

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**JUAREZ DUBAL MASSIA NETO**

**DETERMINAÇÃO DE CURVAS DE SENSIBILIDADE AO ENTALHE PARA  
MATERIAIS QUASE FRÁGEIS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS  
DISCRETOS**

**Alegrete**

**2023**

**JUAREZ DUBAL MASSIA NETO**

**DETERMINAÇÃO DE CURVAS DE SENSIBILIDADE AO ENTALHE PARA  
MATERIAIS QUASE FRÁGEIS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS  
DISCRETOS**

Dissertação apresentada a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito de avaliação.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Bergamini  
Puglia

**Alegrete**

**2023**

**JUAREZ DUBAL MASSIA NETO**

**DETERMINAÇÃO DE CURVAS DE SENSIBILIDADE AO ENTALHE PARA MATERIAIS QUASE FRÁGEIS PELO**

**MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS**

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: 14 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia

Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich

(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **VICENTE BERGAMINI PUGLIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/12/2023, às 10:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/12/2023, às 10:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TONILSON DE SOUZA ROSENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/12/2023, às 10:16, 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](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1326845** e o código CRC **BFEED9E3**.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família por me suportar, amar e estar presente sempre que possível.

Aos amigos que estiveram disponíveis e presentes em todas as mais diversas situações.

Ao quadro de professores maravilhosos do curso de Eng. Mecânica que tive na UNIPAMPA.

Ao meu orientador Dr. Vicente Puglia por ter paciência, abertura e proatividade ao longo dos meses de desenvolvimento deste trabalho.

E a cidade de Alegrete por ter me proporcionado muito aprendizado dentro e fora da faculdade ao longo da graduação.

“Aos seres humanos não é permitido - para sua felicidade, pois de outra forma a vida seria intolerável - antever ou prever, em qualquer medida, o desenrolar dos acontecimentos”

Winston Churchill

## RESUMO

A utilização de materiais polímeros está consolidada na engenharia para diversas aplicações. Os materiais poliméricos de comportamento quase frágeis são utilizados para isolamento térmico e nas estruturas de construções. A determinação das curvas de sensibilidade ao entalhe para esses materiais é fundamental para o desenvolvimento projetos e aplicação de forma segura. Com o objetivo de analisar e validar uma metodologia para obtenção de curvas de sensibilidade ao entalhe para os materiais Necuron 651 e EPS 1F foi utilizado o Método de Elementos Discretos (DEM) neste trabalho. Com o DEM é possível simular ensaios de tração, variações de geometria e características dos materiais de forma computacional. Para calibrar o modelo são utilizadas curvas experimentais de ensaios de tração dos materiais propostos. Posteriormente, a obtenção das curvas de sensibilidade ao entalhe é feita em ensaios de tração em corpos de prova retangular sem entalhe e com entalhe. É analisado também a influência do aumento de defeitos internos no comportamento do EPS 1F sob o efeito de concentradores de tensão. Os resultados mostram que o modelo computacional pode representar de forma satisfatória o comportamento dos materiais quase frágeis sob efeito de concentradores de tensão. O Necuron 651 é sensível ao entalhe até a relação de  $D/W$  0,4 e o EPS 1F tem comportamento majoritariamente insensível ao entalhe ao longo das simulações.

Palavras-chave: Método Elementos Discretos; Sensibilidade ao Entalhe; Necuron 651; EPS 1F; Materiais Quase Frágeis.

## ABSTRACT

The use of polymer materials is well established in engineering for various applications. Polymer materials with quasi-brittle behavior employed for thermal insulation and in the structures of constructions. The determination of notch sensitivity curves for these materials is essential for the safe development and application of projects. In this study, the Discrete Element Method (DEM) used to analyze and validate a methodology for obtaining notch sensitivity curves for Necuron 651 and EPS 1F materials. DEM allows the simulation of tensile tests, variations in geometry, and material characteristics computationally. Experimental tensile test curves of the proposed materials used to calibrate the model. Subsequently, notch sensitivity curves obtained through tensile tests on rectangular specimens with and without notches. The influence of increased internal defects on the behavior of EPS 1F under the effect of stress concentrators is also analyzed. The results show that the computational model can satisfactorily represent the behavior of quasi-brittle materials under the influence of stress concentrators. Necuron 651 is notch-sensitive up to the D/W ratio of 0.4, while EPS 1F exhibits predominantly notch-insensitive behavior throughout the simulations.

Keywords: Discrete Element Method; Notch Sensitivity; Necuron 651; EPS 1F; Quasi-Brittle Materials.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelo de Inglis.....	16
Figura 2 - Placa infinita com espessura B .....	18
Figura 3 - Modos de fratura.....	19
Figura 4 - Comportamento dos materiais frente ao entalhe.....	22
Figura 5 - Modelo CCC .....	23
Figura 6 - Graus de liberdade nodais.....	23
Figura 7 - Esquema de funcionamento DEM .....	25
Figura 8 - Lei constitutiva bilinear .....	25
Figura 9 - Matriz para injeção em Necuron 651.....	27
Figura 10 - Placa de EPS 1F para isolamento térmico .....	28
Figura 11 - Entalhe em V .....	30
Figura 12 - Corpo de prova tamanho III.....	31
Figura 13 - Corpo de prova padrão ASTM gerado pelo DEM.....	31
Figura 14 - Corpo de prova ampliado.....	31
Figura 15 - Deslocamento prescrito e engastes .....	32
Figura 16 - Geometria de placa retangular com entalhe para Necuron 651 .....	33
Figura 17 - Modelos fraturados em DEM .....	33
Figura 18 - Geometria de placa retangular com entalhe para EPS 1F.....	34
Figura 19 - Curva de sensibilidade experimental Necuron 651 .....	36
Figura 20 - Calibração Necuron 651 .....	37
Figura 21 - Corpo de prova fraturado para Necuron 651 .....	37
Figura 22 - Curvas de sensibilidade ao entalhe para Necuron 651 .....	39
Figura 23 - Curva 1F calibrada.....	40
Figura 24 - Corpo de prova fraturado para EPS 1F.....	40
Figura 25 - Curva sensibilidade 1F .....	43
Figura 26 - Corpos de prova computacionais.....	43
Figura 27 - Curvas de sensibilidade para material fragilizado .....	45
Figura 28 - Corpos de prova para Rf de 10,0 m – 1/2 .....	46
Figura 29 - Crescimento de trincas.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do material Necuron 651 .....	28
Tabela 2 - Propriedades do material 1F .....	29
Tabela 3 - Dimensões do corpo de prova .....	30
Tabela 4 - Diâmetros analisados para Necuron 651 .....	33
Tabela 5 - Diâmetros analisados para EPS 1F .....	34
Tabela 6 - Valores de $R_f$ .....	35
Tabela 7 - Valores obtidos pelo DEM .....	37
Tabela 8 - Quadro comparativo da calibração do Necuron 651 .....	38
Tabela 9 - Quadro comparativo entre simulação e experimental .....	39
Tabela 10 - Valores experimentais para 1F .....	41
Tabela 11 - Valores do DEM .....	41
Tabela 12 - Comparação entre DEM e experimental .....	41
Tabela 13 - Média das forças para 1F .....	42
Tabela 14 - Média de valores para $R_f = 10,0$ .....	44
Tabela 15 - Média de valores para $R_f = 35,8$ .....	44
Tabela 16 - Variação de resistência para $R_f$ de 10,0 m – 1/2 .....	46
Tabela 17 - Variação de resistência para $R_f$ de 35,8 m – 1/2 .....	46

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	12
2.	JUSTIFICATIVA.....	13
3.	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS .....	14
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
4.1.	Mecânica da fratura.....	15
4.2.	Mecânica da fratura linear elástica (MFLE).....	17
4.3.	Fator de intensidade de tensões.....	18
4.4.	Sensibilidade ao entalhe.....	20
4.5.	Método de elementos discretos.....	22
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
5.1.	Necuron 651 .....	27
5.2.	Poliestireno Expandido - 1F .....	28
5.3.	Calibração do modelo DEM.....	29
5.4.	Análise da sensibilidade ao entalhe.....	32
5.5.	Fragilização.....	34
6.	RESULTADOS OBTIDOS.....	36
6.1.	Calibração Necuron 651 .....	36
6.2.	Calibração 1F.....	39
6.3.	Sensibilidade ao entalhe.....	41
6.4.	Fragilização.....	43
7.	CONCLUSÕES .....	48
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	49
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50

## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente utilização e produção de materiais quase frágeis no século XXI, o estudo desse tipo de material se tornou alvo de pesquisa e desenvolvimento de trabalhos científicos no meio acadêmico e na indústria. Os materiais quase frágeis são aqueles que apresentam ruptura abrupta e pouca deformação, o que torna seu uso restrito a determinadas aplicações, como exemplos destes materiais tem-se o concreto e diversos polímeros.

Paralelamente, o estudo da falha de componentes também se mostra em constante desenvolvimento na comunidade acadêmica, uma vez que se observa situações de falha catastrófica em estruturas que não estão sob efeito de tensões superiores às tensões críticas de seus materiais. A mecânica da fratura é a área de engenharia que estuda as falhas estruturais relacionando a propagação de trincas pelo corpo do componente. Ela analisa a influência das trincas e concentradores de tensão na vida útil das estruturas.

Em resposta a esses desafios, métodos numéricos e computacionais emergem como recursos essenciais na análise de estruturas e materiais, possibilitando simulações detalhadas em reação a uma variedade de solicitações. O método de elementos discretos (DEM), que é utilizado neste trabalho, consiste na utilização de barras e nós para representação do espaço contínuo do material. Utilizando esse método, pode-se gerar trincas, defeitos e aleatoriedades inerentes ao material, o que torna a representação computacional mais fiel à realidade.

Este estudo converge os princípios da mecânica da fratura com a aplicação dos métodos numéricos, viabilizando uma abordagem computacional para a determinação das curvas de sensibilidade ao entalhe. Esse procedimento, que anteriormente demandava extensos ensaios experimentais, agora pode ser integralmente virtualizado, proporcionando resultados altamente congruentes com experimentos reais. As curvas de sensibilidade são as representações do comportamento dos materiais submetidos a diferentes formas e dimensões de entalhes, que são comuns em estruturas com os mais diversos formatos.

## 2. JUSTIFICATIVA

As curvas de sensibilidade ao entalhe são acessíveis na literatura para aços de ampla aplicação global. Contudo, quando se depara com a necessidade de adquirir essas curvas para novos materiais, incluindo aqueles que exibem comportamento quase frágil, objeto de investigação neste estudo, observa-se uma notável ausência de fontes disponíveis. Além disso, a carência de conteúdo abrange as mais comuns geometrias de entalhes, como entalhes em configuração de U, circulares e em forma de V.

