2}$	15	$3,015dx$	0,011

*Friedrich *et al.*, 2020, **Estimado.

Para aplicar o campo aleatório, um coeficiente de variação igual a 200% foi definido, e os comprimentos de correlação são $lc_x = 0,021 \text{ m}$ e $lc_y = 0,0065 \text{ m}$ e $lc_z = 0,002 \text{ m}$. Algumas análises foram realizadas para diferentes comprimentos de correlação, porém a apresentada foi a que mostrou os melhores resultados.

Assim como no experimento, apenas 1 amostra foi simulada na PD.

Os resultados da PD serão comparados em termos do comportamento global de Carga x Deslocamento e também em termos da configuração da ruptura. Os dados de EA analisados a partir das simulações serão comparados com os dados experimentais em termos da atividade de EA (número de eventos, energia de EA) e o valor- b .

4 RESULTADOS

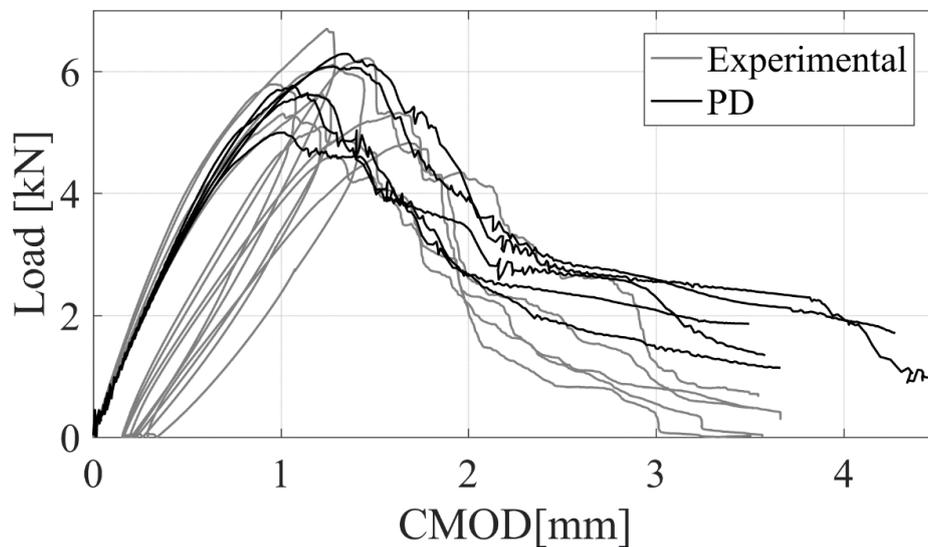
4.1 Aplicação I

Simular corretamente o comportamento de compósitos reforçados com fibras é complexo em termos da calibração das variáveis do modelo (discretização, material, tempo de simulação) e assim adicionar a isso um processo de controle do CMOD tornaria ainda mais difícil essa tarefa. Portanto, primeiramente foi realizada uma análise global do comportamento do material através da simulação do ensaio, sem realizar o processo de descarga do material ao atingir 95% da carga máxima. Em seguida foi realizada uma única simulação de carga e descarga para fins de aprimoramento das análises.

4.1.1 Comportamento Global

Após criar o modelo PD descrito na seção 3.1.2 foram realizadas cinco simulações para obter as curvas de Carga *versus* CMOD. Os resultados obtidos por meio da PD são mostrados na Figura 18, juntamente com as curvas experimentais. A partir da Figura 18 é possível observar que:

Figura 18- Comparação do comportamento global em termos de Carga x CMOD para as amostras experimentais e numéricas.



Fonte: Autor 2022.

- Os valores de carga máxima da PD estão dentro do intervalo de valores do experimentais. A média da carga obtida pela PD foi de 6,06 kN, enquanto que no experimental foi de 5,92 kN. Um erro de 2,43% em relação ao experimental mostra a boa aderência entre os dados numéricos e experimentais.
- O comportamento numérico pós pico consegue representar em parte a ação das fibras, fazendo com que a curva caia lentamente com pequenas oscilações que retratam o rompimento gradual das fibras. Porém nota-se também que as curvas da PD se prolongam mais que as experimentais. Essa pequena diferença pode ser explicada pelo controle do CMOD usado no experimental e não presente nas

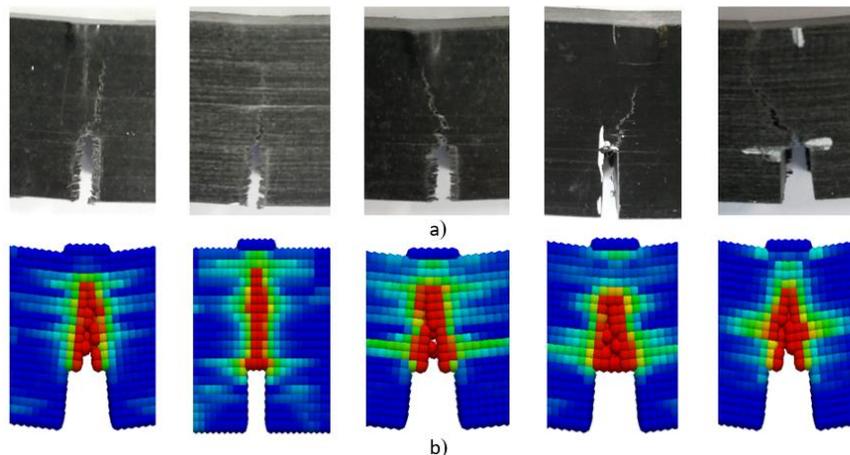
simulações PD. Em trabalhos futuros é possível aproximar ainda mais a resposta da PD implementando tal controle.

