

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

EVOLUÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS: ESTUDO TEÓRICO E  
EXPERIMENTAL

por

Bibiana Gelhen Scipioni

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, 16, dezembro de 2019

## CIP - Catalogação na Publicação

SCIPIONI, BIBIANA GELHEN  
EVOLUÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS: ESTUDO  
TEÓRICO E EXPERIMENTAL / BIBIANA GELHEN SCIPIONI. --  
2019.  
21 f.  
Orientador: IGNACIO ITURRIOZ.

Coorientadores: WILLIAM RAMIRES ALMEIDA, BORIS  
NAHUEL ROJO TANZ.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Mecânica da Fratura. 2. Peridinâmica. 3.  
Compósito. 4. Emissão Acústica. I. ITURRIOZ, IGNACIO,  
orient. II. ALMEIDA, WILLIAM RAMIRES, coorient. III.  
TANZ, BORIS NAHUEL ROJO, coorient. IV. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibiana Gelhen Scipioni

EVOLUÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS: ESTUDO TEÓRICO E  
EXPERIMENTAL

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. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Áreas de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Ignacio Iturrioz

Coorientadores: Prof. William Ramires Almeida e Boris Nahuel Rojo Tanz

Comissão de Avaliação:

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof. Daniel Milbrath De Leon

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Porto Alegre, 16, dezembro de 2019

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de forma especial ao meu irmão Francisco Gelhen Scipioni e aos meus pais, Denizete Filomena Floriano Gelhen e Roberto Breda Scipioni. Pois o apoio e incentivo deles foi essencial para esta conquista.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

EVOLUÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS: ESTUDO TEÓRICO E  
EXPERIMENTAL

**Scipioni, Bibiana Gelhen**  
[bibigs10@hotmail.com](mailto:bibigs10@hotmail.com)

**Resumo:** A evolução do dano nas estruturas fabricadas em materiais compósitos é um tema aberto na engenharia moderna, e não existe atualmente consenso sobre a forma de medir sua evolução, nem métodos consistentes que permitam sua simulação correta. Neste contexto, o presente trabalho visa estudar esse problema analisando duas aplicações: (a) o comportamento até a ruptura de uma viga pré-fissurada formada por fibra de vidro em uma matriz polimérica solicitada a flexão, comparando os resultados experimentais com os obtidos por meio de um modelo numérico, implementado em peridinâmica, que permite simular a ruptura progressiva no sólido; (b) ensaio do descolamento de uma placa de fibra de vidro em uma matriz de resina. Neste ensaio, foi dada atenção especial na aquisição de eventos de emissão acústica para poder localizar como o dano progride durante o ensaio. As análises dos resultados obtidos nas duas aplicações permitiram entender melhor o comportamento da ruptura de materiais compósitos e trabalhar com técnicas de análise não convencionais, como o método de simulação peridinâmica e a técnica de emissão acústica.

**Palavras-chave:** Mecânica da Fratura, Peridinâmica, Compósito, Emissão Acústica.

**Abstract:** The evolution damage in structures made of composite materials is an open theme in modern engineering, and there is currently no consensus on how to measure its evolution, nor consistent methods to its correct simulation. In this context, the present work aims to study this problem by analyzing two applications: (a) the behavior before the rupture of a pre-cracked beam made of fiberglass on a polymeric matrix during bending, comparing the experimental results with those obtained through a numerical model, implemented in perydynamics, that allows to simulate the progressive rupture in the solid; (b) debonding test of a fiberglass board on a resin matrix. In this test, special attention was given to the acquisition of acoustic emission events in order to locate how the damage progresses during the test. The analysis of the results obtained in both applications allowed to better understand the behavior of rupture of composite materials and to work with unconventional analysis techniques, such as the peridynamic simulation method and the acoustic emission technique.

**Keywords:** Fracture Mechanics, Perydynamics, Composite, Acoustic Emission.

## 1. INTRODUÇÃO

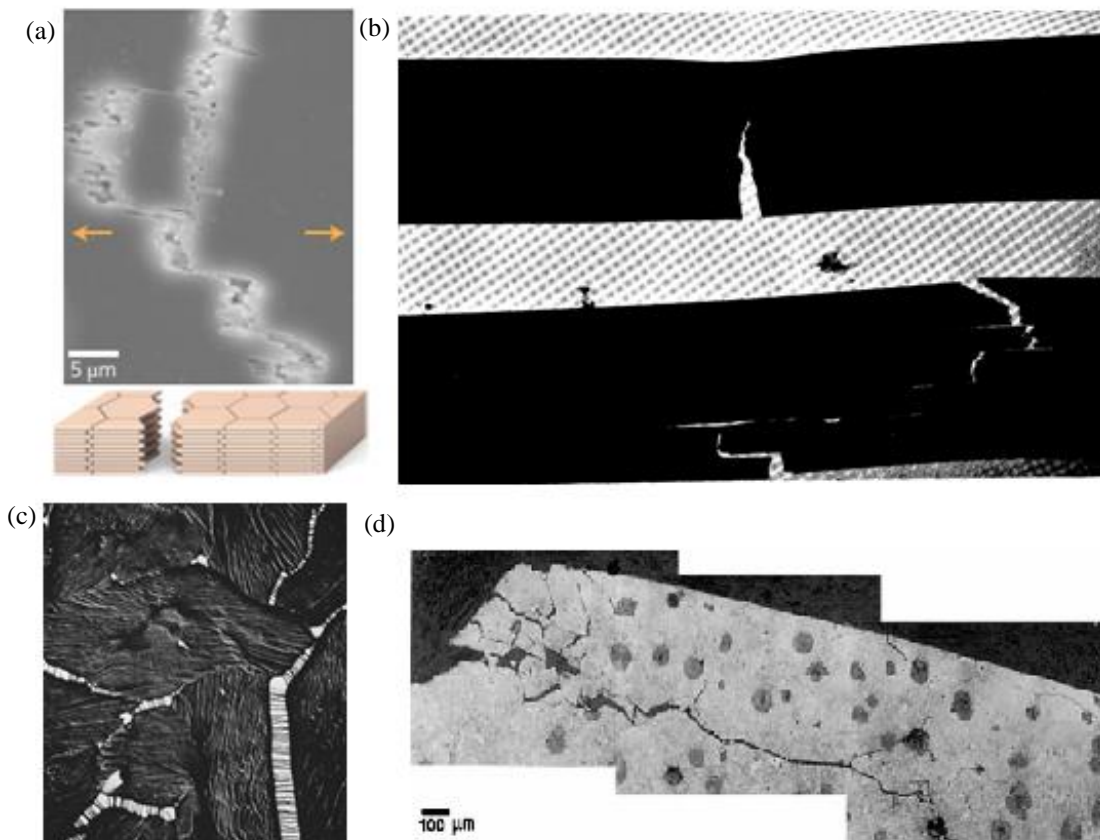
Os materiais compósitos têm sido utilizados desde as origens das civilizações e, nas últimas décadas, têm paulatinamente substituído os materiais estruturais clássicos, como o aço e o alumínio. Vasos de pressão e aviões cada vez mais aumentam a porcentagem de componentes fabricados com materiais compósitos. O acréscimo de rigidez e diminuição de peso são aspectos que tem sido levado em conta na utilização desse tipo de material. Entretanto, como possibilidades de desenvolvimento desse tipo de material, destaca-se a melhora de sua tenacidade e resistência. Enfatiza-se, na melhoria destas duas qualidades, a não limitação das Leis das Misturas, como destaca Wegst et al. (2015). Na

Fig. 1 são apresentados três exemplos onde o processo de dano em materiais compostos é evidenciado.

Na Fig. 1(a) é apresentada a forma em que o nácar rompe. O nácar é um material natural formado por placas frágeis de cálcio embebidas em uma fina pasta proteica, e a microestrutura da mistura permite que o compósito apresente uma boa combinação de tenacidade e resistência.

