

IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS FORMADO POR BARRAS NO SOFTWARE ANSYS LS-DYNA

IMPLEMENTATION OF THE LATTICE DISCRETE ELEMENT METHOD IN THE ANSYS LS-DYNA SOFTWARE

Angélica B. Colpo^a, Ignacio Iturrioz^a e Leandro F. Friedrich^b

^aGrupo de Mecânica Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
angelicacolpo@gmail.com, ignacio.iturrioz@ufrgs.br, <http://www.ufrgs.br/promec>

^bGrupo de Mecânica Aplicada, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil
leandrofriedrich@unipampa.edu.br

Palavras-chave: LDEM, ANSYS LS-DYNA, Fratura.

Resumo. Os problemas resolvidos pela mecânica computacional apresentam-se de maneira cada vez mais complexa com diferentes geometrias e materiais. Pesquisas recentes mostram que a tendência para a solução desses problemas é a união entre diferentes métodos. A partir dessa visão este trabalho apresenta a implementação e avaliação do método dos elementos discretos formado por barras (do inglês LDEM) dentro do software ANSYS LS-DYNA, um solver para análise estrutural por elementos finitos através do método explícito. O LDEM permite a representação do surgimento e propagação de trincas de maneira natural, porém com uma demanda computacional elevada no caso de geometrias complexas, o que limita os tipos de modelos que podem ser analisados. Sendo assim, o objetivo desse trabalho é apresentar e avaliar a implementação do LDEM dentro do ANSYS LS-DYNA permitindo a representação da fratura de diferentes materiais sem restrições de geometria. Para análise dos resultados, comparações com testes experimentais de corpos de prova sob tração de poliestireno expandido serão utilizadas para a validação do modelo em três casos diferentes: Modelo no LDEM, modelo LDEM no ANSYS LS-DYNA (LDEM-DYNA) e o modelo misto MEF + LDEM-DYNA.

Keywords: LDEM, ANSYS LS-DYNA, Fracture.

Abstract. The problems solved by computational mechanics present themselves in an increasingly complex way with different geometries and materials. Recent research shows that the tendency to solve these problems is the union between different methods. Based on this view, this work presents the implementation and evaluation of the lattice discrete element method (LDEM) in ANSYS LS-DYNA software, a solver for finite element structural analysis using the explicit method. The LDEM allows the representation of the appearance and propagation of cracks in a natural way, but with a high computational demand in the case of complex geometries, which limits the types of models that can be analyzed. Therefore, the objective of this work is to present and evaluate the implementation of the LDEM within the LS-DYNA allowing the fracture representation of different materials without geometry limitation. For the analysis of the results, comparisons with experimental tests of specimens of expanded polystyrene under traction will be used to validate the model in three different cases: LDEM model, LDEM model in LS-DYNA (LDEM-DYNA) and the mixed model MEF + LDEM-DYNA.

1 INTRODUÇÃO

A mecânica computacional está sendo cada vez mais utilizada como ferramenta para simular a fratura e fragmentação de diferentes tipos de materiais e problemas que envolvem geometrias complexas. Metodologias numéricas clássicas como elementos finitos são utilizadas para a realização desse tipo de simulação. A maior limitação deste método se encontra na dificuldade em representar a transição entre um meio contínuo, hipótese onde o método se fundamenta, e o descontínuo, que se produz quando o material rompe ou fatura. A teoria clássica do contínuo assume que um ponto material interage somente com seus pontos adjacentes, isto adiciona a esta teoria a característica da localidade. Tal característica permite considerar que a interação entre os pontos é dada pelas leis de balanço, ou seja, na teoria do contínuo um ponto pode trocar massa, momento e energia somente com seu vizinho imediato. Porém esta suposição passa a ser questionável na medida em que se altera a escala de observação do problema. Em geral em escalas macro a suposição é aceitável, porém, na medida em que aproxima-se de escalas atômicas observa-se o surgimento de forças de longo alcance, evidenciando a interação do ponto em análise com pontos que não possuam contato direto. Até mesmo na escala macroespacial existem situações onde a suposição da interação local é questionada, por exemplo, quando pequenas características e microestruturas influenciam toda a macroestrutura (Madenci 2014).

