

Análise de absorção de energia em estruturas honeycomb regular e hierárquica de primeira ordem

Analysis of energy absorption in first order hierarchical and regular 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 trabalho tem como objetivo estudar e entender o comportamento de estruturas com núcleos celulares e placas compósitas em relação à absorção de energia por deformação plástica em uma situação de impacto, com velocidade constante. As simulações foram realizadas pelo método de elementos finitos utilizando o software comercial Abaqus 6.14-1, sendo comparadas as energias específicas absorvidas de diferentes modelos. O modelo hierárquico se mostrou superior na absorção absoluta de energia, mesmo apresentando um pico de força maior. Também apresenta uma melhor eficiência de absorção. Nos modelos celulares foi possível perceber uma notável diferença na energia específica, tanto do modelo regular quanto do hierárquico, se comparado com os seus modelos compósitos em sanduiche. A introdução de uma placa laminada compósita não se mostrou eficiente para a absorção de energia, diminuindo bruscamente a energia específica e ainda acarretando um aumento na força máxima realizada sobre os modelos.

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

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



ABSTRACT

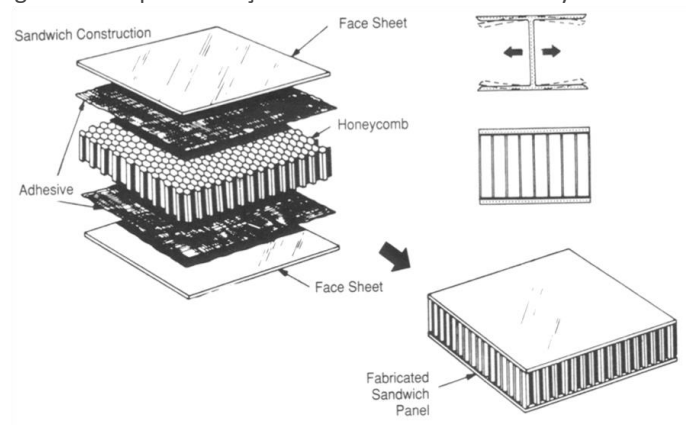
This work aims to study and understand the behavior structures with cellular core and composite plates in relation to absorption of energy by plastic deformation in an impact situation, with constant speed. The simulations were performed by the finite element method using commercial software Abaqus 6.14-1, being compared specific absorbed energy of each model. The hierarchical model proved be superior in energy absorption, even presenting a higher peak of force. Also presentes a better absorption efficiency. It was possible to notice in the cellular models a remarkable difference in the specific energy of both the regular and the hierarchical model, compared with their composite models in sandwich. The introduction of a laminated composite plate was not efficient for energy absorption, decreasing sharply the specific energy and causing an increase in the maximum force in the models.

KEYWORDS: Cellular structures. Impact. Finite elements.

INTRODUÇÃO

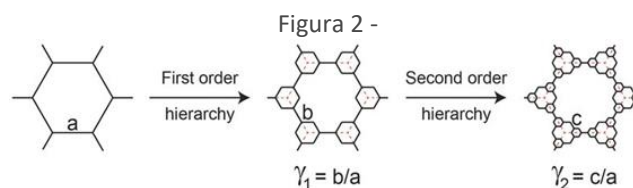
O rápido avanço da engenharia aliado a constante busca da melhoria fez com que fosse necessário um maior estudo sobre os materiais e suas propriedades, um exemplo da aplicação desses estudos está na indústria automotiva, com o passar dos anos os automóveis, cada vez mais, estão sendo projetados pensando na segurança de seus ocupantes, ao mesmo tempo que é necessário tornar os veículos mais leves e mais eficiente no consumo de combustível, para isso foi necessária a implementação de diferentes materiais em seu conjunto buscando em uma situação impacto a absorção de uma alta taxa de energia porém de uma forma não tão abrupta. Um dos artefatos usados pelos engenheiros nos *crash-tests* são os absorvedores de energia do estilo *sandwich*, onde sua composição está exemplificado na figura 1.

Figura 1 – Esquematização estrutura sandwich honeycomb.



Fonte: Aerospace Engineering Blog (2013)

Focando na geometria hexagonal para o núcleo, é possível encontrar variantes das células, uma delas são as estruturas hierárquicas, primeira e segunda ordem, evidenciados na figura 2.



Fonte: Mousanezhad et al. (2015)

O presente trabalho tem como objetivo comparar a eficiência dos modelos *honeycomb* regular e hierárquico de primeira ordem, uma vez que há poucos estudos na literatura sobre estruturas hierárquicas.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizadas diversas análises numéricas realizadas com o método de elementos finitos utilizando o software Abaqus 6.14-1. A finalidade foi obter um maior entendimento sobre a influência na absorção de energia entre o modelo de estrutura *honeycomb* regular e hierárquica de primeira ordem. Para que fosse possível manter um padrão de comparação, os modelos foram construídos com as dimensões mais próximas possíveis e retiradas suas energias específicas para análise. Desta forma tem-se um valor de comparação supondo uma mesma

quantidade de material. Também foram construídos modelos supondo apenas a absorção de energia no núcleo e o seu modelo usual que seria a estrutura do tipo sanduiche onde além do núcleo tem-se duas chapas, nesse caso fibra de carbono com matriz de epóxi, fazendo a fixação do núcleo resultando em um painel anteriormente apresentado.

