

## AVALIAÇÃO DA FRATURA QUASE-FRÁGIL EM PLACAS COM FUROS DE ESPUMAS SEMI-RÍGIDAS DE POLIESTIRENO USANDO A PERIDINÂMICA

Andressa R. Cunha, andressacunha.aluno@unipampa.edu.br<sup>1</sup>

Leandro F. Friedrich, leandrofriedrich@unipampa.edu.br<sup>1</sup>

Luiz E. Kostascki - Programa de Pós-graduação em Engenharia, luiskostascki@unipampa.edu.br<sup>1</sup>

Angélica B. Colpo - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, angelicacolpo@gmail.com<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pampa, Av. Tiaraju, 810 - Ibirapuitã, Alegrete - RS, 97546-550

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Sarmento Leite, 425 - Farrroupilha, Porto Alegre - RS, 90050-170

**Resumo.** O projeto de novos componentes e estruturas com a presença de entalhes, rasgos e orifícios é cada vez mais comum e por isso os concentradores de tensões merecem revisão constante para adequar os novos projetos de engenharia com novos materiais e estruturas de diferentes formas. A presença dos concentradores, além de reduzir a seção resistente da estrutura, também maximiza o campo de tensões ao seu redor, porém, esse comportamento é diferente para materiais frágeis e dúcteis. Uma nova classificação dos materiais denominados quase-frágeis, tem características peculiares e englobam muitos materiais de engenharia como concreto, compósitos entre outros. Neste trabalho analisou-se a sensibilidade ao entalhe e a fratura quase-frágil de corpos de prova de poliestireno expandido (EPS) utilizando a Peridinâmica (PD). O material da PD foi calibrado a partir de dados experimentais mostrando bons resultados no comportamento tensão-deformação e nos padrões de fratura. Posteriormente placas retangulares com orifício circular com diâmetros de 5, 10, 15, 20 e 25 mm foram simuladas. A curva de sensibilidade foi traçada e apresentou comportamento dentro da região esperada para um material quase-frágil, porém com proximidade ao comportamento dúctil. O modelo PD mostrou-se capaz de representar o efeito de concentradores e o comportamento de materiais quase-frágeis.

**Palavras chave:** Peridinâmica. Materiais quase-frágeis. Concentradores de Tensões. Sensibilidade ao entalhe.

**Abstract.** The design of new components and structures with the presence of notches, grooves and holes is increasingly common and that is why stress concentrators deserve constant review to adapt the new engineering projects with new materials and structures of different shapes. The presence of the concentrators reduces the resistant section of the structure in addition to maximizing the stress field around it, however this behavior is different for fragile and ductile materials. A recent classification of materials called quasi-brittle, has peculiar characteristics and includes many engineering materials such as concrete, composites and others. In this work, notch sensitivity and quasi-brittle fracture of expanded polystyrene (EPS) specimens were analyzed using Peridynamics (PD). The PD material was calibrated from experimental data showing good results in the stress x strain behavior and in the fracture patterns. Subsequently, rectangular plates with circular holes with diameters of 5, 10, 15, 20 and 25 mm were simulated. The sensitivity curve was drawn and presented a behavior within the expected region for an quasi-brittle material, but with proximity to the ductile behavior. The PD model was able to represent the effect of concentrators and the behavior of quasi-brittle materials.

**Keywords:** Peridynamics, quasi-brittle materials, Stress Concentration, Notch Sensitivity.

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo (Nijs *et al.*, 2020), no projeto de estruturas e máquinas, torna-se praticamente impossível não inserir alguma mudança geométrica, como por exemplo, entalhes, furos, ressaltos e rasgos. A presença dessas descontinuidades geram os chamados, concentradores de tensões. Como o próprio nome sugere, são intensificadores de tensões em determinada região, que alteram significativamente o comportamento do material e podem alterar os mecanismos de dano ativos.

Para Budynas and Nisbett (2009), algumas soluções para o problema como os fatores de concentração de tensão  $k_t$ , que determinam o aumento na tensão para posterior comparação com a tensão referência para projeto, podem ser encontrados em ábacos e alguns testes experimentais estão disponíveis na literatura. Porém, para uma grande variedade de materiais esses fatores de concentração não podem ser aplicados diretamente, pois, é necessário primeiramente entender a sensibilidade do material à presença de entalhes. A capacidade do material deformar plasticamente ou acumular dano próximo ao entalhe é um fator vital que determina a performance do mesmo na presença de descontinuidades. Além de ser um importante parâmetro de projeto, a sensibilidade ao entalhe pode ser usada como uma medida de tolerância ao dano, bem como tenacidade.