A mecânica dos meios descontínuos sugere uma alternativa para a simulação deste tipo de problema. Neste caso, o material é representado como um arranjo de nós, onde se concentram as massas, que são vinculadas através de leis de interação não lineares. A aparição de descontinuidades quando a estrutura é excitada pode implicar na degradação destas interações, criando a descontinuidade no material de forma natural. Deste modo, é possível representar a fratura e fragmentação do material sem violar as hipóteses básicas da metodologia empregada. Como exemplo de método que utiliza essa teoria podemos citar o LDEM. Este método é apto para simular a fratura de sólidos, pois existe a possibilidade de realizar a representação dessa fratura desativando as barras que tenham atingido seus limites de resistência, o que resulta em uma operação bastante simples, sempre levando em conta o balanço das energias envolvidas no processo. Apesar dessa metodologia combinar a capacidade de contornar o problema da representação da fratura e ao mesmo tempo representar o comportamento do contínuo quando longe destes pontos críticos, esse método necessita de demanda computacional elevada no caso de geometrias complexas, o que limita os tipos de modelos que podem ser analisados.

Através da análise e comparação das metodologias que utilizam a mecânica dos meios contínuos ou descontínuos verifica-se que para a solução de problemas complexos faz-se necessária a união de métodos numéricos, sendo assim este trabalho apresenta a implementação e avaliação do LDEM dentro do software ANSYS LS-DYNA de elementos finitos.

2 METODOLOGIA

2.1 Método dos elementos discretos formado por barras

A formulação do método foi proposta por Nayfeh e Hefzy (1978), onde sugere-se a representação do meio contínuo através de um arranjo regular de barras de treliça. As massas são concentradas em nós e a rigidez das barras representa o comportamento da porção do contínuo que se deseja modelar. As equações que relacionam as propriedades dos elementos com as propriedades que definem o meio elástico isotrópico podem ser encontradas em

Kosteski (2012).

São estabelecidas assim, em cada um dos vértices, as correspondentes equações de equilíbrio, e integrando numericamente em relação ao tempo, é possível obter o comportamento do corpo sólido em um determinado período de tempo.

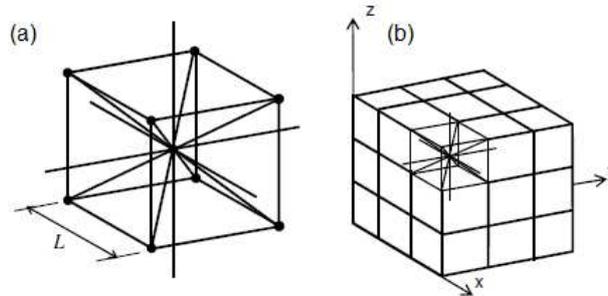


Figura 1: Discretização do LDEM: (a) Módulo cúbico básico, (b) Geração de um corpo prismático.

No LDEM cada nó tem três graus de liberdade, que correspondem aos deslocamentos nodais nas três direções das coordenadas ortogonais. A estratégia de discretização usa um módulo cúbico básico construído com vinte barras e nove nós, conforme mostra a [Figura 1](#). É importante salientar que para um coeficiente de Poisson $\nu = 0,25$ a equivalência com o contínuo isotrópico é completa. Por outro lado, surgem diferenças nos termos de cisalhamento para $\nu \neq 0,25$, esse fato foi explicado por [Kosteski \(2012\)](#). Essas discrepâncias são pequenas e podem ser negligenciadas no intervalo $0,20 \leq \nu \leq 0,30$.

A massa do corpo simulado é discretizada e colocada nos nós da treliça, sendo o valor da mesma, correspondente ao volume de influência de cada nó. O sistema de equações resultante da aplicação da segunda lei de Newton em cada nó é definido pela Eq.(1).

$$M_{ij}\ddot{x}_j + C_{ij}\dot{x}_j + F_i(t) - P_i(t) = 0. \quad (1)$$

Sendo \ddot{x}_j e \dot{x}_j os vetores velocidade e aceleração nodais, respectivamente. M_{ij} é a matriz de massa e C_{ij} a de amortecimento. Os vetores $F_i(t)$ e $P_i(t)$ contêm as forças internas e externas que atuam nas massas nodais. Um esquema explícito de diferenças finitas centrais pode ser usado para integrar a Eq.(1) no domínio do tempo. Como as coordenadas nodais são atualizadas a cada passo de tempo, grandes deslocamentos podem ser contabilizados de maneira natural e eficiente. Quando uma barra da treliça espacial rompe, é gerada uma área de fratura equivalente, isso faz com que energia de fratura seja liberada. Esta energia é dependente da área de fratura e da equação constitutiva do material.