- O campo aleatório cumpre eficientemente a função de distribuir as propriedades mecânicas do material representando o comportamento de compósitos com fibras orientadas.

4.1.2 Configurações de ruptura

A Figura 19 mostra um comparativo das formas de ruptura encontradas por meio da PD com as obtidas pelo ensaio experimental.

Figura 19- Comparação das configurações de ruptura: a) experimental e b) PD.



Fonte: Autor 2022.

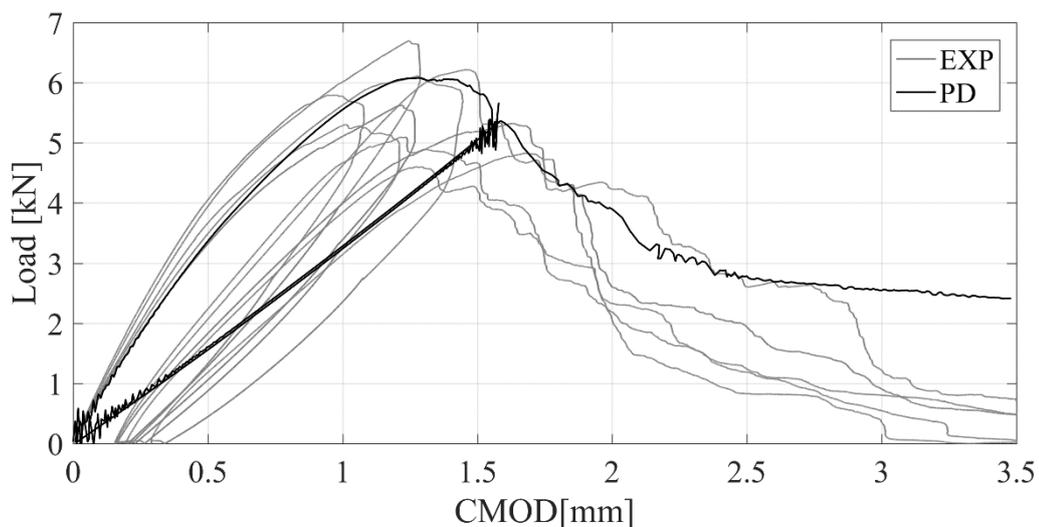
Pode-se observar que as formas de ruptura obtidas pela PD são similares aquelas registradas no experimento, com uma propagação da trinca partindo do entalhe e indo em direção a parte superior da amostra de forma mais ou menos reta, ou seja, modo I de abertura de trinca. Algumas formas de ruptura não foram capturadas pelo modelo PD, como trincas propagando-se em modo misto I+II, por exemplo. Para melhorar esse ponto, uma discretização menor pode ser utilizada, bem como avaliar as condições de contorno do modelo, como o tamanho da região de aplicação do deslocamento prescrito (ver Figura 15).

4.1.3 Simulação do processo de carga e descarga

Para avaliar a atuação da PD no processo de carga e descarga da amostra, uma abordagem inicial ao controle de CMOD foi realizada. Trata-se de um controle “forçado” pois identifica-se manualmente os instantes de tempo em que o processo de descarga e carga devem acontecer ao longo da simulação. Em um controle real a variável de interesse, no caso deste problema o CMOD, é avaliada a cada passo de tempo e atualizada baseada no erro relativo em relação a um comportamento desejado (uma reta, por exemplo). Sendo assim o comportamento de carga e descarga da amostra foi realizado para apenas uma das simulações.

A Figura 20 mostra o comparativo entre os resultados numérico e experimental com controle de CMOD

Figura 20- Comparação da resposta do modelo PD com controle “forçado” do CMOD.