Na Fig. 1(b) são comparadas as configurações finais de uma viga de material isotrópico e outra laminada. Percebe-se que, no segundo caso, a organização interna do material dificulta o avanço da trinca, produzindo um aumento da tenacidade no material. Nos exemplos apresentados na Fig. 1 (c), enfatiza-se também a importância da estrutura interna do material no incremento de sua tenacidade. Na Fig. 1(d) é apresentado a propagação de fissuras em um ferro fundido nodular, na qual é possível notar que os nódulos existentes na microestrutura dificultam a propagação da trinca.

Figura 1: exemplos de materiais compostos naturais em que a estrutura interna do material influencia na determinação de sua rigidez, resistência e tenacidade. Em (a) processo de dano em Nácar; (b) comparação de ruptura numa viga de material isotrópica e uma viga laminada; (c) ruptura da microestrutura de um material vegetal e (d) fissura propagando num ferro fundido nodular.



Fonte: (a) Wegst et al. (2015), (b) Gordon e Ball (2018), (c) Gordon e Ball (2018) e (d) Magalhães et al. (2000).

Os materiais quase frágeis, como o concreto, rochas, cerâmicas e diversos tipos de materiais compostos, são caracterizados pela formação de microfissuras durante o seu processo de dano. Essas microfissuras podem interagir e formar uma descontinuidade macroscópica. A simulação do processo de dano nesses materiais é difícil de realizar utilizando métodos baseados na mecânica do contínuo, como por exemplo, o método dos elementos finitos e o método dos elementos de contorno. Ainda assim, para a aplicação do método dos elementos finitos na simulação de nucleação espontânea e

posterior propagação de fissuras, existem algumas alternativas. Entre as alternativas mais conhecidas, pode-se citar o método das interfaces coesivas proposto por Xu e Needleman (1994) e o método dos elementos finitos estendido proposto por Belytschko et al. (2003). Outra forma de resolver esse tipo de problema é empregar algum dos métodos dos elementos discretos, como é o caso da Peridinâmica, em que a fratura e a fragmentação podem ser capturadas de forma espontânea.

No presente trabalho, apresenta-se uma simulação realizada com a Peridinâmica proposta por Silling (2000), uma versão do Método dos Elementos Discretos. Outra técnica utilizada é a da emissão acústica, que consiste no registro das ondas elásticas produzidas pelas rupturas internas no material durante o processo de dano da estrutura estudada. Essas ondas são captadas na superfície do corpo através de sensores, possibilitando a inferência da característica do processo de dano apresentado pela estrutura em análise a partir do estudo da sequência temporal dos registros.

Dentro do presente contexto é possível apresentar os objetivos do trabalho:

**Objetivo Geral:** Explorar o processo de dano de materiais compósitos utilizando técnicas numéricas e experimentais.

Como **Objetivos Específicos** destaca-se:

- Realizar comparação dos resultados obtidos no ensaio de uma viga com trinca central solicitada a flexão realizado na Universidade de Parma, na Itália, com os resultados obtidos através da simulação desse experimento aplicando a Peridinâmica. As comparações dos resultados são em termos de carga vs. deslocamento global, da configuração final e dos registros de emissão acústica capturados.

- Realizar o ensaio de descolamento (*debonding*) de uma placa de material composto, capturando os eventos de emissão acústica produzidos durante o ensaio e realizando a interpretação dos mesmos.

- Comparar os resultados obtidos na segunda aplicação com resultados teóricos obtidos com um modelo simples (Bundle Model) apresentado em detalhe em Hansen et al. (2015).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Mecânica da Fratura

Na verificação estrutural clássica, a análise é realizada conforme a seguir

$$S_{ym}(Geometria, Condições\ de\ Contorno) = S_y(Material, Temperatura, \dot{\epsilon}, ...) \quad (1)$$

onde  $S_{ym}$  é uma tensão de comparação determinada por algum critério de falha (von Mises, por exemplo). Esse parâmetro depende da geometria da estrutura estudada e das condições de contorno aplicadas, e é comparado com um parâmetro crítico,  $S_y$ , determinado através de um ensaio realizado em uma geometria simples. Esse segundo parâmetro depende do material ensaiado e das condições de realização do ensaio, como temperatura, velocidade de carga ( $\dot{\epsilon}$ ), etc.

No caso de ter uma descontinuidade na estrutura em avaliação, o tipo de ruptura que pode acontecer está associado a propagação instável desta descontinuidade. Nesse caso, o critério de avaliação considerado em (1) sempre será violado na ponta da fissura, numa pequena região. Dessa forma, para poder realizar a análise, é necessário não apenas determinar a intensidade da tensão, mas também determinar alguma distância que meça a região onde essa tensão se manifesta, por exemplo, o critério da distância crítica proposto por Taylor (2007). Também é possível aplicar a mecânica da fratura clássica, que propõe uma expressão alternativa à Equação (1), onde não são mais comparadas tensões e sim parâmetros que permitem determinar se a propagação da fissura será instável ou não. Existem diversas alternativas para a definição dos parâmetros fracto-mecânicos. Dessa forma, tem-se como alternativa a expressão apresentada abaixo,

$$Z(Geometria, Condições\ de\ Contorno, a) = Z_c(Material, Temperatura, \dot{\epsilon}, ...) \quad (2)$$

em que  $Z_c$  é o parâmetro que caracteriza o material e  $Z$  é o parâmetro obtido através das condições de contorno do material, geometria e comprimento da fissura da estrutura em análise.

Na versão mais simples da mecânica da fratura, onde os efeitos não lineares se consideram desprezíveis (mecânica elástica linear da fratura), as alternativas para a definição de  $Z$  utilizadas são o fator de intensidade de tensões ( $K$ ), proposto por Irwin (1957) e a energia específica de fratura ( $G$ ), proposta por Griffith (1920). O fator de intensidade de tensões ( $K$ ) e a energia específica de fratura ( $G$ ) são determinados por

$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

$$G = dU/dA = K^2/E \quad (4)$$

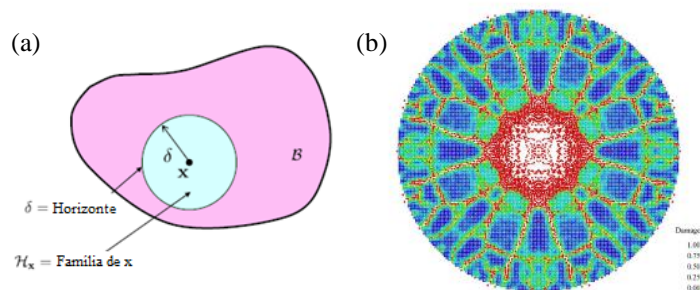
onde  $\sigma$  representa a tensão trativa na ponta da trinca se não houvesse fissura,  $a$  representa o tamanho da fissura,  $\beta$  é um fator de forma que leva em conta a forma da fissura, condições de contorno e geometria,  $E$  representa o módulo de elasticidade, e  $dU/dA$  representa a derivada da energia elástica acumulada no corpo conforme o avanço da fissura. Detalhes sobre sua dedução podem ser encontrados em Anderson (2011).

## 2.2. Peridinâmica

A Peridinâmica é uma teoria não local proposta por Silling (2000). Conforme Madenci e Oterkus (2014), a Peridinâmica associa a mecânica dos meios contínuos e os modelos de dinâmica molecular e faz uma reformulação das equações do movimento na mecânica dos sólidos, a qual modela de forma mais adequada as descontinuidades existentes ou que surgem nos corpos. Dessa forma, a teoria utiliza equações integrais espaciais que podem ser empregadas em descontinuidade e, assim, permite modelar a iniciação da propagação de fissuras.