2.1.1 Lei constitutiva para dano em materiais

[Riera \(1984\)](#) e [Riera e Rocha \(1991\)](#) seguiram a lei proposta por [Hillerborg \(1978\)](#) para materiais quase frágeis como relação constitutiva elementar, ampliando assim o LDEM para problemas de fratura frágil. A lei bilinear ou de Hillerborg, apresentada na [Figura 2a](#), permite capturar os efeitos irreversíveis da nucleação e propagação de fissuras, considerando uma redução na capacidade de carregamento do elemento.

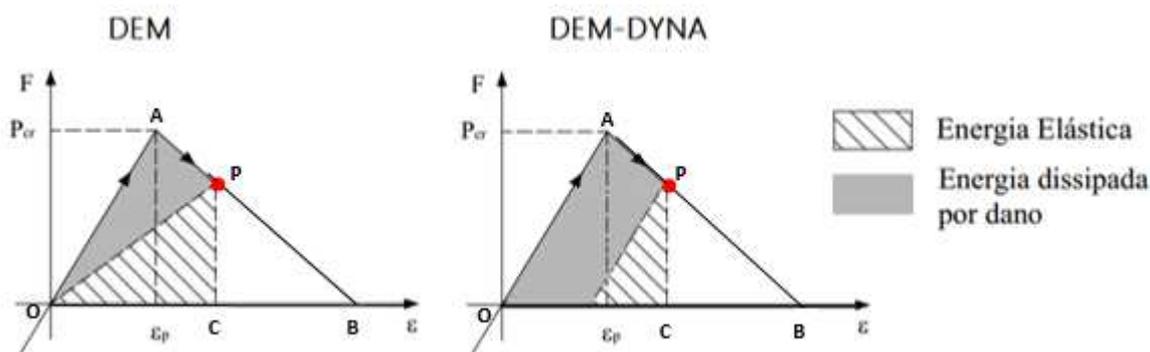


Figura 2: (a) Relação constitutiva elementar do LDEM: Modelo de Hillerborg, (b) Relação constitutiva elementar do LDEM-DYNA.

A relação entre a deformação de falha crítica (ε_p) e a energia específica de fratura (G_f) é dada em termos da Mecânica Elástica Linear da Fratura, conforme Eq.(2), onde d_{eq} é o tamanho do defeito intrínseco equivalente e E é o módulo de elasticidade do material.

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{G_f}{d_{eq}E}}. \quad (2)$$

A presente lei cumpre com a condição necessária de que a área sob a curva força-deformação (área do triângulo OAB na Figura 2a) seja a densidade de energia necessária para fraturar a área de influência do elemento. Sendo assim, para um ponto P na curva força-deformação, a área do triângulo OPC representa a densidade de energia elástica armazenada no elemento. No entanto, a área do triângulo OAP é a densidade de energia dissipada por fratura. Uma vez que a densidade de energia dissipada por dano é igual à energia de fratura, o elemento falha e perde sua capacidade de carga.

2.2 Implementação do LDEM no ANSYS LS-DYNA

O ANSYS LS-DYNA combina o programa de elementos finitos explícitos do LS-DYNA com os recursos de pré e pós-processamento do programa ANSYS. Este método é utilizado para resolver problemas em regime transiente envolvendo grandes não-linearidades, sejam elas geométricas, de contato, grandes deformações ou complexas relações constitutivas de materiais.

Na implementação do LDEM dentro do ANSYS LS-DYNA as barras são representadas através do elemento *Explicit Spring-Damper* (COMBI165) e as massas são representadas pelo elemento *Explicit 3-D Structural Mass* (MASS166), gerando assim o modelo denominado LDEM-DYNA. Como pode ser visto na Figura 2b a relação constitutiva elementar do LDEM-DYNA apresenta diferença da relação do LDEM no momento do descarregamento da barra, sendo que neste modelo o descarregamento ocorre paralelamente à curva de carga, ou seja, não retorna para a origem como ocorre no LDEM. Devido a este fato, como pode ser observado na Figura 2b no elemento do LDEM-DYNA pós produzir sobre a barra um certo nível de dano a densidade de energia elástica armazenada é menor que no LDEM e a densidade de energia dissipada por fratura é maior.