Em materiais quase-frágeis, como concreto, compósitos reforçados, gelo marinho entre outros a distribuição de dano

é uma característica marcante em estruturas construídas a partir desses materiais. Assim, a presença de concentradores pode ser um fator desafiador na fase de projeto. A heterogeneidade é outro ponto a ser levado em consideração e por isso métodos numéricos tradicionais como o Método dos Elementos Finitos (MEF) não podem ser aplicados diretamente. Um método que tem mostrado boa resposta na simulação desse tipo de material é o Método dos Elementos Discretos (MED). No MED o corpo é discretizado em pequenos volumes que interagem entre si dentro de uma determinada distância através de uma lei constitutiva. Uma forma particular de MED foi desenvolvida por Silling (2000), denominada Peridinâmica (PD), permite o estudo de propagação de trincas e outras descontinuidades de forma mais natural que a empregada pelo MEF. Por se tratar de uma teoria relativamente recente, é importante que se estude a sua aplicação nas mais diversas situações e envolvendo materiais distintos.

Neste trabalho utiliza-se como material quase-frágil o poliestireno expandido (EPS). Um material celular com diversas aplicações, que variam também de acordo com a densidade com a qual é fabricado, essa, variando entre 10 kg/m<sup>3</sup> e 90 kg/m<sup>3</sup>. Para (Silva *et al.*, 2020), EPS de alta densidade são utilizados em construções de rodovias, pontes, barragens, estádios, entre outros, além de itens de segurança como capacetes. Já os EPS de baixa densidade possuem aplicação principalmente em isolamento térmico e no setor de embalagens. O processo de fabricação desses materiais podem induzir a presença de defeitos em seu interior como vazios e micro trincas, o que pode afetar o comportamento global do material principalmente na presença de concentradores de tensão que maximizam o problema. Portanto, a avaliação de como os materiais se comportam na presença desses concentradores é importante para o design de novos componentes. Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a fratura e o efeito da concentração de tensões em corpos de prova de poliestireno expandido utilizando a Peridinâmica.

## 2. SENSIBILIDADE AO ENTALHE

Para Alderliesten (2017), no projeto de componentes e estruturas, a sensibilidade ao entalhe dos materiais tem sido um parâmetro chave no projeto contra fadiga e falhas, principalmente devido aos materiais que estão sendo desenvolvidos atualmente como por exemplo, compósitos e polímeros. A partir disso, é dada a importância do estudo desse fator considerando diferentes casos.

Segundo (Nijs *et al.*, 2020) concentradores de tensões alteram de forma significativa a distribuição de tensões em certos materiais, inclusive alterando os mecanismos de dano presentes. Define-se a sensibilidade ao entalhe como uma forma de mensurar o quão afetado por concentradores é o material. Para (Alderliesten, 2017), materiais dúcteis como o alumínio e o aço possuem pouca sensibilidade ao entalhe, devido a uma redistribuição de tensões que ocorre na região do concentrador ocasionada pela plasticidade do material. Os materiais dúcteis ideais não possuem sensibilidade, portanto, a tensão varia de acordo com a área líquida da seção transversal.

As Equações (1) e (2) apresentam, respectivamente, as equações para tensão líquida do corpo de prova, onde se considera o diâmetro do furo e a tensão bruta, onde não se considera o diâmetro do furo no cálculo da área. A constante  $W$  representa a largura do corpo de prova,  $D$  o diâmetro do furo,  $F$  a força aplicada e  $t$  a espessura.

$$\sigma_0 = \frac{F}{W.t} \quad (1)$$

$$\sigma_N = \frac{F}{(W - D)t} \quad (2)$$

Segundo Alderliesten (2017), por outro lado, em materiais frágeis, uma alta concentração de tensão ocorre perto do furo e reduz gradualmente em direção às bordas. Para a falha frágil, a resistência nominal depende do limite elástico de acordo com o fator de concentração de tensão. Como resultado, a falha frágil é sensível a entalhes. Na Fig. 1 podem ser visualizadas as duas equações que determinam a sensibilidade ou insensibilidade ao entalhe. A Fig. 1 ilustra a razão entre tensão considerando a área líquida (com furo) e a tensão última versus a razão entre o diâmetro ( $D$ ) e a largura ( $W$ ) do corpo de prova. Segundo (Silva *et al.*, 2020), esse critério teórico utilizado para a avaliação da sensibilidade denomina-se critério da máxima tensão (do inglês Maximum Stress Criterion - MSC).