Na Peridinâmica, o corpo é discretizado e, em seu estado não deformado, todo ponto material tem associado a si suas coordenadas espaciais, um volume diferencial e uma densidade de massa. Em qualquer um destes pontos do material, pode-se aplicar cargas, deslocamento e velocidade prescritos, os quais resultam em movimentos e deformações. Cada ponto material interage diretamente com outros pontos materiais até uma distância de raio  $|\delta|$ . Essa distância  $|\delta|$  é chamada de Horizonte, como apresentado na Fig. 2. Os pontos que estão dentro do limite do horizonte de um determinado ponto  $x$  são a chamada família do ponto  $x$ ,  $H_x$ .

Figura 2: (a) representação do Horizonte ( $\delta$ ) e da família do ponto  $x$  e (b) configuração final de um disco submetido ao impacto de um míssil, problema modelado com a Peridinâmica.



Fonte: (a) Silling (2012). (b) Parks et al. (2008)

A equação do movimento utilizada na Peridinâmica não é uma equação diferencial e sim uma equação integro-diferencial, apresentada em Bobaru et al. (2016)



$$\rho(x)\ddot{y}(x,t) = \int_H f(q,x,t)dV_q + b(x,t) \quad (5)$$

onde  $b(x,t)$  representa as forças de corpo atuantes,  $\ddot{y}(x,t)$  é a aceleração associada a massa discreta localizada originalmente no ponto  $x$ ,  $\rho(x)$  é a densidade do material,  $f(q,x,t)$  são as forças de união entre os pares de nós vinculados, sendo  $Hx$  o domínio definido pelo o horizonte do ponto  $x$ .

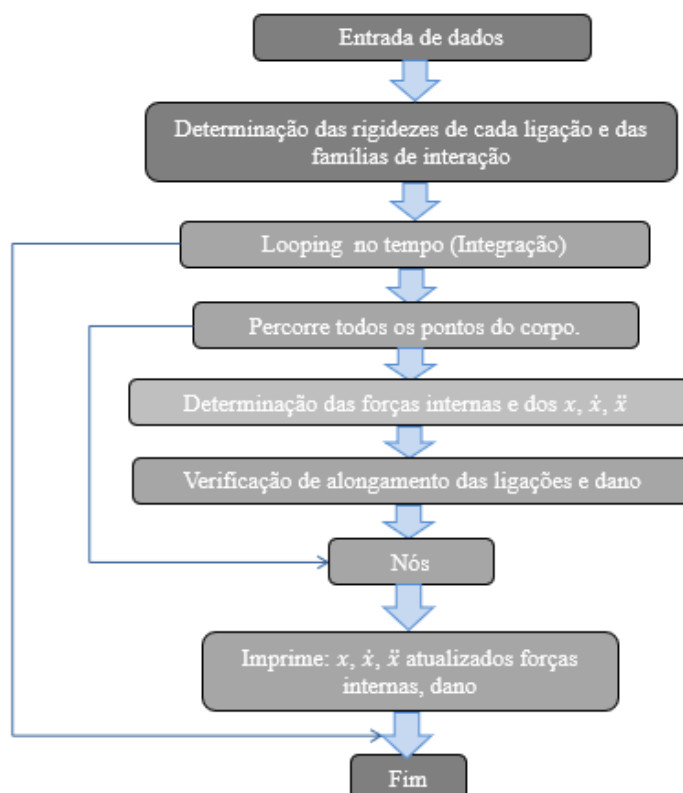
Conforme descrito em Bobaru et al. (2016), na teoria Peridinâmica os danos podem ser modelados facilmente através de quebras de ligações, ou seja, ao ultrapassar um determinado valor de deformação crítica. Bobaru et al. (2016), ainda relata que a densidade de força associada a ligação rompida é transferida para as ligações vizinhas, favorecendo assim o processo de dano progressivo. A deformação crítica é calculada por

$$S_0 = \sqrt{\frac{5\pi G_f}{9E\delta}} \quad (6)$$

em que  $S_0$  é o valor crítico de deformação,  $G_f$  é a energia crítica de fratura,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\delta$  é o Horizonte. Na versão original do método da Peridinâmica, o horizonte necessário para obter resultados razoáveis deve ser no mínimo três vezes a distância entre nós,  $\Delta x$ , porém apresenta o inconveniente de deixar o problema modelado dependente do nível de discretização empregado. Em Cabral et al (2018) é apresentado uma forma para evitar esse problema, assim, é possível fixar o horizonte em 3 vezes  $\Delta x$  e compensar esta restrição mudando a lei constitutiva das ligações entre os nós. Essa versão da Peridinâmica é a utilizada neste trabalho.

Na Figura 3, apresenta-se um fluxograma que explica de forma sucinta as diferentes etapas realizadas no algoritmo implementado com a teoria Peridinâmica por Madenci e Oterkus (2014).

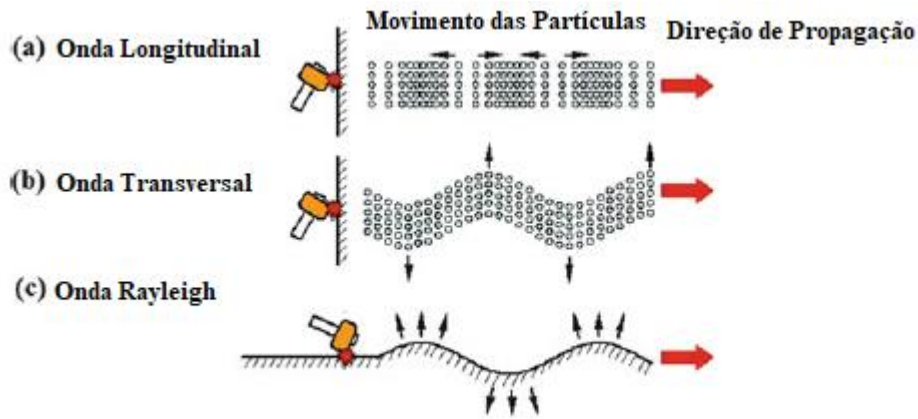
Figura 3: Representação esquemática do algoritmo que implementa a teoria da Peridinâmica.



### 2.3. Técnica de Emissão Acústica (TEA)

A técnica de emissão acústica é um método de ensaio não destrutivo, podendo ser realizado em equipamentos em circunstâncias de serviço (ASME-BPVC-SectionV). Segundo Grosse e Ohtsu (2008), quando ocorre uma fratura em um material, há a liberação de energia de deformação armazenada, a qual é consumida formando novas fissuras e emitindo ondas elásticas. Os sensores/acelerômetros de emissão acústica (EA), com elementos piezoelétricos, detectam as ondas elásticas que propagam no material. Conforme Mizutani (2016), a velocidade e propagação de uma onda elástica depende das propriedades do material e do tipo de onda. Entre os tipos de ondas mais empregados em análises de emissão acústica, estão as ondas longitudinais, as ondas transversais e as ondas de Rayleigh. O comportamento destes tipos de ondas está representado na Fig. 4.

Figura 4: modo de propagação de ondas elásticas: (a) onda longitudinal, (b) onda transversal e (c) onda Rayleigh.



Fonte: Mizutani (2016) (Adaptado)

Mizutani (2016) define que nas ondas longitudinais as partículas vibram na direção de propagação da onda (Fig. 4(a)) e são conhecidas como ondas primárias, pois são as ondas elásticas que se propagam com maior velocidade. Já nas ondas transversais, as partículas vibram perpendicularmente a propagação da onda (Fig.4(b)) e são conhecidas como ondas secundárias. As ondas de Rayleigh são geradas quando as ondas longitudinais e transversais atingem a superfície de um material sólido e elástico, assim, as partículas se movem de forma elíptica (Fig. 3(c)). A seguir, apresenta-se como a velocidade de propagação das ondas longitudinais ( $V_P$ ), transversais ( $V_S$ ) e de Rayleigh ( $V_R$ ) são calculadas, respectivamente, por

$$V_P = \sqrt{\frac{(1-\nu)E(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (7)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (8)$$

$$V_R = 0.9 \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (9)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente do Poisson do material e  $\rho$  é a densidade do material. Observa-se que a velocidade de propagação da onda elástica de Rayleigh é 90% do valor da velocidade de propagação da onda transversal.