3 RESULTADOS E DISCUÇÕES

3.1 Ensaio de tração uniaxial de amostras de poliestireno expandido

Os ensaios foram realizados por Colpo (2016), de acordo com a norma ASTM D 638 – 10, a qual estabelece a metodologia para determinar as propriedades mecânicas de plásticos submetidos à tração. Na Tabela 1 são apresentadas as dimensões do corpo de prova (CP) que possui espessura $t=10$ mm. A excitação ao longo do CP foi aplicada por meio de um deslocamento com taxa de deformação controlada (0,061 mm/mm.s). Neste trabalho são utilizadas 3 repetições do ensaio do CP III.

	R [mm]	W [mm]	L [mm]	G [mm]	D [mm]	WO [mm]	LO [mm]
CP	76,00	19,00	57,00	50,00	115,00	29,00	246,00

Tabela 1: Dimensões do corpo de prova.

3.2 Simulações

Os dados de entrada utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 2. A forma de obtenção das propriedades do material podem ser encontradas em Colpo (2016). Todos os parâmetros de entrada são os mesmos nas simulações realizadas no LDEM, LDEM-DYNA e no modelo misto que é formado pelo LDEM-DYNA + Elementos Finitos (*Explicit 3-D Structural Solid SOLID164*). A Figura 3 apresenta os corpos de prova no LDEM-DYNA e no modelo misto.

Parâmetro	
E [MPa]	4,35
ρ [kg/m ³]	11,90
ν	0,25
G_f [N/m]	133,40
CVG_f [%]	40,00
L_c [m]	0,0055
d_{eq} [m]	0,066

Tabela 2: Parâmetros utilizados nas simulações.

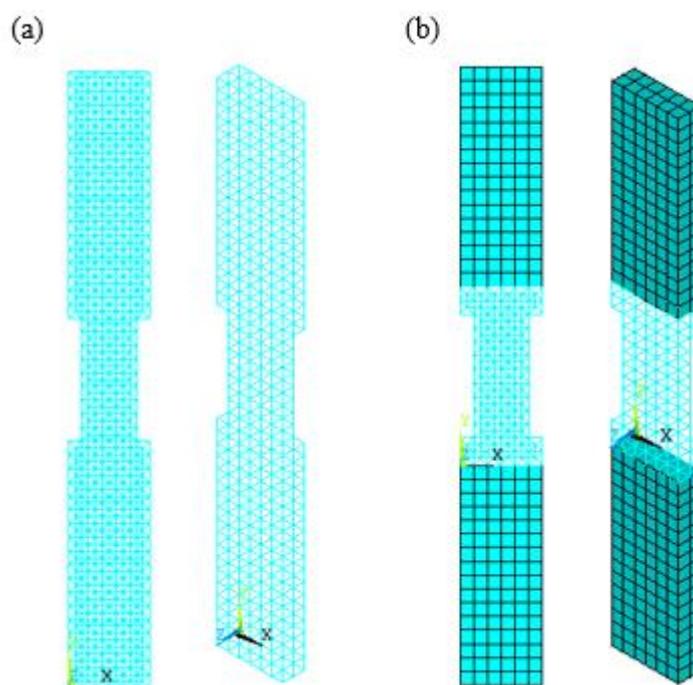


Figura 3: (a) Modelo LDEM-DYNA, (b) Modelo Misto.

3.3 Análise comparativa

A seguir são apresentadas as comparações das curvas força *versus* deslocamento dos ensaios de corpos de prova sob tração de poliestireno expandido com três modelos diferentes: Modelo no LDEM (Figura 4), modelo LDEM-DYNA (Figura 5) e o modelo Misto (Figura 6). Foram comparados três repetições dos ensaios com três repetições de cada simulação que foram obtidas modelando a aleatoriedade do material. O LDEM permite, com relativa facilidade, definir algumas propriedades do material como campos aleatórios com uma determinada distribuição de probabilidades. Tradicionalmente, considera-se como campo aleatório a energia específica de fratura adotando uma distribuição de probabilidades do Tipo Weibull, conforme explicado em Kostaski (2012).