Para disponibilizar o conteúdo que já é difundido para outros materiais, a aplicação do método de elementos discretos na modelagem de ensaios de tração mostra-se uma ferramenta de importância destacada. Esse método permite a geração precisa de entalhes de configurações variadas em corpos de prova computacionais. Dessa maneira, torna-se viável a simulação do formato de entalhe requerido, conforme estipulado pelas normas pertinentes. A partir dessa representação virtual, é possível conduzir análises detalhadas do comportamento do material, fornecendo os dados essenciais, como tensão e deformação de ruptura, para a construção das curvas de sensibilidade ao entalhe.

A obtenção de curvas de sensibilidade ao entalhe que representem com precisão o comportamento do material desempenha um papel de extrema importância na avaliação das aplicações e demandas de estruturas. A aquisição dessas curvas por meio de simulações computacionais não apenas economiza recursos que, de outra forma, seriam despendidos na compra de corpos de prova, mas também oferece flexibilidade para gerar diversas curvas de acordo com as propriedades do material e especificações de entalhes requeridas. Uma vez que os ensaios de tração convencionais são destrutivos e resultam na inutilização dos corpos de prova, a utilização de modelos computacionais emerge como uma solução viável e eficiente para conduzir este tipo de análise.

No modelo DEM, é possível monitorar em tempo real o surgimento e a propagação de trincas, considerando a influência de defeitos internos e concentradores de tensão, de maneira análoga ao que é estudado na mecânica da fratura. Portanto, o processo de fragilização, que pode ser resultado de influências como temperatura ou processos de fabricação no material, pode ser analisado no comportamento dos corpos de prova durante as simulações.

### 3. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Os objetivos gerais deste trabalho são realizar ensaios de tração para os materiais quase frágil Necuron 651 e EPS 1F pelo DEM e validar uma metodologia para obtenção das curvas de sensibilidade ao entalhe.

Para objetivos específicos, tem-se:

- a) Calibrar o modelo DEM com as curvas experimentais de ensaio de tração dos materiais quase frágeis Necuron 651 e EPS 1F;
- b) Obter as curvas de sensibilidade ao entalhe para os polímeros Necuron 651 e EPS 1F;
- c) Analisar o efeito da fragilização no comportamento das curvas de sensibilidade ao entalhe para o EPS 1F;
- d) Avaliar possíveis zonas críticas de sensibilidade de sensibilidade ao entalhe ao longo de D/W.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será abordada a fundamentação teórica para o desenvolvimento do trabalho, seus procedimentos experimentais e também análise posterior de seus resultados e implicações.

### 4.1. Mecânica da fratura

Mecânica da fratura é a área da engenharia que investiga as formas e condições em que ocorrem as falhas de estruturas. Ao estudar o comportamento de trincas, por exemplo, ao longo dos últimos anos, pode-se desenvolver métodos científicos para evitar ou prever a falha de componentes nas mais diversas aplicações. O avanço dos estudos nessa área mostra-se fundamental para o desenvolvimento de projetos cada vez mais seguros e mais sofisticados.

O principal objetivo do estudo da mecânica da fratura é a determinação se uma trinca, que pode ser resultante do processo de fabricação, operação ou inerente do material, irá resultar em uma fratura repentina da estrutura. O processo de falha pode ser devido a repetição de solicitação ou de forma instantânea na solicitação.

Como define Anderson (2005) há dois principais motivos para uma estrutura falhar:

- Negligência durante fabricação, projeto ou manuseio de estruturas;
- Aplicação de novo design ou novo material que resultará em comportamento desconhecido.

Portanto, fica evidente a urgência em conhecer os aspectos do projeto como curvas, entalhes e seus concentradores de tensão e também as propriedades dos materiais que são aplicados nas estruturas. Assim, a mecânica da fratura é fundamental para determinar a segurança de um novo projeto e avaliar a segurança de estruturas que já estão em serviço.

Para projetos mecânicos, o coeficiente de segurança (N) é obtido pela relação das tensões equivalente ou admissível ( $\sigma_{eq}$ ) e a de ruptura do material ( $\sigma_{rup}$ ). A tensão equivalente é obtida por métodos convencionais de resistências dos materiais como Von Mises e Tresca, que não consideram os defeitos internos inerentes do material e descontinuidades. Assim, define a equação 1 para análise de segurança da estrutura:

$$\sigma_{eq}(F, geometria) \leq \sigma_{rup}(Material, T, F)/N \quad (1)$$

Sendo:

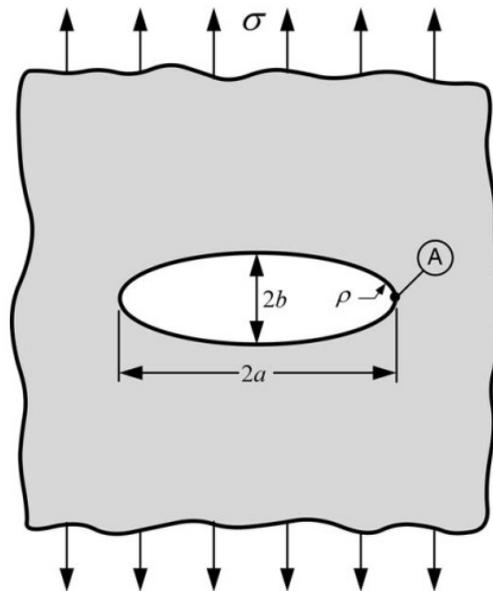
F: carga aplicada;

T: temperatura.

Porém, ao se considerar os defeitos internos, concentradores de tensões e descontinuidades, a equação (1) perde validade. Assim, a mecânica da fratura desenvolve equacionamentos e critérios para análise de problemas com essa complexidade.

Inglis (1913) registrou os primeiros estudos quantitativos relacionando trinca como concentrador de tensão. Em sua análise, ele considera uma placa plana com trinca elíptica interna de comprimento  $2a$  por  $2b$  sob carregamento axial,  $\sigma$ , perpendicular à elipse, também considera-se que as dimensões da placa são suficientemente maiores que as da elipse, como mostra a figura 1.

Figura 1 - Modelo de Inglis.



Fonte: Adaptado de Anderson, 2005.

Inglis verificou que a tensão na ponta trinca, no ponto A da figura 1, é dada pela equação (2):

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b}\right) \quad (2)$$

Logo, fica definido que a relação:  $\sigma_A/\sigma = K$ , sendo K um fator concentrador, ou ampliador de tensão que é função da trinca na estrutura. Também pode-se extrair da equação 2 que, se o raio de curvatura r, que é dado por:  $r = b^2/a$ , for 0, uma trinca com ponta aguda, a tensão em A tenderá ao infinito. Isso não ocorre na prática, já que se encontra esse tipo de trinca em estruturas que não colapsam.

#### 4.2. Mecânica da fratura linear elástica (MFLE)

Em 1920, Griffith desenvolvia importantes estudos na área de mecânica da fratura sendo considerado um dos precursores da área. Griffith, ao investigar placas de fibra de vidro de diferentes espessuras sob tração, pode detectar a relação da tensão que elas suportavam com a espessura das placas. Ele notou que quanto menor a espessura, maior a tensão que elas suportavam e mais próxima à tensão teórica de ruptura.

Considerando que o comportamento do material da placas de fibra de vidro é elástico e que também a ruptura delas ocorria essencialmente durante o estado de deformação elástica, Griffith sugeriu haver a relação do surgimento da trinca com o balanço de energia entre as energias de superfície e interna, como mostra a equação (3):

$$\frac{dw}{dA} - \frac{dU}{dA} = \gamma \quad (3)$$

Sendo:

w: Potencial das forças externas aplicadas;

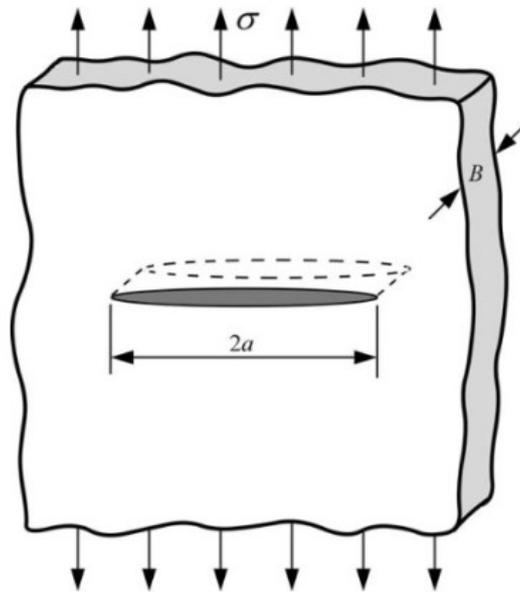
A: Área da superfície da trinca com espessura igual a placa;

U: Energia de deformação interna;

$\gamma$ : Energia de superfície de material.

Ao se adaptar o modelo de placa infinita sob tração, agora com espessura B e trinca elíptica de comprimento 2a, conforme mostra a figura 2, com a equação 3 sugerida por Griffith, chega-se a equação (4):

Figura 2 - Placa infinita com espessura B



Fonte: Anderson, 2005.

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi a}} \quad (4)$$

Sendo:

$\sigma_f$ : Tensão de ruptura da placa;

E: modulo de elasticidade do material.

A equação 4 também pode ser escrita da seguinte forma, substituindo  $2\gamma_s$  por  $G_C$ , resultando na equação 5:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{G_C E}{\pi a}} \quad (5)$$

Sendo:

$G_C$ : taxa crítica de liberação de energia de Griffith.

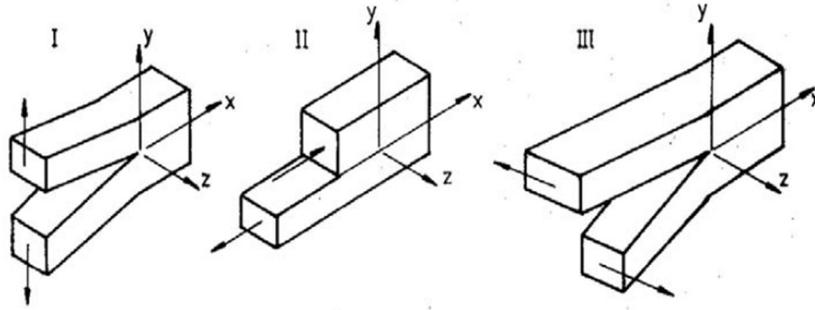
### 4.3. Fator de intensidade de tensões

Com base no trabalho de Westergaard (1927), Irwin (1957) apresenta o fator de intensidade de tensão, K. Esse fator é definido como o parâmetro que representa a

variação das magnitudes das tensões imediatamente após a ponta da trinca. Nota-se que tal variação é dependente da dimensão da trinca.