Através da TEA é possível determinar o local em que está a fonte de emissão acústica, ou seja, onde o material está rompendo. De acordo com Grosse e Ohtsu (2008), a localização pode ser calculada através das diferenças de tempo de chegada da onda elástica que é emitida pela fonte de emissão acústica e registrada por cada um dos sensores utilizados no ensaio. Para definir a localização dessa fonte, são necessários os tempos de início, as coordenadas cartesianas de cada sensor e as velocidades das ondas longitudinais e transversais.

Dessa forma, a localização é resolvida pelo tempo de origem e pela posição da fonte nas coordenadas cartesianas  $(x_0, y_0, z_0)$ . Um dos métodos de localização mais utilizados é o da localização interativa, no qual se lineariza o problema. Assim, necessita-se de um hipocentro teste (“posição da fonte inicial proposta”) que seja relativamente próximo do valor real. (Grosse e Ohtsu, (2008)). Através da equação apresentada a seguir, calcula-se os tempos de viagem para localização 3D,

$$t_i = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}}{v} + t_0 \quad (10)$$

em que  $x, y$  e  $z$  são as coordenadas do ponto em que se encontra a fonte,  $x_i, y_i$  e  $z_i$  são as coordenadas do sensor  $i$ ,  $V$  é a velocidade de propagação da onda no material,  $t_0$  é o tempo de origem da primeira estimativa e  $t_i$  é o tempo de viagem até cada sensor  $i$ .

Pelo fato de o primeiro valor de hipocentro ser uma aproximação os tempos calculados acabam sendo diferentes dos medidos e algumas correções são necessárias ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  e  $\Delta t$ ) para minimizar essa diferença. Essas correções podem ser feitas empregando a série de Taylor no resíduo (diferença entre o tempo medido e o calculado para cada sensor) (Grosse e Ohtsu (2008)).

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em Carpinteri et al. (2017b), analisa-se o comportamento de propagação de trincas em concreto reforçado com fibras (fibras microssintéticas de polipropileno) distribuídas de forma aleatória na matriz. Nesse artigo, propõe-se uma metodologia para medir a tenacidade do material que leve em conta as características de tratar com um material quase-frágil. Também, é proposto um procedimento de carga e descarga que será descrito no capítulo 5.1, e que permite levar em conta a tendência de a fissura abrir em modo misto. O mesmo procedimento de ensaio descrito nesse artigo foi realizado pelo Grupo de Fratura da Universidade de Parma em vigas de matriz termoplástica reforçada com fibra de vidro e os resultados desse ensaio serão analisados na primeira aplicação do presente trabalho.

No artigo de Flores et al. (2016), estudou-se como prever a resistência de estruturas entalhadas feitas de fibra de vidro com uma direção preferencial (horizontal) em uma matriz de resina epóxi. As diversas não linearidades são observadas na resposta global em termos de carga vs. deslocamento. No estudo realizado por Zhao et al. (2019), também foram realizados testes de flexão de três pontos em vigas compostas laminadas. A forma com que o dano foi aumentando foi estudada nesses testes, assim como a verificação da influência de como as camadas da viga foram construídas.

Em relação à segunda aplicação, relacionada ao ensaio de descolamento da placa de material composto, menciona-se o artigo de Weissgraber e Becker (2013). Nesse artigo, os autores apresentam uma nova abordagem para analisar a carga que produziria a iniciação de trincas de juntas coladas. No modelo proposto, a resistência a tração e a tenacidade à fratura do adesivo são os parâmetros

principais. Como forma de testar a consistência do modelo, os resultados do mesmo foram comparados com resultados experimentais, obtendo-se uma boa concordância.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Peridínamica: descrição do algoritmo utilizado.

A versão original do algoritmo utilizado foi publicada por Madenci e Oterkus (2014). Contudo, ao longo do tempo, o código proposto pelos autores citados anteriormente foi modificado pelo grupo de pesquisa GMAP/UFRGS, no qual a autora está inserida, acrescentando diversas modificações. Entre essas modificações estão a possibilidade de considerar propriedades do material (tenacidade e módulo de elasticidade) como campos aleatórios com distribuição de probabilidades e correlação espacial definida, o desenvolvimento de uma nova lei constitutiva que permite atribuir um comportamento bilinear à ligação entre dois nós (Cabral et al., 2019), e a paralelização do código.

### 4.2 Medição dos eventos de emissão acústica

Na segunda aplicação, realizou-se um ensaio no GMAP/UFRGS de descolamento de uma placa de fibra de vidro com matriz de epóxi aderida a uma placa de aço. Para a aquisição de eventos de emissão acústica, foram utilizados três acelerômetros, sendo dois deles 352A60 e o terceiro 352C33, ambos da marca PCB. Dessa forma, foi possível captar a emissão acústica quando o material estivesse descolando. Para a aquisição de dados, utilizou-se um DAQ da marca Brüel & Kjær com uma frequência de aquisição de 65kHz. Os mesmos foram colados sobre a placa de aço visando utilizar a informação dos mesmos para realizar a localização das fontes dos eventos. Para realizar esse tipo de teste, a utilização de sensores que permitem capturar frequências mais altas é o recomendado. Um quarto sensor (com frequência de corte de 150kHz) foi utilizado, mas a aquisição não pode ser aproveitada devido à baixa intensidade do sinal, para isso teria sido necessário utilizar um pré-amplificador.

## 5 APLICAÇÕES

### 5.1 Análise de uma viga de matriz termoplástica reforçada com fibra de vidro

#### 5.1.1 Descrição do modelo físico

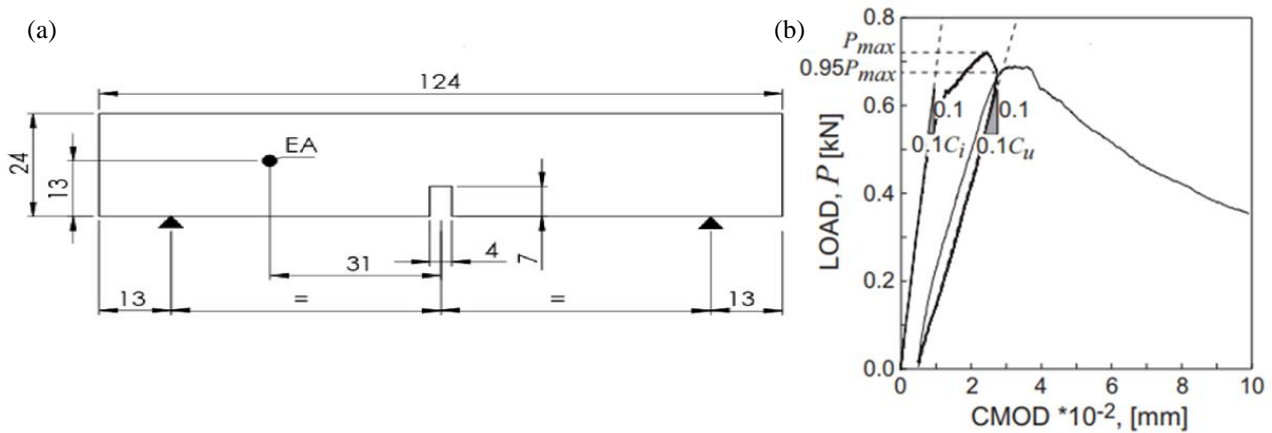
Um ensaio foi realizado na Universidade de Parma visando caracterizar os parâmetros fracto mecânicos de um material compósito constituído por uma matriz termoplástica reforçada com fibra de vidro. As fibras são longas, unidirecionais e contínuas ao longo da amostra.