Na falha quase-frágil, também presente na Fig. 1 a quantidade de dano acumulado ao redor do concentrador e o tamanho da estrutura governam uma transição entre o comportamento dúctil-frágil, típico de materiais quase-frágeis.

## 3. PERIDINÂMICA

O modelo Peridinâmico original foi proposto por (Silling, 2000), sendo este uma reformulação da mecânica do contínuo, uma vez que o autor substituiu as derivadas das equações clássicas por integrais, fazendo com que o modelo continue definido na presença de descontinuidades, como as trincas por exemplo. Ou seja, utilizou o modelo para unificar o contínuo e descontínuo.

Para Liu (2012), a PD classifica-se como teoria não-local, sendo intermediária entre as teorias locais, onde há interação somente com os vizinhos imediatos e a dinâmica molecular, que estuda interações atômicas e moleculares. Assim, a

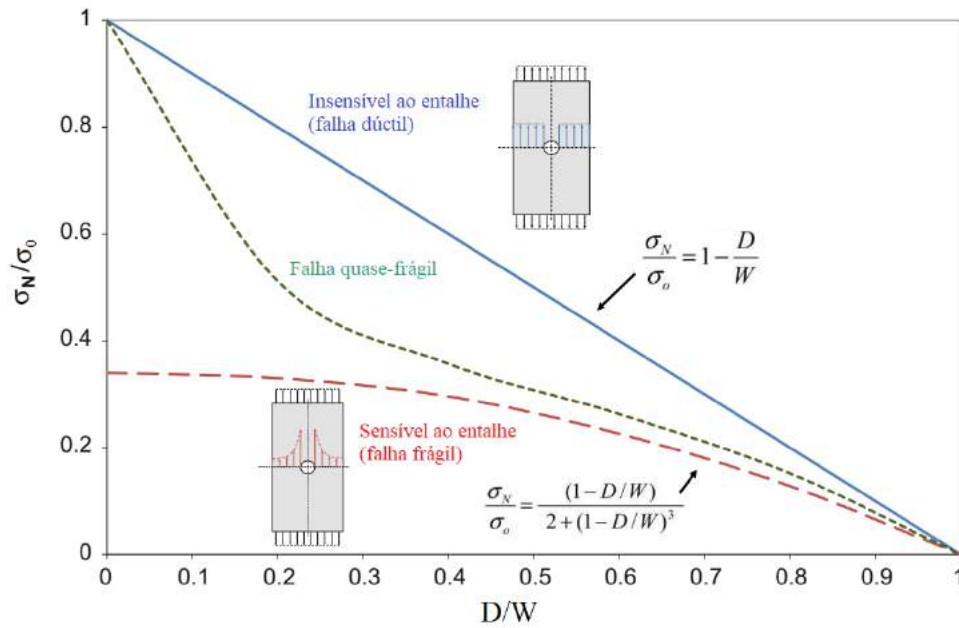


Figura 1. Gráfico tensão retida devido a concentrador x razão entre diâmetro D e largura W. Adaptado de Alderliesten (2017)

Peridinâmica é vista como uma forma mais realista de simular a propagação de trincas. Embora a dinâmica molecular supere este aspecto, atualmente não há como simular estruturas em escalas reais utilizando esse modelo.

Após a formulação original, denominada *bond-based*, houve uma segunda formulação denominada *state-based*, tendo em vista que a original possui certas limitações, como o coeficiente de Poisson fixo em 0,25. Porém, para a proposta deste trabalho, o modelo original atende completamente as necessidades e por isso foi utilizado.

Segundo (Cabral *et al.*, 2019), a Equação (3) pode ser vista como um balanço de momento linear na teoria Peridinâmica, onde verifica-se o valor da aceleração ( $\ddot{u}$ ) de um ponto material para qualquer instante de tempo. Onde  $\rho$  representa a densidade,  $b$  as forças externas atuando no ponto e  $dV_{x'}$  o volume dos pontos materiais. Nota-se que devido à integração, todos os pontos na família de  $x$  são considerados.

$$\rho \ddot{u}(x_k, t) = \int_{H_x} f(\eta, \xi) dX_{x'} + b(x, t) \quad (3)$$

A discretização do sólido se dá através da divisão do corpo em pequenos elementos, chamados pontos materiais que possuem interação baseada em uma lei constitutiva e por isso pode ser classificada como uma particularização do método de elementos discretos (MED).