Para os 3 modos de fratura, como mostra a figura 3, o modo I, que é o de carregamento de tração e mais comum encontrado nos modelos de fratura, pode-se determinar o campo de tensões imediatamente após a ponta da trinca como a equação (6):

Figura 3 - Modos de fratura.



Fonte: Adaptado de Puglia, 2014.

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{ij}(\theta) \quad (6)$$

Sendo:

$\sigma_{ij}$ : Tensor de tensões;

$f_{ij}$ : Função relativa a forma do carregamento e geometria do componente;

$\theta$ : ângulo que define a posição do ponto em relação a ponta trinca;

$K_I$ : Fator de intensidade de tensões para o modo I.

O fator de intensidade de tensões para o modo I ( $K_I$ ), é definido como sendo uma função do comprimento da trinca e do carregamento da estrutura. Desse modo,  $K_I$  é definido pela equação (7):

$$K_I = \varphi \sigma \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

Sendo:

$\varphi$ : Coeficiente em função da geometria do componente;

$\sigma$ : Tensão aplicada na estrutura.

Após a tensão atingir um valor limite, ao qual a trinca irá se propagar ao longo da estrutura, o fator de intensidade ( $K_I$ ) será referenciado como tenacidade à fratura, representado pela equação 8:

$$K_{IC} = \sigma_f \sqrt{\pi a_c} f(a_c/W) \quad (8)$$

Sendo:

$K_{IC}$ : Tenacidade à fratura de modo I;

$a_c$ : Comprimento crítico de trinca;

$\sigma_f$ : Tensão de ruptura aplicada;

$f(a_c/W)$ : Parâmetro de geometria e carregamento.

#### 4.4. Sensibilidade ao entalhe

Como Norton (2013) aborda, entalhe é definido como qualquer descontinuidade que interrompa o fluxo de forças ao longo de um componente. Os entalhes podem ser de diversas formas, sendo comumente associados a furos, mudanças de diâmetros e ranhuras. A presença dessas descontinuidades é comum em quaisquer componentes.

Os entalhes são também concentradores de tensões e podem alterar drasticamente o campo de tensões em seus componentes. Conforme as dimensões dos entalhes, estes podem desempenhar o papel de trinca na estrutura. É assim para entalhes com raio de arredondamento muito pequenos.

Na literatura, é possível encontrar parâmetros que relacionam o tipo de entalhe e suas dimensões com a concentração de tensões. O fator  $K_t$  é amplamente utilizado e possui ábacos para aços, por exemplo. A definição de  $K_t$  é dada pela equação (9), que relaciona a tensão na região do entalhe com a tensão aplicada na estrutura:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_a} \quad (9)$$

Sendo:

$\sigma_{max}$ : Tensão máxima no concentrador;

$\sigma_a$ : Tensão aplicada na estrutura.

Para o caso de específico de entalhe circular central e tensão tratativa no corpo de prova, pode-se analisar o comportamento do material em função do diâmetro do furo. A análise é feita dividindo a tensão de ruptura dos corpos de prova com entalhe central ( $\sigma_N$ ) pela tensão de ruptura do corpo de prova sem entalhe ( $\sigma_u$ ). As equações (10) e (11) apresentam as tensões  $\sigma_u$  e  $\sigma_N$  respectivamente:

$$\sigma_u = \frac{F}{Wt} \quad (10)$$

Sendo:

$F$ : Força aplicada no corpo no momento de ruptura;

$W$ : Largura do corpo de prova;

$t$ : espessura do corpo de prova.

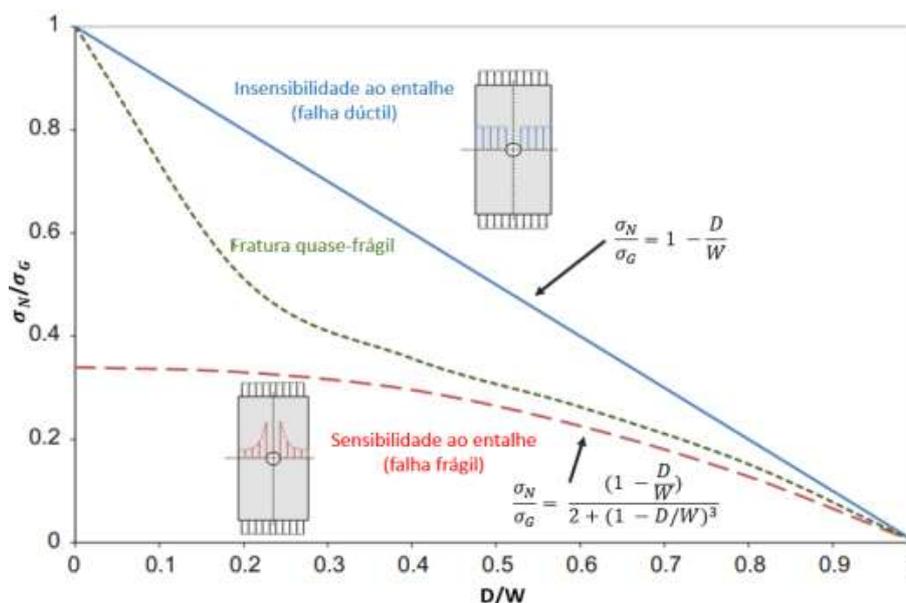
$$\sigma_N = \frac{F}{(W-D)t} \quad (11)$$

Sendo:

$D$ : diâmetro do furo central.

O comportamento ao entalhe varia com relação ao tipo de material. Classificando em 3 grupos de materiais: dúcteis, frágeis e quase frágeis, alguns entalhes comuns na engenharia foram analisados, no caso específico de entalhe circular central e tensão tratativa, como mostra a figura 4.

Figura 4 - Comportamento dos materiais frente ao entalhe



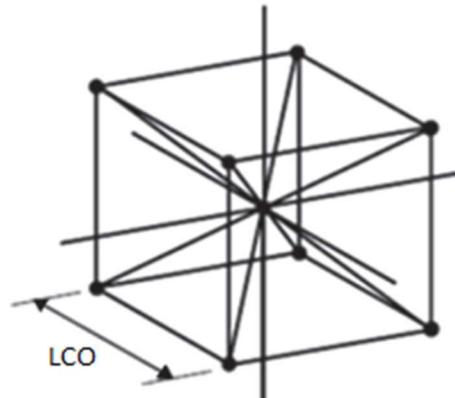
Fonte: Adaptado de Cunha, 2021.

#### 4.5. Método de elementos discretos

A discretização dos materiais nos corpos de prova é feita no DEM pela utilização de pontos ligados por elementos de barras. Os pontos são as representações de massa e as barras que os interligam representam a rigidez do meio contínuo do corpo (Soares; Iturrioz, 2014.). O módulo básico é formado por 20 barras e 9 nós, o sistema de coordenadas cartesianos é utilizado para delimitar os três graus de liberdade dos deslocamentos.

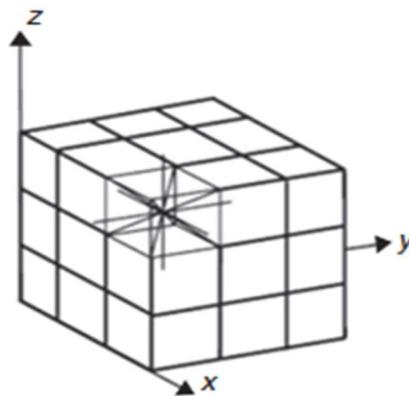
O padrão de disposição dos nós e barras é análogo a um modelo de célula unitária cúbica de corpo centrado (CCC) de comprimento LCO conforme ilustrado na figura 5 e os três graus de liberdade para cada massa nodal na figura 6. Considerando as massas nodais, o amortecimento do material, três graus de liberdade e a condição de equilíbrio para as forças internas e externas de cada massa nodal, pode-se determinar a força resultante nos pontos e seus deslocamentos em um determinado intervalo de tempo pela equação (12):

Figura 5 - Modelo CCC



Fonte: Adaptado de Soares; Iturrioz, 2014.

Figura 6 - Graus de liberdade nodais



Fonte: Adaptado de Soares; Iturrioz, 2014.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F(t) - P(t) = 0 \quad (12)$$

Sendo:

$M$ : Matriz de massas nodais;

$C$ : Matriz de amortecimento;

$\ddot{x}$ : vetor aceleração nodais;

$\dot{x}$ : vetor velocidade nodais;

$F(t)$ : Vetor de força nodal interna;

$P(t)$ : Vetor de força nodal externa.

O sistema pode ser integrado no domínio do tempo desde que respeite a condição do  $\Delta t$  de materiais elásticos lineares para que a integração mantenha-se contínua pela equação (13):

$$\Delta t \leq \frac{0,6LCO}{\sqrt{E/\rho}} \quad (13)$$

Sendo:

$\rho$ : densidade do material.

Para materiais elástico isotrópicos, a área longitudinal ( $A_l$ ) dos elementos longitudinais do modelo pode ser calculada pela equação (14), assim como a área diagonal ( $A_d$ ) pode ser calculada analogamente pela equação (15):

$$A_l = \emptyset L^2 \quad (14)$$

$$A_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \delta \emptyset L^2 \quad (15)$$

Sendo:

$\emptyset$ : Função de  $\delta$ ;

$\delta$ : Função de  $\vartheta$ .

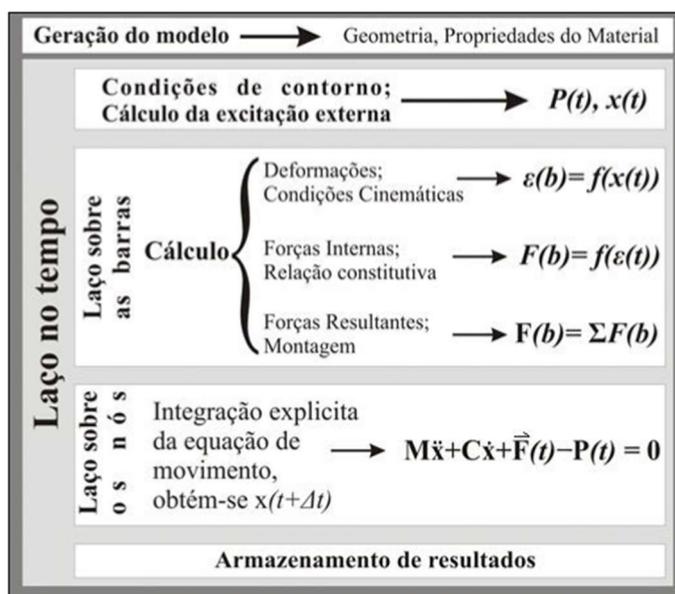
Observa-se a dependência de  $\emptyset$  e  $\delta$  do coeficiente de Poisson  $\vartheta$  do material. Desta forma,  $\delta$  e  $\vartheta$  são dados pelas equações (16) e (17) respectivamente. Existe uma equivalência completa entre o modelo discreto com o meio contínuo isotrópico no qual  $\vartheta = 0,25$ . Para valores diferentes de 0,25 surgem diferenças no termos de corte (Soares; Iturrioz, 2014).

$$\emptyset = \frac{(9+8\delta)}{(18+2\delta)} \quad (16)$$

$$\delta = 9\vartheta(4 - 8\vartheta) \quad (17)$$

Em síntese, o modelo DEM, para o caso de material linear elástico quase frágil é ilustrado pela figura 7.