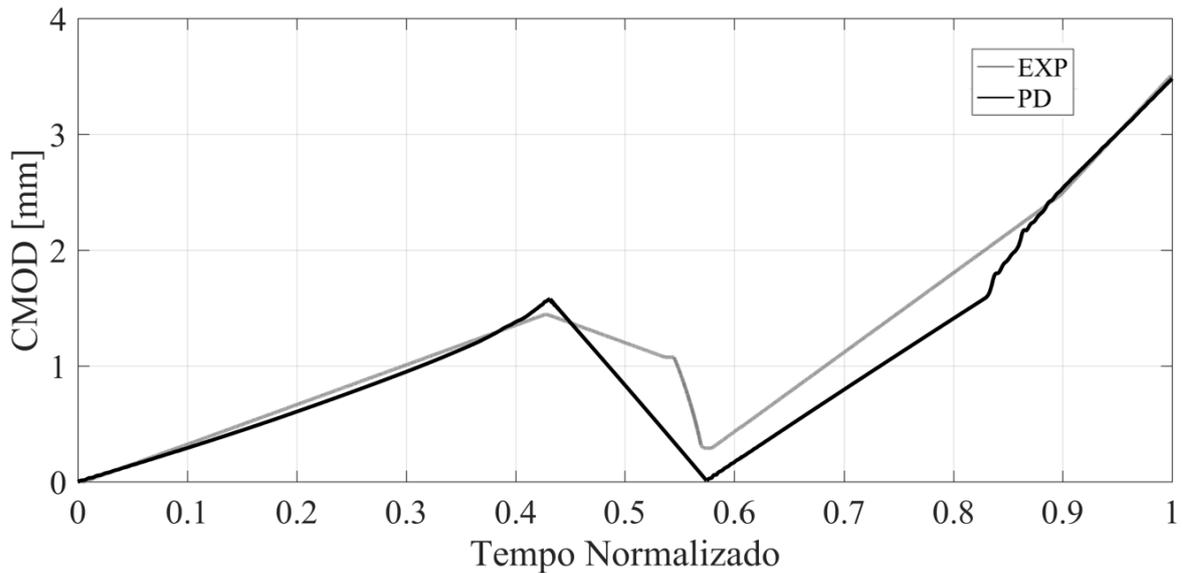


Fonte: Autor 2022.

Nota-se inicialmente que, assim como os resultados apresentados anteriormente (Figura 18), até o pico máximo o comportamento das curvas são próximos. No ponto de descarregamento, em 95% de P_{max} , há a presença de uma pequena vibração na resposta devido a mudança brusca de sentido do deslocamento prescrito (estava para baixo e mudou para cima). Esse mesmo comportamento é registrado no momento em que o sentido do deslocamento muda novamente no ponto próximo de zero. Nota-se que devido a aplicação da lei bilinear (Figura 6) a curva de descarregamento volta para a origem. Esse comportamento pode ser alterado mudando também o comportamento da lei bilinear.

A Figura 21 mostra o comparativo do comportamento do CMOD experimental e numérico apresentados na Figura 20. Os passos de tempo são o número de dados em cada caso e não podem ser comparados diretamente, sendo apenas usados para representar a linha do tempo.

Figura 21- Comparação do comportamento do controle do CMOD a) experimental e b) numérico.



Fonte: Autor 2022.

Como esperado o controle do experimental é preciso, com regiões de carga e descarga bem definidas. Para que o teste experimental não demore muito, no processo de recarregamento a velocidade de abertura do CMOD é aumentada. Já na resposta do modelo PD, principalmente na região de recarregamento, há uma inclinação levemente maior, mas não suficiente para que o comportamento global pós pico se assemelhe ao experimento. Isso explica em parte porque nos resultados pós pico apresentados na Figura 18 não obteve-se uma melhor aderência entre os dados experimentais e numéricos.

4.2 Aplicação II

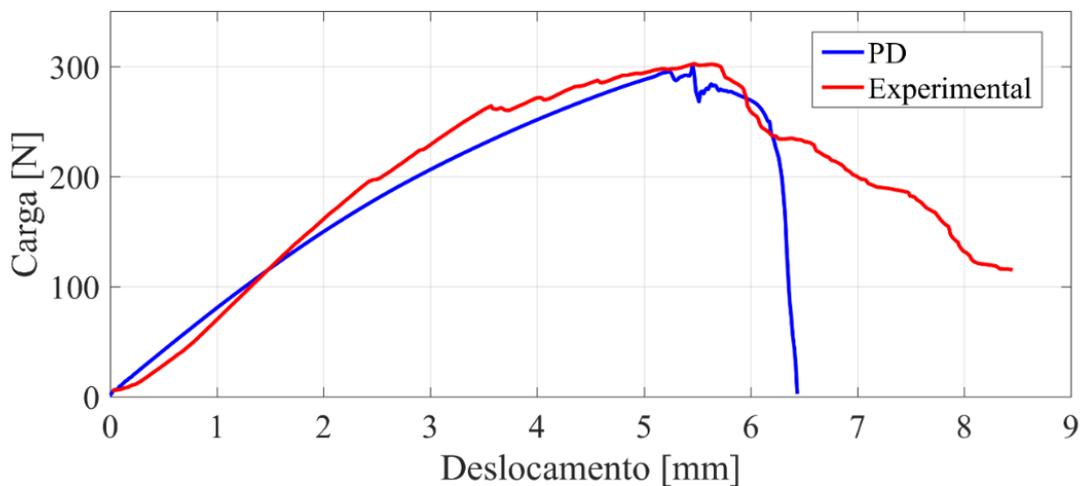
Para conseguir calibrar o modelo PD, inúmeros testes alterando os parâmetros da lei bilinear e do campo aleatório foram realizados para obter uma resposta global similar ao experimental. O tamanho do modelo (número de pontos materiais) era significativamente maior

que a Aplicação I e a simulação teve que ser realizada a uma velocidade maior que a necessária para capturar eventos de EA de forma clara. Além disso, a lei bilinear suaviza a ruptura das ligações não gerando movimento interno suficiente para mudar a aceleração no ponto de captura de EA (ver Figura 25). Sendo assim foram realizadas duas simulações diferentes, uma utilizando a lei bilinear para comparação do comportamento global e configuração de ruptura, e outra que utiliza a lei uniaxial (Figura 22) para análise dos eventos de EA, isso porque a ruptura abrupta da lei uniaxial permite capturar os eventos de forma clara.

