

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

RENAN RODRIGUES MARCHEZAN

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE AO ENTALHE DO POLIURETANO NECURON DE
DIFERENTES DENSIDADES UTILIZANDO PERIDINÂMICA**

Alegrete

2023

RENAN RODRIGUES MARCHEZAN

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE AO ENTALHE DO POLIURETANO NECURON DE
DIFERENTES DENSIDADES UTILIZANDO PERIDINÂMICA**

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

Orientador: Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich

Alegrete

2023

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) .

M317a Marchezan, Renan Rodrigues

Análise da sensibilidade ao entalhe do poliuretano Necuron
de diferentes densidades utilizando peridinâmica / Renan
Rodrigues Marchezan.

53 p.

Tese (Doutorado)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA
MECÂNICA, 2023.

"Orientação: Leandro Ferreira Friedrich".

1. Peridinâmica. 2. Poliuretano. 3. Sensibilidade ao
entalhe. 4. Métodos numéricos. 5. Fratura. I. Título.

RENAN RODRIGUES MARCHEZAN

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE AO ENTALHE DO POLIURETANO NECURON
DE DIFERENTES DENSIDADES UTILIZANDO PERIDINÂMICA**

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

Monografia defendida e aprovada em: 05 de julho de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr Leandro Ferreira Friedrich
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr Cristian Pohl Meinhardt
(UNIPAMPA)

Prof. Dr Vicente Bergamini Puglia
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/07/2023, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/07/2023, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **VICENTE BERGAMINI PUGLIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/07/2023, às 12:33, 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 **1172154** e o código CRC **84ABFFC6**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente queria agradecer aos meus pais Sinara e José Luiz e ao meu irmão Michel, por toda a ajuda emocional e financeira provida durante a graduação.

Quero agradecer os professores Leandro Friedrich e Vicente Puglia pela ajuda prestada durante os trabalhos de conclusão de curso 1 e 2, pela paciência e disposição ao me orientar.

A minha vó Terezinha (*in memorian*) pelos ensinamentos e risadas durante o tempo que passamos juntos.

Aos meus amigos Mariana, Ueslei Luan (*in memorian*), Andressa, Aniseh, Guilherme, Julia, Victor, Andrey, Estefano, Gabriele, Thiago, Luis Roberto, Bruno, Vanine, Guton, Willian, Marco Antônio e João Victor. Muito obrigado pelos diversos momentos proporcionados durante o nosso convívio, diversos momentos de escape com muitas e muitas risadas, conversas aleatórias e pela amizade sincera.

"A estrada para o sucesso está sempre em construção. Persista e não desista."

Lily Tomlin

RESUMO

Entender como os materiais se comportam e suas propriedades é fundamental para adaptar seu uso para as mais diversas situações, ou seja, utilizar ao máximo suas características para que não haja desperdícios. Tendo em vista que os polímeros Necuron tem muita usabilidade dentro do setor industrial, principalmente em matrizes e moldes usando ângulos diversos, é necessário compreender melhor como este material se comporta na presença de concentradores, ou ainda, a sua sensibilidade ao entalhe. Para isto, emprega-se neste trabalho a peridinâmica para a análise da sensibilidade ao entalhe do Necuron de densidades 100, 300 e 708 kg/m³. O comportamento do material é validado usando placas com entalhes em V com dados disponíveis da literatura. Após isso, placas com diferentes diâmetros de furos são simuladas e a análise da sensibilidade é realizada. Na validação os resultados numéricos obtiveram uma diferença relativa máxima de 5,38% quando comparado com os dados experimentais. Os resultados da sensibilidade ao entalhe mostram que o material pode ser classificado como quase frágil, pois se distancia da curva de insensibilidade.

Palavras-chave: Fratura, Necuron, Poliuretano, Peridinâmica.

ABSTRACT

Understanding how materials behave and their properties is fundamental to adapting their use to the most diverse situations, that is, making the most of their characteristics so that there is no waste. Considering that Necuron polymers are very usable within the industrial sector, especially in dies and molds using different angles, it is necessary to better understand how this material behaves in the presence of concentrators, or even, its sensitivity to notch. For this, peridynamics is used in this work to analyze the notch sensitivity of Necuron densities 100, 300 and 708 kg/m³. The behavior of the material is validated using V-notched plates with data available from the literature. After that, plates with different hole diameters are simulated and the sensitivity analysis is performed. In the validation, the numerical results obtained a maximum relative difference of 5.38% when compared with the experimental data. The results of the notch sensitivity show that the material can be classified as almost brittle, as it distances itself from the insensitivity curve.

Keywords: Fracture, Necuron, Polyurethane, Peridynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Navio <i>Liberty</i> um dia após o seu lançamento no estaleiro.....	11
Figura 2 – Exemplos de utilizações para o Necuron.	13
Figura 3 - Separação atômica, micro mecanismo de Clivagem.....	15
Figura 4 - Esquema de formação e propagação da trinca.....	16
Figura 5 - Gráfico tensão deformação.....	17
Figura 6 – Modos de aberturas de trincas.....	19
Figura 7 – Balanço de energia seguindo a primeira lei da termodinâmica.....	20
Figura 8 - Gráfico de sensibilidade ao entalhe, comparação da tensão líquida/tensão bruta (máxima).....	23
Figura 9 - Modelos de teorias: (a) Local, (b) Peridinâmica e (c) Dinâmica Molecular.	24
Figura 10 – Esquema de interações de pontos e como funciona a deformação da Peridinâmica após a deformação.....	25
Figura 11 – Lei constitutiva para simular o conceito de dano das ligações.	27
Figura 12 – Esquema de formulação da equação da tenacidade a fratura na peridinâmica.	28
Figura 13 – Lei Constitutiva Bi Linear. Case I – Proposta de Silling. Case II – Conceito de Horizonte Computacional. Case III – Ajuste do caso II para que tenha a mesma resposta global do caso I.....	29
Figura 14 - Energias envolvidas na fratura segundo a lei bi linear.	30
Figura 15 - Aleatoriedade no modelo PD.	31
Figura 16 - Geometria de Calibração para Modelo de sensibilidade ao entalhe.....	33
Figura 17 - Curvas de força-deslocamento para diferentes densidades do Necuron.	35
Figura 18 - Corpo de prova com diâmetro central para análise de sensibilidade ao entalhe.....	36
Figura 19 – Relação força – deslocamento variando o diâmetro do furo para o Necuron 708 kg/m ³	36
Figura 20 – Curva de sensibilidade ao entalhe para o Necuron 708.	37
Figura 21 – Comparação resultados peridinâmica e experimental da placa em V para o Necuron 708.	39
Figura 22 – Comparação resultados peridinâmica e experimental da placa em V para o Necuron 300.	40
Figura 23 – Comparação resultados peridinâmica e experimental da placa em V para o Necuron 100.	41
Figura 24 – Trincas de amostras das placas com entalhe em V.	42
Figura 25 – Comparativo de forças experimentais com as encontradas na peridinâmica para o Necuron 708.	43
Figura 26 – Sensibilidade ao entalhe Necuron 708: comparação peridinâmica x experimental.	44
Figura 27 – Sensibilidade ao entalhe Necuron 300: dados peridinâmica.	45
Figura 28 - Sensibilidade ao entalhe Necuron 100: dados peridinâmica.	45
Figura 29 – Comparativo de sensibilidade ao entalhe das diferentes densidades.....	46
Figura 30 – Diâmetros variados e suas trincas no Necuron densidade 708.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões do corpo de prova com entalhe em V.	34
Tabela 2 - Propriedades mecânicas e de fratura do Necuron.	34
Tabela 3 – Diâmetros dos furos e força máxima experimental para o Necuron 708 kg/m ³ ...	36
Tabela 4 - Propriedades do Necuron de acordo com a sua densidade.	38
Tabela 5 – Comparação dos resultados peridinâmica x experimentais da força máxima para o Necuron 708 kg/m ³ utilizando diferentes diâmetros de furos.....	43
Tabela 6 –Resultados peridinâmica da força máxima para o Necuron 100 e 300 kg/m ³ utilizando diferentes diâmetros de furos.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS	13
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	TIPOS DE FRATURA	15
2.2	MECÂNICA DA FRATURA	17
2.2.1	MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA (MFLE)	18
2.2.1.1	Critério de Energia	19
2.2.1.2	Critério do Fator de Intensidade de Tensões	20
2.2.1.3	Relação entre G e K	21
2.3	SENSIBILIDADE AO ENTALHE	21
2.4	PERIDINÂMICA	23
2.4.1	LEI CONSTITUTIVA BI LINEAR	29
2.4.2	ALEATORIEDADE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MODELO PD	30
3	METODOLOGIA	33
3.1	VALIDAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO MATERIAL	33
3.2	ANÁLISE DA SENSIBILIDADE AO ENTALHE	35
4	RESULTADOS	38
4.1	VALIDAÇÃO DO COMPORTAMENTO MATERIAL	38
4.2	ANÁLISE DA SENSIBILIDADE AO ENTALHE	42
5	CONCLUSÕES	48
6	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O enraizamento dos materiais na história humana é muito antigo. Desde os primórdios da humanidade os materiais tornaram-se destaque, dando nome inclusive as idades, tais como: Idade da Pedra (lascada ou polida), Idade do Bronze, Idade do Ferro. Cada qual destes materiais apresenta uma evolução significativa na forma como humanos trabalharam, avanços tecnológicos e ferramentas que melhoraram a qualidade de vida e adaptabilidade de nossos ancestrais. Primeiramente eram usados materiais primários encontrados na natureza, tais como pedras, peles, madeira, argila, depois foram descobertas técnicas para a criação de novos com propriedades superiores aos anteriores. Descobriu-se também que se pode mudar as propriedades com tratamentos térmicos e também com a adição de outros elementos, tendo então, um vasto acervo de materiais que podem ser escolhidos de acordo com a sua aplicação. Esse conhecimento que foi adquirido nos últimos cem anos nos possibilita criar diversos itens que precisam de propriedades únicas que atendem propósitos muito específicos. (CALLISTER, 2008)

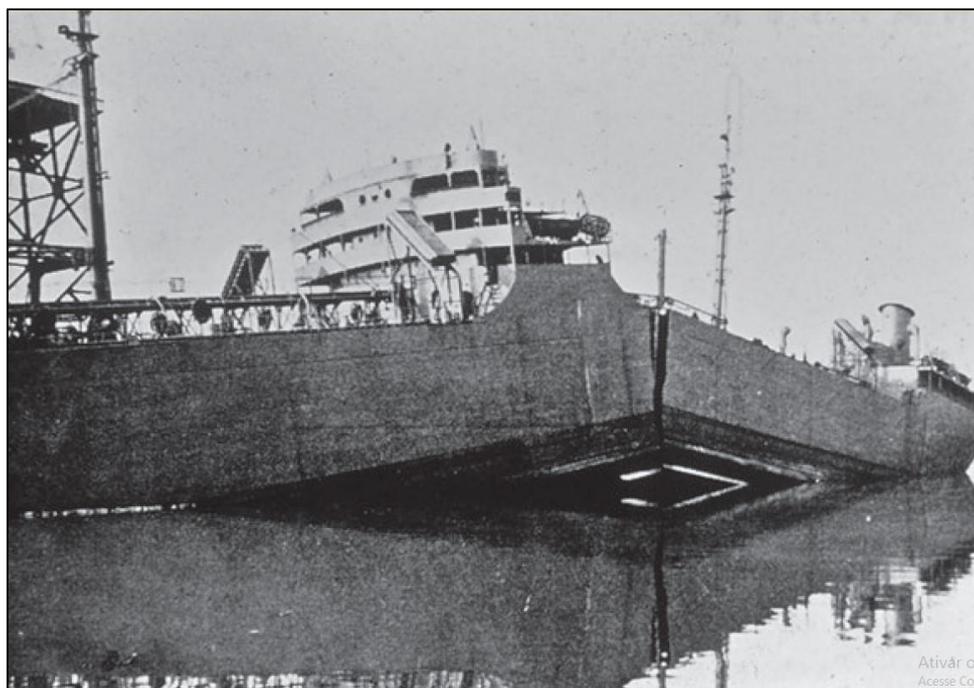
O estudo de materiais pode ser dividido nas áreas de Ciência de Materiais e Engenharia de Materiais. A ciência é a parte que investiga as propriedades e as relações entre suas microestruturas, já a engenharia é a parte na qual projeta a estrutura de um material para obter um conjunto desejado de propriedades. O cientista tem a função principal de desenvolver ou sintetizar novos materiais enquanto o engenheiro fica com a parte de criar o processamento para a criação deles. (CALLISTER, 2008)

Uma área dentro da ciência e engenharia dos materiais é o estudo da fratura, que é a separação de um objeto sob tensão, resultando na formação de duas novas superfícies. Ela é um problema comumente encontrado quando há a seleção errada dos materiais para algum projeto, por exemplo, as propriedades mecânicas não atendem aos pré-requisitos do uso, ou por outro lado, há alguma falha na criação ou processamento destes. A fratura tem três estágios principais, sendo eles: nucleação ou iniciação, propagação da trinca e separação final. (ANDERSON, 2005) (GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ, 2020)

Os estudos sobre a fratura só foram ter grandes avanços perto na época da Segunda Guerra Mundial, antes disso os arquitetos e engenheiros de época usavam

um coeficiente de segurança de 10 ou mais para as suas construções. A causa deste interesse foram os acontecimentos dos navios *Liberty*. Os Estados Unidos forneciam esses navios para a Grã-Bretanha durante a guerra e durante a produção de cerca de dois mil e setecentos navios (2700), quatrocentos deles (400) apresentaram fraturas, vinte (20) dos navios sendo totalmente inutilizáveis por terem quebrado ao meio, como mostrado na figura (1). Investigações levaram a três principais causas: as soldas eram produzidas por pessoas sem muita experiência e continham diversas imperfeições, a maior parte das fraturas iniciaram em cantos quadrados concentradores de tensões e o aço do qual os navios eram feitos tinham pouca dureza. Os estudos sobre os navios abriram um novo campo dentro da ciência dos materiais chamado de Mecânica da Fratura. (ANDERSON, 2005)

Figura 1 – Navio *Liberty* um dia após o seu lançamento no estaleiro.



Fonte: Callister (2008).