Figura 7 - Esquema de funcionamento DEM

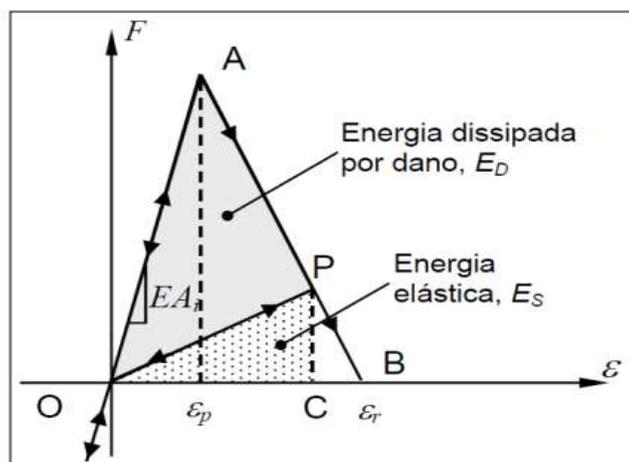


Fonte: Adaptado de Puglia (2014, p. 23).

#### 4.6. Lei constitutiva bilinear

Proposta por Rocha (1991), a lei constitutiva bilinear, ou modelo de Hillerborg, permite relacionar e quantificar os efeitos da fratura frágil e irreversibilidades pela nucleação e propagação de trincas no modelo DEM. A lei pode ser ilustrada pela figura 8 e sua aplicação é de extrema importância para modelar o comportamento dos nós e elementos de barras no modelo de elementos discretos.

Figura 8 - Lei constitutiva bilinear



Fonte: Kostaski (2012).

Sendo:

$F$ : Força axial no elemento cúbico;

$\varepsilon$ : Função da deformação específica no elemento;

$\varepsilon_r$ : Deformação de ruptura;

$\varepsilon_p$ : Deformação crítica de limite;

$E$ : Módulo de elasticidade do material;

$A$ : Área de seção transversal do elemento.

Da lei, obtém-se que a área abaixo da curva OAB é a densidade de energia mínima necessária para fraturar a região do elemento cúbico. Já a área do triângulo OPC representa a densidade de energia armazenada no elemento. Por fim, a área do triângulo OPA é a densidade de energia dissipada na fratura do elemento. A lei define que a densidade de energia dissipada por dano é igual à densidade de energia de fratura, portanto o elemento ao falhar irá descarregar essa parcela linearmente, reta AB, até a origem perdendo sua utilidade de receber carga.

Cada elemento cúbico pode ser especificado por duas áreas,  $A_l$  e  $A_d$ , longitudinal e diagonal respectivamente. O produto da área fraturada, o qual ocorre a falha, com a energia específica de fratura ( $G_f$ ) dividido pela comprimento do elemento deve ser igual à área OAB, portanto chega-se na equação (18):

$$\int_0^{\varepsilon_r} F(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{G_f A_i^f}{L} \quad (18)$$

Sendo:

$A_i^f$ : Área fraturada do elemento com o subscrito  $i$  indicando área diagonal ou longitudinal.

Dessa forma, quando o elemento atinge a deformação crítica limite antes do dano ( $\varepsilon_p$ ), a relação entre a energia específica de fratura ( $G_f$ ) e o módulo de elasticidade do material pode ser feita pela equação (19) que é modelada em função da Mecânica da Fratura Linear Elástica. Ela contém o fator de falha do material ( $R_f$ ) que é a representação dos defeitos e descontinuidades intrínsecas do material.

$$\varepsilon_p = R_f \sqrt{\frac{G_f}{E}} \quad (19)$$

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda os materiais usados para calibração do modelo computacional, o desenvolvimento da metodologia para obtenção das curvas de sensibilidade ao entalhe e as situações analisadas. A sessão parte da apresentação dos materiais e suas propriedades mecânicas, passa pelo detalhamento de procedimentos utilizados na calibração dos modelos, que são fundamentais para validação dos resultados, e as bases consultadas em trabalhos anteriores como o de Negru (2015), Cunha (2021) e Marchezan (2023).

### 5.1.Necuron 651

Para tornar robusta a validação do modelo computacional, decidiu-se realizar a calibração do DEM com outro material que fora analisado o comportamento de sua curva de sensibilidade ao entalhe, de forma experimental, pelo autor Negru (2015). O Necuron 651, material analisado por Negru (2015), é um polímero poliuretano de comportamento quase frágil, o material pode ser referido também como Necuron 708 em função de sua densidade  $708\text{kg/m}^3$ .

Figura 9 - Matriz para injeção em Necuron 651



Fonte: Adaptado de Graphite Technologies, 2018.

Com aplicação na indústria automotiva, o Necuron é utilizado em ferramentas de calibração, transporte e guias. O material apresenta bom acabamento superficial e também é comumente aplicado em matrizes para processos de injeção como mostra a figura 9. Outra propriedade comum ao Necuron é a estabilidade dimensional em variações

de temperatura o que torna possível a sua aplicação em processos de laminação e fabricação de modelos de machos para fundição (Graphite Technologies, 2018).

Negru (2015) verifica em suas análises e testes mecânicos que o Necuron de alta densidade apresenta as propriedades presentes na tabela 1. Essas propriedades são utilizadas como base no trabalho de Marchezan (2023) e na calibração deste trabalho.

Tabela 1 - Propriedades do material Necuron 651

E[MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\nu$	$Gf$ [N/m]	$CV_{Gfr}$ [%]
1250	708	0,3	1256	30

Fonte: Adaptado de Marchezan, 2023.

## 5.2. Poliestireno Expandido - 1F

O material de comportamento característico quase frágil utilizado neste trabalho é o polímero de poliestireno expandido 1F. O EPS é a sigla internacionalmente conhecida que designa o poliestireno expandido, é comum a utilização do termo Isopor no Brasil. O processamento de obtenção desse material evoluiu muito através do anos, removendo o utilização de gases CFC e HCFC causadores do efeito estufa no planeta. Dessa forma os produtos finais de EPS não contaminam o meio ambiente e ainda podem ser reciclados (EPS Brasil, 2014).

Figura 10 - Placa de EPS 1F para isolamento térmico



Fonte: Adaptado de Refratil Refratários, 2023.

O Isopor tem diversas aplicações dentre elas telhas térmicas para isolamento de construções e blocos e placas para utilização em estruturas de construção civil,

exemplo de placa do material está na figura 10. O EPS 1F, utilizado neste trabalho, é característico por ter uma densidade menor em relação a classe 5F, outro EPS de maior densidade. As propriedades como módulo de elasticidade, densidade e coeficiente de Poisson, que são utilizadas no modelo computacional do material estão presentes na tabela 2, algumas das propriedades são base para os modelos de peridinâmica ensaiados por Cunha (2021).

Tabela 2 - Propriedades do material 1F

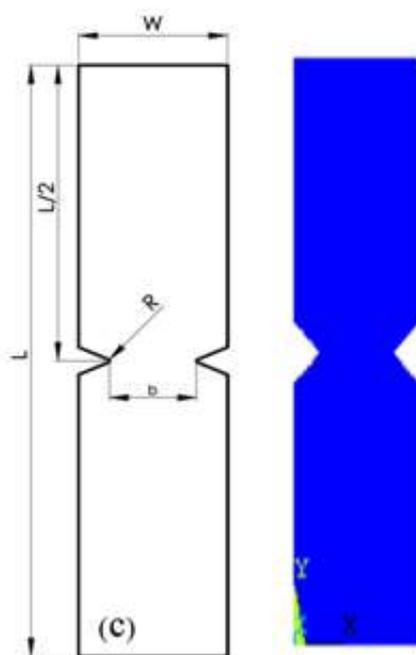
E[MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\nu$	$Gf$ [N/m]	$CV_{gfr}$ [%]
4,88	11,9	0,25	133,4	170

Fonte: Adaptado de Cunha, 2021.

### 5.3. Calibração do modelo DEM

Para calibração do material analisado por Negru (2015), utiliza-se o modelo de entalhe em V, assim como o autor, em ensaio de tração para determinar a curva de Força x Deslocamento característica do Necuron 651. O padrão de corpo de prova utilizado nas simulações e ensaios experimentais é mostrado na figura 11, já as dimensões do modelo na tabela 3. Negru (2015) realiza quatro ensaios para o entalhe V até o momento de ruptura do corpo de prova e a média entre os quatro ensaios determina os valores de força de ruptura e deslocamento do material. Para ter igual amostragem, é realizado o mesmo número de ensaios experimentais no modelo do DEM com sementes de aleatoriedades diferentes.

Figura 11 - Entalhe em V



Fonte: Autor.

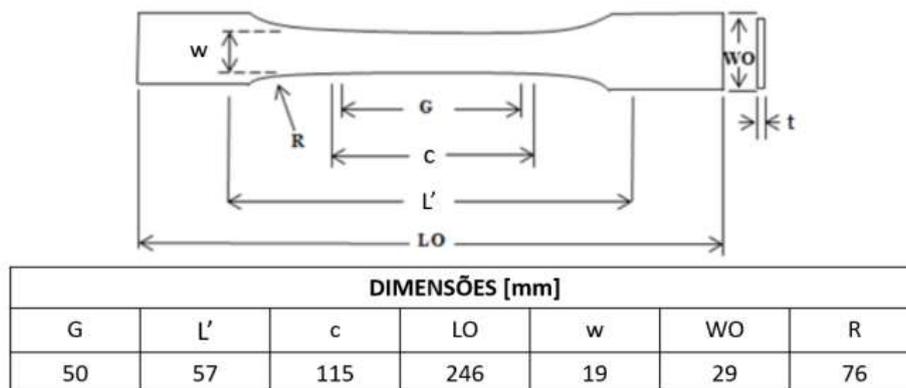
Tabela 3 - Dimensões do corpo de prova

W [mm]	b [mm]	L [mm]	R [mm]
25	15	100	0,25

Fonte: Adaptado de Negru, 2015.