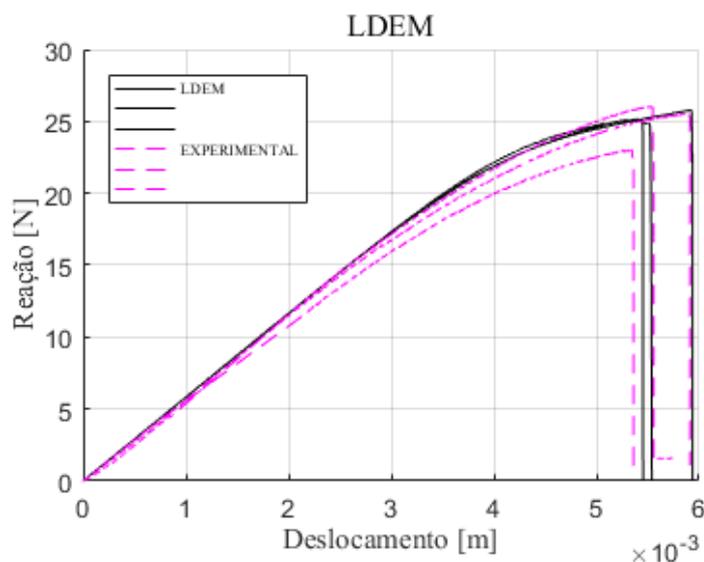


Figura 4: Força *versus* deslocamento: comparação entre experimental e LDEM.

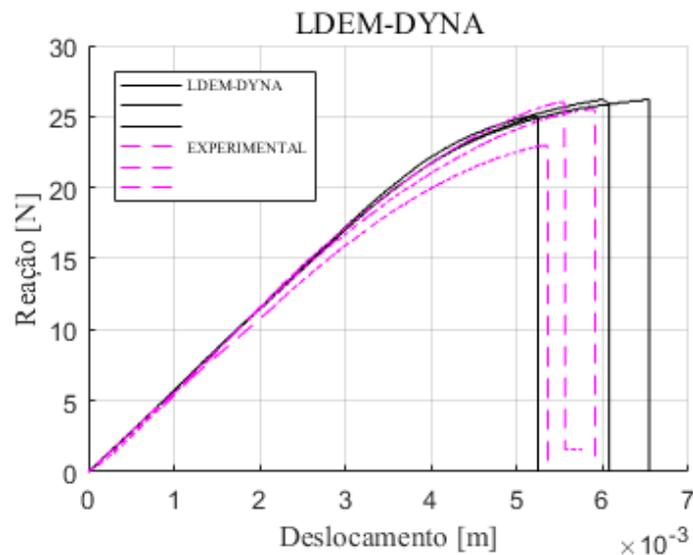


Figura 5: Força versus deslocamento: comparação entre experimental e LDEM-DYNA.

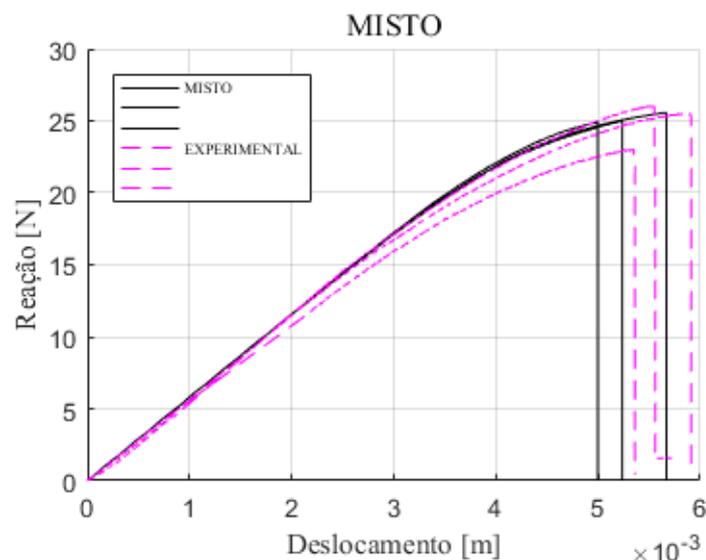


Figura 6: Força versus deslocamento: comparação entre experimental e modelo Misto.