Dentro da área da Mecânica da Fratura, vem sendo utilizado métodos preventivos na análise de fraturas, principalmente na fratura frágil e por fadiga. Um grande aliado da Mecânica da Fratura são os métodos numéricos, uma vez as simulações podem ser de uma ajuda de suma importância para as análises. Um dos primeiros métodos de simulação numérica utilizado na engenharia foi o Método dos

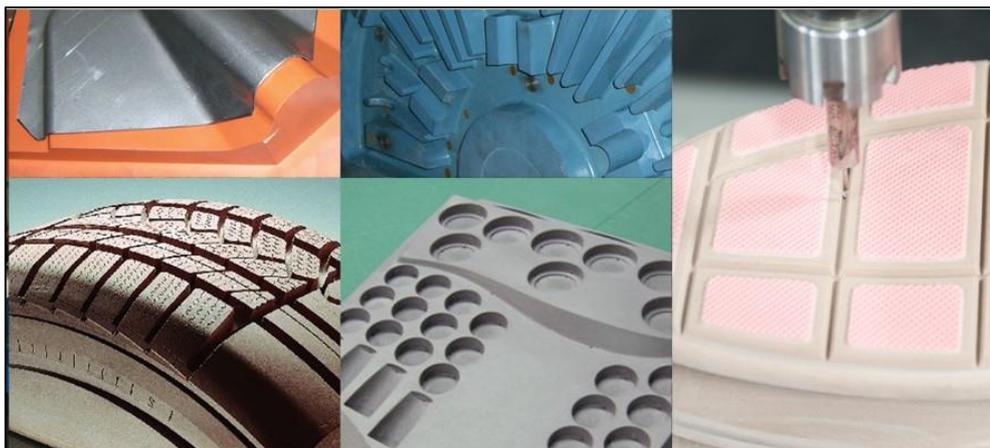
Elementos Finitos (MEF), porém o MEF não consegue simular uma heterogeneidade diante dos materiais, tendo resultados que não levam conta interstícios e defeitos de materiais presentes já na fabricação deles. Por outro lado, o Método dos Elementos Discretos (MED) consegue simular essas diferenças por não se basear nas mesmas equações que o MEF, sendo melhor utilizado para análises críticas de falhas e propagação de trincas. Ele consegue simular com interações modeladas por leis constitutivas, pequenos pontos, intervalos ou volumes dentro dos corpos, o que é perfeito para uma análise deste tipo. (LIU, 2012)

A Peridinâmica é uma nova versão da teoria da mecânica do contínuo escrita no formato de integrais de forças e publicada pela primeira vez por Silling (2000) no início dos anos 2000. Essa teoria foi proposta para resolver algumas limitações da mecânica clássica dos sólidos, que não conseguia lidar com a propagação de fissuras e falhas em materiais. A peridinâmica descreve o comportamento dos sólidos considerando a interação entre as partículas do material, em vez de analisá-las separadamente. Essa abordagem leva a uma descrição mais realista da propagação de fissuras, já que cada partícula é capaz de interagir com todas as outras.

Os polímeros são usados há muitos séculos pela humanidade, principalmente aqueles que são ocorrem naturalmente, ou seja, derivados de plantas e animais. As modernas pesquisas têm mostrado e determinado como é a formação dessas estruturas moleculares dentro desses materiais. Muitos plásticos, materiais fibrosos e borrachas que hoje em dia estão presente nas nossas vidas são materiais polímeros sintéticos. (CALLISTER, 2008)

Um material que vem ganhando bastante atenção recentemente é o Necuron. Este é um polímero poliuretano que é vendido em diversas densidades, cada qual com seu uso. Pode ser encontrado também na versão Epóxi. Algumas das aplicações deste material são: Moldes para design e protótipos, gabaritos, ferramentas e modelos para fundição, ferramentas de laminação, dentre outros mostrados na Figura (2). Geralmente é vendido em blocos, placas ou pré-fabricados. (GLOBALTEC, 201-?)

Figura 2 – Exemplos de utilizações para o Necuron.



Fonte: Globaltec (201-?).

1.1 Justificativa

O estudo sobre os materiais é muito importante para o mundo da engenharia, visto que quanto maior o conhecimento que se tem sobre aquele material e as possíveis aplicações dele, pode-se evitar impactos negativos na sua aplicação, assim evitando perdas de todos os tipos (custos, tempo, retrabalhos, etc.). Tendo em vista que o uso do Polímero Necuron é tão versátil dentro da indústria, há uma necessidade de compreensão maior sobre como ele se comporta. Como ele é bastante usado em matrizes e moldes, onde geralmente trabalha-se com ângulos precisos e diversas geometrias, é necessário entender a sensibilidade ao entalhe do mesmo.

1.2 Objetivo Geral e específicos

Este trabalho tem como objetivo geral, analisar numericamente a sensibilidade ao entalhe do material Necuron, de diferentes densidades, quando este é submetido a um carregamento até a ruptura utilizando a Peridinâmica.

Objetivos específicos deste trabalho são:

- Validar o comportamento do material de acordo com os dados experimentais disponíveis na literatura em corpos de prova com entalhe em V;
- Validar o comportamento de sensibilidade ao entalhe para o Necuron com densidade 708 kg/m^3 disponível na literatura;

- Analisar a sensibilidade ao entalhe do Necuron para as densidades 100 e 300 kg/m³.

1.3 Estruturação do trabalho

Esse trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro traz uma breve introdução sobre a importância do estudo de materiais e a aplicação dos métodos numéricos. O segundo traz aspectos importantes da fundamentação teórica como os tipos de fratura, Mecânica da Fratura, Sensibilidade ao entalhe e por fim, a Peridinâmica. O terceiro capítulo trata sobre a metodologia adotada para o alcance dos objetivos. No quarto capítulo são apresentados os resultados e a análise dos mesmos. No quinto e último capítulo são descritas as conclusões a partir dos resultados contidos no capítulo quatro, assim como sugestões de trabalhos futuros.

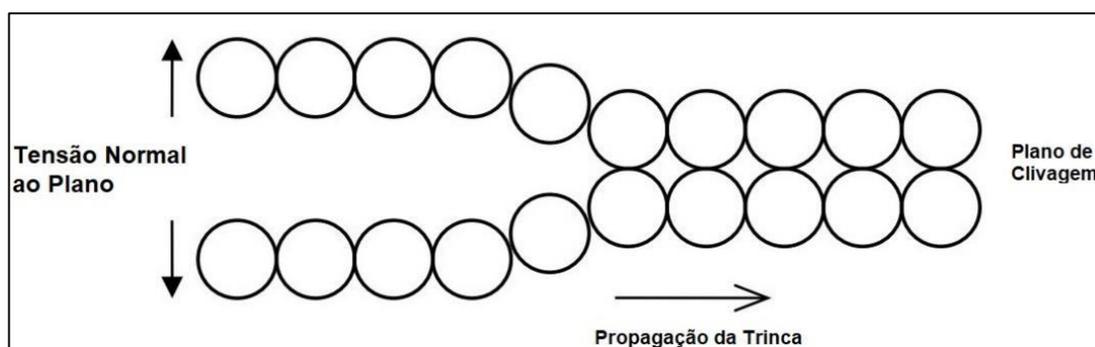
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tipos de Fratura

O rompimento de uma estrutura é comumente relacionado à ocorrência de trincas. A análise da fratura pode ser realizada em diferentes níveis dentro do material, como na escala microscópica, que envolve os mecanismos de fratura em pequena escala como, por exemplo, verificar como ocorreu a fratura nos grãos da microestrutura, e na escala macroscópica, que se concentra nos mecanismos de fratura em grande escala, como ensaios de fadiga. A interação entre esses processos resulta em um tipo de fratura, que é classificado como frágil ou dúctil em materiais de engenharia. (GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ, 2020)

A fratura dos materiais pode ser analisada em termos de micro mecanismos que ocorrem na escala dos grãos. Esses micros mecanismos podem ser citados como a clivagem e a coalescência de microcavidades, que estão associados principalmente com a fratura frágil e dúctil, respectivamente. A clivagem é um processo em que os átomos são separados ao longo de um plano cristalográfico específico, conhecido como plano de clivagem, que pode variar entre diferentes grãos e materiais. Esse tipo de fratura é classificado como transgranular já que se propaga ao longo do plano cristalográfico. A Figura (3) representa esse processo de clivagem. (GONZALEZ-VELAZQUEZ, 2020) (MAGGIO, 2019)

Figura 3 - Separação atômica, micro mecanismo de Clivagem.

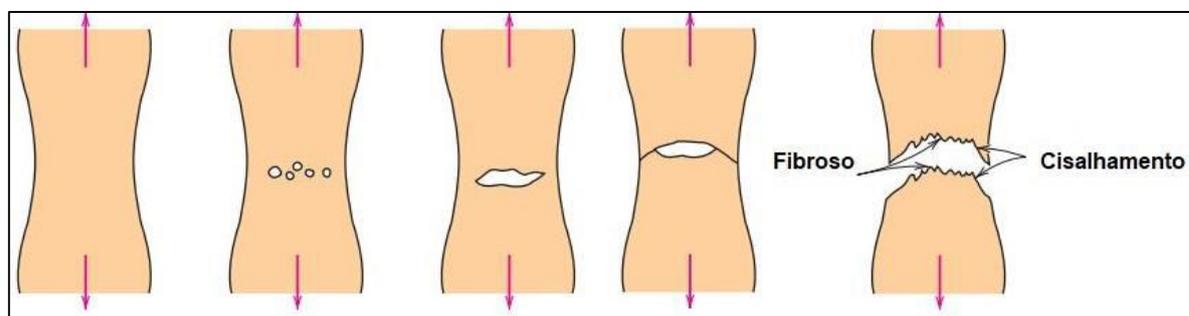


Fonte: González-Velázquez (2020).

A coalescência de microcavidades é um processo em que os pequenos vazios se unem para formar uma grande superfície de fratura. Essas cavidades são geradas durante a deformação do material, como pode ser observado na Figura (4) em um

ensaio de tração, após o aparecimento do empescoçamento. Com o aumento do volume dos vazios e a redução da área remanescente, a peça eventualmente sofre fratura, apresentando a forma característica de "taça e cone". Na escala macroscópica, os mecanismos de fratura que levam o material à falha incluem sobrecarga, fadiga, corrosão e fluência, entre outros. Esses mecanismos são influenciados pelas condições ambientais, taxa de carregamento, deformação, temperatura, tempo e outros fatores. (CALLISTER, 2008) (MAGGIO, 2019) (GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ, 2020)

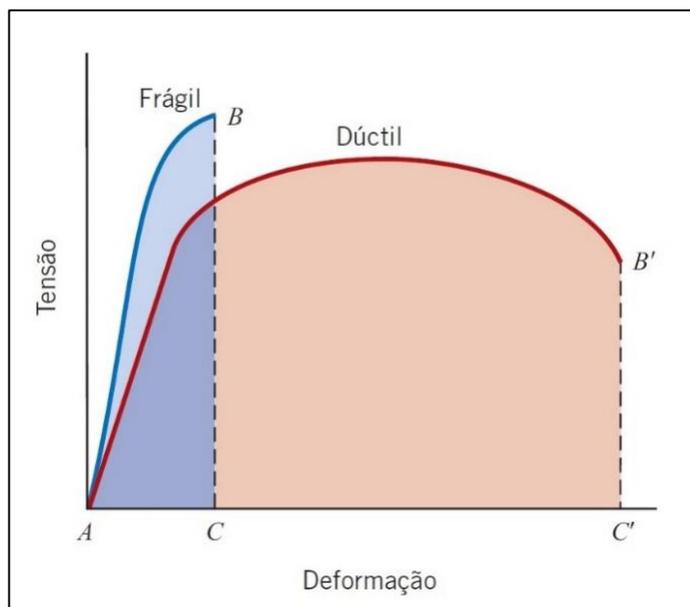
Figura 4 - Esquema de formação e propagação da trinca.



Fonte: Callister (2008).

A figura (5) apresenta o gráfico de tensão por deformação, tanto de fratura frágil como para fratura dúctil. A área abaixo da curva representa a energia absorvida pelo material antes do rompimento, nota-se que os materiais mais dúcteis apresentam grande deformação antes do rompimento, enquanto os materiais frágeis não possuem essa característica, rompendo abruptamente. (CALLISTER, 2008)

Figura 5 - Gráfico tensão deformação.



Fonte: Callister (2008).

2.2 Mecânica da Fratura

O método convencional de dimensionamento de estruturas envolve a comparação da tensão equivalente (σ_{eq}) que é calculada de acordo com critérios de falha como Von Misses, Rankine, Tresca, entre outros, com a tensão de referência do material (σ_{rup}). Essa tensão de referência é determinada por meio de ensaios padronizados, levando em conta as características do material, a taxa de aplicação do carregamento ($\dot{\sigma}$) e a temperatura do ambiente (T), e é obtida sob condições de carregamento uniaxial. Em adição, o fator de segurança (N) é geralmente considerado nessa análise, como forma de levar em conta defeitos, sobrecargas e outros fatores que não são diretamente incluídos no cálculo. (KANNINEN; POPELAR, 1985) (CABRAL, 2016)

$$\sigma_{eq}(\sigma, \text{Geometria}, \text{Condições de Contorno}) \leq \sigma_{rup}(\text{material}, T, \dot{\sigma})/N \quad \dots(1)$$

Quando há conhecimento prévio dos defeitos ou discontinuidades presentes no material, a aplicação da equação mencionada anteriormente torna-se inadequada para realizar as verificações necessárias, já que as tensões são ampliadas em tais situações. A fim de garantir a confiabilidade da utilização das estruturas, a mecânica da fratura propõe uma abordagem alternativa para solucionar esse problema, a equação (2). (CABRAL, 2016)

Para realizar a verificação de estruturas que apresentam defeitos ou descontinuidades, a abordagem convencional da análise de tensões se torna inviável, pois nestes casos as tensões são maximizadas. Uma nova abordagem para resolver esse problema é apresentada pela mecânica da fratura, a partir da definição de um parâmetro Z que leva em conta o tamanho da trinca (a), geometria e condições de contorno da estrutura. Esse parâmetro é então comparado com Z_{mat} que é obtido a partir da ruptura do material em amostras com geometria, condições de contorno, temperatura, taxa de carregamento e coeficiente de segurança normalizados. A nova relação mostrada na equação (2) entre os parâmetros Z e Z_{mat} é utilizada para garantir a utilização confiável das estruturas.

$$Z(a, \text{Geometria, Condições de Contorno}) \leq Z_{mat}(\text{material, T, } \sigma) / N \quad \dots(2)$$

