

Influência do dano na absorção de energia em estrutura *honeycomb* hexagonal

Influence of damage on the energy absorption in hexagonal *honeycomb* structures

RESUMO

Henrique Otokovieski Dolinski
henriquedolinski@alunos.utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Marco Antônio Luersen
luersen@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Este artigo tem como objetivo estudar e compreender a influência causada pelo dano na absorção de energia de deformação plástica de estruturas celulares quando submetidas a impacto. É utilizado um critério de falha com iniciação e propagação de dano baseado na deformação dos elementos de malha. As simulações foram realizadas no código comercial de elementos finitos Abaqus, tendo-se como critério de comparação a energia específica absorvida dos diferentes modelos. Apesar de no modelo celular de *honeycomb* o critério de falha e propagação de dano não se mostrar eficiente, para o atenuador de impacto a adição de tal recurso se mostrou bastante positiva diminuindo o erro da simulação inicial em relação ao modelo ensaiado.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas celulares. Impacto. Elementos finitos.

ABSTRACT

This paper aims to study and understand the influence of the damage on the plastic deformation energy absorption of cellular structures when subjected to impact. A failure criterion with initiation and propagation of damage based on the deformation of the mesh elements is employed. The simulations were performed using the finite element commercial code Abaqus, using the specific energy absorbed from the different models as a comparison criterion. Although in the honeycomb cell model the failure and damage propagation criterion is not efficient, for the impact attenuator the addition of this feature was very positive, reducing the error of the initial simulation in relationship to the tested model.

KEYWORDS: Cellular structures. Impact. Finite elements.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

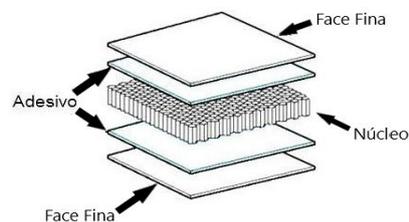
Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Muitas das invenções realizadas pela engenharia são baseadas em modelos já existentes na natureza. A estrutura celular de tipo *honeycomb* não é diferente. Assim que uma estrutura desse tipo é visualizada já nos remete aos favos construídos pelas abelhas em suas colmeias, o fato da sua organização ser constituídas de várias células, podendo não ser só hexagonais mas também triangulares e quadradas, cria a possibilidade de construção de peças rígidas e leves, em estruturas chamadas de sanduíche, evidenciado na Figura 1, compostas por um núcleo geralmente de alumínio, devida a sua menor rigidez quando comparado ao aço e boa absorção de energia, e fixada por adesivo a placas de alumínio ou algum material composto como por exemplo fibra de vidro com epóxi.

Figura 1 – Esquema de uma estrutura sanduíche com núcleo *honeycomb*.



Fonte: Autoria própria (2020).

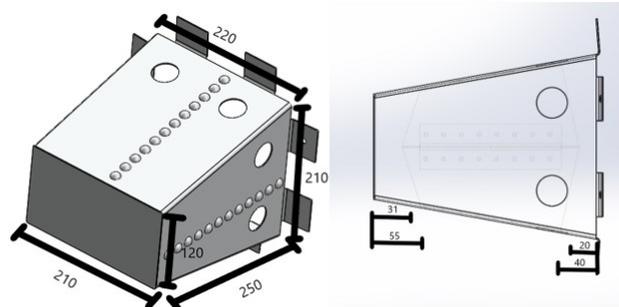
Segundo Hibbeler (2015), qualquer material que possa ser submetido a grandes deformações antes de sofrer ruptura é denominado material dúctil, sendo o alumínio um deles, a escolha dele em um projeto vem de sua capacidade de sofrer uma grande deformação em sobrecarga antes de falhar. A ductibilidade é uma característica importante quando o objetivo é absorção de energia, fazendo com que o material absorva energia de maneira suave. Dessa forma no caso de absorvedores de impacto, cuja finalidade é a proteção de pessoas, tem-se como resultado uma desaceleração mais amena, não submetendo o corpo a grandes esforços internos os quais, se forem elevados, podem causar sérias lesões.