A geometria do corpo de prova é apresentada na Fig. 5(a). A metodologia proposta por Carpinteri et al. (2017) foi utilizada para determinar a tenacidade do material. Tal metodologia é utilizada para calcular a tenacidade à fratura de materiais quase-frágeis em que a trinca esteja se propagando no material sob carga de modo misto. A carga aplicada é controlada, assim como o deslocamento de abertura da boca da trinca. Dessa forma, o corpo de prova é carregado até a carga máxima ( $P_{MÁX}$ ), logo, o valor de carga começa a diminuir pelo fato de a trinca começar a propagar. Quando o valor da carga atinge 95% do valor de  $P_{MÁX}$ , 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 totalmente.

Na Fig. 5 (b), apresenta o comportamento dos resultados de carga vs. deslocamento da abertura da boca da trinca (CMOD) obtidos por Carpinteri et al. (2017) para a sequência de carregamento e descarregamento explicada anteriormente. O carregamento foi aplicado controlando os deslocamentos para inibir uma possível propagação instável da fissura. A resposta é medida na abertura da boca da trinca, técnica chamada *Crack Mouth Opening Displacement* (CMOD). Como os

sensores utilizados no experimento para aquisição da resposta em termos do CMOD apresentavam uma alta frequência de aquisição, foi realizado, um procedimento de derivar duas vezes a resposta obtida em termos de CMOD. Dessa forma, obteve-se a aceleração do CMOD, parâmetro que se mostra similar aos eventos de emissão acústica.

Figura 5: (a) dimensões do corpo de prova e condições de contorno e (b) sequência de carga aplicada sobre o corpo de prova.



Fonte: (b) Carpinteri et al., 2017b.

Este teste foi simulado com o modelo numérico baseado na Peridinâmica.

### 5.1.2 Descrição do modelo numérico implementado

Os parâmetros do material e os parâmetros necessários para o modelo em Peridinâmica utilizados na simulação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do material e parâmetros do modelo utilizados na simulação.

Parâmetros da Simulação	
Parâmetro	Valor
Módulo de elasticidade (E) [GPa]	12
Energia específica de fratura ( $G_f$ ) [kJ/m <sup>2</sup> ]	90
CV( $G_f$ ) [%]	50
Horizonte numérico do material= ( $\delta$ ) [mm]= 3.015 $\Delta$	6.03
Lei constitutiva utilizada	Bi-linear
Número de integrações no tempo, NT	100000
Número de divisões na direção X	62
Número de divisões na direção Y	12
Número de divisões na direção Z	6
So	3.21e-2
Velocidade constante para aplicação de deslocamento prescrito [m/s]	0.217

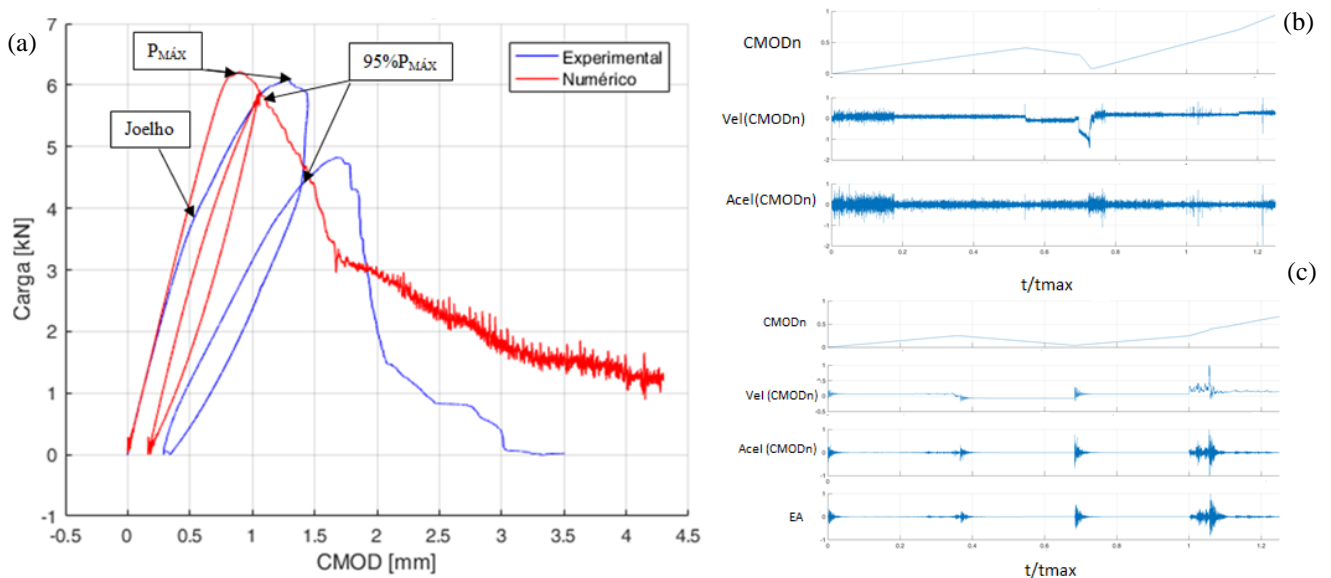
No ensaio a aplicação da carga foi realizada seguindo a sequência descrita anteriormente. Os resultados obtidos foram em termos dos deslocamentos obtidos na boca da fissura e aceleração

perpendicular medida na direção da superfície do corpo de prova na posição indicada na Fig. 5 (a). Também foram obtidos os danos acumulados nos elementos de ligação dos nós. No modelo de Peridinâmica utilizado, uma forte limitação foi não considerar a anisotropia do material, a qual será incorporado na sequência do trabalho.

### 5.1.3 Resultados da Aplicação 1

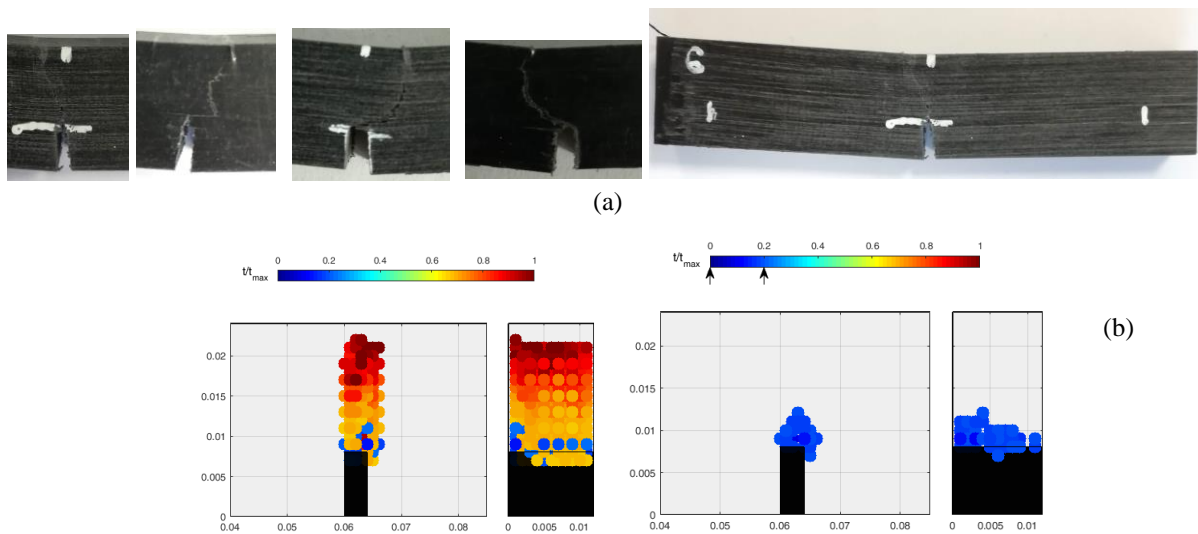
A Fig. 6(a) apresenta a comparação dos resultados experimentais e numéricos em termos da carga suportada pela viga *vs.* a abertura da boca da trinca (CMOD). A comparação dos resultados mostra que o Joelho característico nesse tipo de ensaios não é capturado na simulação. Isso deve ser investigado com maior aprofundamento, mas provavelmente a causa seja pelo fato de o modelo preliminar utilizado ser isotrópico. Na Fig. 6(b) são apresentados os resultados experimentais em termos da evolução no tempo, da velocidade e da aceleração do CMOD. Esse último valor é interpretado como um registro de emissão acústica. Nota-se que a mudança nos valores de CMOD registra a sequência de carga e descarga realizada. De forma análoga, na Fig.6 (c) são apresentados os valores em termos de CMOD, sua velocidade e aceleração *vs.* tempo, para a simulação realizada. Nesse caso, também é apresentado o valor da emissão acústica registrada na simulação no sensor EA indicado na Fig.5(a). No resultado da simulação é possível conferir que a segunda derivada do CMOD tem o mesmo padrão que o registro de emissão acústica realizado na simulação numérica, verificando que a proposta de considerar o  $Acel(CMODn)$  como uma medida da emissão acústica é válida.