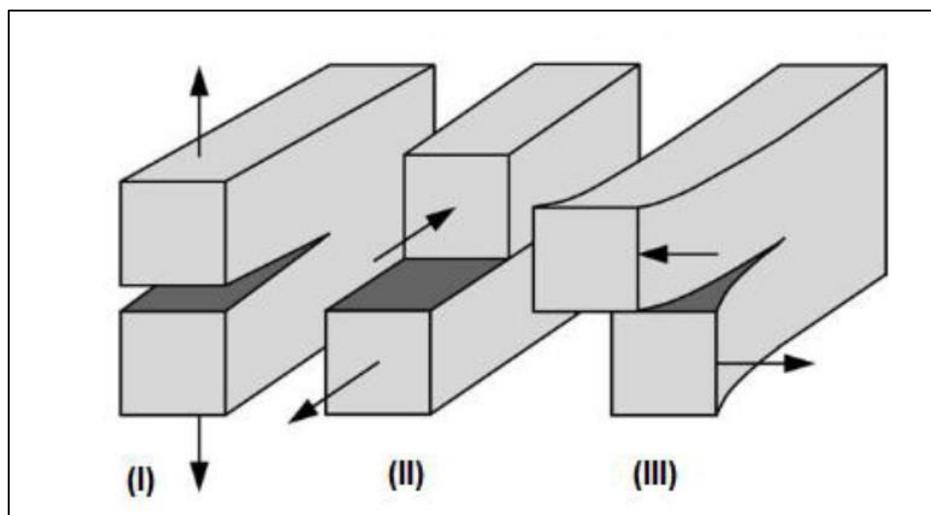
A equação acima, se for verdadeira, resulta na confirmação de que a trinca não se propagará de forma instável. Alguns parâmetros de condições de contorno são encontrados em tabelas na literatura, tais como: G_c sendo a energia específica de fratura ou K_{IC} como sendo a tenacidade a fratura. Existem duas principais divisões na mecânica da fratura, sendo a primeira a mecânica da fratura linear elástica (MFLE), que considera a deformação plástica na região próxima à propagação da trinca como mínima e, portanto, desprezível. A segunda divisão é a mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP), onde a região de plasticidade é maior e não pode ser desconsiderada. No contexto deste trabalho, os critérios da MFLE são mais relevantes, e serão explicados em mais detalhes na subseção a seguir. (CABRAL, 2016)

2.2.1 Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

A presença de uma trinca em um material introduz uma maior complexidade na determinação da tensão máxima antes da falha, pois depende de múltiplos fatores. Um desses fatores é a forma como a solicitação é aplicada à trinca, como ilustrado na Figura (6). O Modo I ocorre quando a trinca é submetida a um carregamento de tração, enquanto que os Modos II e III correspondem a um carregamento de cisalhamento que causa, respectivamente, deslizamento e rasgamento da trinca. Adicionalmente, é possível que ocorra a combinação destes modos. O Modo I representa o maior risco

para a estrutura ou componente, uma vez que é o sentido de menor resistência na maioria dos materiais. (ANDERSON, 2005)

Figura 6 – Modos de aberturas de trincas.



Fonte: Anderson (2005).

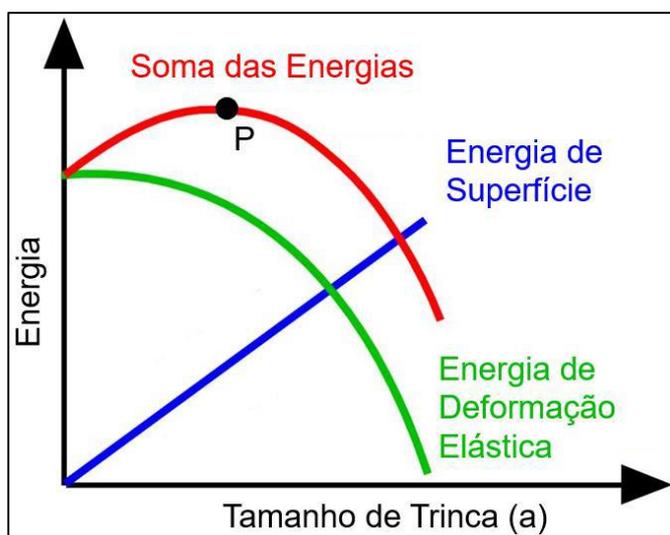
Existem duas abordagens principais na MFLE para avaliar a estabilidade de uma estrutura com trincas: o critério de energia (G), que realiza um balanço geral na estrutura, e o critério local do fator de intensidade de tensões (K), que analisa a distribuição das tensões na ponta da trinca. (ANDERSON, 2005)

2.2.1.1 Critério de Energia

O critério começou por volta de 1920, que deu início ao desenvolvimento da área e estudos mais aprofundados de mecânica da fratura. Foi feito um balanço de energia num sólido, seguindo os princípios da primeira lei da termodinâmica. Na figura (7) apresentada, é possível visualizar como ocorre a variação de energia durante a propagação de uma trinca. À medida que a trinca se propaga, a energia de deformação diminui e a energia de superfície aumenta. Quando a trinca atinge o tamanho crítico (ponto P), ela passa a se propagar de forma instável sem a necessidade de aporte de energia adicional. Em 1956, Irwin simplificou o modelo de Griffith para facilitar sua aplicação em problemas de engenharia. Ele introduziu o conceito de taxa de liberação de energia (G), que representa a quantidade de energia disponível para o crescimento da trinca. Embora o termo "taxa" sugira variação no

tempo, G é calculado como a variação da energia potencial do sistema por unidade de área da trinca durante a propagação. (ANDERSON, 2005)

Figura 7 – Balanço de energia seguindo a primeira lei da termodinâmica.



Fonte: McGuinty (2014).

A energia específica de fratura G_c é uma propriedade de cada material que depende diretamente das condições de contorno, propriedades e tipo de carregamento. A equação (3) determina a ocorrência instável da propagação, que antes foi descrita como ponto P da figura (7).

$$G > G_c \quad \dots(3)$$

2.2.1.2 Critério do Fator de Intensidade de Tensões

O fator de intensidade de tensões (K) foi proposto por Irwin em 1957, baseando-se no trabalho anterior de Westergaard em 1939 que definiu o campo de tensões na presença de uma descontinuidade. O valor de K reflete a magnitude das tensões na ponta da trinca, as quais variam com o tamanho da trinca (a), embora o campo de tensões permaneça inalterado. Essa característica permite que resultados obtidos em amostras de dimensões reduzidas possam ser extrapolados para estruturas reais. O parâmetro leva em conta a geometria, o tamanho da trinca e a tensão aplicada, e pode ser expresso de forma geral pela Equação (4), em que σ representa a tensão aplicada,

a é o comprimento da trinca e Y é uma constante. (ANDERSON, 2005) (MCGUINITY, 2014)

$$K_{(I,II,III)} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \dots(4)$$

A trinca irá se espalhar de forma instável apenas quando K for maior que um valor crítico chamado de tenacidade a fratura (K_c), obtido em ensaios pré definidos por norma. A equação (5) apresenta o critério de integridade da estrutura.

$$K < K_c \quad \dots(5)$$

2.2.1.3 Relação entre G e K

É possível correlacionar os parâmetros mencionados até o momento para análise na MFLE. No caso de uma placa com dimensões infinitas contendo uma trinca de tamanho " a " no centro, sob condições de estado plano de tensões, a Equação (6) relaciona K e G para o modo I de carregamento, onde $E = E'$.

$$G_I = \frac{K_{IC}^2}{E'} \quad \dots(6)$$

Neste caso, por se tratar de estado plano de deformações, E' deve ser substituído na equação anterior por $E' = E / (1 - \nu)^2$. (ANDERSON, 2005)

2.3 Sensibilidade ao entalhe

É praticamente impossível evitar mudanças geométricas, como entalhes, furos, ressalto e rasgos, durante o projeto de estruturas e máquinas. Essas descontinuidades são conhecidas como concentradores de tensões e são capazes de intensificar as tensões em uma determinada região, alterando significativamente o comportamento do material e podendo causar danos. A literatura apresenta alguns parâmetros para avaliar a integridade das estruturas na presença de entalhes, sendo o fator de concentração de tensão K_t um dos mais utilizados. O K_t é definido pela equação (7), onde $\sigma_{máx}$ representa a tensão na região do concentrador e σ_a é a tensão nominal aplicada remotamente. (NIJS *et al.*, 2020)

$$K_t = \frac{\sigma_{máx}}{\sigma_a} \quad \dots(7)$$

Existem ábacos que fornecem valores para o parâmetro em questão, os quais são amplamente disponíveis na literatura. No entanto, para muitos materiais, esses fatores de concentração não podem ser aplicados diretamente. É necessário, antes de tudo, entender como o material responde à presença de descontinuidades, considerando sua capacidade de deformação plástica ou de acumulação de danos próximo ao entalhe. Essa sensibilidade é um fator crucial para determinar sua performance na presença de descontinuidades e, portanto, é essencial conhecê-la na fase de projeto para prever com precisão todos os tipos de falha, incluindo falhas por fadiga. (ALDERLIESTEN, 2017)

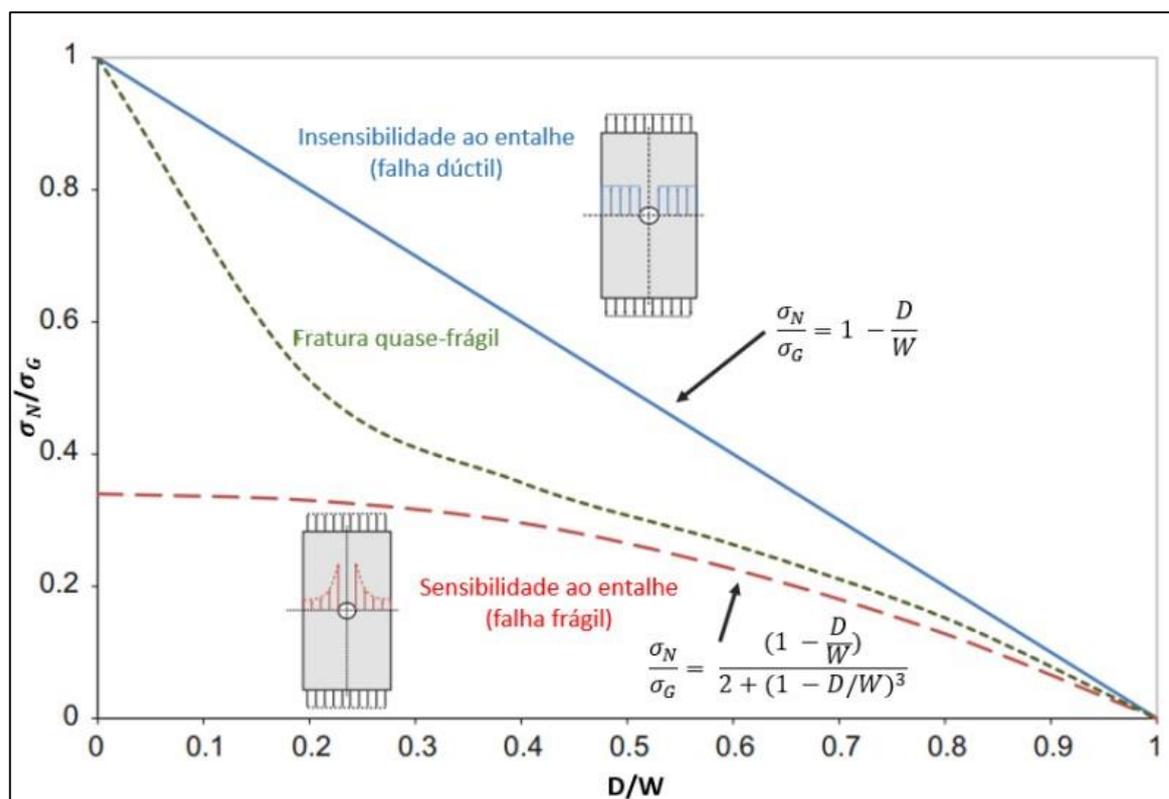
De acordo com Silva *et al.* (2020), o Critério da Máxima Tensão (*Maximum Stress Criterion* - MSC) é uma abordagem que permite realizar essa análise. Esse critério é ilustrado na figura 8, onde uma série de placas com furos centrais é carregada axialmente e as tensões bruta e líquida são calculadas. As Equações (8) e (9) apresentam, respectivamente, as equações para a tensão bruta e a tensão líquida do corpo de prova. Na equação da tensão bruta, não se considera o diâmetro do furo no cálculo da área, que pode ser estimada como a tensão última do material (σ_U). Já na equação da tensão líquida, o diâmetro do furo é considerado. A constante W representa a largura do corpo de prova, D o diâmetro do furo, F a força aplicada no momento da ruptura e t a espessura.

$$\sigma_G = \sigma_u = \frac{F}{Wt} \quad \dots(8)$$

$$\sigma_N = \frac{F}{(W-D)t} \quad \dots(9)$$

Para materiais frágeis, a concentração de tensão próxima à raiz do entalhe é alta e diminui gradualmente, tornando o material sensível à presença destes. Em contrapartida, para materiais dúcteis, como aço e alumínio, a região de plasticidade distribui as tensões ao longo da seção transversal, tornando a variação de tensão dependente apenas da área líquida e, portanto, menos sensível ao entalhe. Materiais quase-frágeis, como concreto, compósitos reforçados e algumas espumas rígidas, estão na região de transição de comportamento, governada pelo acúmulo de dano e tamanho da estrutura, e são amplamente utilizados na engenharia. (ALDERLIESTEN, 2017) (SILVA *et al.*, 2020).

Figura 8 - Gráfico de sensibilidade ao entalhe, comparação da tensão líquida/tensão bruta (máxima).



Fonte: Adaptado de Alderliesten (2017).