O presente trabalho tem como objetivo entender a influência da consideração do dano nas simulações de impacto em estruturas celulares, analisando assim a necessidade de tal recurso para a obtenção de resultados mais próximos da realidade.

MATERIAL E MÉTODOS

A partir de modelos de construídos no *software* de elementos finitos Abaqus 6.14-1, foram realizadas diversas análises numéricas com a finalidade de obter um maior entendimento sobre a influência na obtenção de energia em modelos, com e sem, a aplicação do critério de falha por dano de material dúctil. A fim de se manter os padrões de comparação, foi utilizado um componente de Fórmula SAE (atenuador de impacto) projetado, ensaiado e validado, como modelo referência para possíveis ajustes de valores das propriedades de evolução de dano, já que as mesmas não possuem valor validado por ensaio, e inicialmente aproximadas de acordo com a literatura. Após uma decisão sobre tais valores, foi-se feita a simulação do modelo *honeycomb*. O atenuador de impacto cotado conforme a Figura 2, será apenas apresentado superficialmente neste trabalho, visto que ele não é o foco do estudo.

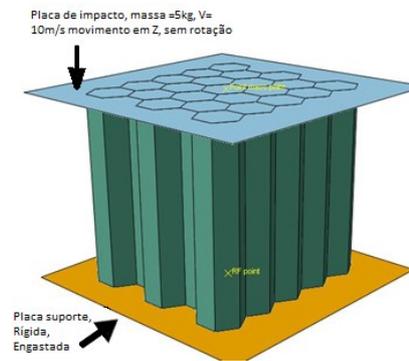
Figura 2 – Atenuador de impacto (dimensões em mm).



Fonte: Autoria própria (2020).

O modelo *honeycomb* regular é composto por um núcleo hexagonal de 5x5 células, o comprimento de aresta de cada hexágono assume o valor de 1.73mm e uma altura de 15 mm. A Figura 3 retrata o modelo de *honeycomb* regular.

Figura 3 – Esquematização núcleo honeycomb.



Fonte: Autoria própria (2020).

Foi utilizado o elemento de casca de quatro nós (código S4R do Abaqus) para os modelos e todos sendo do mesmo material, Alumínio AA3003, H18 com uma espessura de 0,05 mm para o *honeycomb* e 1,5mm para o atenuador de impacto. As propriedades mecânicas do material utilizado estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do Alumínio AA3003 H18

Módulo de elasticidade (E)	Densidade (ρ)	Coefficiente de Poisson (ν)	Tensão de escoamento inicial (σ_i)	Tensão de escoamento final (σ_f)
68,9 GPa	2730 kg/m ³	0,33	115,8 MPa	154,5 MPa

Fonte: Zhang, Zhang e Wen (2014).

Para a simulação do núcleo *honeycomb* hexagonal usou-se uma placa rígida como base de dimensão 20 x 20 mm, onde as arestas inferiores do núcleo foram engastadas nessa placa, e as arestas superiores unidas na placa de impacto pelo recurso Tie.

Na fase do estudo de dano, foi necessária uma pesquisa maior para se entender o funcionamento do dano na simulação e a influência que os coeficientes colocados fariam no resultado, primeiro definiu-se que seria usado a opção Dano Dúctil presente no Abaqus, e de acordo com o estudo de Luo (2008), foi definido

uma taxa de deformação (*strain rate*) de 0.21 para a liga de alumínio desse estudo, após isso era necessário entender qual a influência da triaxialidade de tensões (*stress triaxiality*), procurando na literatura pesquisas sobre tais parâmetros, chegou-se à conclusão que para o Alumínio AA3003 H18, os coeficientes poderiam ser definidos com o valor “0”, de acordo com Mirza, Barton e Church (1996).

No critério de propagação de dano, usou-se o critério de falha por deformação, para definir o mesmo é necessário saber qual o tipo de elemento simulado, onde elemento linear assume valor de 0.2 e quadrático de 0.1, qual a deformação que o material sofre desde a tensão de escoamento (0.02), até a sua ruptura (0.67), e por fim usar o tamanho do elemento de malha como um multiplicador. Então em uma malha de elemento 5 mm, tem-se: $0.2 \times 0,65 \times 5 = 3,25$. Tal valor precisa ser alterado a cada refinamento de malha que se faz.