Figura 6: (a) comparação de resultados experimentais e numéricos em termos da carga suportada pela viga *vs.* o CMOD. CMOD, sua velocidade e aceleração *vs.* tempo para resultados, em (b) experimentais e em (c) numéricos. No caso (c) também é apresentada e evolução da emissão acústica registrada pela EA (ver Fig. 5.a)



Na Fig. 7(a) e Fig. 7(b) são apresentadas as configurações finais obtidas em diversos testes realizados. Verifica-se que a anisotropia influencia notavelmente na propagação da fissura. Na Fig. 7(c) são apresentados os resultados obtidos na simulação, em que foram representados os baricentros das ligações rompidas durante o processo de dano acontecido. Um detalhe é dano produzido até a primeira descarga (representado por pontos azuis). Os resultados obtidos mostram a capacidade do modelo em realizar esse tipo de estudo, mas também a necessidade de incorporar a anisotropia no material para poder melhorar os resultados da simulação.

Figura 7: a) resultado da fratura de amostras ensaiadas na Universidade de Parma, b) resultado da fratura da amostra simulada utilizando a teoria da Peridinâmica



## 5.2. Análise do descolamento de uma placa de material compósito.

Nessa aplicação, realizou-se de forma experimental um ensaio de descolamento de uma placa de resina com fibras de vidro de 80mm x 315mm colada em uma placa de aço com cola de cianocrilato (CASCOLA – Adesivo Instantâneo). Na Fig.8 (a) e (b) são mostradas fotos da placa disposta na prensa onde foi ensaiada. Na Fig. 8 (c) uma vista superior da placa permite determinar a posição dos três acelerômetros utilizados para capturar os eventos de emissão acústica. A máquina utilizada para realizar o ensaio foi uma máquina de ensaios Universal disponibilizado pelo Grupo de Mecânica Aplicada da UFRGS.

Através do programa *SOFT\_AE* (desenvolvido no GMAP/UFRGS) compilado em *MATLAB*, os dados obtidos no experimento foram processados e analisados. Primeiramente, capturou-se os eventos obtidos por cada acelerômetro, posteriormente um filtro passa baixa com uma frequência de corte de 28kHz (para evitar *aliasing*) e um filtro passa alta com uma frequência de 500Hz para eliminar ruídos.

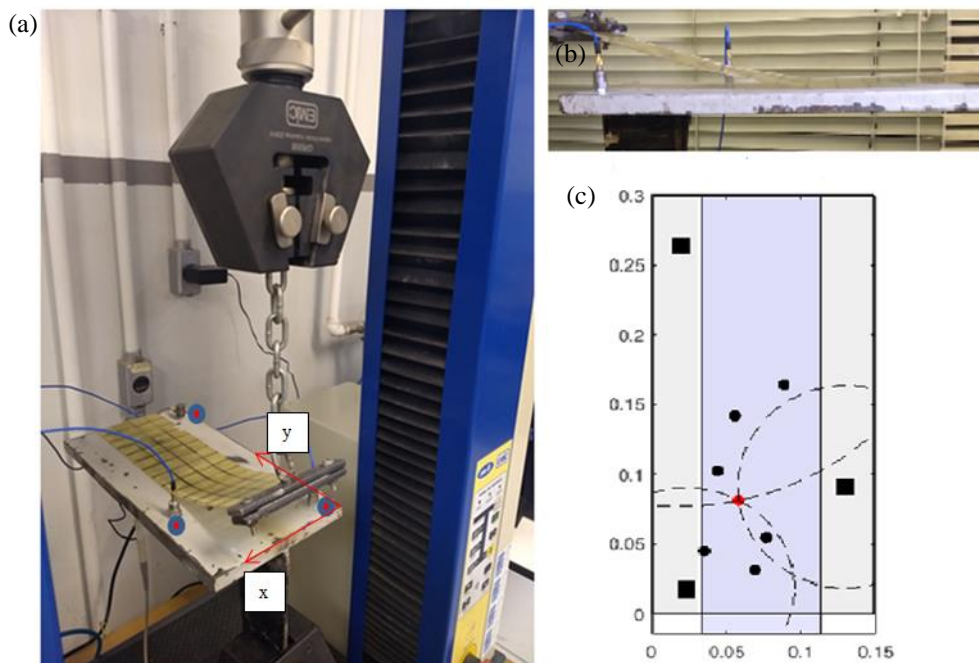
Por meio do procedimento de localização citado na seção 2.3, foi calculada a posição das fontes dos eventos de emissão acústica. É válido ressaltar que a velocidade utilizada na Equação 10 foi a velocidade de Rayleigh, pois os acelerômetros utilizados captam a propagação da onda elástica transversal. Além disso, a velocidade utilizada no cálculo da localização foi obtida através da Equação 9 e, dessa forma, diminuiu-se uma incógnita do problema. Isso foi necessário, porque só estavam disponíveis para realizar o ensaio três sensores. As propriedades mecânicas da placa de aço e da fibra de vidro em matriz de epóxi são apresentadas na Tabela 3, em que  $E_1$  é o módulo de elasticidade na direção das fibras da placa de fibra de vidro em uma matriz de epóxi,  $E_2$  e  $E_3$  são os módulos de elasticidade nas direções transversais a esse material,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$  e  $\nu_{23}$  são os valores de Poisson para as direções 1, 2 e 3.

Tabela 3: propriedades do aço e da fibra de vidro.

Propriedade dos Materiais			
Propriedade	Aço Carbono	Fibra de Vidro+ Epóxi	
Módulo de Elasticidade [GPa]	210	$E_1$	29
		$E_2$	8,84
		$E_3$	8,84
Poisson	0,3	$\nu_{12}$	0,14
		$\nu_{13}$	0,14
		$\nu_{23}$	0,3
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	7850	-	
Velocidade de <i>Rayleigh</i> [m/s]	2500	-	

As posições das fontes dos eventos estão indicadas na Fig 8 (c). Os círculos concêntricos com os sensores mostram como é determinada a posição da fonte de um evento a partir dos três tempos de início registados pelos sensores utilizados.

Figura 8: (a) e (b) mostram a placa do compósito na posição que foi ensaiada, e a localização dos sensores de emissão acústica, e (c) esquema que apresenta a placa de compósito colada na placa de aço, a posição dos acelerômetros (quadrados pretos) e a localização das fontes de alguns dos eventos registrados (círculos em preto). Para uma fonte, foram indicados os círculos concêntricos calculados a partir da posição de cada sensor.