A Fig.2(a) apresenta a interação de um elemento denominado  $x$  com seu vizinho  $x'$ . Por se tratar de um modelo não local, considera-se que o ponto  $x$  interage com todos os pontos materiais que estejam dentro do limite determinado por  $\delta_o$ , também chamado horizonte peridinâmico. Para Silling (2000), os pontos materiais dentro deste limite pertencem a família de  $x$  e essa interação ocorre por meio de uma força  $f$ , onde a forma da função pode ser vista na Fig. 2(b) e pela Eq. (4). Nessa equação  $y' - y$  representa a posição relativa entre os pontos materiais após a deformação e  $c$  representa o micromódulo de elasticidade da ligação, descrito para modelos 2D através da Eq. (5) onde  $e$  é a espessura do corpo e  $E$  o módulo de elasticidade do material.

$$f(u' - u, x' - x) = cs \frac{y' - y}{|y' - y|} \quad (4)$$

$$c = \frac{48E}{5\pi\delta_o^3 e} \quad (5)$$

Além disso, a Eq. (4) também insere o parâmetro  $s$  denominado estiramento da ligação do inglês *stretch*. Este parâmetro escalar é definido pela Eq. (6) onde  $x$  representa a posição do ponto material na posição original.

$$s = \frac{|y' - y| - |x' - x|}{x' - x} \quad (6)$$

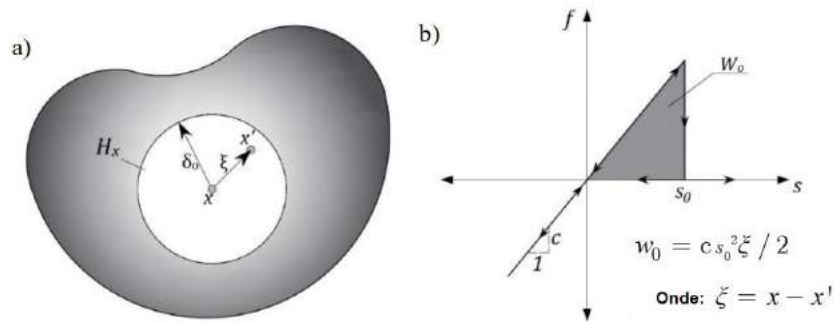


Figura 2. (a) Interação entre pontos materiais na Peridinâmica Cabral *et al.* (2019) (b) Lei constitutiva que define interação entre pontos materiais na Peridinâmica Cabral *et al.* (2019).

Em (Cabral *et al.*, 2019), o rompimento das interações entre pontos materiais ocorre quando  $s$  atinge o valor do estiramento crítico  $s_o$  dado pela Eq. (7) para o caso 2D, em que  $G_f$  é a energia específica de fratura do material.

$$s_o = \sqrt{\frac{5\pi G_f}{9E\delta_o}} \quad (7)$$

Cabral *et al.* (2019), desenvolveram uma lei constitutiva alternativa ao modelo uniaxial da Fig. 2(b), permitindo a simulação de materiais quase-frágeis. Na abordagem dos autores, o horizonte peridinâmico  $\delta_o$  é considerado uma propriedade do material, e desta forma, não varia conforme discretização. Assim, dependendo do tipo de material simulado pode resultar em valores significativamente grandes, que demandariam um custo computacional elevado. Para contornar esse problema, utilizaram um artifício denominado horizonte peridinâmico computacional  $\delta$ , através de uma equivalência entre as áreas abaixo do gráfico de ambas as leis, que representa a energia de fratura, ou seja, considerando  $\delta_o$  e  $\delta'$ , tornaram a lei mais flexível, permitindo a mudança do comportamento global do material. Em geral, o valor do horizonte computacional é dado por  $\delta' = 3,015dx$  onde  $dx$  é a distância entre pontos materiais.

A Figura 3(a) mostra a energia de dano agora inclusa no processo. A variável  $s_p$  é definida como o estiramento elástico máximo e  $s_r$  é o estiramento crítico. A relação entre  $s_p$  e  $s_r$  é dada pelo parâmetro  $K_r$  na Eq.(8). Esses parâmetros determinam a forma da lei bi linear e como é o comportamento da curva na macro escala.