Como pode ser visto na Figura 4, Figura 5 e Figura 6 as curvas obtidas com os ensaios e simulações apresentaram comportamentos semelhantes. Para realizar uma comparação mais detalhada é apresentada a Tabela 3, onde são mostrados a força de ruptura média (\bar{F}_{rup}), o deslocamento de ruptura médio (\bar{d}_{rup}) e o coeficiente de variação desses dois parâmetros (CV).

	\bar{F}_{rup}	$CV(\bar{F}_{rup})$	\bar{d}_{rup}	$CV(\bar{d}_{rup})$
Experimental	24,80	6,40	0,00560	5,06
LDEM	25,24	1,85	0,00561	4,86
LDEM-DYNA	25,73	2,49	0,00594	11,02
Misto	25,12	1,75	0,00531	6,15

Tabela 3: Resumo dos resultados.

A Figura 7 e Figura 8 apresentam a comparação entre o balanço energético dos três modelos simulados. É possível verificar que após certo nível de dano, a energia elástica acumulada no LDEM é maior que no LDEM-DYNA e a energia de dano é menor, devido a diferença na curva de descarga entre as relações constitutivas elementares dos dois modelos, conforme explicado na Figura 2. Já o modelo misto apresenta um valor intermediário de energia elástica devido ao fato de levar em conta a energia dos elementos discretos e dos elementos finitos que formam o modelo. Em relação a energia de dano o modelo misto capta a ruptura dos elementos discretos, porém sua curva apresenta certa discrepância em relação ao modelo no LDEM-DYNA devido ao fato de que alguns elementos que danificam no LDEM-DYNA estão fora da região simulada em elementos discretos no modelo misto, como pode ser verificado na Figura 9, onde os elementos em amarelo são os elementos que já sofreram algum dano e os em vermelho são as barras rompidas. Na Figura 9a, é possível ver que existem elementos em amarelo fora da região central.

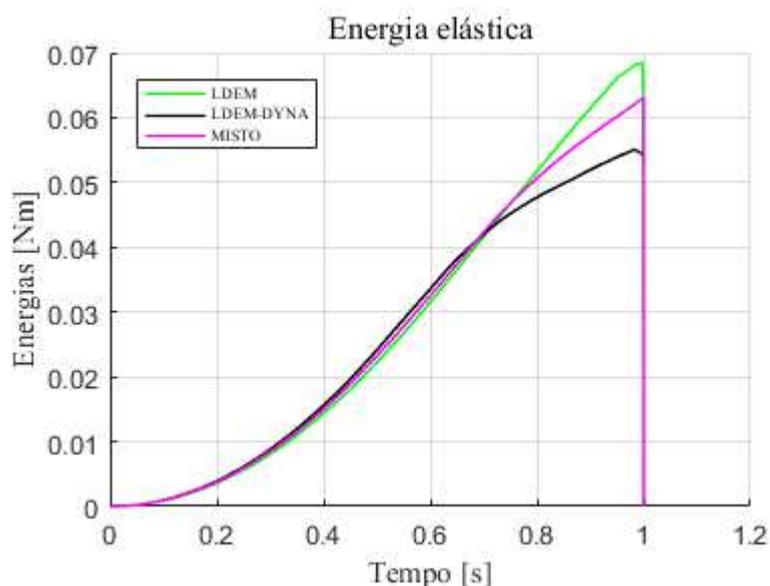


Figura 7: Energia elástica: comparação do balanço energético entre os três modelos simulados.

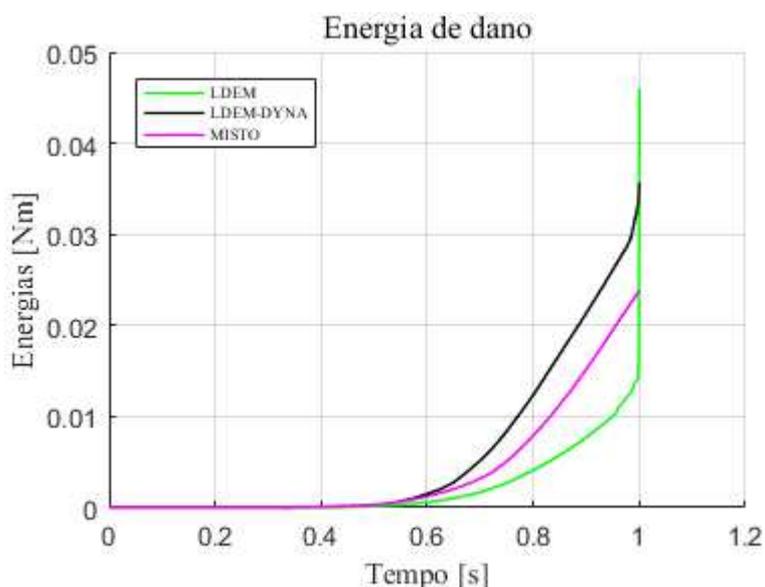


Figura 8: Energia de dano: comparação do balanço energético entre os três modelos simulados.