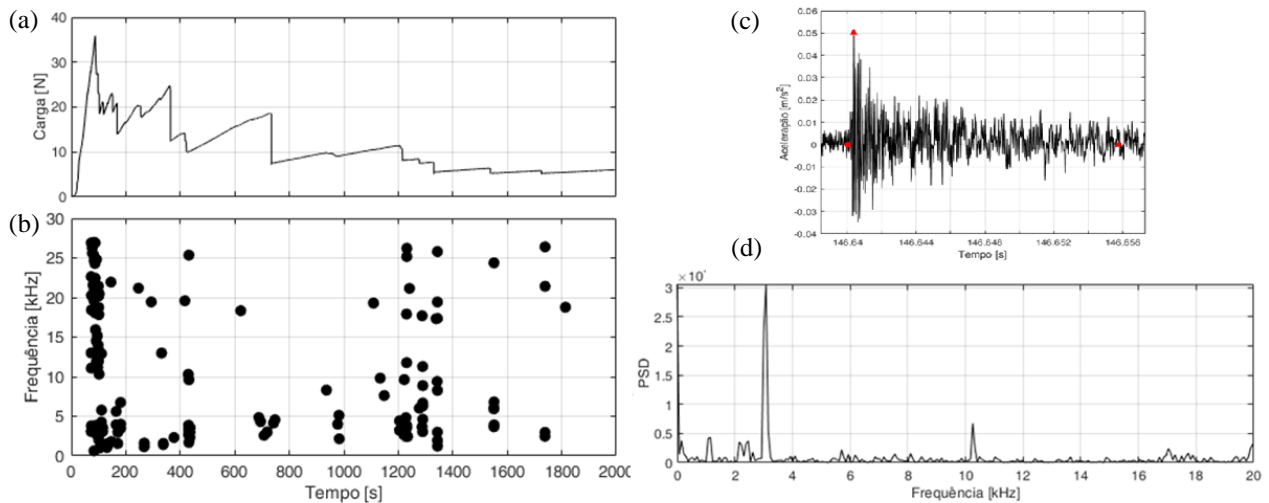
A qualidade da localização foi baixa devido à baixa frequência de aquisição dos sensores (65KHz) e as pequenas distâncias do corpo de prova ensaiado. Uma forma de minimizar esses efeitos seria realizar a aquisição com mais sensores.

Após a captura e a filtragem dos eventos, seguiu-se com a aplicação da FFT (Transformada Rápida de Fourier) no evento, para conhecer o conteúdo de frequência que contém cada evento. Na Fig. 9 (a) é apresentada evolução da carga em função do tempo durante o ensaio. Na Fig.9 (b) é plotado o valor da frequência na qual se apresenta a máxima amplitude obtida em cada evento analisado. Na Fig.9



(c) está representado um evento típico no domínio do tempo, e, finalmente, na Fig.9 (d), é plotada a respectiva transformada de Fourier.

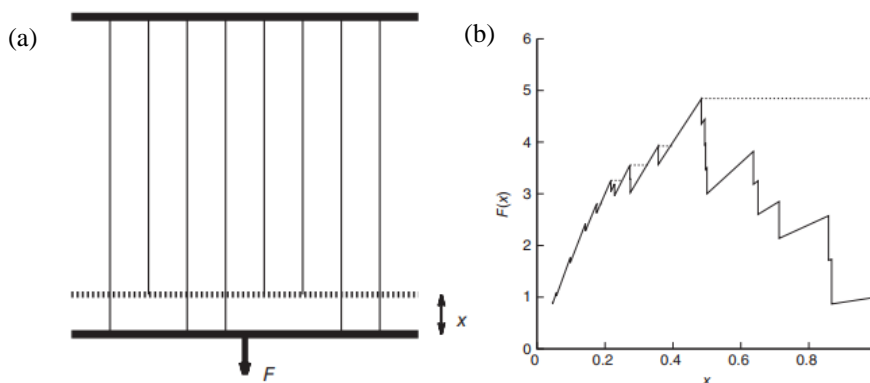
Figura 9: (a) variação da carga vs. o tempo, (b) variação da frequência que caracteriza a cada evento registrado no ensaio, (c) um evento típico de emissão acústica registrado e (d) sua densidade espectral de potência (PSD), a qual permite medir a distribuição da energia do evento por conteúdo de frequência.



Em Hansen et al. (2015), é realizada a análise de um sistema de barras solicitadas em paralelo como indicado na Fig. 10(a). Cada barra tem um comportamento elástico com uma deformação limite considerada, uma variável aleatória com uma determinada densidade de distribuição de probabilidades. Esse simples modelo apresenta resultados vinculados ao presente trabalho

O sistema de barras em paralelo permite simular o colapso de sistemas abstraindo-se das geometrias e condições de contorno do problema estudado. Nota-se a semelhança dos resultados em termos da evolução da resistência durante o processo de carga do sistema de barras conectadas em paralelo, apresentado na Fig. 10 (b), e o obtido no ensaio realizado no presente trabalho, apresentado na Fig. 9 (a).

Figura 10: (a) modelo de barras em Paralelo (Bundle Model), (b) evolução da carga durante o processo de dano.



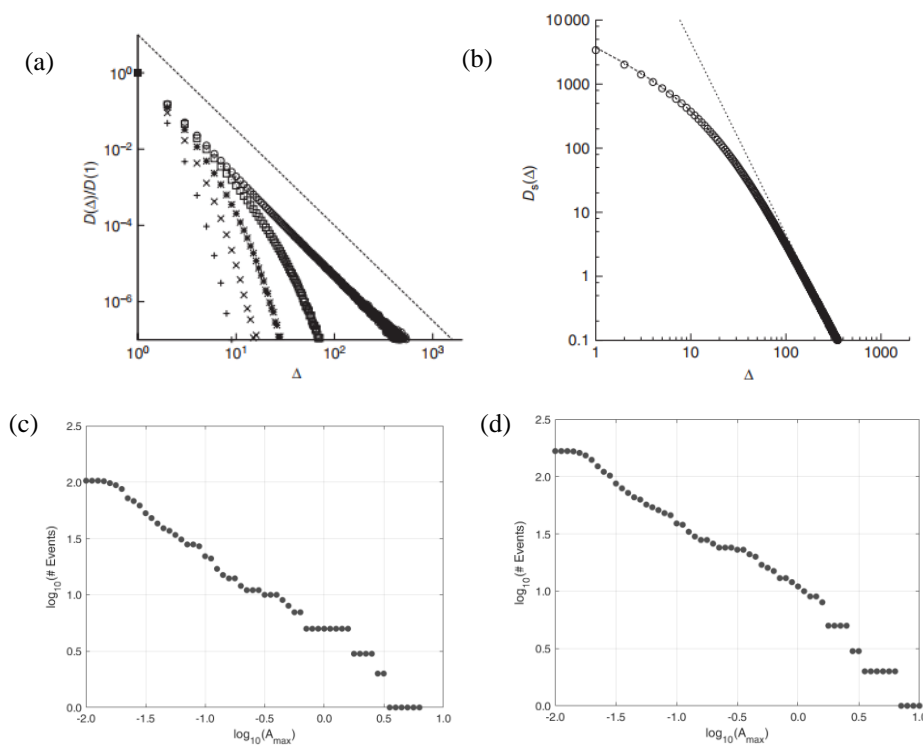
Fonte : Hansen et al. (2015)

Nesse modelo, chamaremos de avalanches o número de barras que rompem em forma simultânea. Essa medida pode ser associada a um evento de emissão acústica capturado num modelo físico.