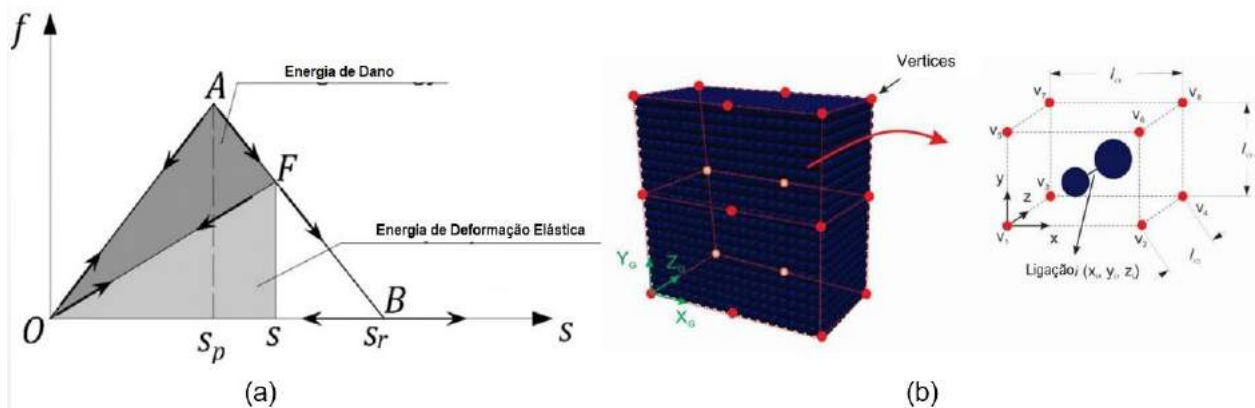


Figura 3. (a) Lei bi linear e as energia envolvidas durante o processo de carregamento Cabral *et al.* (2019); (b) Distribuição das propriedades mecânicas aleatórias no modelo peridinâmico Friedrich *et al.* (2019)

$$s_r = k_r s_p, k_r = \frac{s_o \delta_o}{s_p \delta'} \quad (8)$$

Na PD a aleatoriedade das propriedades mecânicas do material quase-frágil é inserida através de um campo aleatório correlacionado. A metodologia consiste em inserir prismas que englobam o modelo PD, onde cada prisma possui 8 polos, espaçados por um comprimento de correlação  $l_{corr}$  que pode variar nas três direções, ver Figura 3(b). Através de uma distribuição Weibull, são determinados valores distintos  $G_f$  para cada polo. O valor de  $G_f$  para cada ligação PD é determinado a partir de uma interpolação tridimensional como mostra a Eq. (9) que leva em consideração o comprimento de correlação  $l_{corr}$ , bem como a coordenada do baricentro da ligação  $(x_i, y_i, z_i)$  em relação a coordenada de referência.

Mais informações sobre o campo aleatório podem ser encontradas nos trabalhos de Friedrich *et al.* (2019) e Puglia *et al.* (2019)

$$\varphi_{\nu}(x_i, y_i, z_i) = V_1 + \frac{V_2 + V_1}{l_{cx}} x_i + \frac{V_3 - V_1}{l_{cy}} y_i + \frac{V_5 - V_1}{l_{cz}} z_i + \frac{V_4 - V_3 - V_2 - V_1}{l_{cx} l_{cy}} x_i y_i + \frac{V_6 - V_5 - V_3 + V_1}{l_{cx} l_{cz}} x_i z_i + \frac{V_7 - V_5 - V_3 + V_1}{l_{cy} l_{cz}} y_i z_i + \frac{V_8 - V_7 - V_6 + V_5 - V_4 + V_3 + V_2 - V_1}{l_{cx} l_{cy} l_{cz}} x_i y_i z_i \quad (9)$$

#### 4. METODOLOGIA

Neste trabalho o material quase-frágil estudado foi a espuma de poliestireno expandido que possui diversas aplicações como mostrado em Silva *et al.* (2020). Como referência para a calibração do material foram utilizados os resultados experimentais de COLPO (2016). A autora caracterizou e simulou de forma experimental a fratura de poliestireno expandido classes 1F, 5F e 7F, que possuem diferentes densidades. Este trabalho focou-se na análise apenas da Classe 1F.

O corpo de prova apresentado na Fig. 4, utilizado na calibração do modelo 2D da PD é baseado na norma ASTM D638-10 que regulamenta os ensaios a tração para investigação de propriedades de materiais poliméricos. Assim como no experimental, 5 repetições foram realizadas para o modelo da amostra, de forma a garantir resultados estatisticamente válidos.

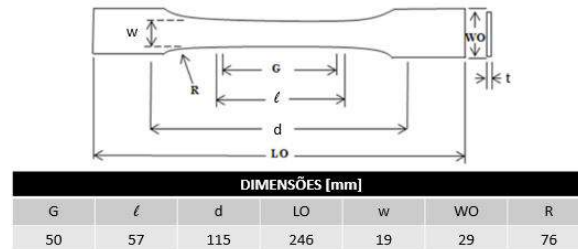


Figura 4. Dimensões do corpo de prova utilizado para calibração no modelo PD. Adaptado de COLPO (2016)

Após a calibração, placas com diferentes tamanhos de furos foram simuladas e o efeito de sensibilidade ao entalhe foi analisado. A Fig. 5 ilustra as dimensões de comprimento  $L$  e largura  $W$  utilizadas para as placas planas de referência bem como para as placas contendo concentradores. A Tab. 1 mostra as dimensões dos orifícios analisados bem como a razão com a largura da placa. Neste trabalho, foram realizadas 4 simulações considerando diferentes campos aleatórios.