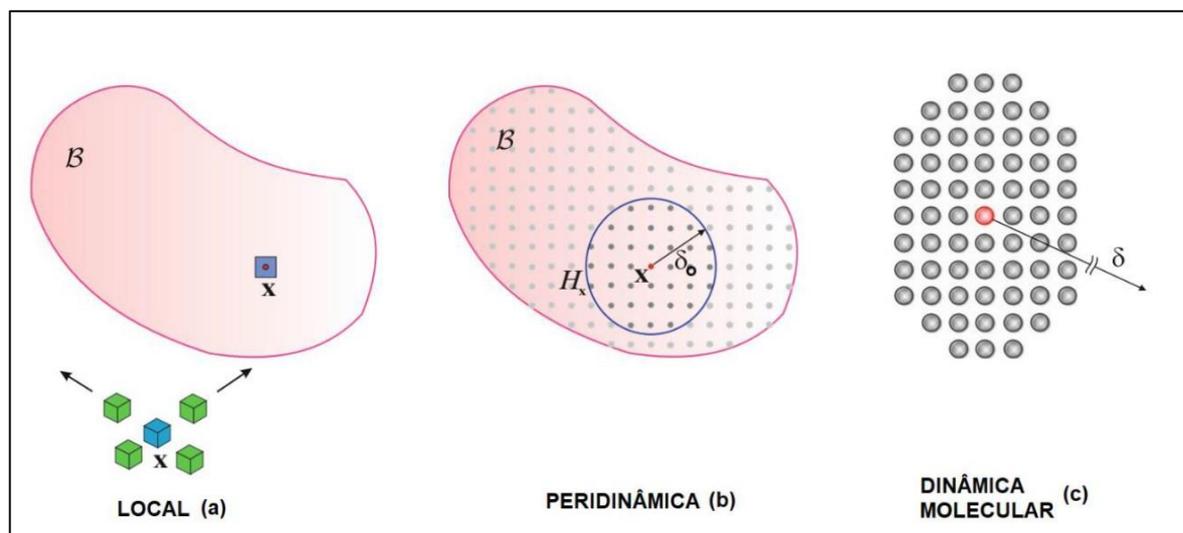
2.4 Peridinâmica

Os métodos numéricos têm se tornado cada vez mais presentes na resolução de problemas de engenharia, mas nem todos são capazes de representar de forma precisa o processo de fratura dos materiais. Entre os métodos mais utilizados estão as teorias locais, como a teoria clássica do contínuo ilustrada na Figura (9a), que considera somente a interação do ponto material com seus vizinhos imediatos, tornando-a questionável quando há variações de escala na geometria. Além disso, as equações diferenciais parciais utilizadas na teoria clássica se tornam indefinidas na presença de descontinuidades, como uma trinca, limitando sua aplicabilidade. (LIU, 2012) (JAVILI *et al.*, 2019) (MADENCI, 2014)

Embora existam formas de contornar as limitações das simulações de fratura, as soluções encontradas são aplicáveis a apenas alguns casos específicos, não abrangendo as diversas condições complexas de propagação de trincas. As simulações de dinâmica molecular, por sua vez, parecem ser uma solução promissora, já que analisam as interações em nível atômico e permitem um grande

número de interações, como mostra a Figura (9c). No entanto, essas simulações ainda são usadas principalmente para entender a física que rege o processo de fratura, uma vez que simular uma estrutura de engenharia de tamanho real requer recursos computacionais e de tempo ainda não disponíveis. (LIU, 2012) (JAVILI *et al.*, 2019) (TAYLOR, 2010)

Figura 9 - Modelos de teorias: (a) Local, (b) Peridinâmica e (c) Dinâmica Molecular.



Fonte: Madenci (2014).

Entre a teoria clássica e a dinâmica molecular, encontram-se as teorias não locais, que levam em consideração o comportamento de pontos materiais situados a uma distância de raio finito do ponto de interesse. Quando esse raio é da mesma magnitude da geometria analisada, a análise passa a ser de dinâmica molecular (CABRAL, 2016).

A Peridinâmica é uma das teorias não locais e foi introduzida por Silling (2000) com o objetivo de modelar trincas de forma mais realista. Nessa teoria, a equação de movimento da mecânica dos sólidos foi reformulada substituindo as derivadas por integrais, que são definidas em descontinuidades. Além disso, a Peridinâmica introduziu o conceito de dano do material, permitindo a modelagem do início e propagação de trincas de forma arbitrária e realista. Existem duas versões da Peridinâmica e neste trabalho será utilizada somente a versão baseada em ligações (*bond-based PD*).

Considerando o corpo não deformado formado pela região B na Figura 10(a), cada ponto material dentro da região destacada é associado a uma coordenada $x_{(k)}$, onde k é um número infinito ($k = 1, 2, 3...$). Essas coordenadas são referenciadas em

um sistema conforme ilustrado. Cada ponto material interage com os seus vizinhos dentro de uma vizinhança delimitada por δ_o , conhecida como horizonte peridinâmico. Essa vizinhança também pode ser chamada de família de x , ou H_x . A interação entre os pontos materiais x e x' é representada por uma força de ligação f . (ZHOU, 2017)

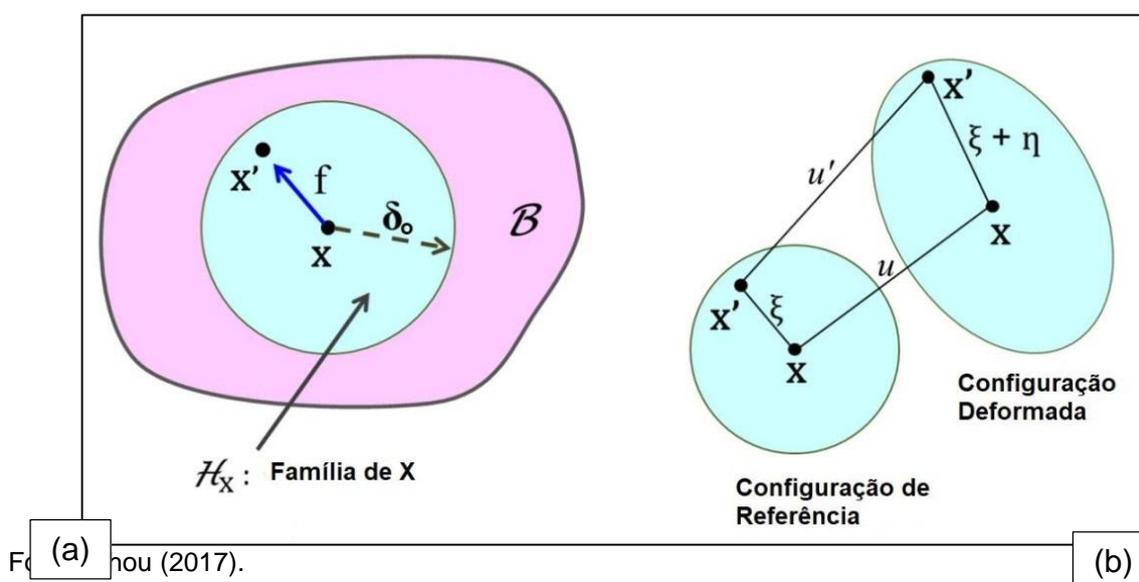
Em relação às coordenadas cartesianas de referência, cada ponto material sofre deslocamentos representados pelos vetores $u(x,t)$ e $u(x',t)$ para ambos os pontos materiais. A posição dos pontos antes e após a deformação é ilustrada na Figura 10(b). Além disso, podemos visualizar o vetor de posição relativa entre os pontos quando não deformados, representado por ξ , e o vetor de deslocamento relativo, simbolizado por η .

As definições são fornecidas para cada instante de tempo pelas Equações (10) e (11), respectivamente. O vetor $\xi + \eta$ representa a posição relativa dos pontos x e x' após a deformação, de forma que mostre a posição atual dos mesmos.

$$\xi = x' - x \quad \dots(10)$$

$$\eta = u(x', t) - u(x, t) \quad \dots(11)$$

Figura 10 – Esquema de interações de pontos e como funciona a deformação da Peridinâmica após a deformação.



A Equação (12) traz a equação de movimento da teoria peridinâmica, baseando-se na segunda lei de Newton. Levando em conta a ρ como densidade, \ddot{u} representa o vetor aceleração, b representa as forças de corpo e f sendo a força de

ligação que a partícula x' exerce sobre x , é possível então determinar a aceleração de certo ponto material para cada instante de tempo. A integral leva em conta todas as interações na família H_x . (SILLING, 2005; CABRAL, 2016)

$$\rho \ddot{u}(x_{(k)}, t) = \int_{H_x} f(\eta, \xi) dX_{x'} + b(x, t) \quad \dots(12)$$

A distância entre os pontos, representada por ξ , e a interação só poderá ocorrer se o valor da distância for menor que o valor do horizonte. A Equação (13) demonstra a anulação do par de forças f caso esta condição não seja verdadeira. (SILLING, 2005)

$$|\xi| > \delta_o \rightarrow f(\eta, \xi) = 0 \quad \dots(13)$$

A força f tem certas propriedades definidas pelas Equações (14) e (15) a seguir.

$$f(-\eta, -\xi) = -f(\eta, \xi) \forall \eta \xi \quad \dots(14)$$

$$(\eta, \xi) \times f(\eta, \xi) = 0 \quad \dots(15)$$

Ambas propriedades conservam balanço de momento linear e angular, consequentemente, o par de forças que uma partícula exerce sobre a outra, tem a mesma magnitude e sentido contrário, além de que a força f tem sentido paralelo ao vetor $\eta + \xi$.

O alongamento das ligações é regido pela Equação (16). Trazendo os vetores normais para representar o comprimento das ligações nos seus estados: inicial e deformado. Esse conceito é definido para o dano dentro da peridinâmica, contando que os pontos deixam de estar ligados quando o valor de s alcança um determinado valor crítico s_o . Como o rompimento entre os pontos é permanente, o modelo depende do histórico de ligações entre os pontos, na verificação de que um ponto ainda estaria ligado com outros ou não. (CABRAL, 2016; MACEK, 2007)

$$s(t, \xi, \eta) = \frac{\|\xi + \eta\| + \|\xi\|}{\|\xi\|} \quad \dots(16)$$

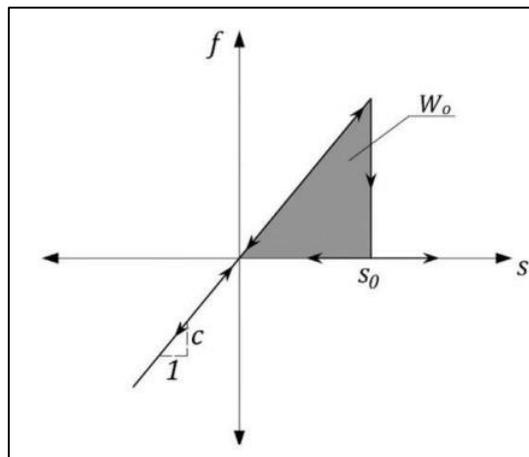
Diante disso, a equação das forças f pode ser reformulada como $f = c(\xi)s$, onde $c(\xi)$ representa o módulo de elasticidade das ligações. Para um caso bidimensional, a Equação (17) substitui o módulo de elasticidade para que este independa de ξ .

$$c = \frac{6E'}{\pi\delta_0^4(1-2\nu')e} \quad \dots(17)$$

onde e é a espessura do corpo, temos que $E' = E$ e $\nu' = \nu$ para o estado do plano de tensões, assim como $E' = E(1 - \nu^2)$ e $\nu' = \frac{\nu}{(1 - \nu)}$ para o estado de deformações.

A Figura (11) mostra o esquema da Lei Constitutiva, onde a área embaixo da curva representa W_0 que é o trabalho necessário para quebrar uma única ligação. (CABRAL *et al.*, 2019)

Figura 11 – Lei constitutiva para simular o conceito de dano das ligações.



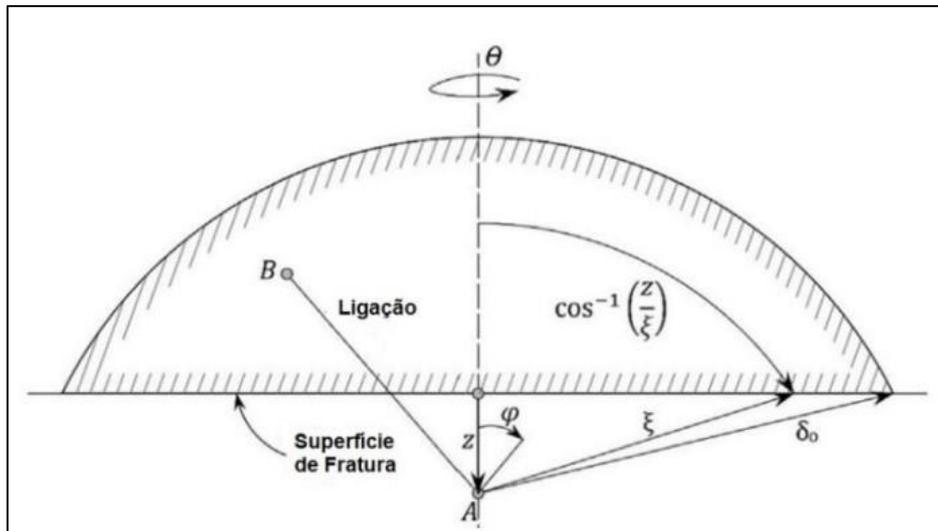
Fonte: Cabral *et al.* (2019).

A Equação (18) mostra a ligação do alongamento crítico a um certo parâmetro que é conhecido do material, no caso dessa equação, sendo a energia específica de fratura G_f . Essa energia de fratura se equivale a energia dissipada quando há o

rompimento de diversas ligações em uma certa área. A Figura (12) mostra a geometria da qual se desenvolve a equação abaixo. Assim sendo:

$$G_f = \int_0^{\delta_o} \int_0^{2\pi} \int_z^{\delta_o} \int_0^{\cos^{-1}z/\xi} \left(\frac{cs_o^2\xi}{2} \right) \xi^2 \sin\varphi d\varphi d\xi d\theta dz = \frac{\pi cs_o^2 \delta_o^5}{10} \quad \dots(18)$$

Figura 12 – Esquema de formulação da equação da tenacidade a fratura na peridinâmica.



Fonte: Cabral et al. (2019).

Substituindo a Equação (17) na (18), obtém-se a Equação (19) que expressa os alongamentos críticos s_o função de parâmetros de material para os casos bidimensionais.

$$s_o = \sqrt{\frac{5\pi G_f}{9E\delta_o}} \quad \dots(19)$$

Para representar o dano de um material, é criado um índice local chamado de φ , levando em conta como está o estado das ligações do ponto material em análise. Se $\varphi = 0$ então o ponto em questão não possui nenhuma ligação rompida. Caso o $\varphi = 1$ então o ponto está totalmente desconectado do corpo. As Equações (20) e (21) mostram essa relação.

$$\varphi = 1 - \frac{\int_{H_x} \vartheta dV_\xi}{\int_{H_x} dV_\xi} \quad \dots(20)$$

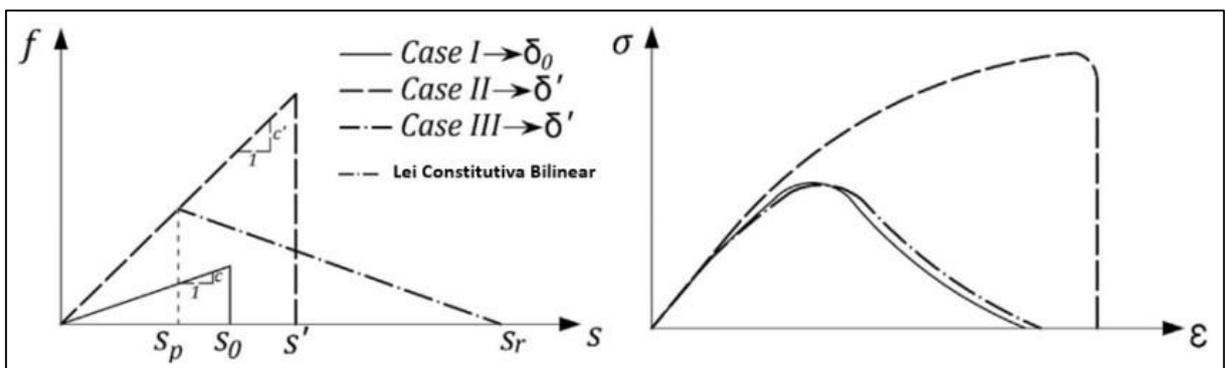
onde ϑ é a função escalar responsável por relacionar o estado das conexões entre as ligações presentes no ponto x ou função escalar de dano.

$$\vartheta = \begin{cases} 1 & \text{se } s < s_0 \\ 0 & \text{se } s \geq s_0 \end{cases} \quad \dots(21)$$

2.4.1 Lei constitutiva bi linear

A lei constitutiva bi linear é uma reformulação da lei constitutiva uniaxial, criada para que haja a possibilidade de modelar os materiais quase frágeis. Sendo o horizonte δ_0 uma propriedade do material, o tamanho da família H_x pode ser gigante, até mesmo maior que a estrutura, o que torna impossível a simulação devido ao enorme número de ligações entre pontos. Para resolver este problema, Cabral *et al.* (2019), inseriu o conceito de um horizonte computacional chamado de δ' . Este novo horizonte tem como definição geral $\delta' = 3,015dx$ tendo dx como a distância entre pontos materiais. A figura (13) ilustra a lei e seus casos.