Para validar o comportamento do material e a análise das curvas de sensibilidade ao entalhe para o material Isopor 1F, o modelo do DEM é calibrado com as curvas experimentais dos ensaios de tração obtidas, em trabalhos anteriores, por Cunha (2021) e Colpo (2016). Das características analisadas, tem-se a tensão de ruptura e a deformação. Os corpos de prova utilizados para os ensaios e que serão gerados no DEM seguem o padrão da norma ASTM D638 – 10 a qual normatiza os procedimentos para ensaios de tração de corpos de prova poliméricos. O tamanho utilizado para ambos os ensaios, experimental e computacional, são do tamanho III, as dimensões são mostradas na figura 12 e o modelo DEM gerado nas figuras 13 e 14.

Figura 12 - Corpo de prova tamanho III



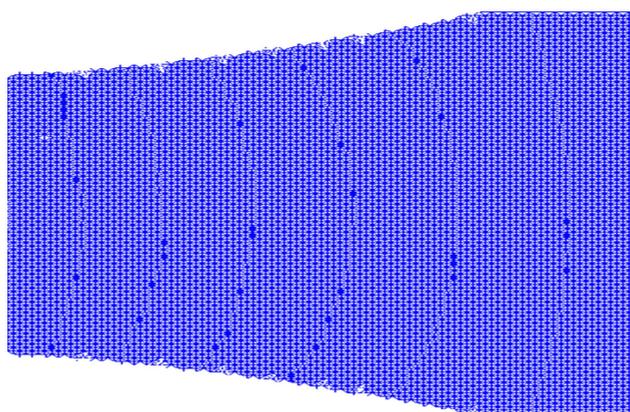
Fonte: Adaptado de ASTM, 2014.

Figura 13 - Corpo de prova padrão ASTM gerado pelo DEM



Fonte: Autor.

Figura 14 - Corpo de prova ampliado



Fonte: Autor.

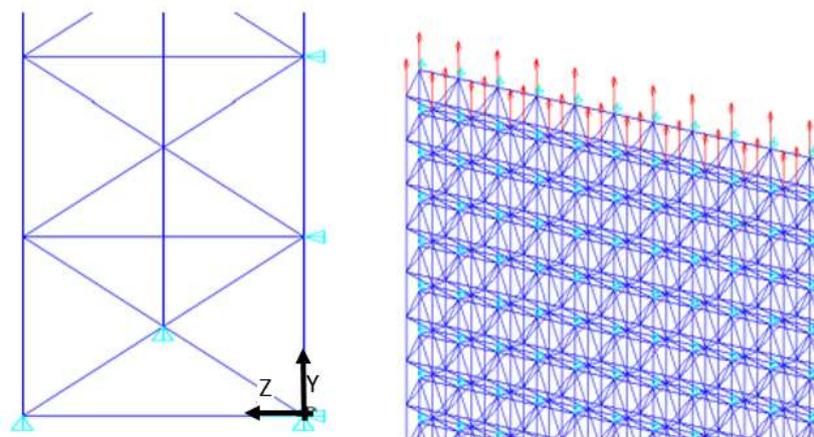
São conduzidas cinco simulações, equivalente ao número de curvas experimentais obtidas em estudos anteriores, com diferentes sementes de campo aleatório. Em seguida, é feita a análise das cinco curvas computacionais e verificação da

ruptura de cada corpo de prova. Verificam-se os valores das tensões e deformações de ruptura que os modelos do Método dos Elementos Discretos apresentam, assegurando que estejam dentro do intervalo dos ensaios experimentais.

Em todas as simulações as condições de engaste e aplicação da carga, em forma de deslocamento prescrito, mantiveram-se iguais. O deslocamento prescrito (representado por setas vermelhas) é feito nas últimas duas linhas de nós no topo do corpo de prova, sendo realizado no sentido único de Y, com velocidade de deslocamento que garanta a condição de carregamento quase estático, ou seja, velocidade que não cause oscilações elevadas de energia cinética ao longo do ensaio.

Os engastes (representados por triângulos) são aplicados nas duas primeiras linhas de nós na base para restringir o deslocamento no sentido de X, Y e Z. Também foram engastados todos os nós na direção de Z negativo ou espessura do modelo, restringindo o deslocamento em X e Z. Assim, a condição de estado plano de deformação, EPD, é atendida. A figura 15 mostra as aplicações do deslocamento prescrito e engastes.

Figura 15 - Deslocamento prescrito e engastes

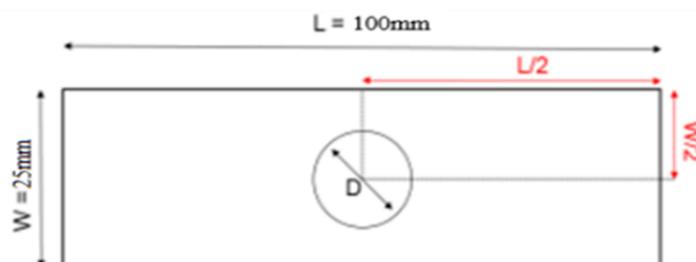


Fonte: Autor.

#### 5.4. Análise da sensibilidade ao entalhe

Para obtenção da curva de sensibilidade do material analisado por Negru (2015) e posteriormente por Marchezan (2023), o Necuron 651, são utilizados corpos de provas retangulares sem entalhe e com furo central de diâmetro  $D$ . O corpo de prova contém as dimensões  $L$  e  $W$ , 100mm e 25mm, mostradas na figura 16. As dimensões do diâmetro  $D$  e relação  $D/W$  são mostradas na tabela 4.

Figura 16 - Geometria de placa retangular com entalhe para Necuron 651



Fonte: Autor.

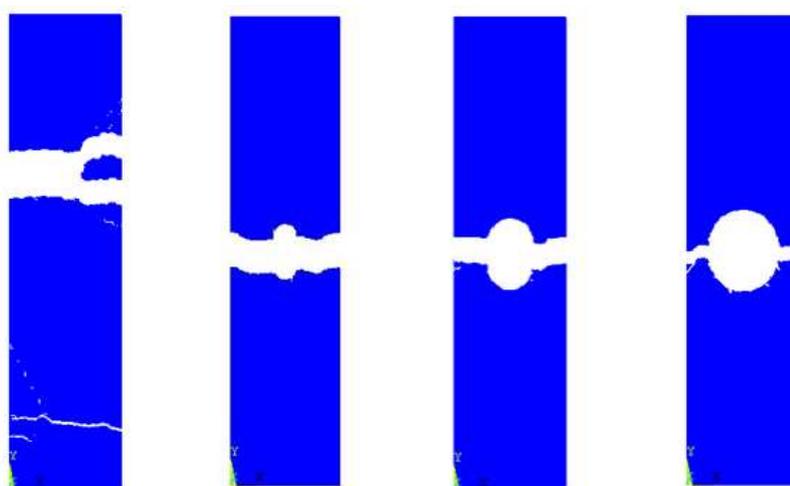
Tabela 4 - Diâmetros analisados para Necuron 651

D[mm]	1	2,5	5	7	10	15	20
D/W	0,04	0,01	0,2	0,28	0,4	0,6	0,8

Fonte: Autor.

Para os modelos de corpos de prova descritos anteriormente, sem e com entalhe, foram realizados 4 ensaios de tração até o momento da ruptura pelo DEM para obter-se a média entre os resultados. Utilizou-se uma semente aleatória diferente em cada ensaio para geração de aleatoriedades e defeitos internos do material. Os dados extraídos dos ensaios foram as deformações e forças,  $F_u$  para placa sem entalhe e  $F_N$  para as placas com entalhe, no momento da ruptura. A figura 17 mostra os corpos de prova sem entalhe e com entalhe nos diâmetros de 10mm, 20mm e 30mm gerados no modelo DEM após a fratura. Com o valor médio das 4 forças de ruptura das placas sem entalhe e com furo, é possível traçar a curva da sensibilidade ao entalhe característica de  $F_N/F_u$  em função  $D/W$ .

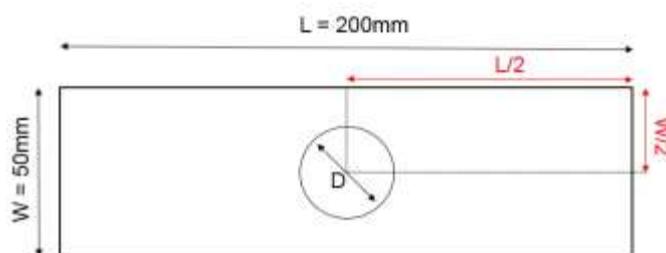
Figura 17 - Modelos fraturados em DEM



Fonte: Autor.

Para obtenção das curvas de sensibilidade ao entalhe do material EPS 1F, são utilizados corpos de provas retangulares sem entalhe e com furo central de diâmetro  $D$  de maneira semelhante ao Necuron 651. Todas as simulações foram feitas pelo DEM e seguindo as dimensões do corpo de prova da figura 18. O diâmetro  $D$  varia de 5mm até 30mm com incrementos de 5mm, conforme mostra a tabela 5, com relação de  $D/W$  máxima de 0,6.

Figura 18 - Geometria de placa retangular com entalhe para EPS 1F



Fonte: Adaptado de Cunha, 2021.

Tabela 5 - Diâmetros analisados para EPS 1F

D[mm]	5	10	15	20	25	30
D/W	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

Fonte: Autor.

### 5.5.Fragilização

A fragilização é um processo comum que pode ocorrer em qualquer tipo de material, dúctil e frágil, e é causado durante seu processamento ou quando já em solicitação. O processo tende a diminuir a ductilidade do material.

Para análise do comportamento do material e sua sensibilidade ao entalhe sob o efeito da fragilização, o EPS 1F teve seus valores de fator de falha alteradores em dois níveis. O valor de  $R_f$ , fator de falha, que representa os defeitos e discontinuidades intrínsecas do material e está presente na aplicação da lei constitutiva bilinear na equação (19) ao modelo numérico, é alterado do original de forma a elevar sua magnitude, conforme a tabela 6. Elevando o valor de  $R_f$ , o modelo computacional passa a ter maior quantidade de defeitos, como barras danificadas ou totalmente rompidas, na malha gerada pelo DEM, antes mesmo da aplicação da carga.