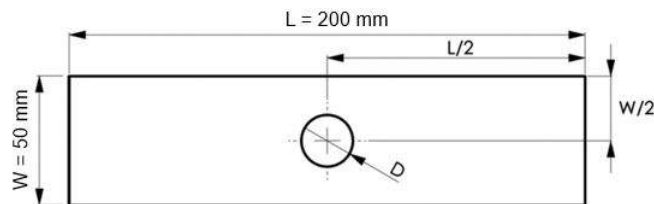


Figura 5. Placa plana com suas respectivas dimensões de comprimento e largura.

Tabela 1. Diâmetros dos concentradores e a relação com a largura da placa.

Concentradores de Tensões					
D [mm]	5	10	15	20	25
D/W	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

#### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 mostra os parâmetros da simulação bem como as propriedades mecânicas utilizadas na calibração do modelo PD obtidas com os dados experientais de COLPO (2016). A Fig. 6 mostra o comparativo das curvas experimentais com as obtidas através das simulações na PD. Nota-se completa aderência dos resultados da PD com todas as curvas dentro do intervalo experimental. É possível também observar o acúmulo de dano e perda da rigidez inicial das amostras e por fim uma ruptura abrupta, caracterizando o comportamento quase-frágil do material.

Tabela 2. Propriedades do material e parâmetros da PD.

Propriedades do Material e parâmetros da Peridinâmica										
E [MPa]	$\nu$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$G_f$ [N/m]	$CV_{G_f}$ [%]	$l_{cor}$ [m]	$dx$ [m]	$s_p$	$K_r$	$\delta^*$ [m]	$\delta_o$ [m]
4,88	0,25	11,9	133,4	100	$dx/2$	0,0005	0,022	50	$3,015 * dx$	0,088

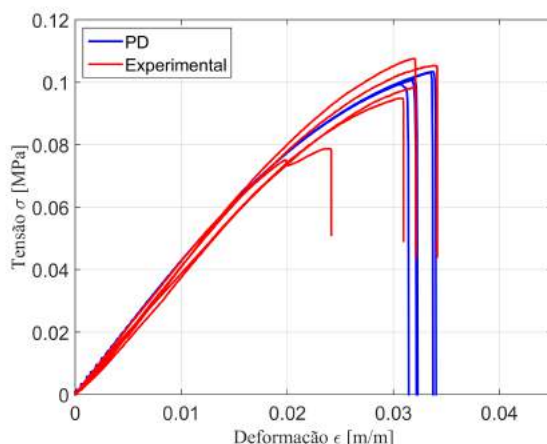


Figura 6. Curvas do modelo experimental e obtidas pelo modelo Peridinâmico

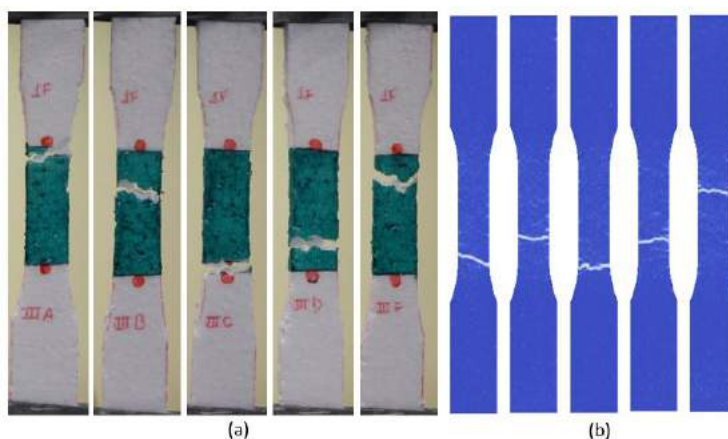


Figura 7. Comparativo entre padrões de ruptura experimentais e da PD

A Figura 7 mostra os padrões de ruptura experimental e da PD. É possível visualizar que ambos possuem padrões de propagação similares e na região da concentração das tensões, como esperado.