4.2.1 Comportamento global

A Figura 22 mostra o comparativo entre os resultados experimentais e numéricos em termos de Carga x Deslocamento. Comparando as curvas é possível notar que ambas ficaram próximas uma da outra. O pico de carga da simulação foi de 295,5 N e o pico de carga do ensaio experimental foi de 302,5 N, ou seja, uma diferença de apenas 2,3% entre os dados. Nota-se que o comportamento pós pico registrado na simulação não consegue capturar o mesmo comportamento experimental, ou seja, uma queda mais suave, e sim rompe abruptamente. Acredita-se que essa diferença pode estar atrelada ao menor número de pontos materiais na direção da altura, apenas 4, e assim não há barreiras o suficiente para impedir a propagação instável da trinca.

Figura 22- Curvas carga x deslocamento.

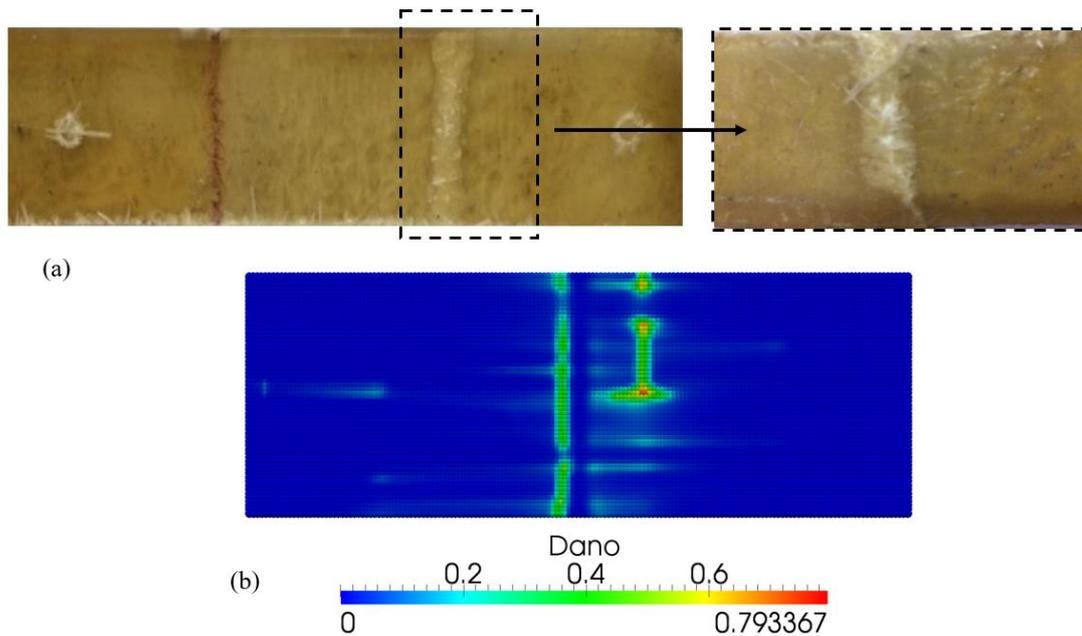


Fonte: Autor 2022.

4.2.2 Configuração de ruptura

A Figura 23 apresenta o comparativo entre os padrões de ruptura numérico e experimental.

Figura 23- Configuração de ruptura: a) experimental e b) numérico.



Fonte: Autor 2022.