Tabela 6 - Valores de  $R_f$ 

$R_f$	$[m^{-1/2}]$
Original	4,3
Fragilização	10
Fragilização	35,8

Fonte: Autor.

$$\varepsilon_P = R_f \sqrt{\frac{G_f}{E}} \quad (19)$$

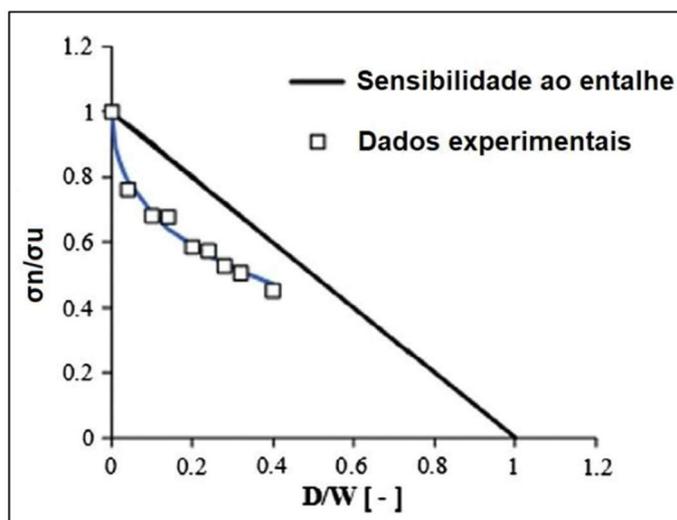
## 6. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção são apresentados os resultados das calibrações dos materiais 1F e Necuron 651. Em seguida, as curvas de sensibilidade de ambos os materiais, obtidas pelo autor, são mostradas e avaliadas. Ao final da sessão os resultados da fragilização do EPS 1F e suas consequências são avaliadas.

### 6.1. Calibração Necuron 651

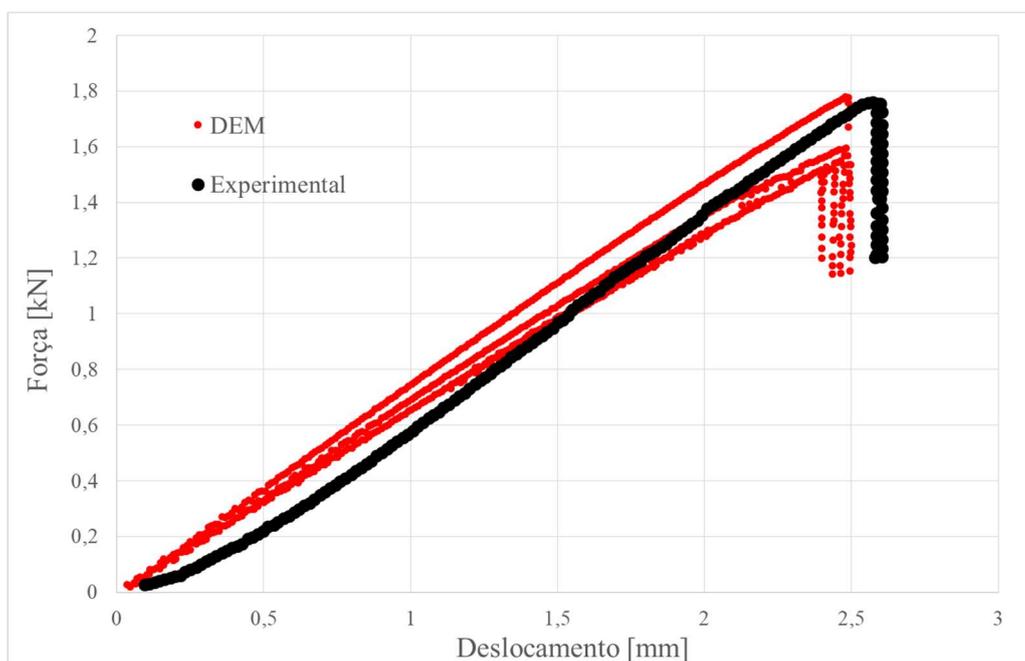
A curva característica Força x Deslocamento para o material Necuron 651 está representada na figura 19, a qual é média dos 4 testes obtida por Negru (2015). O valor da força no momento da ruptura é de 1,77kN e o deslocamento 2,59mm. Esse resultado é a base para calibração no modelo DEM. As curvas geradas pelo modelo computacional, na figura 20, resultaram nos valores médios de força e deslocamento, no momento de ruptura, de 1,61kN e 2,58mm conforme detalha a tabela 7. As diferenças em termos percentuais entre as médias experimentais e virtuais ficaram em 9,56% e 0,24% para força e deslocamento respectivamente. A tabela 8 contém a comparação anterior e as médias obtidas. A figura 21 mostra um corpo de prova fraturado pela a simulação.

Figura 19 - Curva de sensibilidade experimental Necuron 651



Fonte: Adaptado de Negru, 2015.

Figura 20 - Calibração Necuron 651



Fonte: Autor.

Figura 21 - Corpo de prova fraturado para Necuron 651



Fonte: Autor

Tabela 7 - Valores obtidos pelo DEM

Curva	1	2	3	4	Média
Força [kN]	1,79	1,61	1,54	1,52	1,61
Deslocamento[mm]	2,59	2,58	2,59	2,58	2,58

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Quadro comparativo da calibração do Necuron 651

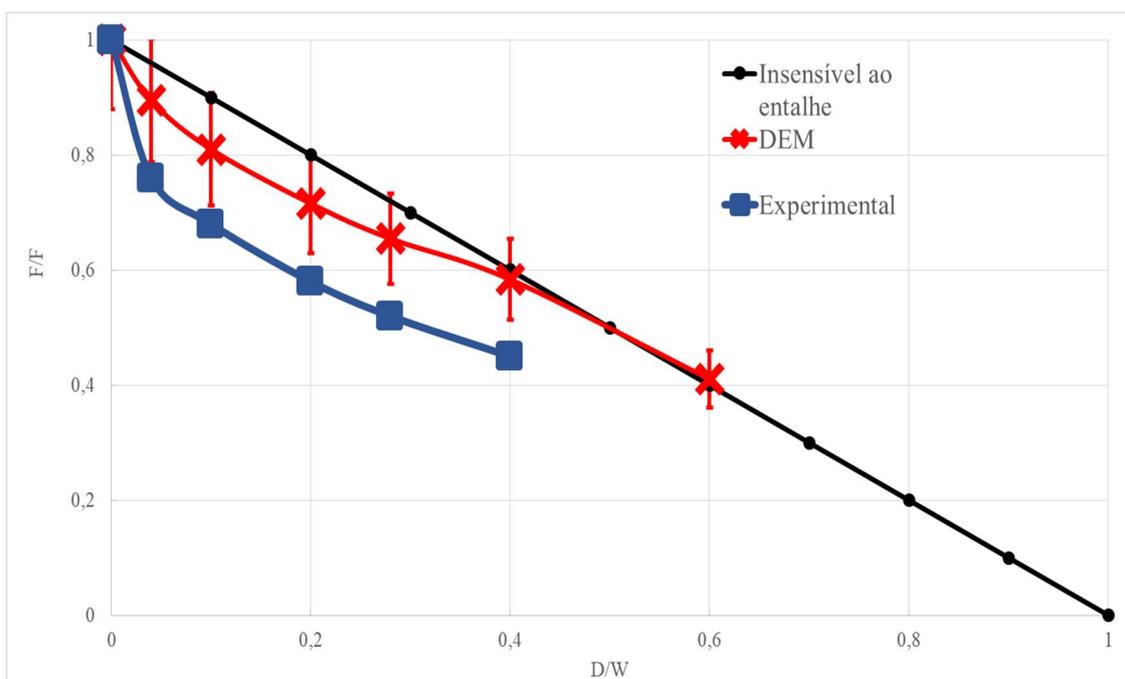
	Experimental	DEM	Diferença [%]
Força [kN]	1,77	1,61	9,65
Deslocamento[mm]	2,59	2,58	0,24

Fonte: Autor.

A curva de sensibilidade ao entalhe, presente na figura 22 com marcadores quadrados, foi obtida por Negru (2015) e utilizada como base para comparação dos resultados do trabalho de Marchezan (2023). Ela foi produzida através de ensaios experimentais de tração para corpos de prova com furo circular central, mesmo método utilizado nesse trabalho. Desta forma, com a calibração do modelo virtual partindo da curva característica Força x Deslocamento do Necuron, verifica-se também a curva de sensibilidade obtida pelo Método de Elementos Discretos em comparação à curva experimental.

Das simulações referentes da tabela 5, diâmetros analisados do Necuron 651, e mais os ensaios de placa sem entalhe, foi possível obter a curva de sensibilidade para o material. Presente na figura 22 com marcadores em “X”, é observado que os resultados numéricos acompanharam os valores experimentais. Até a relação D/W de 0,4 o modelo numérico mostra-se capaz de acompanhar o comportamento experimental, após essa relação o material se comporta de maneira totalmente insensível ao entalhe, dessa forma o entalhe não atua mais como concentrador de tensão. No gráfico, a curva computacional apresenta variação de 12% nos valores médios dos pontos projetados. A tabela 9 mostra as diferenças percentuais obtidas em cinco pontos diferentes ao longo de D/W entre os modelos, por exemplo, o modelo computacional mostra-se 17,47% menos sensível ao entalhe em relação ao modelo experimental na relação de D/W 0,04.

Figura 22 - Curvas de sensibilidade ao entalhe para Necuron 651



Fonte: Autor.

Tabela 9 - Quadro comparativo entre simulação e experimental

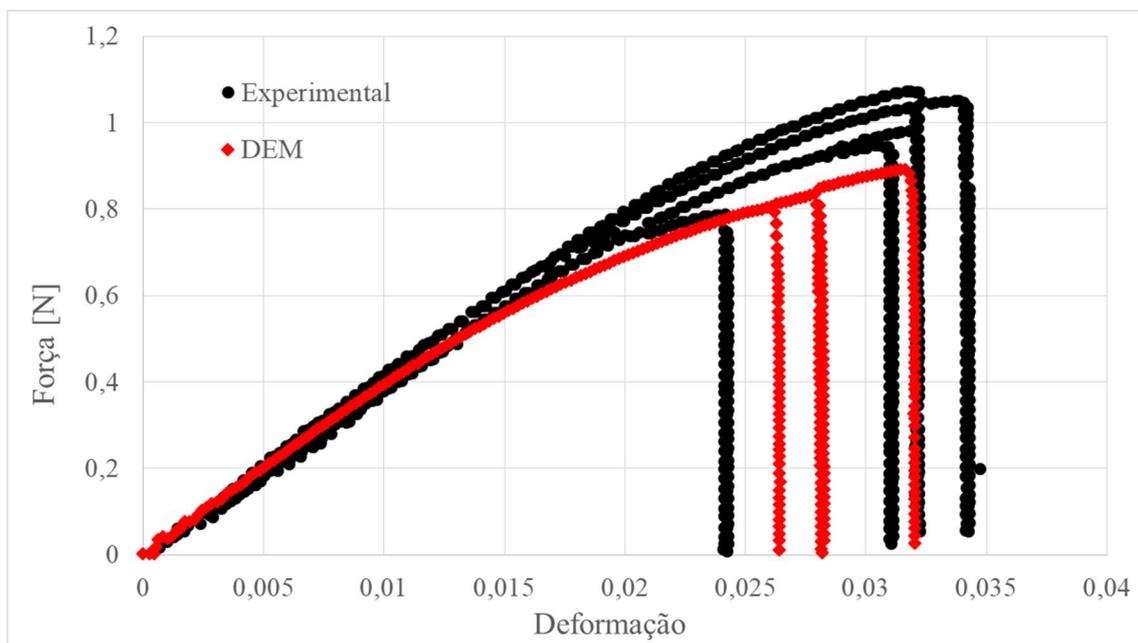
D/W	Diferença percentual				
	0,04	0,10	0,20	0,28	0,40
%	17,47	19,13	23,41	25,91	29,73

Fonte: Autor.