A partir da calibração do material a ser utilizado, as placas com os diferentes concentradores foram simuladas. A Fig. 8 mostra a comparação das curvas força-deslocamento para os diferentes diâmetros analisados. Um corpo de prova de cada diâmetro foi representado tanto na Fig. 8 quanto na Fig. 9. Um comparativo ilustrando as diferentes configurações de ruptura é mostrado na Fig. 9. Pelas Fig. 8 e Fig. 9 verifica-se novamente o comportamento quase-frágil das amostras.

Com as repetições das simulações, os valores médios das forças e o coeficiente de variação  $CV = \text{m\u00e9dia}/\text{desvio padr\u00e3o}$  para cada caso foram registrados e s\u00e3o apresentados na Tab. 3. Com esses valores \u00e9 poss\u00edvel graficar a sensibilidade ao entalhe do material a partir das Equa\u00e7\u00f5es (1) e (2). O resultado \u00e9 apresentado na Fig. 10. Observa-se que a espuma de poliestireno apresentou um comportamento pr\u00f3ximo da insensibilidade ao entalhe, esperada de materiais d\u00facteis. Conforme mencionado, os concentradores tamb\u00e9m podem influenciar na mudan\u00e7a do mecanismo de falha convencional. Uma distribui\u00e7\u00e3o do dano na regi\u00e3o pr\u00f3xima ao concentrador faz com que ocorra uma redistribui\u00e7\u00e3o das tens\u00f5es, impossibilitando um comportamento mais pr\u00f3ximo ao fr\u00e1gil e uma curva mais afastada da reta de insensibilidade.

Conforme Mostafavi *et al.* (2013), \u00e9 caracter\u00edstico dos materiais quase-fr\u00e1geis apresentarem uma zona de processo de fratura, onde microtrincas e outros tipos de mecanismos criam uma ponta da trinca fict\u00edcia e a concentra\u00e7\u00e3o da tens\u00e3o ocorre longe do raio do concentrador. Esse comportamento colabora com os resultados da sensibilidade ao entalhe registrados.

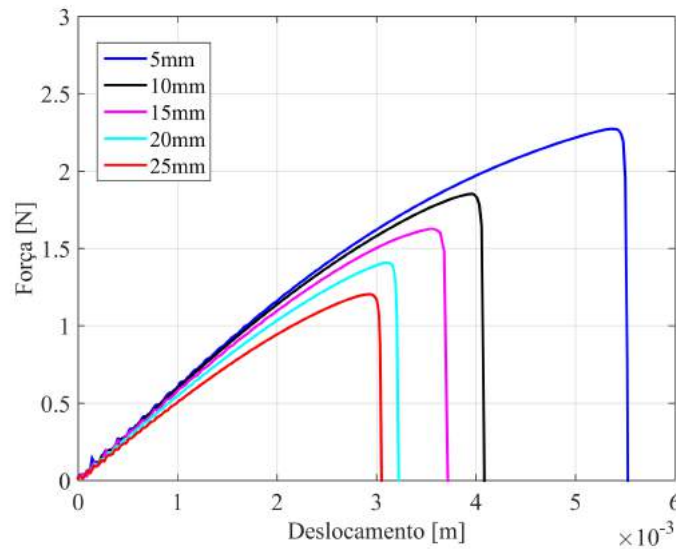


Figura 8. Comparativo gráfico Força x Deslocamento para os diferentes concentradores

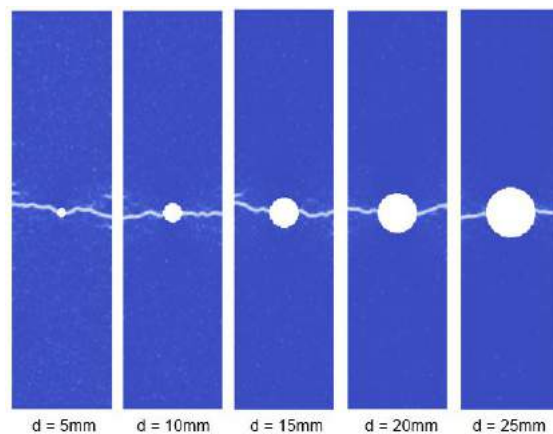


Figura 9. Modelos de fratura para os diferentes diâmetros de concentradores.