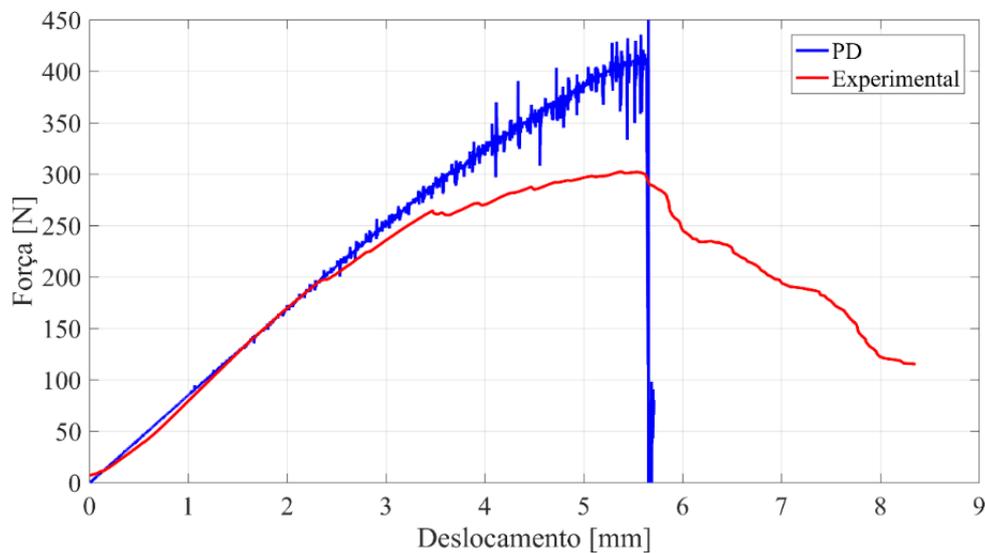
Em ambos os casos, a ruptura acontece logo ao lado do ponto de aplicação da carga, com um dano mais distribuído registrado pela PD, enquanto que no experimental o local da fratura é mais concentrado.

4.2.3 Atividade de EA

Para extrair os dados de EA por meio da PD, um segundo ensaio foi realizado utilizando a lei uniaxial. Foram utilizadas as mesmas propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 2, porém o valor de s_0 , da lei uniaxial, foi definido igual a s_p . Os parâmetros do campo aleatório também são os mesmos. Vale destacar que os resultados apresentados a seguir utilizando essas configurações foram publicados no XXXVII *Congreso Argentino de Mecánica Computacional* (MECOM 2021).

A Figura 24 mostra a curva de carga obtida por meio da simulação juntamente com os dados experimentais. É possível destacar que há uma grande flutuação da carga do meio para o final da simulação. Essa flutuação pode ter sido ocasionada devido a uma velocidade alta aplicada ao deslocamento prescrito. Nota-se também que o pico de carga foi excedido 33,33 %, isso devido a utilização da lei uniaxial que não suaviza a resposta global. Da mesma forma que o resultado utilizando a lei bilinear, não foi possível obter a suavidade na queda da curva pós pico da simulação como ocorrida no ensaio experimental.

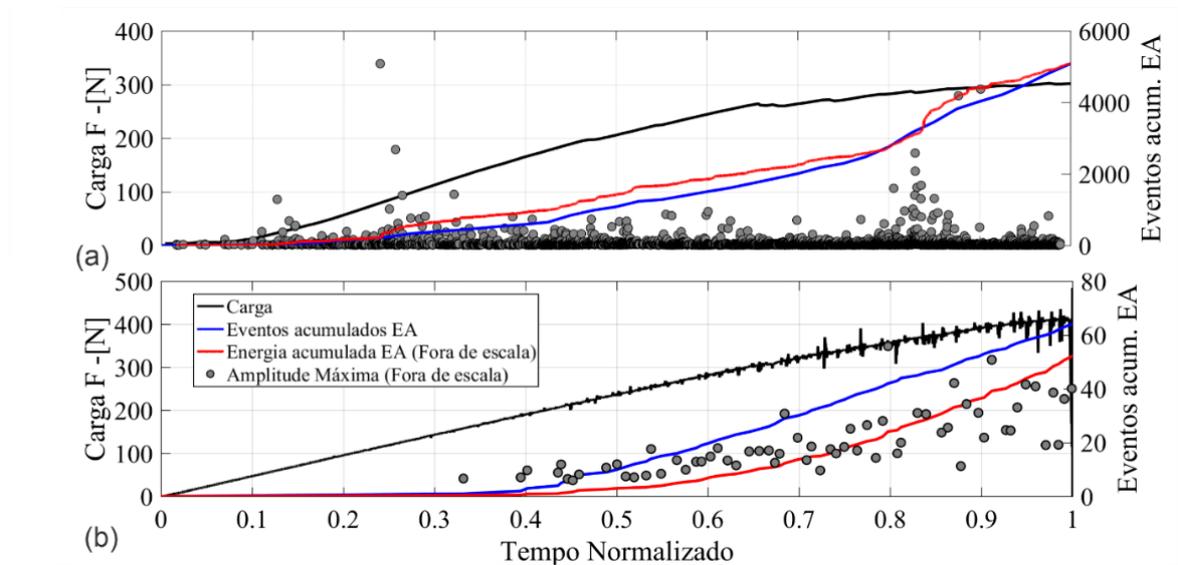
Figura 24- Carga x Deslocamento experimental e numérico utilizando a lei uniaxial.



Fonte: Autor 2022.

A Figura 25 mostra o comparativo da atividade de EA registrado no ensaio experimental e pela PD. Ao comparar os dados fica claro que o experimental possui uma quantidade muito maior de eventos (aproximadamente 5000) pois quando uma fibra se rompe ocasiona uma avalanche de eventos, ou seja, um conjunto de eventos era registrado pelo sensor. Como na PD existe apenas uma distribuição das propriedades mecânicas para tentar representar a influência das fibras, não possuindo fibras de forma concreta, não consegue-se registrar esse tipo de comportamento (avalanches). Assim o modelo PD capturou aproximadamente 60 eventos.