Figura 13 – Lei Constitutiva Bi Linear. Case I – Proposta de Silling. Case II – Conceito de Horizonte Computacional. Case III – Ajuste do caso II para que tenha a mesma resposta global do caso I.



Fonte: Cabral *et al.* (2019).

As Equações (22) e (23) apresentam equivalências entre os casos. Sendo a (22) uma igualdade entre os casos II e III, onde tem-se uma descendência, tornando-

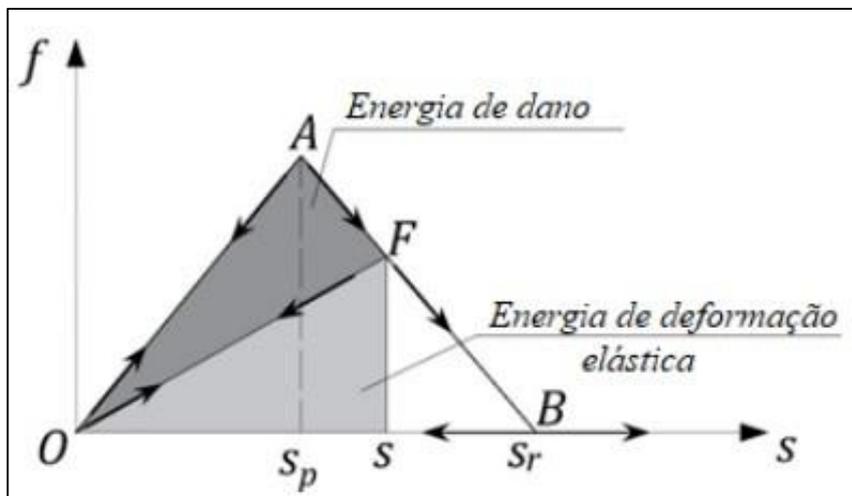
a bi linear. E a (23) então realizando uma igualdade entre I e III tendo-se equivalência para todos os casos entre si.

$$s'^2 = s_p s_r \quad \dots(22)$$

$$s_o^2 \delta_o = K_r s_p^2 \delta' \text{ sendo } K_r = \frac{s_r}{s_p} \quad \dots(23)$$

A lei bi linear tem sua definição completa com s_r e K_r . A variável s_p pode ser definida como algo entre 70%-80% da formação atingida no instante do rompimento do material ou então, como a deformação em que a estrutura globalmente perde a linearidade. Para aderir a lei bi linear, precisa-se reformular a função escalar de dano apresentada na Equação (21). Considerando a nova forma de medir as energias do sistema como mostra a Figura (14), temos a nova Equação (24) que rege a nova função escalar de dano.

Figura 14 - Energias envolvidas na fratura segundo a lei bi linear.



Fonte: Cabral et al. (2019).

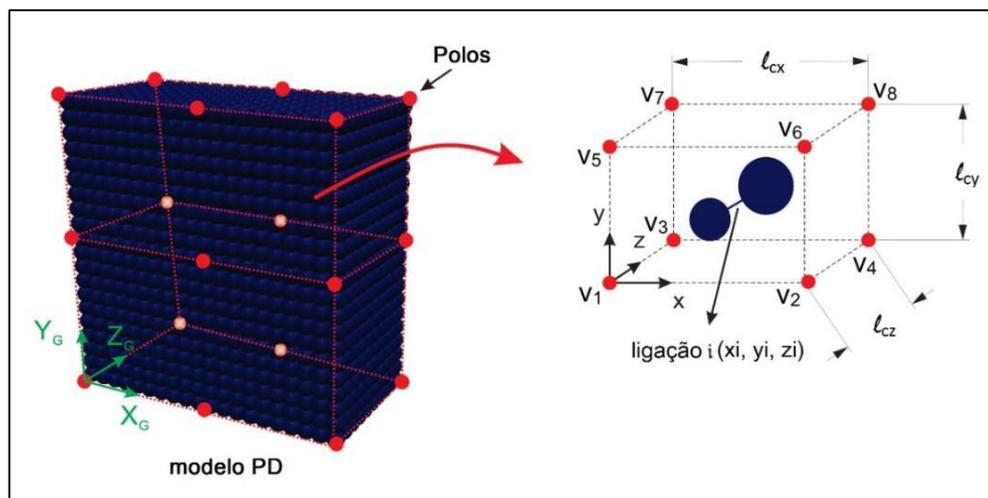
$$\vartheta = \begin{cases} 1 & \text{se } s < s_o \\ \frac{\text{area}OFB}{\text{area}OAB} & \text{se } s_p < s < s_r \\ 0 & \text{se } s \geq s_o \end{cases} \quad \dots(24)$$

2.4.2 Aleatoriedade das propriedades mecânicas do modelo PD

Todos os materiais possuem defeitos intrínsecos que vem de fabricação, sejam pelo processo como são feitos ou por erro de composições químicas, sendo assim não tendo propriedades mecânicas constantes ao longo de toda a sua forma. Mesmo duas barras tiradas de um mesmo lote de fabricação terão diferenças de defeitos intrínsecos. Em materiais quase frágeis, essa heterogeneidade é um fator de suma importância, visto que altera de forma significativa o comportamento deste tipo de material. (CALLISTER, 2008)

Considerando que a energia específica de fratura G_f está diretamente relacionada ao alongamento crítico da ligação, neste estudo, o parâmetro será introduzido por meio de uma distribuição de probabilidade do tipo Weibull. Em Friedrich *et al.* (2019), o modelo foi aprimorado para ser aplicado no contexto da Peridinâmica. A proposta consiste em inserir prismas dentro do volume analisado, onde os lados desses prismas são formados pelos comprimentos de correlação (l_{cx} , l_{cy} , l_{cz}). A Figura (15) ilustra esses prismas, bem como os 8 vértices que cada um contém. Além disso, são inseridas as coordenadas globais do modelo (X_G , Y_G , Z_G), a coordenada local do centro da ligação entre pontos materiais (x_i , y_i , z_i) e a coordenada do prisma em relação à coordenada global (Y_{Gi} , X_{Gi} , Z_{Gi}). Para determinar o valor de G_f para cada ligação, é realizada uma interpolação 3D, conforme a Equação (25). Isso ocorre porque cada um dos vértices (V_1 , V_2, \dots, V_8) recebe um valor aleatório de G_f , seguindo a distribuição de probabilidade mencionada. (FRIEDRICH *et al.*, 2019)

Figura 15 - Aleatoriedade no modelo PD.



Fonte: Friedrich *et al.* (2019).

$$\begin{aligned}
\varphi_v(x_i, y_i, z_i) = & V_1 + \frac{V_2 + V_1}{l_{cx}} x_i + \frac{V_3 - V_1}{l_{cy}} y_i + \frac{V_5 - V_1}{l_{cz}} z_i + \frac{V_4 - V_3 - V_2 - V_1}{l_{cx} l_{cy}} x_i y_i + \frac{V_6 - V_5 - V_3 + V_1}{l_{cx} l_{cz}} x_i z_i + \\
& \frac{V_7 - V_5 - V_3 + V_1}{l_{cy} l_{cz}} y_i z_i + \frac{V_8 - V_7 - V_6 + V_5 - V_4 + V_3 + V_2 - V_1}{l_{cx} l_{cy} l_{cz}} x_i y_i z_i \quad \dots(25)
\end{aligned}$$

3 METODOLOGIA

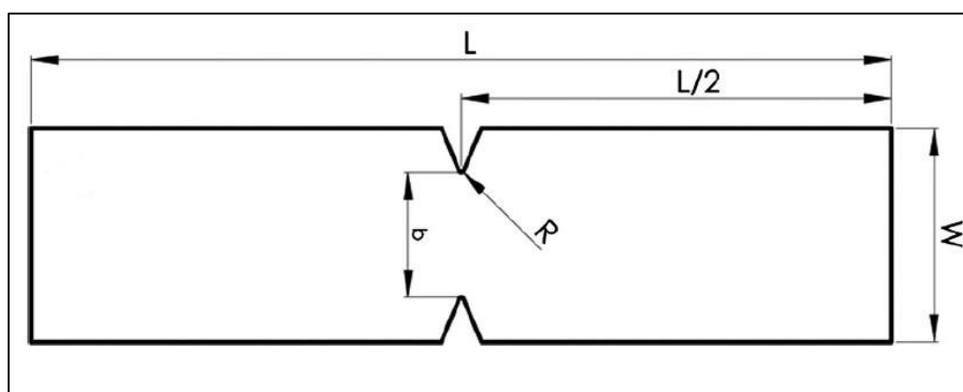
Este capítulo apresenta a descrição das etapas para o desenvolvimento da análise de sensibilidade ao entalhe do Necuron. Primeiramente é necessário fazer a validação do comportamento do material na peridinâmica e então é possível analisar a sensibilidade ao entalhe. Essas duas etapas são baseadas em dados disponíveis na literatura para ensaios experimentais de Negru *et al.* 2015.

Para realizar as simulações, será utilizado o uma rotina de *software* feita em linguagem Fortran, utilizando-se do programa Visual Studio para rodar as rotinas e modificar os parâmetros ou então o código se necessário. Os resultados em tempo real da simulação poderão ser verificados com o MatLab, através de gráficos de energias e de força x deslocamento. Após o rompimento do material, será possível verificar a imagem de ruptura dos corpos de prova com o programa Paraview.

3.1 Validação do comportamento do material

Nesta etapa ocorre a validação do comportamento do material, ou seja, esta etapa assegura que o material que está sendo simulado, tem o mesmo comportamento daquele registrado no ensaio experimental. Neste caso, os dados experimentais são obtidos do trabalho de Negru *et al.* 2015, onde um corpo de prova com detalhe em V, na Figura (16), foi utilizado. A geometria do corpo de prova tem as dimensões mostradas na Tabela (1) abaixo.

Figura 16 - Geometria de Calibração para Modelo de sensibilidade ao entalhe.



Fonte: Adaptado de Negru *et al.* (2015).

Tabela 1 - Dimensões do corpo de prova com entalhe em V.

Dimensões Geométricas do corpo de Prova (mm)				
L	W	b	D	R
100	25	15	-	0,25

Fonte: Negru *et al.* (2015).

As propriedades do material, considerando as diferentes densidades do Necuron, estão disponíveis em Negru *et al.* 2015 e são listadas na Tabela (2). Mais precisamente, três diferentes densidades são consideradas: 100, 300 e 708 kg/m³.

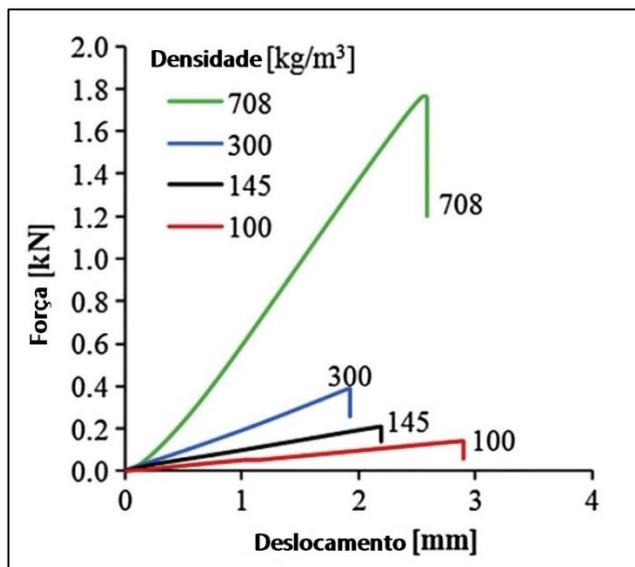
Tabela 2 - Propriedades mecânicas e de fratura do Necuron.

Densidade do Poliuretano (kg/m³)	100	300	708
Módulo de elasticidade (MPa)	30,18	281,39	1250
Coefficiente Poisson	0,285	0,302	0,302
Resistência à Tração (MPa)	1,16	3,86	17,40
Energia de Fratura Modo I (MPa m^{0,5})	0,087	0,372	1,253

Fonte: Adaptado de Negru *et al.* (2015)

A resposta do modelo PD será então comparada com as curvas experimentais em termos de força – deslocamento para o Necuron com diferentes densidades, como mostrado na Figura (17).

Figura 17 - Curvas de força-deslocamento para diferentes densidades do Necuron.



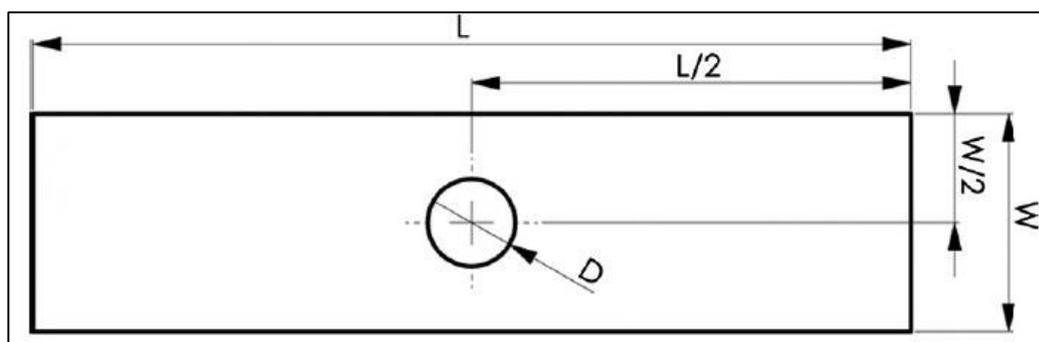
Fonte: Adaptado de Negru *et al.* (2015).