## 6.2. Calibração 1F

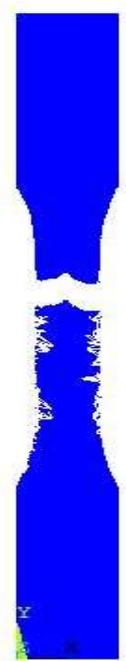
A figura 23 apresenta as curvas experimentais que foram utilizadas para calibração com o modelo numérico e a tabela 10 os valores de tensão e deformação de ruptura respectivamente. Da análise estatística, as curvas experimentais apresentaram como força de ruptura mínima de 0,78N e máxima 1,08N, já a deformação no momento de ruptura mínima encontrada foi de 0,024mm/mm e máxima de 0,034mm/mm. As médias para força e deformações no momento da ruptura foram, respectivamente, 0,97N e 0,030mm/mm. A figura 24 mostra um corpo de prova fraturado pela a simulação.

Figura 23 - Curva 1F calibrada



Fonte: Autor.

Figura 24 - Corpo de prova fraturado para EPS 1F



Fonte: Autor.

Tabela 10 - Valores experimentais para 1F

Curvas	1	2	3	4	5	Média
Força [N]	0,78	0,95	0,98	1,08	1,05	0,97
Deformação [mm/mm]	0,024	0,031	0,032	0,032	0,034	0,030

Fonte: Autor.

As curvas de Força x Deformação geradas pelo modelo DEM, na figura 23, demonstram a proximidade do modelo virtual para o experimental. Uma análise estatística dos dados na tabela 11 com os valores computacionais gerados, revela que o máximo e mínimo para força de ruptura são, respectivamente, 0,89N e 0,80N. Quanto às deformações máximas e mínimas, foram encontradas em 0,032mm/mm e 0,026mm/mm, respectivamente. A média das forças e deformações das cinco simulações realizadas no modelo DEM foram de 0,83N e 0,028mm/mm.

Tabela 11 - Valores do DEM

Simulação	1	2	3	4	5	Média
Força [N]	0,80	0,82	0,83	0,83	0,89	0,83
Deformação [mm/mm]	0,026	0,028	0,028	0,028	0,032	0,028

Fonte: Autor.

Ao comparar a diferença das médias entre o modelo computacional e experimental, chega-se nos valores de 9,01% para as forças e 7,33% para deformações, a tabela 12 apresenta a relação das médias descritas.

Tabela 12 - Comparação entre DEM e experimental

	Experimental	DEM	Diferença [%]
Força [N]	0,97	0,83	15,93
Deformação [mm/mm]	0,030	0,028	7,86

Fonte: Autor.

### 6.3.Sensibilidade ao entalhe

Após a conclusão da calibração, procedeu-se com a realização dos ensaios de tração com o objetivo de determinar a curva de sensibilidade ao entalhe para o material 1F, excluindo o efeito de fragilização. Os ensaios foram conduzidos de maneira a calcular a média dos resultados obtidos ao longo das cinco repetições realizadas para cada padrão

de corpo de prova. A tabela 13 mostra os valores médios das forças de ruptura encontrados para a placa retangular sem entalhe e com furos de diâmetros variados.

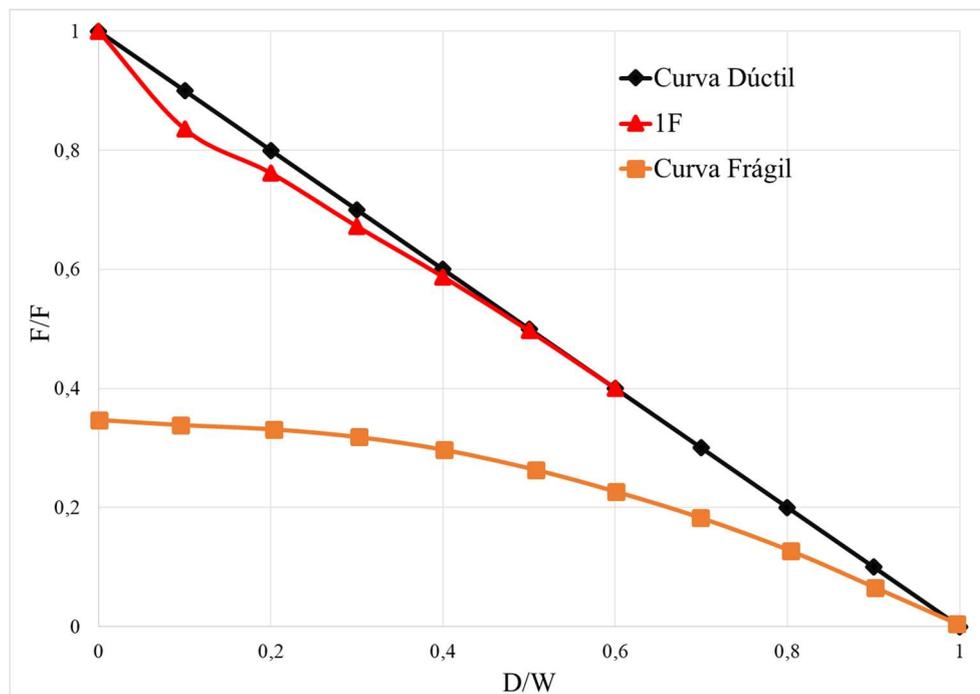
Tabela 13 - Média das forças para 1F

Entalhe [mm]	D/W	Força[N]
Sem entalhe	0	5,34
5	0,1	4,46
10	0,2	4,07
15	0,3	3,59
20	0,4	3,14
25	0,5	2,65
30	0,6	2,14

Fonte: Autor.

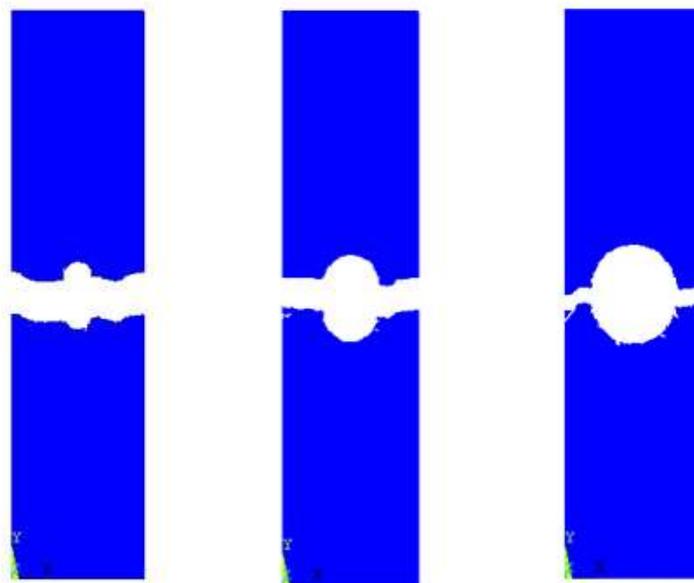
A curva de sensibilidade do material 1F está representada pela curva com marcadores triangulares na figura 25 juntamente as curvas dúctil e frágil. Na curva frágil observa-se um material de comportamento puramente frágil e extremamente sensível ao entalhe. No gráfico, o eixo horizontal é a relação entre diâmetro do furo D e largura W do corpo de prova, o eixo vertical é a relação da força de ruptura das placas com entalhe central e sem entalhe. Observa-se que após a relação D/W de 0,4 o material tem um comportamento puramente dúctil pelo DEM e os entalhes maiores de 20 mm não têm influência como concentradores de tensão no corpo de prova. A figura 26 mostra modelos de corpo de prova retangulares fraturados com entalhes de 10mm, 20mm e 30mm.

Figura 25 - Curva sensibilidade 1F



Fonte: Autor.

Figura 26 - Corpos de prova computacionais



Fonte: Autor.

#### 6.4. Fragilização

Ao elevar o valor de  $R_f$  e consequentemente adicionar maiores níveis de defeitos e discontinuidades ao material, foram realizados os mesmos ensaios anteriores para obtenção de curva de sensibilidade ao entalhe. Nota-se que as mesmas sementes de

campo aleatório foram utilizadas para todos os ensaios. As tabelas 14 e 15 apresentam os valores médios das simulações para os dois valores de  $R_f$  testados no DEM.

Tabela 14 - Média de valores para  $R_f = 10,0$

Entalhe [mm]	D/W	Força[N]
Sem entalhe	0	10,78
5	0,1	6,86
10	0,2	6,44
15	0,3	5,89
20	0,4	5,24
25	0,5	4,56
30	0,6	3,84

Fonte: Autor.