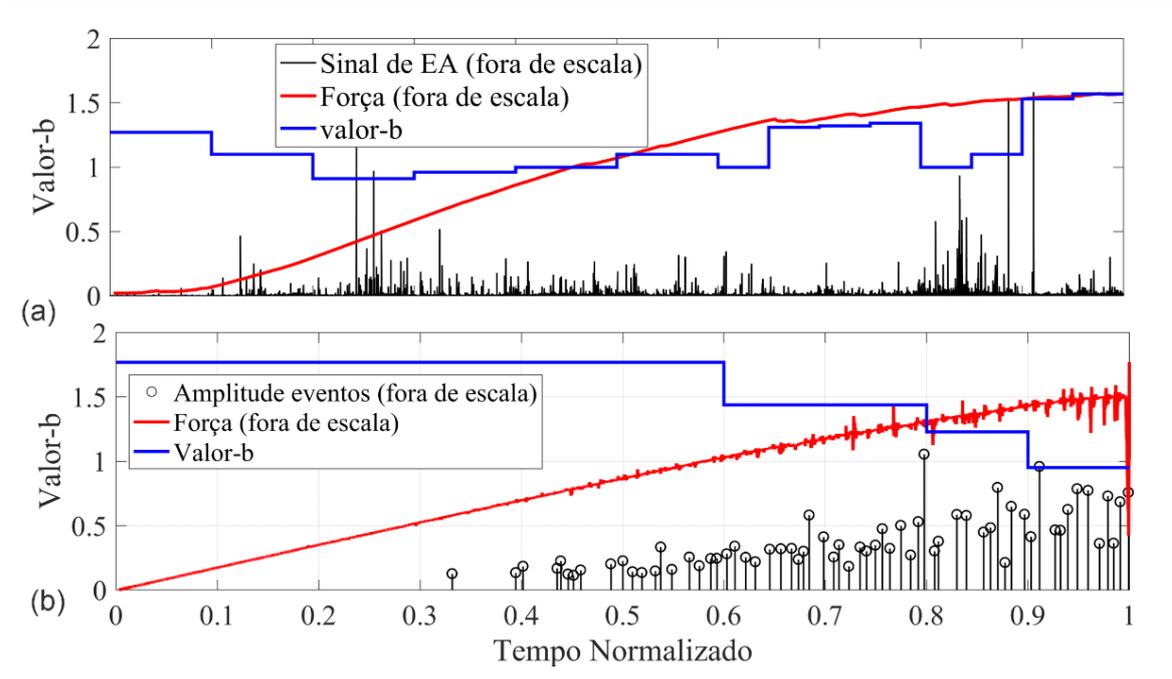
Figura 25- Comparação da atividade de EA a) experimental e b) numérico.



Fonte: Autor 2022

Ainda na Figura 25, é possível ver uma total correspondência entre o número de eventos de EA e a energia de EA para o caso da simulação. Já para o experimento, nota-se que a energia de EA cresce acentuadamente em pontos onde se encontram uma grande quantidade de eventos, as avalanches.

Como mencionado na Seção 2.3.1 o valor- b é um índice precursor de falha em estruturas, assim durante o monitoramento utilizando esse parâmetro é possível identificar o colapso através de uma mudança em seu valor. A Figura 26 mostra os valores de b encontrados para o experimental e numérico. No experimento, o tempo do ensaio foi dividido em 16 intervalos de tempo e o valor- b foi calculado para cada um. Mais detalhes sobre o cálculo do valor- b experimental pode ser encontrado em Friedrich *et al.* (2020). No caso experimental nota-se que o valor- b apresenta quedas próximos aos pontos de avalanches, como em 0,24 e 0,84 do tempo normalizado. Assim, é possível afirmar que o valor- b consegue prever a aproximação de pontos críticos na estrutura, que não necessariamente são o colapso final da mesma. Já na simulação, mesmo com poucos eventos, as características típicas do valor- b foram capturadas. A metodologia para o cálculo do valor- b foi a mesma do experimental. Dividiu-se a simulação em 4 intervalos de tempo e o valor- b foi calculado para cada um deles. No início da simulação existe uma quantidade maior de eventos de menor amplitude, tornado o valor b próximo a 1,5, em seguida quando a amplitude dos eventos aumenta o valor- b tende a 1 como esperado, indicado que o colapso está próximo.

Figura 26- Comparação do valor- b a) experimental e b) numérico.