Tabela 3. Valores de Força Média e Coeficiente de Variação para cada diâmetro de furo e placa plana de referência

Diâmetro	5	10	15	20	25	Placa Plana
Força Média	2,2593	1,8931	1,6368	1,3911	1,1793	2,5495
CV Força [%]	1,6087	3,6543	1,8432	2,4106	1,4588	2,394

## 6. CONCLUSÕES

As simulações na Peridinâmica, capturaram de forma satisfatória o comportamento quase-frágil nas curvas tensão-deformação, além dos padrões de fratura se comparados com os obtidos de forma experimental. Nas simulações dos 4 corpos de prova para cada concentrador, não ocorreram variações significativas nos resultados, conforme apontado pelos coeficientes de variação. Nos padrões de fratura das placas com concentradores, evidencia-se que o modelo cumpre ao que se propõe, simular a propagação complexa de trincas em alguns casos com múltiplas trincas, comum para os materiais quase-frágeis e sua heterogeneidade.

A análise da sensibilidade ao entalhe através do critério da máxima tensão (MSC) mostrou-se coerente com o comportamento do material quase-frágil e suas características. O conceito de sensibilidade ao entalhe é utilizado em uma análise preliminar de projeto, no entanto, deve ser utilizado com cautela, pois, mesmo nesse caso onde o material apresentou comportamento próximo da insensibilidade, houve uma considerável redução na tensão de ruptura com a presença dos concentradores.

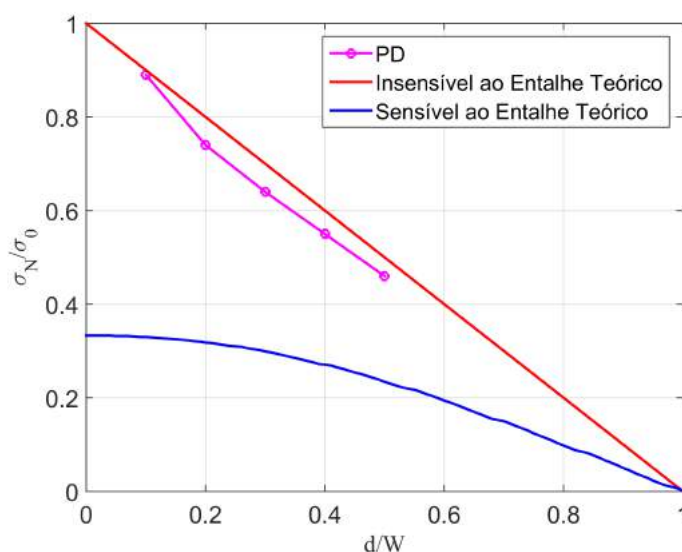


Figura 10. Sensibilidade ao entalhe do Poliestireno Expandido Classe 1F

## 7. REFERÊNCIAS

- Alderliesten, R., 2017. "Blunt notch strength". In *Fatigue and Fracture of Fibre Metal Laminates*, Springer, pp. 77–100.
- Budynas, R.G. and Nisbett, J.K., 2009. *Elementos de máquinas de Shigley*. AMGH Editora.
- Cabral, N.R., Invaldi, M.A., D'Ambra, R.B. and Iturrioz, I., 2019. "An alternative bilinear peridynamic model to simulate the damage process in quasi-brittle materials". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 216, p. 106494.
- COLPO, A.B., 2016. *Análise numérica e experimental da fratura em materiais quase-frágeis*. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete.
- Friedrich, L.F., Barcellos, M. and Iturrioz, I., 2019. "Random field generation of the material properties in a peridynamic model". Trabalho apresentado no 25º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica.
- Liu, W., 2012. "Discretized bond-based peridynamics for solid mechanics".
- Mostafavi, M., Baimpas, N., Tarleton, E., Atwood, R., McDonald, S., Korsunsky, A. and Marrow, T., 2013. "Three-dimensional crack observation, quantification and simulation in a quasi-brittle material". *Acta Materialia*, Vol. 61, No. 16, pp. 6276–6289.
- Nijs, A., Selezneva, M., Swolfs, Y., Hirano, N., Taketa, I., Karaki, T., Verpoest, I. and Gorbatikh, L., 2020. "Notch-sensitivity of hybrid carbon-fibre/self-reinforced polypropylene composites". *Composites Science and Technology*, Vol. 200, p. 108422.
- Puglia, V.B., Kostascki, L.E., Riera, J.D. and Iturrioz, I., 2019. "Random field generation of the material properties in the lattice discrete element method". *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 54, No. 4, pp. 236–246.
- Silling, S.A., 2000. "Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48, No. 1, pp. 175–209.
- Silva, F.G.d., Freire Júnior, R.C.S., Nobrega, S.H.S.d. and Dias, A.M.d.S., 2020. "Application of failure criteria in aeronautical sandwich structure composites with a central hole subjected to bending testing". *Materials Research*, Vol. 23, No. 2.

## 8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.