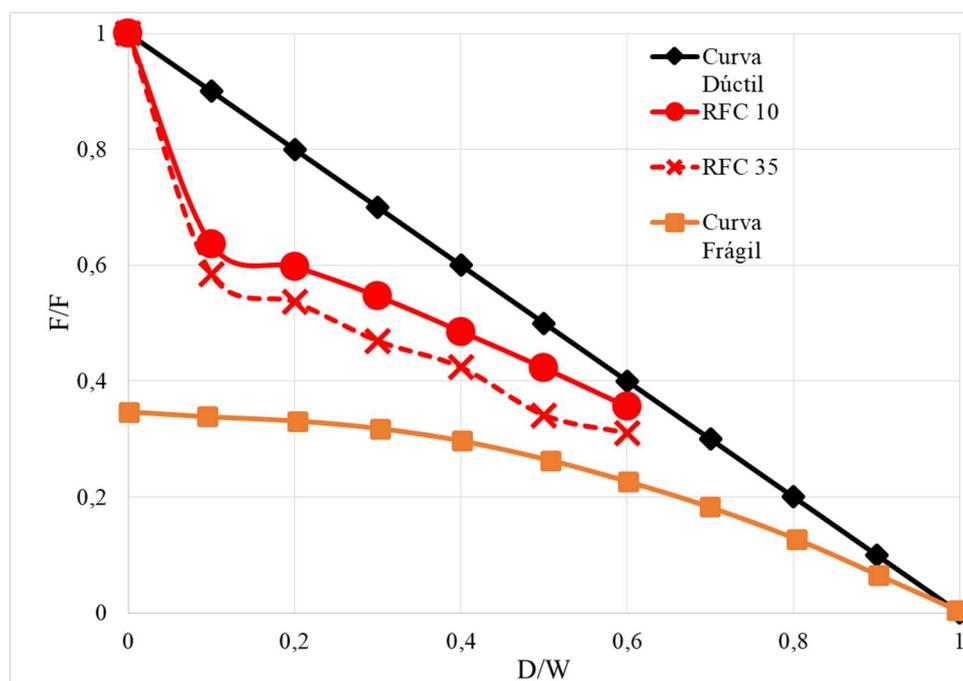
Tabela 15 - Média de valores para  $R_f = 35,8$

Entalhe [mm]	D/W	Força[N]
Sem entalhe	0	23,08
5	0,1	13,45
10	0,2	12,34
15	0,3	10,79
20	0,4	9,75
25	0,5	7,84
30	0,6	7,15

Fonte: Autor.

As curvas de sensibilidade ao entalhe para os dois cenários de fragilização podem ser observadas na Figura 27. A curva com traço contínuo e marcador circular representa o comportamento do material em uma situação com fator de falha igual a  $10,0m^{-1/2}$ , enquanto a curva em tracejada com marcador em “X” corresponde ao  $R_f$  com valor de  $35,8m^{-1/2}$ .

Figura 27 - Curvas de sensibilidade para material fragilizado



Fonte: Autor.

É possível observar que em ambas as situações, a região compreendida entre  $D/W$  0 e 0,1 apresenta o aumento mais elevado referente à fragilização do material. Dessa forma, pode-se classificar como região crítica de sensibilidade ao entalhe. Nessa zona, a variação com que o material diminui sua resistência pode ser aproximada pela inclinação da reta que liga os pontos (0;1) e (0,1; 0,6). A inclinação da reta indica que nesse intervalo de  $D/W$  cada incremento de 1mm no entalhe resulta em diminuição de 8% da resistência do material. Comparando, ao aproximar os pontos (0,2;0,54) e (0,3;0,47), região de  $D/W$  entre 0,2 e 0,3, da curva de  $R_f 35,8m^{-1/2}$ , a inclinação da reta indica que nesse intervalo de  $D/W$  o material diminui sua resistência em apenas 1,4% a cada incremento de 1mm no entalhe, diferente dos 8% da região crítica.

Os comparativos entre os pontos das duas curvas fragilizadas com o material em estado normal estão nas tabelas 16 e 17, para os valores de  $R_f 10,0m^{-1/2}$  e  $35,8m^{-1/2}$  respectivamente. A figura 28 mostra modelos fraturados com entalhes de 10mm, 20mm e 30mm para  $R_f$  de  $10,0m^{-1/2}$ . Na figura 29 é possível observar o crescimento de trincas nas proximidades do concentrador de tensão de 15mm na situação com  $R_f$  de  $35,8m^{-1/2}$ .

Tabela 16 - Variação de resistência para  $R_f$  de  $10,0 \text{ m}^{-1/2}$ 

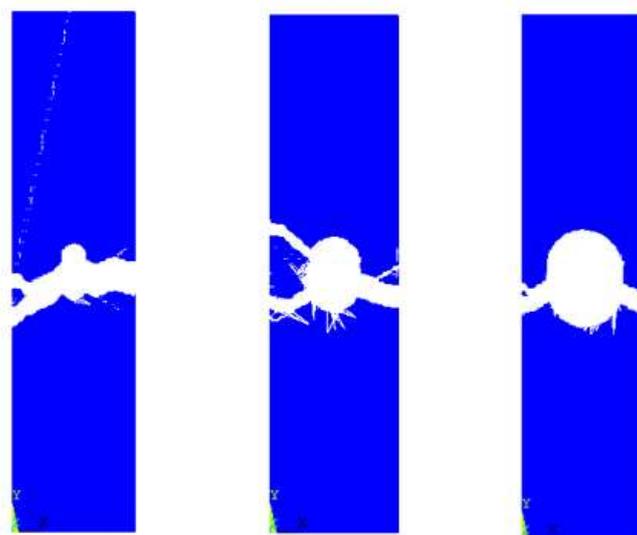
D/W	F/F		Variação[%]
	1F	$10,0 \text{ m}^{-1/2}$	
0,1	0,84	0,64	31,45
0,2	0,76	0,60	27,50
0,3	0,67	0,55	23,01
0,4	0,59	0,49	21,02
0,5	0,50	0,42	17,52
0,6	0,40	0,36	12,40

Fonte: Autor.

Tabela 17 - Variação de resistência para  $R_f$  de  $35,8 \text{ m}^{-1/2}$ 

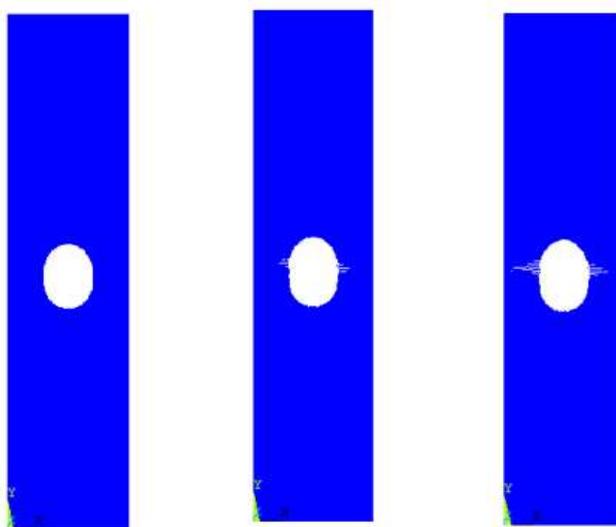
D/W	F/F		Variação[%]
	1F	$35,8 \text{ m}^{-1/2}$	
0,1	0,84	0,58	42,91
0,2	0,76	0,54	41,95
0,3	0,67	0,47	43,26
0,4	0,59	0,42	38,65
0,5	0,50	0,34	45,66
0,6	0,40	0,31	29,00

Fonte: Autor

Figura 28 - Corpos de prova para  $R_f$  de  $10,0 \text{ m}^{-1/2}$ 

Fonte: Autor.

Figura 29 - Crescimento de trincas



Fonte: Autor.

## 7. CONCLUSÕES

Este trabalho verificou a utilização do DEM para obtenção de curva de sensibilidade ao entalhe para dois materiais poliméricos de comportamento quase frágil, Necuron 651 e EPS 1F. Partindo de resultados obtidos na literatura foi possível calibrar ambos os modelos, com base nessas informações foram determinadas as seguintes conclusões:

- O Necuron apresentou sensibilidade ao entalhe até a relação  $D/W$  0,4. Após, o modelo se torna insensível ao entalhe (perdendo efeito do concentrador de tensão);
- O Isopor 1F apresentou comportamento praticamente insensível ao entalhe em toda variação de  $D/W$
- A fragilização do material, aumento de defeitos internos, altera o comportamento do material e gera zona crítica de sensibilidade ao entalhe na região entre 0 e 0,1  $D/W$ ;

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para estudos em trabalhos futuros, tem-se:

- Avaliar a influência do  $CV_{Gfr}$  na calibração de materiais e obtenção de curvas de sensibilidade ao entalhe;
- Avaliar o fator de falha na etapa de calibração do modelo em EPS 1F;
- Verificar a existência de zonas críticas em outros materiais poliméricos;
- Avaliar o comportamento do material EPS 1F na faixa de  $D/W$  entre 0 e 0,1 para outros exemplos de concentradores de tensão pelo DEM.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

CUNHA, Andressa R. Aplicação da peridinâmica e da teoria das distâncias críticas no estudo da fratura de materiais. Orientador: Leandro Ferreira Friedrich. 2021. 67p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de mecânica) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia de mecânica, Alegrete, 2021.

EPS. In: **EPS**. [S. l.]: EPS Brasil, 2020. Disponível em: <https://epsbrasil.ind.br/eps-2/>. Acesso em: 6 nov. 2023.

GRAPHITE TECHNOLOGIES (Portugal). Necuron 651. In: NECURON 07. Marinha Grande: [s. n.], 2018. p. 2-22. Disponível em: [https://fab-lab.uevora.pt/uploads/machine\\_file/54/catálogo\\_Necuron.pdf](https://fab-lab.uevora.pt/uploads/machine_file/54/catálogo_Necuron.pdf). Acesso em: 8 nov. 2023.

GRIFFITH, A. **Phenomena of rupture and now in solids**, Phil. Trans. R. Soc. Lond, 1921.

GRUPO REFRAZIL REFRAZÁRIOS. **Forro 1F de Poliestireno Expandido: EPS | Isopor®**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.refrazil.com.br/produto/forro-1f-de-poliestireno-expandido-eps-isopor/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

KOSTESKI, L. Aplicação do método dos elementos discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas. 2012. 6-59 f. Tese (Doutorado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MARCHEZAN, Renan Rodrigues. Análise da sensibilidade ao entalhe do poliuretano necuron de diferentes densidades utilizando peridinâmica. Orientador: Leandro Ferreira Friedrich. 2023. 54p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Mecânica) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia de Mecânica, Alegrete, 2023.

NEGRU, R. **Application of TCD for brittle fracture of notched PUR materials**. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, v. 80, p. 87-95, 2015.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas**: uma abordagem teórica, 4 ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall. P, p. 343-350, 2013.

PUGLIA, Vicente B.; KOSTESKI, Luis; ITURRIOZ, Ignacio. **Simulation Using Acoustic Emission on Quasi-Fragile Materials Employing the Method of Discrete Elements Formed by Bars**. Mecánica Computacional, v. 33, n. 9, p. 635-635, 2014.

RIERA, D.; ROCHA, M. **A note on velocity of crack propagation in tensile fracture**. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas. v. XII/3, p. 217-240, 1991.

SOARES, F. S.; ITURRIOZ, I. **Simulação da propagação subcrítica de fissuras em materiais quase frágeis aplicando uma versão do método de elementos discretos formados por barras**. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, v. 32, n. 3, p. 153-162, 2016.