3.2 Análise da sensibilidade ao entalhe

Depois de validar o comportamento do material, a análise de sensibilidade ao entalhe é realizada. Utilizando o corpo de prova abaixo, mostrado na Figura (18), tendo L como 200 mm e W como 50 mm, e modificando o diâmetro do furo, D, de 1 até 10 mm (ver Tabela (3)), a sensibilidade é obtida graficando a relação entre σ_G/σ_N e D/W . Quatro simulações são realizadas para cada furo, obtendo um valor médio e um desvio padrão para cada caso.

A força máxima, para o Necuron de densidade igual a 708 kg/m³ também é apresentada na Tabela (3) como referência e será usada para avaliar a resposta do modelo numérico.

Figura 18 - Corpo de prova com diâmetro central para análise de sensibilidade ao entalhe.



Fonte: Adaptado de Negru *et al.* (2015).

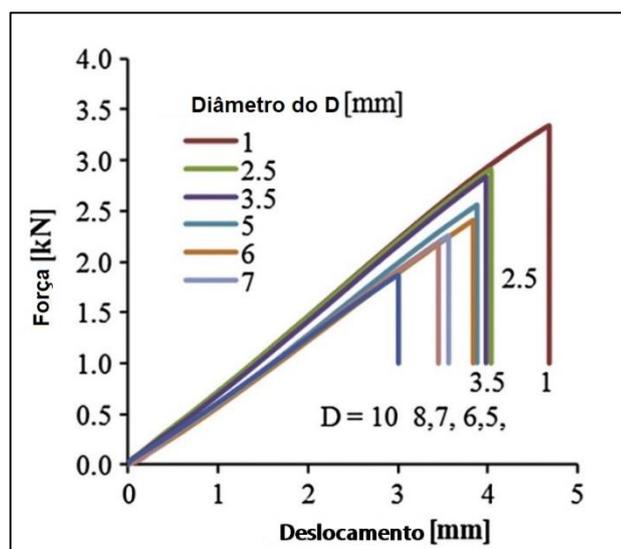
Tabela 3 – Diâmetros dos furos e força máxima experimental para o Necuron 708 kg/m³.

D (mm)	1,0	2,5	3,5	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0
$F_{m\acute{a}x}$ (N)	3309,2	2961,8	2944,6	2544,7	2491,0	2290,8	2197,3	1960,3

Fonte: Adaptado de Negru *et al.* (2015).

A Figura (19) abaixo mostra a relação de força-deslocamento em função do tamanho do diâmetro, ilustrando melhor os resultados da Tabela (2) para o Necuron 708 kg/m³, único comportamento disponível na literatura.

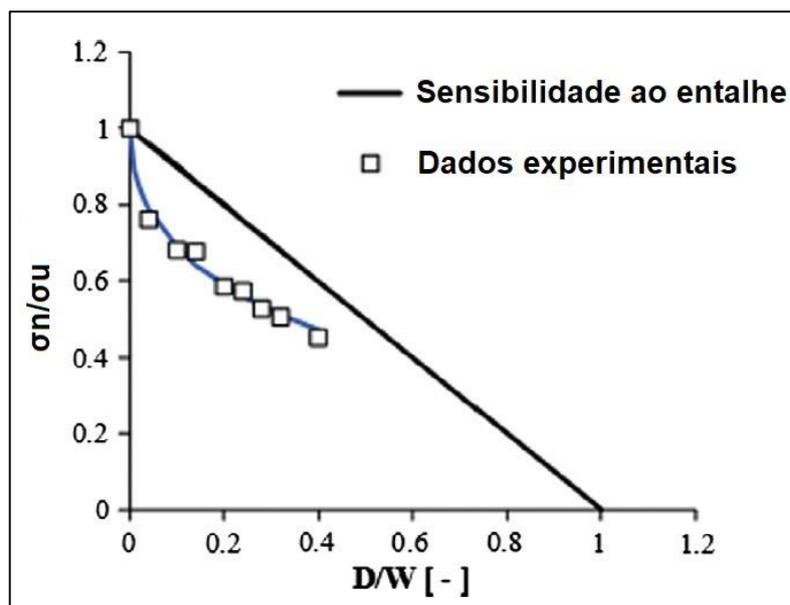
Figura 19 – Relação força – deslocamento variando o diâmetro do furo para o Necuron 708 kg/m³.



Fonte: Adaptado de Negru *et al.* (2015).

A Figura (20) mostra a relação σ_n/σ_u e D/W para o Necuron 708 kg/m³. Logo, os resultados numéricos serão comparados com estes. Como não há dados na literatura sobre o comportamento do Necuron para as demais densidades, a mesma abordagem detalhada acima, será usada para determinar a sensibilidade do Necuron com as densidades igual a 100 e 300 kg/m³.

Figura 20 – Curva de sensibilidade ao entalhe para o Necuron 708.



Fonte: Adaptado de Negru *et al.* (2015).

4 RESULTADOS

4.1 Validação do comportamento material

A Tabela (4) apresenta as propriedades do material, os parâmetros da lei constitutiva bi linear e as considerações sobre o campo aleatório para o Necuron de diferentes densidades. Os parâmetros da lei foram obtidos de acordo com o trabalho de Friedrich *et al.* (2022). Em todos os modelos utilizados o espaçamento entre pontos materiais (Δ) é igual a $2,5 \cdot 10^{-4}$ m e δ_0 igual $3,015\Delta$.

Tabela 4 - Propriedades do Necuron de acordo com a sua densidade.

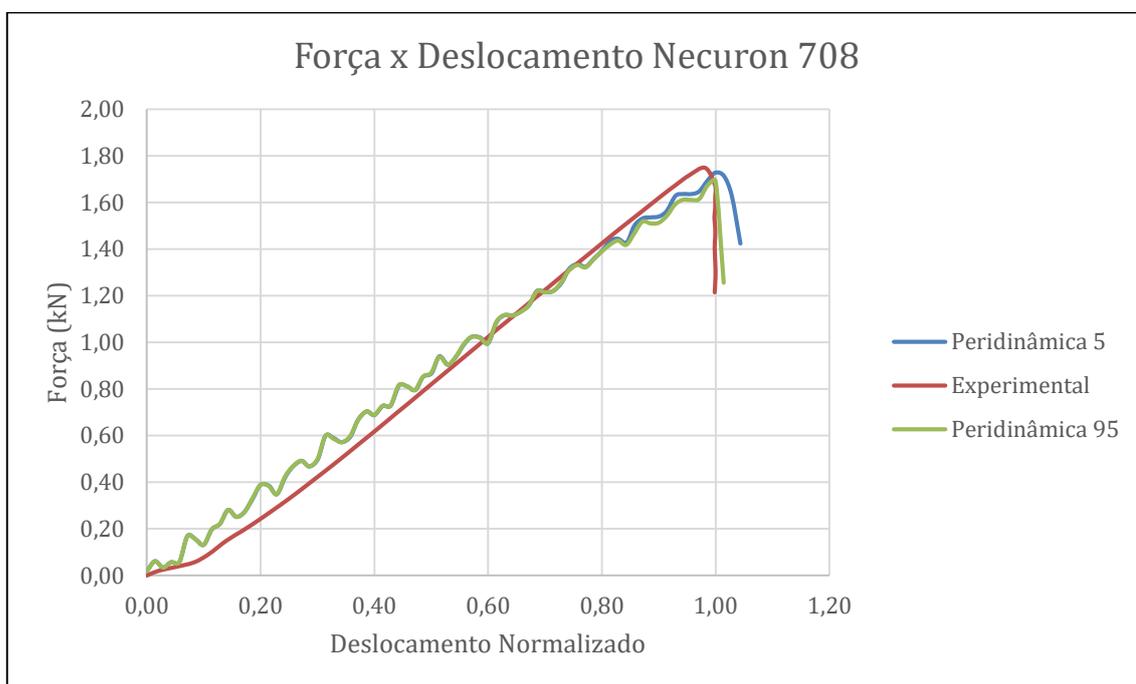
ρ [kg / m ³]	E [MPa]	ν	G_f [N / m]	CV_{Gf} [%]	l_{corr} [m]	s_p	K_r	δ' [m]
100	30,18	0,25	250,80	7,5	$\Delta/2$	0,03754	9,77	0,00736
300	281,39	0,25	491,81	115	$\Delta/2$	0,01341	16,33	0,012
708	1250,0	0,25	1256,0	50	$\Delta/2$	0,01360	9,0	0,0068

Fonte: Autor (2023).

A Figura (21) mostra a comparação dos resultados da peridinâmica e experimentais para a placa em V do Necuron 708 em termos da relação força – deslocamento normalizado (deslocamento/deslocamento no pico da força).

A comparação mostra que os resultados numéricos (valor médio) têm uma diferença relativa de 2,25% em relação a carga máxima quando comparado com o valor experimental. Os números que aparecem ao lado da legenda representam as *seeds* daquela amostra em específico, ou seja, representa uma peça única com suas devidas falhas e interstícios de fabricação únicos em um campo gerado aleatoriamente.

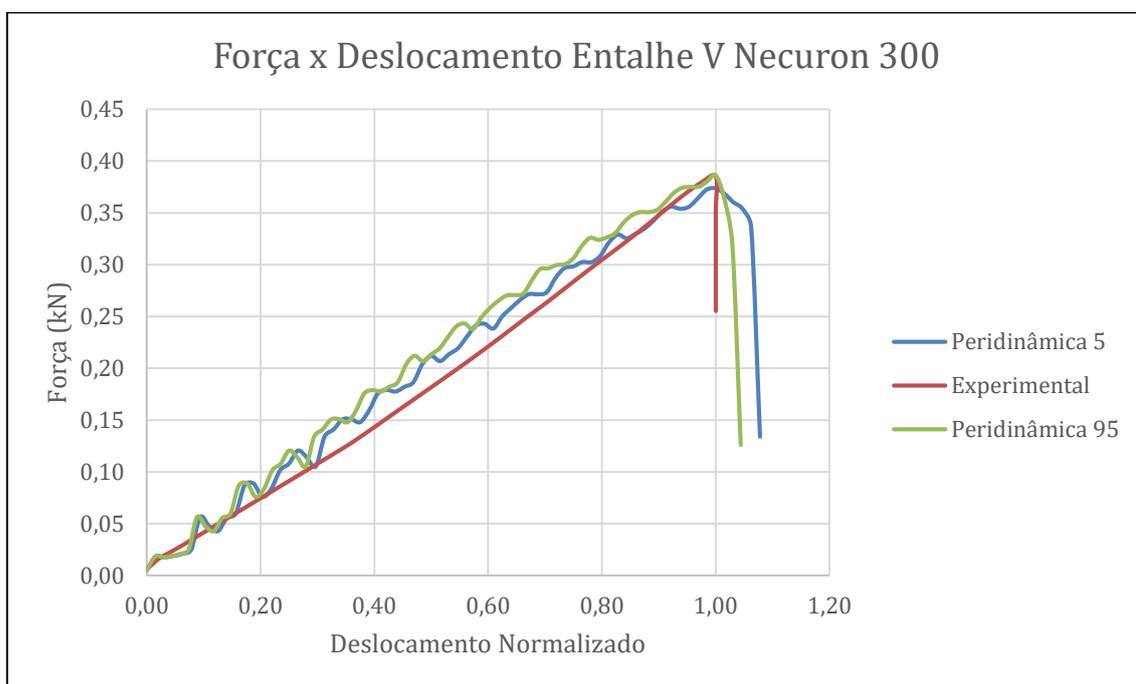
Figura 21 – Comparação resultados peridinâmica e experimental da placa em V para o Necuron 708.



Fonte: Autor (2023).

A Figura (22) mostra a comparação dos resultados da peridinâmica e experimentais para a placa em V do Necuron 300 em termos da relação força – deslocamento normalizado (deslocamento/deslocamento no pico da força). A comparação mostra que os resultados numéricos tem uma diferença relativa de 1,32% em relação a carga máxima quando comparado com o valor experimental.

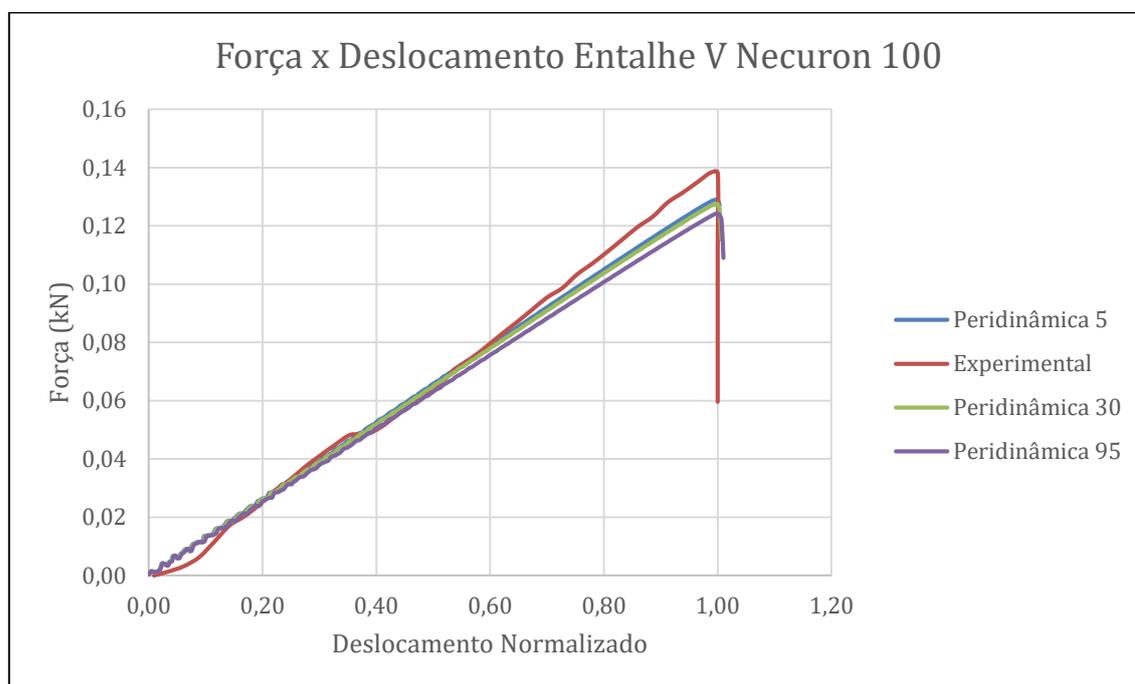
Figura 22 – Comparação resultados peridinâmica e experimental da placa em V para o Necuron 300.



Fonte: Autor (2023).

A Figura (23) mostra a comparação dos resultados da peridinâmica e experimentais para a placa em V do Necuron 100 em termos da relação força – deslocamento normalizado (deslocamento/deslocamento no pico da força). A comparação mostra que os resultados numéricos tem uma diferença relativa de 5,38% em relação a carga máxima quando comparado com o valor experimental.

Figura 23 – Comparação resultados peridinâmica e experimental da placa em V para o Necuron 100.