Para a comparação de dano o primeiro parâmetro necessário é ativar a função de eliminação de elementos rompidos no *software*, STATUS, tal parâmetro não retorna valores, mas sim resultado visual, para a comparação em valores tem-se os mesmos parâmetros de interesse de simulações de absorvedores de impacto.

Esta pesquisa tem como objetivo extrair a energia total absorvida (TEA), energia específica absorvida (SEA) e a eficiência de esmagamento (CFE). SEA e CFE são definidas por

$$SEA = \frac{TEA}{m} \quad (1)$$

$$CFE = \frac{F_{méd}}{F_{máx}} \quad (2)$$

$$Erro = \frac{E_{atual} - E_{anterior}}{E_{anterior}} * 100 \quad (3)$$

O cálculo da energia absorvida foi realizado a partir da integral de Riemann para obter o valor da área abaixo do gráfico de Força versus Deslocamento.

Foi definido como critério de parada um tempo de 0.00075 segundos correspondente a 7,5 mm de deslocamento da placa de impacto, testado o número de pontos que seriam usados na simulação para uma melhor curva e por fim feita a convergência da malha com um erro permitido igual ou menor que 8%

Com o intuito de uma melhor organização cada modelo está enumerado e especificado sua massa utilizada nos cálculos:

Modelo 1: Núcleo *Honeycomb* hexagonal, massa total de 0,312g.

Modelo 2: Atenuador de Impacto, massa total de 1,12Kg.

Modelo 3: Dano núcleo *Honeycomb* hexagonal, massa total de 0,312g.

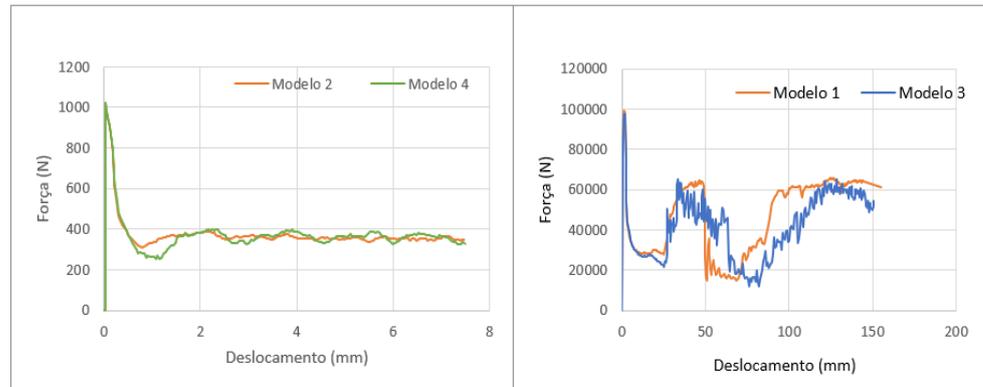
Modelo 4: Dano Atenuador de Impacto, massa total de 1,12Kg

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta as curvas de força *versus* deslocamento obtidas para os modelos 2 e 4, com a presença de dano. Ambos estão dotados de suas respectivas malhas convergidas. Apesar de serem modelos geometricamente diferentes, é possível comparar pontos positivos e negativos para ambos. Primeiro, o atenuador de impacto devido os alívios tem uma maior facilidade para iniciar sua deformação, o que diminui o pico de força e conseqüentemente o pico de desaceleração, porém não se tem a presença de dobras sequenciais durante o processo de flambagem

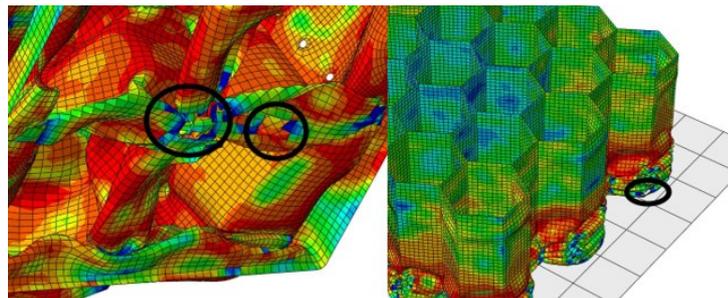
igual o modelo hexagonal apresenta, essas dobras além de representarem um melhor aproveitamento da área superficial do modelo também colaboram para o processo de densificação o qual é responsável por uma parte da energia absorvida conforme o avanço da compressão ocorre.