Um dos resultados destacados por Hansen et al. (2015) mostra que a distribuição da magnitude das avalanches durante o processo de dano, em escala bilogarithmica, é linear. Nas Fig.11 (a) e Fig.11 (b), mostram-se esses resultados, sendo que a distribuição dos mesmos pode perder da linearidade, conforme ilustrado em Fig. 11(a), se o registro utilizado para confeccionar o gráfico não é completo e na Fig. 11(b) é ilustrado quando a excitação na simulação é realizada por incrementos discretos.

Na Fig. 11 (c) e Fig. 11 (d), apresentam-se as distribuições de magnitudes de emissões acústicas do experimento realizado na aplicação 2. Na Fig. 11(c) foi considerado o registro total de emissões acústicas e na Fig. 11(d) o registro com os primeiros 25 % dos eventos. É possível perceber a similaridade dos resultados da aplicação com o modelo teórico apresentado previamente.

Figura 11: resultados em termos de magnitude de eventos/avalanches vs. número de eventos (a) sistema de barras em paralelo, no caso de utilizar vários intervalos dos dados simulados, (b) sistema de barras em paralelo no caso de aplicar a excitação em intervalos discretos, (c) resultados experimentais da segunda aplicação apresentada utilizando todos os eventos registrados, (d) resultados experimentais da seg. aplicação apresentada utilizando 25% dos eventos registrados.



Fonte: (a) e (b) Hansen et al. (2015).

## 6. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo o estudo da mecânica da fratura em materiais compósitos. Para isso, foram utilizadas como ferramentas de análise a realização de experimentos, em que a técnica de emissão acústica foi empregada, e o método de simulação baseado na Peridinâmica.

No decorrer desse trabalho, foi possível chegar às seguintes conclusões:

1) O modelo de Peridinâmica utilizado forneceu resultados consistentes, apesar da limitação do modelo em não considerar a anisotropia.

2) O cálculo da segunda derivada da aceleração da abertura da boca da fissura (CMOD) resultou em uma medida de eventos de emissão acústica.

3) O registro de eventos de emissão acústica na segunda aplicação permitiu localizar de forma razoável as fontes de alguns dos eventos de emissão acústica. A utilização de sensores de mais alta frequência, assim como a utilização de mais de três sensores para realizar a localização da fonte dos eventos, teriam ajudado a melhorar a precisão da localização.

4) A comparação dos resultados obtidos na segunda aplicação com os resultados obtidos com o Modelo de Barras conectadas em paralelo (Bundle Model) tem sido esclarecedora da potência desse modelo analítico simples para a simulação do processo de dano de materiais quase frágeis. A comparação foi feita em termos da evolução da força global durante o processo de dano e em termos da distribuição do número de eventos/avalanches durante o processo de dano estudado.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a introdução da anisotropia no modelo numérico da Peridinâmica. Além disso, o estudo do conteúdo de frequência da segunda derivada do CMOD registrado durante o processo e a exploração da possibilidade de a análise utilizada ser uma fonte de informação adicional sobre os problemas estudados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, Ted. L. **Fracture Mechanics Fundamentals and Applications**. 3. ed. [S. l.]: Taylor & Francis Group, 2011. 610 p.

ASME-BPVC-SectionV. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code**. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2010.

BELYTSCHKO, T.; CHEN, H; XU, J; G, Zi. Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity with a new discontinuous enrichment. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s. l.], v. 58, ed. 12, p. 1873-1905, 2003.

BOBARU, Florin; FOSTER, John T.; GEUBELLE, Philippe H.; SILLING, Stewart A. (ed.). **Handbook of Peridynamic Modeling**. [S. l.]: Taylor & Francis Group, 2016. 530 p.

BRÜEL & Kjør PULSE 3560-C. BU 0228 - 22. [S. l.], 8 nov. 2008. Disponível em: <https://www.bksv.com/media/doc/bu0228.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2019.

CABRAL, Néstor Rossi; INVALIDI, María Agustina; D'AMBRA, Ricardo Barrios; ITURRIOZ, Ignacio. An alternative bilinear peridynamic model to simulate the damage process in quasi-brittle materials. **Engineering Fracture Mechanics**, [s. l.], v. 216, 2019.

CARPINTERI, Andrea; FORTESE, Giovanni; RONCHEI, Camilla; SCORZA, Daniela; VANTADORI, Sabrina. Mode I fracture toughness of fibre reinforced concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, [s. l.], v. 91, p. 66-75, 2017b.

FLORE, D.; STAMPFER, B.; WEGENER, K. Experimental and numerical failure analysis of notched quasi-unidirectional laminates at room temperature and elevated Temperature. **Composite Structures**, [s. l.], v. 160, p. 128-141, 2016.

GORDAN, J.E.; BALL, P. **The New Science of Strong Materials: Or Why You Don't Fall Through the Floor**. [S. l.]: Princeton University Press, 2018. 328 p.

GROSSE, Christian U.; OHTSU, Masayasu (ed.). **Acoustic Emission Testing: Basics for Research - Applications in Civil Engineering**. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008. 396 p.

HANSEN, Alex; HAMMER, Per C.; PRADHAN, Srutarshi. **The Fiber Bundle Model: Modeling Failure in Materials**. 1. ed. [S. l.]: Wiley - VCH, 2015. v. 234.

MADENCI, Erdogan; OTERKUS, Erkan. **Peridynamic Theory and Its Applications**. [S. l.]: Springer, 2014. 289 p.

MAGALHÃES, L.; SEABRA, J.; SÁ, C. Experimental observations of contact fatigue crack mechanisms for austempered ductile iron (ADI) discs. **WEAR**, [s. l.], v. 246, ed. 1-2, p. 134-148, 2000.

MIZUTANI, Yoshihiro (ed.). **Practical Acoustic Emission Testing**. 1. ed. [S. l.]: Springer Japan, 2016. 130 p.

PARKS, Michael L.; SELESON, Pablo; PLIMPTON, Steven J.; LEHOUCQ, Richard B.; SILLING, Stewart A. **Peridynamics with LAMMPS: A User Guide**. [S. l.]: Sandia National Laboratories, 2008. 30 p. v. 0.2 Beta

PCB Piezotronics - 352C33. H. [S. l.], 15 abr. 2008. Disponível em: [https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB\\_Corporate/Vibration/Products/Manuals/352C33.pdf](https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/Products/Manuals/352C33.pdf). Acesso em: 8 dez. 2019.

PCB Piezotronics - 352A60. [S. l.], 29 set. 2008. Disponível em: [https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB\\_Corporate/Vibration/Products/Manuals/352A60.pdf](https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/Products/Manuals/352A60.pdf). Acesso em: 8 dez. 2019.

SILLING, S.A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids** **48**, [s. l.], p. 175-209, 2000.

SILLING, Stewart. **Introduction to Peridynamics**. Sandia National Laboratories 10 abr. 2012. 28 Slides.

TAYLOR, David. **The Theory of Critical Distances**. 1. ed. [S. l.]: Elsevier Science, 2007. 306 p.

WEGST, Ulrike G. K.; BAL, Hao; SAIZ, Eduardo; TOMSIA, Antoni P.; RITCHIE, Robert O. Bioinspired structural materials. **Nature Mater**, [s. l.], v. 14, p. 23-36, 2015.

WEISSGRABER, P.; BECKER, W. Finite Fracture Mechanics model for mixed mode fracture in adhesive joints. **International Journal of Solids and Structures**, [S. l.], v. 50, n. 14-15, p. 2383-2394, 1 abr. 2013.

XU, X.-P.; NEEDLEMAN, A. Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, [s. l.], v. 42, ed. 9, p. 1397-1434, 1994.

ZHAO, Defang et al. Flexural damage behavior of CF/PA6 plain woven laminates with different layers. **Composites Part B**, [s. l.], v. 162, p. 631-642, 2019.