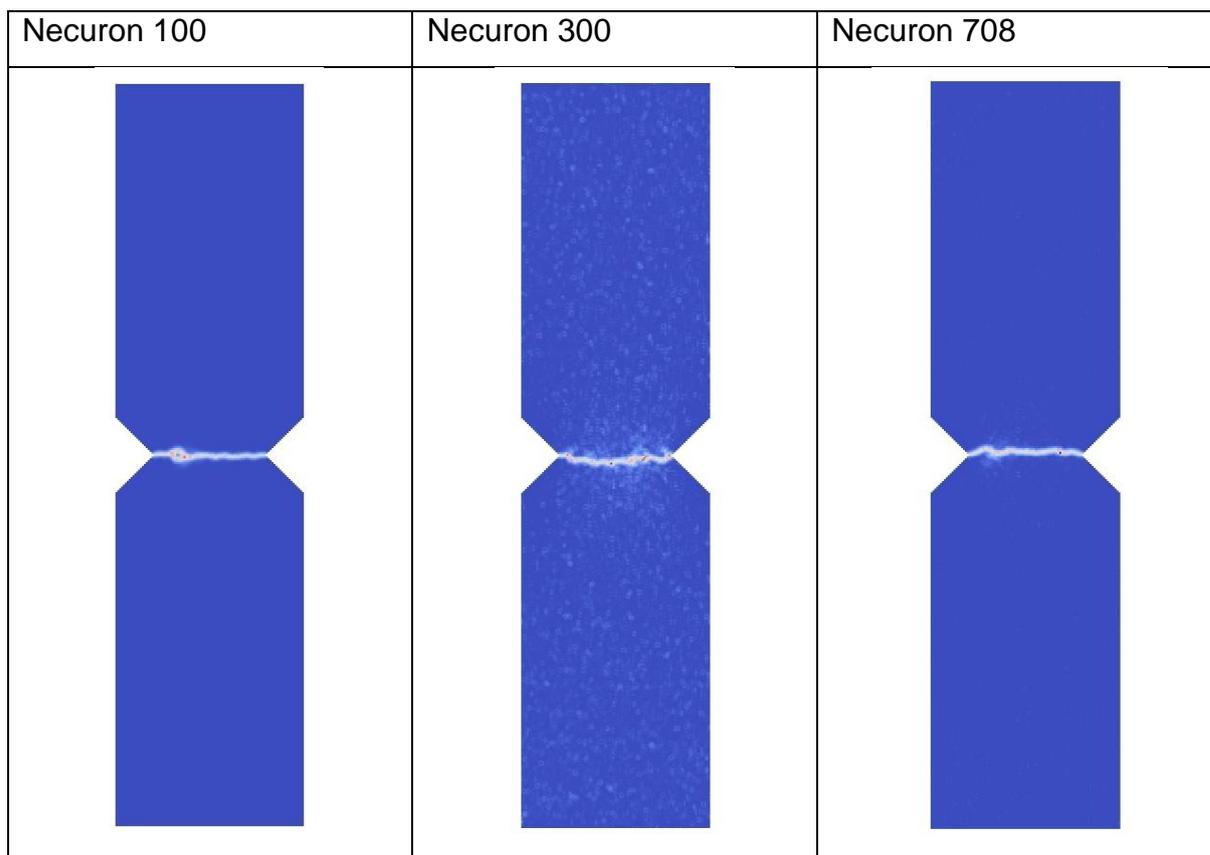


Fonte: Autor (2023).

Os resultados acima mostram que o comportamento do material simulado é semelhante a aquele registrado experimentalmente. Mais precisamente, a maior diferença relativa encontrada foi de 5,38% no Necuron de densidade 100, indicando uma boa correlação entre os valores experimentais e numéricos.

A Figura (24) abaixo mostra um exemplo da fratura obtida para cada diferente densidade. É possível notar que o caminho da trinca é tortuoso em todos os casos. Esse comportamento é resultado da implementação do campo aleatório. Nota-se que as trincas não são de formato taça-cone como e nem são extremamente frágeis como mostradas no início da seção 2 deste trabalho, mas sim de uma mistura de ambas, pois afinal o material sendo quase-frágil, tem seu comportamento parecido com o de um material frágil, mas não inteiramente.

Figura 24 – Trincas de amostras das placas com entalhe em V.



Fonte: Autor (2023).

4.2 Análise da sensibilidade ao entalhe

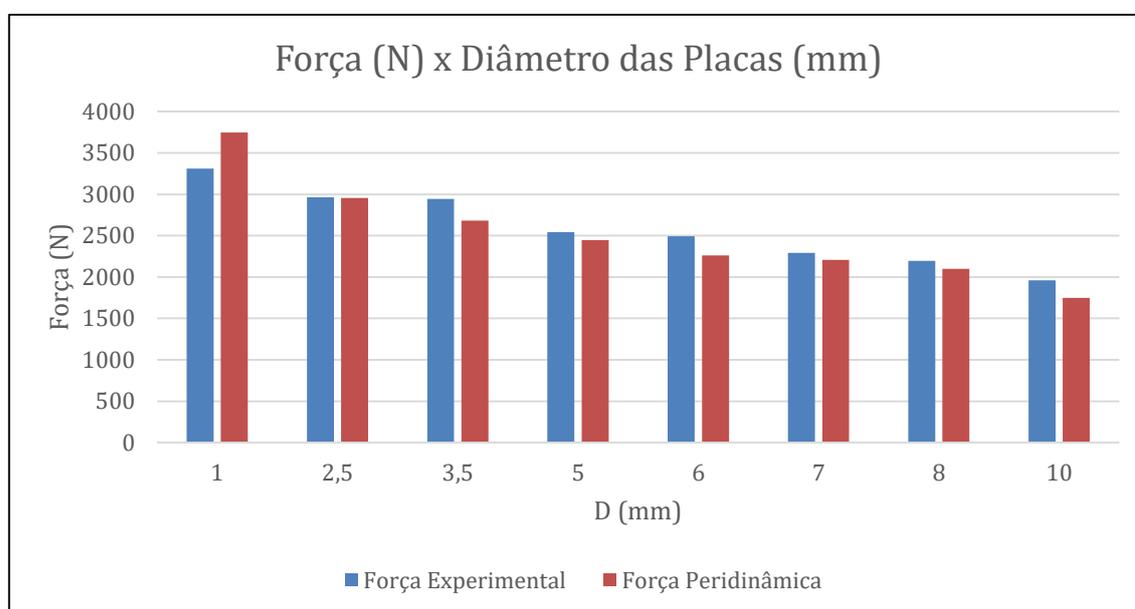
Primeiramente compara-se os resultados numéricos da sensibilidade ao entalhe do Necuron 708, pois é o único caso em que há dados experimentais. A Tabela (5) abaixo mostra a comparação dos resultados em termos da diferença relativa entre os valores numéricos e experimentais. Nota-se que as maiores diferenças são de 13,25% para o caso do diâmetro de 1 mm e a de 10,90% para o diâmetro de 10 mm. Como os dados de Negru et al., 2015 não forneceram o desvio padrão ou coeficiente de variação, não é possível saber se os dados numéricos estão dentro da variação obtida experimental. A figura (25) representa melhor a tabela mostrada abaixo.

Tabela 5 – Comparação dos resultados peridinâmica x experimentais da força máxima para o Necuron 708 kg/m³ utilizando diferentes diâmetros de furos.

D (mm)	1,0	2,5	3,5	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0
F_{exp} (N)	3309,2	2961,8	2944,6	2544,7	2491,0	2290,8	2197,3	1960,3
F_{num} (N)	3747,8	2956,6	2683,5	2446,7	2261,9	2208,2	2098,9	1746,6
Diferença Relativa (%)	13,25	0,17	8,87	3,85	9,20	3,61	4,48	10,90

Fonte: Adaptado de Negru *et al.* (2015).

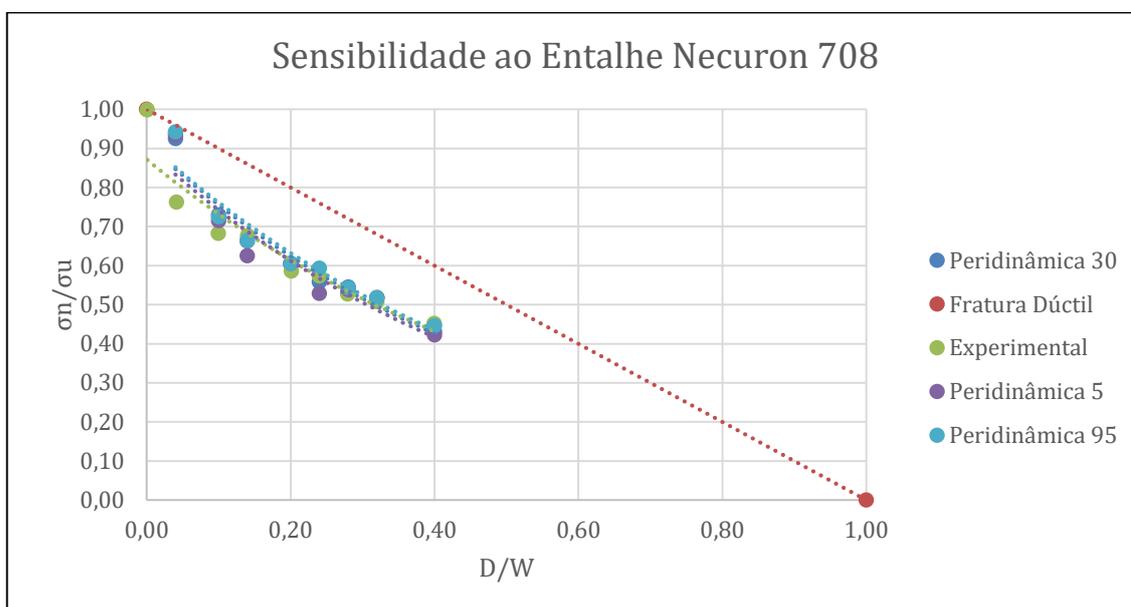
Figura 25 – Comparativo de forças experimentais com as encontradas na peridinâmica para o Necuron 708.



Fonte: Autor (2023).

A Figura (26) mostra a sensibilidade ao entalhe para o necuron 708 obtida pelas simulações PD's e aquela experimental disponível em Negru *et al.*, 2015. O valor da força máxima média da placa plana foi de 4051 N.

Figura 26 – Sensibilidade ao entalhe Necuron 708: comparação peridinâmica x experimental.



Fonte: Autor (2023).

Nota-se que há uma satisfatória correlação com os dados obtidos experimentais, mostrando uma boa capacidade da simulação PD na captura desse importante parâmetro de projeto.

A Tabela (6) apresenta os valores médios da força máxima para as placas com furos para as densidades de 100 e 300 kg/m³. O valor da força máxima média da placa plana foi de 336,35 N e 735,64 N, para a densidade de 100 e 300, respectivamente.

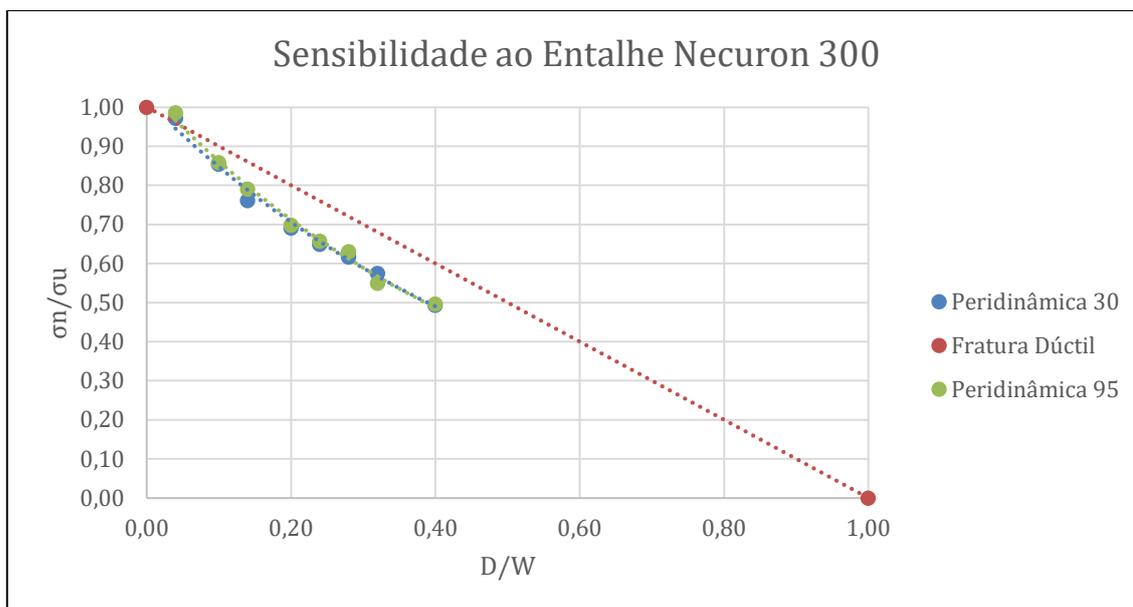
Tabela 6 – Resultados peridinâmica da força máxima para o Necuron 100 e 300 kg/m³ utilizando diferentes diâmetros de furos.

D (mm)	1,0	2,5	3,5	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0
$F_{num} 100(N)$	288,67	234,83	232,85	202,00	182,82	176,90	160,73	147,00
$F_{num} 300(N)$	702,68	617,78	550,12	499,74	469,32	445,82	415,78	356,50

Fonte: Adaptado de Negru *et al.* (2015).

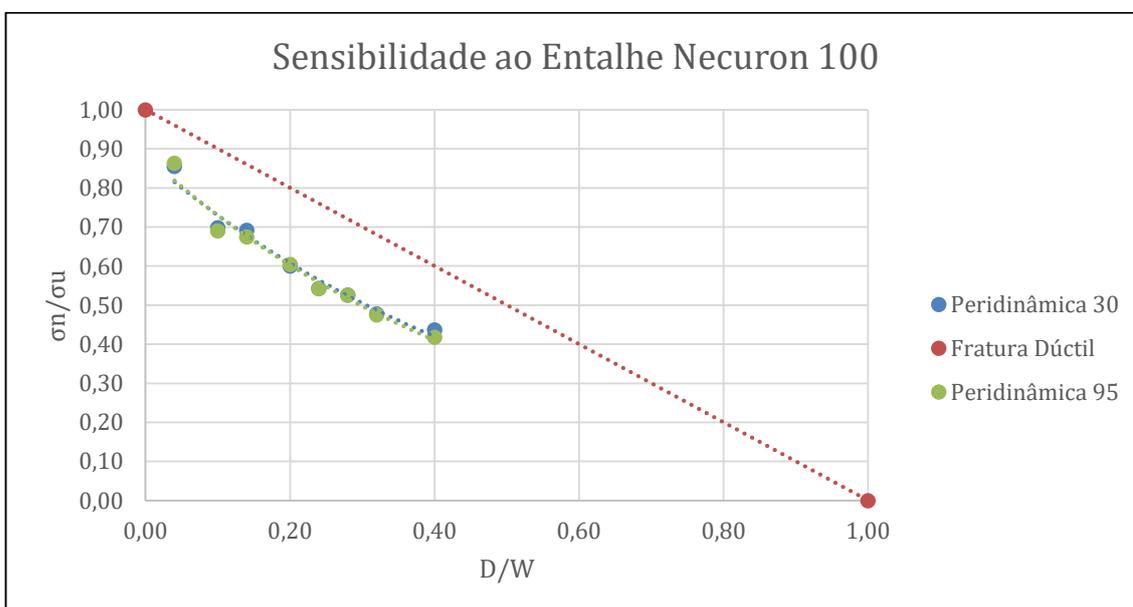
As Figuras (27) e (28) representam as curvas de sensibilidade ao entalhe para o Necuron 300 e 100 respectivamente. Nota-se que em ambos os casos o comportamento quase-frágil é registrado.