Fonte: Autor 2022.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho a teoria peridinâmica foi utilizada como ferramenta de simulação de diferentes materiais compósitos. A partir das análises realizadas pode-se concluir que:

- A PD apresenta-se como uma boa ferramenta para o estudo de materiais compósitos capturando as características mecânicas e a forma de colapso dos mesmos.
- A análise dos dados de EA da amostra simulada não consegue capturar integralmente os padrões observados no ensaio experimental, no entanto, através do valor- b conseguiu identificar a eminência da falha. Assim a PD, pode ser utilizada para esse fim, no entanto a velocidade de aplicação do deslocamento prescrito deve ser pequena, o que pode tornar a simulação computacionalmente pesada.
- O campo aleatório apresenta-se como uma técnica para a distribuição das propriedades mecânicas do material, conseguindo como no caso da Aplicação I, aproximar as características do comportamento global e da forma de fratura do obtidos experimentalmente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros têm-se como sugestões:

- Implementar o controle de carga/deslocamento no modelo PD procurando aumentar a precisão dos resultados quando o isso é exigido;
- Simular a Aplicação II mais lentamente e capturar os sinais de EA utilizando a lei bi linear.
- Criar um modelo simétrico para a Aplicação II procurando também diminuir o custo computacional.

7 REFERÊNCIAS

AGGELIS , Dimitrios G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters. **Mechanics Research Communications**, [S. l.], p. 153–157, 23 fev. 2011.

AGUA, Daniel. **EL MITO DE LA CAVERNA DEL INGENIERO DE ESTRUCTURAS**. [S. l.], 5 nov. 2015. Disponível em: https://www.prontubeam.com/articulos/10_2015_mito_caverna_ing_estruct/10_2015_mito_caverna.ph. Acesso em: 5 set. 2021.

AGUIAR , Juliano de. **CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS CTOD POR ANÁLISE FRACTAL**. Orientador: Lindberg Lima Gonçalves. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2004.

BREMM, Caroline *et al.* Parametric study of random fields of the mechanical properties of the material in a peridynamic model. **Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós- Graduação e Pesquisa de Engenharia (CILAMCE)**, [s. l.], 16 nov. 2020.

CABRAL NR, Invaldi MA, D’Ambra RB, Iturrioz I. **An alternative bilinear peridynamic model to simulate the damage process in quasi-brittle materials**. *Eng Fract Mech* 2019; 216.

CALLISTER JR, William D. Composites. *In: MATERIALS Science and Engineering introduction*. 7. ed. [S. l.: s. n.], 2005. cap. 16.

CALLISTER, William D. *Ciência e Engenharia de materiais: Uma introdução*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.

CARPINTERI, A.; LACIDOGNA, G.; PUZZI, S. **From criticality to final collapse: Evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0**. *Chaos, Solitons & Fractals*, v. 41, n. 2, p. 843-853, 2009.

CARPITERI A, Fortese G, Ronchei C, Scorza D, Vantadori S. **Mode I fracture toughness of fibre reinforced concrete**. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2017;91:66-75

CASARIL, Alexandre; GOMES, Eduardo Rovaris; SOARES, Marcos Roberto. Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. *Revista Matéria*, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 408-419, 2007.

DB Guindastes e Logísticas. [S. l.], 3 jan. 2019. Disponível em: <http://www.dbguindastes.com.br/>. Acesso em: 5 set. 2021.

FRIEDRICH, L. F.; BARCELLOS, M.; ITURRIOZ, I. Random field generation of the material properties in a peridynamic model. 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering – resumo aprovado, 2019.

FRIEDRICH, L. F.; BARCELLOS, M.; ITURRIOZ, I.; COLPO, A. B.; CESAR, E. S.; PUGLIA, V. B.; KOSTESKI, L. E. Experimental analysis of the size effect in quasi-fragile

materials. 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering – resumo aprovado, 2019.

FRIEDRICH, Leandro; COLPO, Angélica; MAGGI, Anna; BECKER, Tiago; LACIDOGNA, Giuseppe; ITURRIOZ, Ignacio. Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition. *Composites structures*, [s. l.], 14 nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113105>. Acesso em: 24 fev. 2022.

In: INI - Inspeção Não Intrusiva em vasos de pressão e tanques de armazenamento. **Mistras** [S. l.], 2016. Disponível em: <http://www.dbguindastes.com.br/>. Acesso em: 5 set. 2021.

In: INI - Inspeção por Emissão Acústica Inspeção. **Mistras** [S. l.], 2016. Disponível em: http://www.pasa.com.br/2016/inspecao_por_emissao.asp. Acesso em: 5 set. 2021.

In: Novos aviões de fuselagem estreita de longo alcance podem mudar transporte aéreo. **Aero Magazine** [S. l.], 9 jun. 2019. Disponível em: https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/novos-avioes-de-fuselagem-estreita-de-longo-alcance-podem-mudar-transporte-aereo_4353.html. Acesso em: 5 set. 2021.

MIRLISENNA, Giuseppe. **Método dos Elementos Finitos: o que é?**. [S. l.], 22 jan. 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 5 set. 2021.

NAKAMURA, Hideyuki. Introdução. *In*: PRACTICAL Acoustic Emission Testing: The Japanese Society for Non-Destructive Inspection. [S. l.: s. n.], 2016.

OTERKUS, ERKAN; MADENCI, ERDOGAN. PERIDYNAMIC ANALYSIS OF FIBER-REINFORCED COMPOSITE MATERIALS. **Journal of Mechanics of Materials and Structures**, v. 7, p. 45-83, 1 nov. 2012.