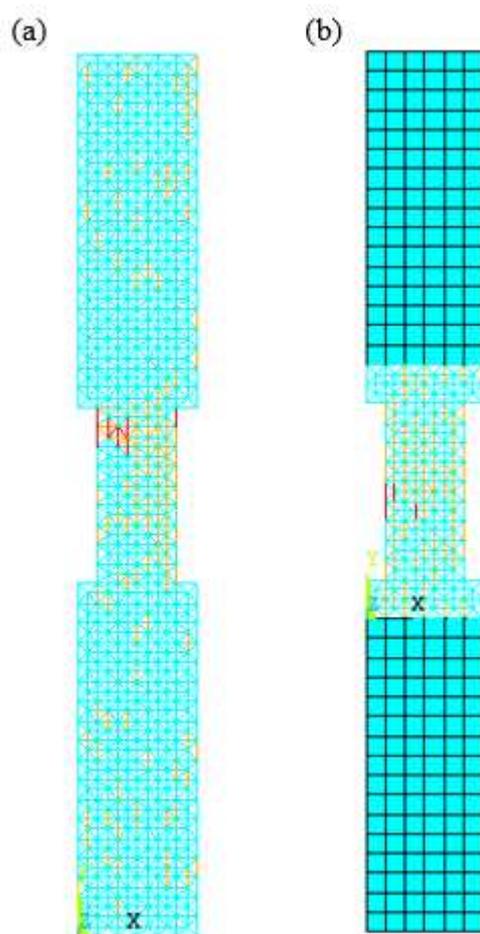


Figura 9: Elementos danificados: (a) LDEM-DYNA, (b) modelo Misto.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma análise comparativa de ensaios em corpos de prova de poliestireno expandido sob tração com simulações realizadas através do método dos elementos discretos formado por barras (LDEM), modelo LDEM no ANSYS LS-DYNA (LDEM-DYNA) e o modelo misto de Elementos Finitos + LDEM-DYNA, com o objetivo de validar esses dois últimos modelos. Dadas as particularidades comentadas na seção anterior, pode-se concluir que em todas as metodologias é possível capturar a ruptura no problema estudado. Através da comparação dos resultados obtidos com os experimentos e simulações no LDEM, sendo este um método já consolidado, foi possível validar a implementação do LDEM no ANSYS LS-DYNA e também a união de métodos numéricos para a solução do problema através do modelo misto. A possibilidade de realizar a união entre elementos discretos e elementos finitos irá permitir em trabalhos futuros a solução de problemas complexos através da potencialização dos benefícios de cada método.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem o apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PROMEC, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, da Capes e do CNPq que fazem possível a continuação das pesquisas e a melhora continua profissional.

REFERÊNCIAS

- Colpo, A., *Análise numérica e experimental do efeito de escala em materiais quase frágeis*. Dissertação mestrado em engenharia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, 2016.
- Hillerborg, A., *A model for fracture analysis*. Cod lutvdg/tv bm-3005, p.1-8, 1978.
- Kosteski, L., *Aplicação do método dos elementos discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas*. Tese doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2012.
- Madenci, E. e Oterkus, E., *Peridynamic Theory and its Applications*. Springer, New York, 2014.
- Nayfeh, A.H. e Hefzy, M.S., Continuum modeling of three-dimensional truss-like space structures. *Aiaa journal*, v. 16(8), p. 779-787, 1978.
- Riera, D., *Local effects in impact problems in concrete structures*. In: proceedings, conf. On structural analysis & design of nuclear power plants, UFRGS, Porto Alegre, RS, 1984.
- Riera, D. e Rocha, M., A note on velocity of crack propagation in tensile fracture. *Revista brasileira de ciências mecânicas*. p. 217-240, 1991.