Figura 27 – Sensibilidade ao entalhe Necuron 300: dados peridinâmica.



Fonte: Autor (2023).

Figura 28 - Sensibilidade ao entalhe Necuron 100: dados peridinâmica.

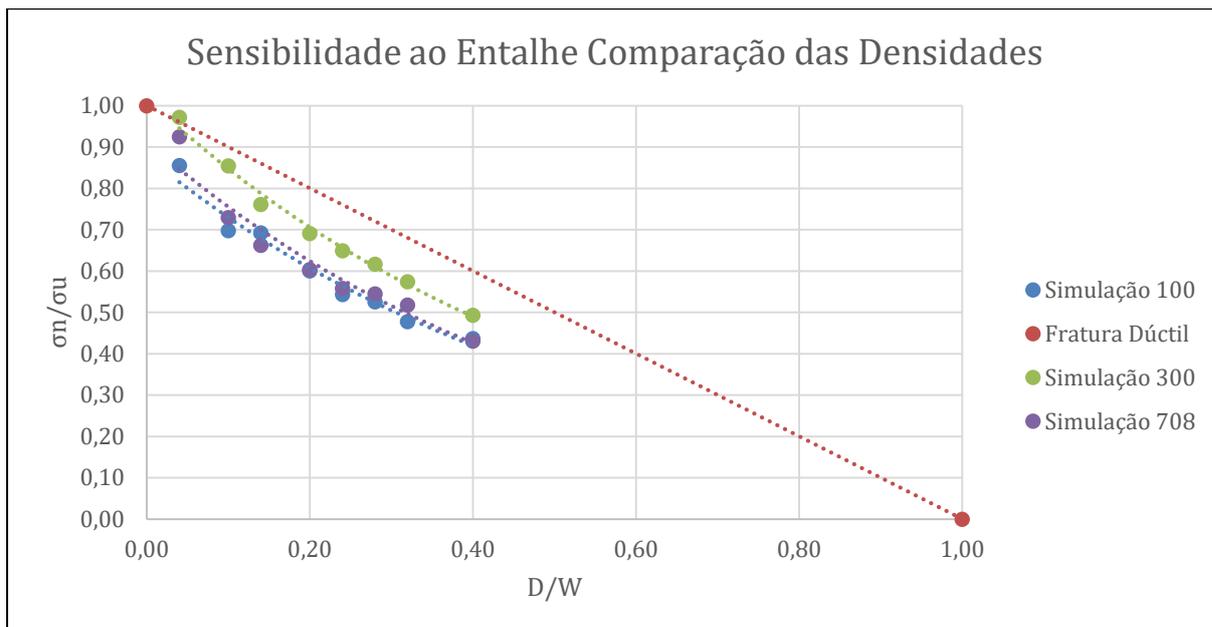


Fonte: Autor (2023).

A Figura (29), mostra a sensibilidade ao entalhe do necuron 708, 300 e 100. Nota-se que o comportamento das amostras caracterizadas pelas densidades 708 e 100 são praticamente iguais. Em todos os casos percebe-se para o menor diâmetro leva a um comportamento de total insensibilidade ao entalhe. Isso pode ser explicado justamente pelo fato de o diâmetro ser muito pequeno e a danificação acontece no

corpo em geral, e nesse caso não há concentração, como se fosse uma espécie de plasticidade do material. Neste gráfico em específico, o número ao lado da legenda representa somente a densidade do material analisado, não havendo conexão com as *seeds*, uma vez que este resultado é uma média das amostras usadas.

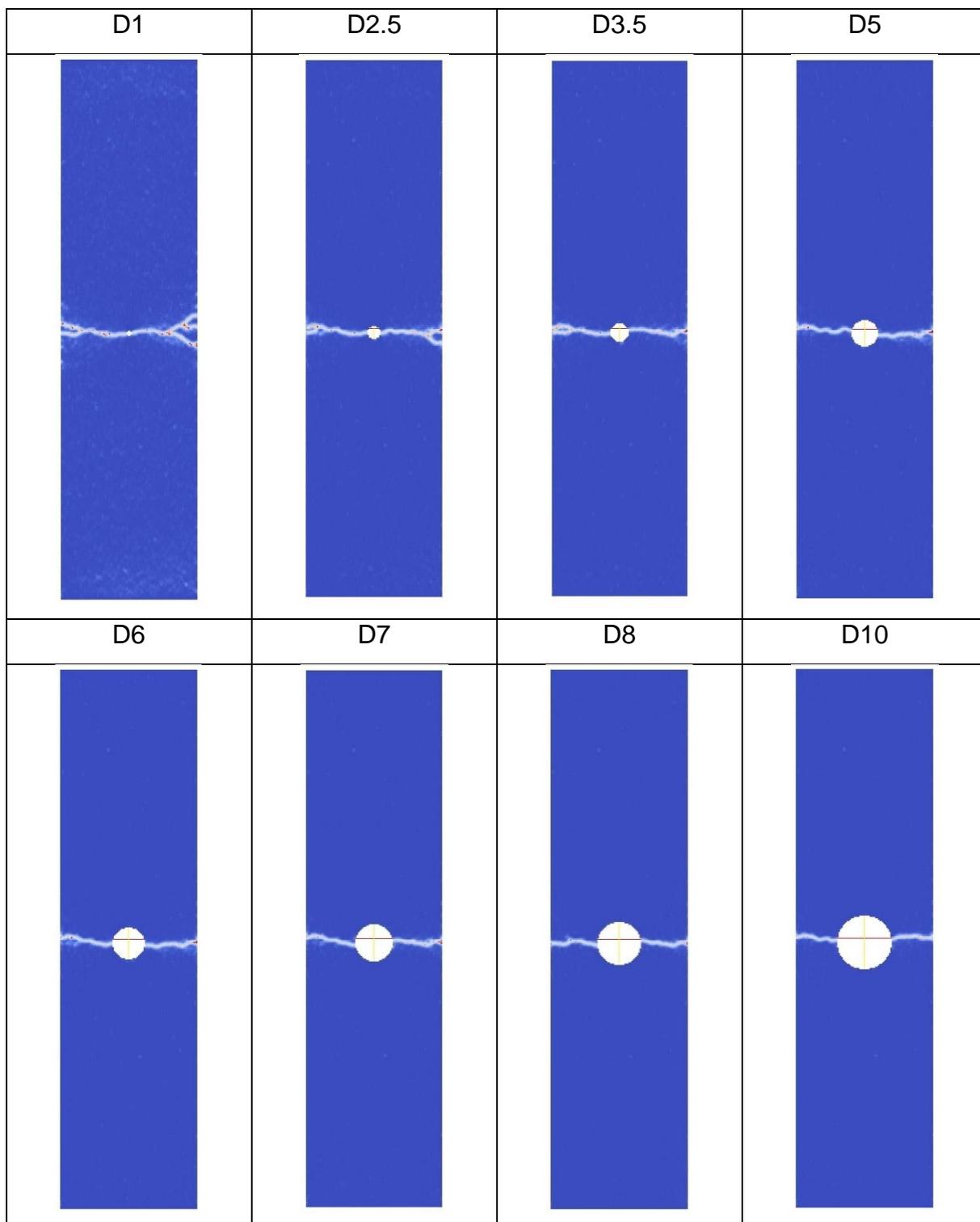
Figura 29 – Comparativo de sensibilidade ao entalhe das diferentes densidades.



Fonte: Autor (2023).

A figura (30) mostra as propagações de trincas para diferentes diâmetros, na densidade de 708.

Figura 30 – Diâmetros variados e suas trincas no Necuron densidade 708.



Fonte: Autor (2023).

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho a análise de sensibilidade ao entalhe do Necuron de densidades 100, 300 e 708 kg/m³ foi analisada numericamente por meio de simulações na Peridinâmica. O comportamento do material foi validado a partir de dados disponíveis da literatura para placas com entalhes em V e a sensibilidade avaliada após o processo de validação em placas com furos de diferentes diâmetros.

A partir dos resultados apresentados na seção anterior, pode-se concluir que:

- O comportamento do material analisado numericamente quando comparado com o experimental teve uma satisfatória correlação, com erro relativo máximo de 5,38%;
- O necuron de diferentes densidades se caracteriza como um material de comportamento quase frágil como observado nos resultados numéricos da sensibilidade ao entalhe;
- A PD mostrou-se uma boa ferramenta para o tipo de análise realizada podendo expandir sua aplicação para outros tópicos similares como a concentração de tensão estático e fadiga.

Para sugestões de trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizados ensaios experimentais próprios para avaliar novas densidades, pode-se também realizar as simulações com velocidade mais lenta e/ou amortecimento para aliviar as curvas. Aplicar a PD para a simulação da concentração de tensões e também a teoria das distâncias críticas, onde a mesma teve uma primeira aplicação no trabalho *Aplicação da peridinâmica e da teoria das distâncias críticas no estudo da fratura de materiais* de Andressa Rodrigues Cunha, 2019.

6 REFERÊNCIAS

ALDERLIESTEN, Renè. Blunt notch strength. In: ALDERLIESTEN, R. **Fatigue and Fracture of Fibre Metal Laminates**. [S.l.]: Springer, 2017. Cap. 5, p. 77–100.

ANDERSON, T. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**, 3 ed., CRC Press, 2005. 630 p.

ASTM D638-14, **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**, ASTM International, 2014.

CABRAL, Nestor R. **Aplicación de la teoría Peridinámica a la Mecánica de Fractura**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, 2016.

CABRAL, N. R.; INVALIDI, M. A.; D'AMBRA, R. B.; ITURRIOZ, I. Na alternative bilinear peridynamic model to simulate the damage process in quase-brittle materials. **Engineering Fracture Mechanics**, [s. l.], v. 216, n. 106494, Julho, 2019. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001379441930147X?via%3Di>
hub. Acesso em: 10 de maio de 2023.

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

FRIEDRICH, L.; BARCELLOS, M.; ITURRIOZ, I.; **Random field generation of the material properties in a peridynamic model**. 2019. Trabalho apresentado ao 25º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2019.

GLOBALTEC. Necuron: Aplicações Necuron. Disponível em:
<http://www.necuron.com.br/aplicacoes-necuron.html>. 201-?. Acesso em: 10 de março de 2023.

GONZALEZ-VELAZQUEZ, J. L. **Mechanical Behavior and Fracture of Engineering Materials**. Structural Integrity: Volume 12. Switzerland: Springer, 2020. 244 p.

HIBBELER, R.; **Resistência dos Materiais**. 7ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

KANNINEN, M. F.; POPELAR, C. H. **Advanced fracture mechanics**. [S.l.]: OxfordUniversity Press, 1985.

JAVILI, A.; MORASATA, R.; OTERKUS, E.; OTERKUS, S.; Peridynamics review. **Mathematics and Mechanics of Solids**, London, v. 24, n. 11, p. 3714–3739, Out. 2018.

LIU, W. **Discretized bond-based peridynamics for solid mechanics**. [S.l.]: 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Michigan State University, 2012.

MACEK, R. W.; SILLING, S. A. Peridynamics via finite element analysis. **Finite Elements in Analysis and Design**, [s. l.], v. 43, n. 15, p. 1169–1178, 2007.

MADENCI, E.; OTERKUS, E. **Peridynamic theory and its applications**. New York: Springer, 2014.

MAGGIO, L. G. D. **Analytical and numerical methods for assessing the fatigue life of threaded bores**. Torino, 2019. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Faculdade de Engenharia, Politecnico di Torino.

MOHAMAD, S. A. S; NORHAZILAN, M. N.; AHMAD, B. H. K.; MOHD, N. T. A review of the application of the theory of critical distance towards concrete. **MATEC Web of Conferences**. 250. Malaysia. 2018.

MCGUINTY, B. **Fracture Mechanics**. [S.l.], 2014. Disponível em: <http://www.fracturemechanics.org/>. Acesso em: 25 fevereiro 2023.

NEGRU, R. *et al.* Assessment of brittle fracture for PUR materials using local strain energy density and theory of critical distances. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 79, p. 62–69, Out. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167844215300744?via%3Di> hub. Acesso em: 20 de fevereiro de 2023.

NIJS, A.; SELEZNEVA, M.; SWOLFS, Y.; HIRANO, N.; TAKETA, I.; KARAKI, T.; VERPOEST, I.; GORBATIKH, L.; Notch Sensitivity of hybrid carbon-fibre/self-reinforced polypropylene composites. **Composites Science and technology**, [s.l] V.200 n. 108422. Nov. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353820322120>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2023.

SILLING, S. A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, [s. l], v. 48, n. 1, p. 175–209, Jan. 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022509699000290?via%3Dihub>. Acesso em: 12 de fevereiro 2023.

SILLING, S. A.; ASKARI, E. A mesh free method based on the peridynamic model of solid mechanics. **Computers & structures**, [s. l], v. 83, n. 17-18, p. 1526–1535, Jun. 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045794905000805?via%3Dihub>. Acesso em: 20 de abril de 2023.

SILVA, F. G.; JÚNIOR, R.; NOBREGA, S.; DIAS, A.; Application of failure criteria in Aeronautical Sandwich Structure Composites with a central hole subjected to bending testing. **Materials Research** (Online Version), São Carlos, v. 23, n.2, Jun. 2020. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392020000200216&tlng=en. Acesso em: 20 de fevereiro de 2023.

TAYLOR, D. **The Theory of Critical Distances: A New Perspective in Fracture Mechanics**. Oxford: Elsevier Science, 2010.

ZHOU, W.; LIU, D.; LIU, N. Analyzing dynamic fracture process in fiber-reinforced composite materials with a peridynamic model. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l], v. 178, p.60–76, Jun. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013794417301182>. Acesso em: 27 de abril de 2023.