PRINCÍPIOS fundamentais da emissão acústica. *In*: DE ANDRADE, Rodrigo Foggiatto. **Emissão Acústicas: Conceitos e Aplicações**. [S. l.: s. n.], 2017. cap. 2.

Rajak, D.K.; Pagar, D.D.; Menezes, P.L.; Linul, E. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers* **2019**, *11*, 1667. <https://doi.org/10.3390/polym11101667>

RICHTER, C.F. Elementary seismology. San Francisco and London: W.H. Freeman, 1958.

ROCHA, R. E. **Fracture toughness determinations by means of indentation fracture**. Nanocomposites with unique properties and applications in medicine and industry, p. 21-38, 2011.

SILLING, S.A. “Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces”. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 48, pp. 175–209, 2000.

SCIPIONI, Bibiana Gelhen. EVOLUÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS: ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL. *In*: SCIPIONI, Bibiana Gelhen. **EVOLUÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS: ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL**.

Orientador: Ignacio Iturrioz. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [S. l.], 16/12/2019.

SHEN, Feng; ZHANG, Qing; HUANG, Dan. Damage and Failure Process of Concrete Structure under Uniaxial Compression Based on Peridynamics Modeling. **Hindawi**, [S. l.], v. 2013, p. 1-6, 18 set. 2013. DOI <http://dx.doi.org/10.1155/2013/631074>. Disponível em: <https://downloads.hindawi.com/journals/mpe/2013/631074.pd>. Acesso em: 6 set. 2021.

VANTADORI, S, Carpinteri A, Fortese G, Ronchei C, Scorza D. **Mode I fracture toughness of fibre-reinforced concrete by means of a modified version of the two-parameter model. Procedia Structural Integrity**. 2016;2:2889-2895.

VENTURA, Autora: Ana Mafalda F.M. **Compósitos de Matriz Metálica**. [S. l.], 22 jun. 2012. Disponível em: <https://compositosmetalicos.wordpress.com/2012/06/22/bkagrwrtwer/>. Acesso em: 5 set. 2021.

VIGNOLI, Lucas Lisbôa. **MODELOS MICROMECAÑICOS APLICADOS À ANÁLISE MULTIESCALA DE COMPÓSITOS LAMINADOS**. Orientador: Marcelo Amorim Savi. 2020. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) - UFRJ, 2020.

YI-LE, Hu; YIN, Yu; HAI, Wang. Peridynamic analytical method for progressive damage in notched composite laminates. **ELSEVIER**, [S. l.], p. 801-810, 15 out. 2013.

ZHOU, Wu; LIU, Dahsin; LIU, Ning. Analyzing dynamic fracture process in fiber-reinforced composite materials with a peridynamic model. **Engineering Fracture Mechanics**, p. 60-70, 18 abr. 2017.

SHEN, Rulin; XIONG, Rui; GONG, Yanling. Analysis of Damage and Crack Propagation in Unidirectional Composite Laminates with a Peridynamic Model. **Journal of Physics: Conference Series**, [S. l.], v. 1549, p. 032088, 1 out. 2020. DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1549/3/032088>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1549/3/032088>. Acesso em: 9 set. 2021.

SILVA, Alex Oliveira da; CAVALCANTE, Márcio André Araújo. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS LONGAS UNIDIRECIONAIS EMPREGANDO MODELOS DA MICROMECAÑICA. CILAMCE 2016, [s. l.], 6 nov. 2016.

KILIC, Bahattin. MODELING OF UNIDIRECTIONAL COMPOSITE MATERIALS. In: KILIC, Bahattin. Peridynamic Theory for Progressive Failure Prediction in Homogeneous and Heterogeneous Materials. 2008. Tese de Doutorado (Doctor of Engenharia Mecânica) - University Libraries, [S. l.], 2008.

KILIC, B.; AGWAI, A.; MADENCI, E. Peridynamic theory for progressive damage prediction in center-cracked composite laminates. **Elsevier**, [S. l.], p. 141–151, 6 mar. 2009.

MAGGI, Anna Celia Wagner. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA EM ANÁLISE DE DANO EM ESTRUTURAS REFORÇADAS COM FIBRAS. 2018. Monografia

(Bacharelado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [S. l.], 2018.

MADENCI, Erdogan; OTERKUS, Erkan. Apêndices. In: PERIDYNAMIC Theory and Its Applications. [S. l.: s. n.], 2014.

TANZI, Boris Nahuel Rojo. **ANÁLISE DO PROCESSO DE DANO COM A TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA E MÉTODOS DISCRETOS**. 2020. Dissertação (Mestre em Engenharia) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [S. l.], 2020.

VANTADORI, Sabrina; CARPINTERI, Andrea; GŁOWACKA, Karolina; GRECO, Fabrizio; OSIECKI, Tomasz; RONCHEI, Camilla; ZANICHELLI, Andrea. Fracture toughness characterisation of a glass fibereinforced plastic com. **WYLEI**, [s. l.], 10 jul. 2020.