Figura 4 - Curvas Força *versus* Deslocamento modelos.



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 5 – Evidência do dano no atenuador de impacto e no modelo *honeycomb*.



Fonte: Autoria própria (2020).

O intuito desta pesquisa é compreender melhor o funcionamento da condição de dano em simulações e verificar sua influência nos resultados. Na Tabela 2 tem-se os principais parâmetros de interesses

Tabela 2- Parâmetros de interesse (resultados finais)

Modelo	TEA	SEA (KJ)	CFE	Tempo (s)
1	2,7735 J	8,8895	0,3496	93746,5
2	5,7245 KJ	5,1112	0,5718	27672,6
3	2,7622 J	8,8534	0,3580	25104,4
4	5,1034 KJ	4,5569	0,5748	40411,3

Fonte: Autoria própria (2020).

Iniciando pelo erro proveniente do atenuador de impacto, foi obtido um erro de 10,85%, valor considerável, levando em conta que o modelo sem dano apresentava valor de 17,55% maior de energia em comparação com o ensaio, sendo possível constatar que a simulação é válida e diminui assim o erro.

O modelo hexagonal apresentou um erro de 0,407%, pelo fato de apenas o núcleo estar sendo analisado. Tal resultado se mostra satisfatório visto que não há erros provenientes das representações de soldas ou fixações.

Quanto ao quesito tempo, até o tamanho de elemento 0,15 mm do modelo hexagonal os tempos eram parecidos, porém por algum motivo desconhecido e indo ao contrário do esperado, o tempo de simulação sem dano para modelos mais refinados foi maior.

Já no modelo do atenuador de impacto verificou-se o contrário, tem-se um tempo quase 2 vezes superior para o tamanho de elemento de 4 mm, valor referente ao tamanho de elemento ao qual foi-se obtida a convergência de malha do modelo.

CONCLUSÃO

Com a análise dos resultados fica notável que a aplicação do dano para o modelo atenuador de impacto se mostrou eficaz e diminui o erro do modelo, porém o tempo de simulação cresceu consideravelmente e dependendo do resultado da convergência de malha pode não compensar aplicar o critério de dano, tal erro ainda poderia ser diminuído, fazendo a consideração da solda nas arestas e da fixação por rebites.

No caso do modelo hexagonal o critério de dano se mostrou eficiente devido a diminuição do tempo de simulação, algo que valeria uma investigação maior do por que ter ocorrido, porém em quesitos resultados sua diferença foi desprezível.

Portanto, o critério de dano utilizado depende da finalidade da simulação e geometria do modelo, sendo necessário testes em modelos simplificados para a retirada de resultados que definirão se o mesmo é adequado a simulação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UTFPR e ao LAMES (Laboratório de Mecânica Estrutural) pelo espaço e possibilidade da realização do trabalho e ao CNPq pelo apoio financeiro em forma de bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7.ed. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2015. p. 60-63

LUO, M. **Ductile fracture characterization of an aluminum alloy sheet**, Term Project Report of 2.094 , Massachusetts Institute of Technology, abr. 2008 .

MIRZA, M.; BARTON, D. C.; CHURCH, P. The effect of stress triaxiality and strain-rate on the fracture characteristics of ductile metals, **Journal of Materials Science**, v. 31, p. 453-461, jan. 1996.

ZHANG, X.; ZHANG, H.; WEN, Z. Experimental and numerical studies on the crush resistance of aluminum honeycombs with various cell configurations. **International Journal of Impact Engineering**, v. 66, p. 48-59, abr. 2014.