Os modelos regular e hierárquico de primeira ordem são compostos por um núcleo hexagonal de 3x5 células. No modelo regular o comprimento da aresta assume o valor de 1.73mm e no modelo hierárquico foi adotado $\gamma_1 = 0,32$ valor considerado para se obter a maior rigidez da estrutura segundo Alqassim (2011). Os laminados, superior e inferior, de compósito são retangulares de mesmo tamanho no modelo regular, (15x15)mm e (16x15)mm no modelo hierárquico de primeira ordem, ambos os núcleos apresentam uma altura de 15mm.

Todos os modelos de elementos finitos são do tipo *shell* (casca) e foram usados elementos S4R do Abaqus. O material do núcleo é o Alumínio AA3003 H18, com espessura de 0,05 mm. Os laminados compósitos, nos modelos sanduiche, consistem em uma matriz de epóxi e o reforçador de fibra de carbono, feitos de oito lâminas de 0.125mm cada. O laminado é simétrico do tipo [0,±45,90]_s e o conjunto matriz/fibra apresenta uma densidade de 1570 kg/m³. As propriedades mecânicas dos materiais estão listadas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1-Propriedades mecânicas do Alumínio AA3003 H18

Módulo de elasticidade (E)	Densidade (ρ)	Coef. 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: Autoria própria (2019).

Tabela 2- Propriedades mecânicas da lâmina unidirecional de Carbono-Epóxi IM7/8552

Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
E_{11}	145 GPa	X_T	2414 MPa
E_{22}	8,9 GPa	X_C	1365 MPa
ν_{12}	0,33	Y_T	51 MPa
G_{12}	5,6 GPa	Y_C	269 MPa
G_{13}	5,6 GPa	S_{12}	120 MPa
G_{23}	4,48 GPa		

Fonte: Autoria própria (2019).

Foi feito o uso de uma placa rígida de dimensão 20x20 mm, para o suporte dos modelos onde nos modelos constituídos só do núcleo, suas arestas inferiores foram engastadas nessa placa e para os modelos sanduiche a superfície inferior do laminado foi engastada à placa.

A 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

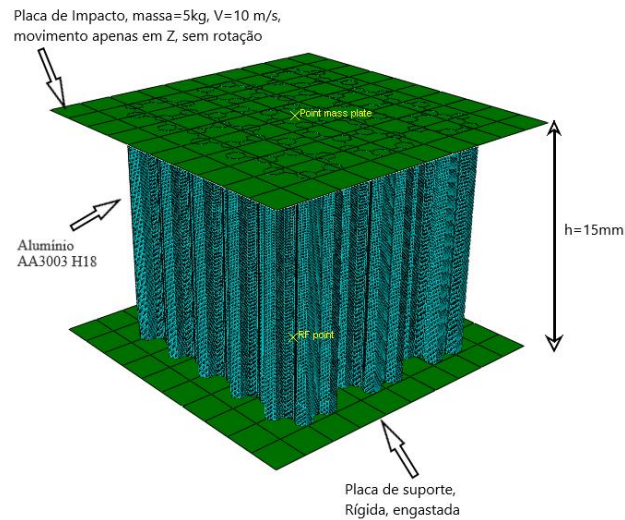
$$SEA = \frac{TEA}{m} \quad (1)$$

$$CFE = \frac{F_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{e}d}} \quad (2)$$

Para o cálculo da energia absorvida foi utilizada a soma de Riemann para integrar a área abaixo do gráfico de força x deslocamento.

Foi definido como critério de parada um tempo de 0.00075 segundos que corresponde a 7.5mm 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 6%

Figura 3 – Modelagem final núcleo *honeycomb* hierárquico de primeira ordem.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para uma melhor organização cada modelo é enumerado e especificado sua massa utilizada nos cálculos:

Modelo 1 - Núcleo *honeycomb* regular, massa total de 0,312g.

Modelo 2 - Núcleo *honeycomb* hierárquico de primeira ordem, massa total de 0,560g.

Modelo 3 - Painel sanduíche compósito de núcleo *honeycomb* regular, massa total de 1,018g.

Modelo 4 - Painel sanduíche compósito de núcleo *honeycomb* hierárquico de primeira ordem, massa total de 1,314g.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar dos vários cuidados para se ter uma simulação o mais próximo possível de um ensaio real, não foi possível fazer a validação experimental devido à complexidade da estrutura *honeycomb* regular que já apresenta um elevado valor, difícil de encontrar no mercado e alta complexidade para fabricação, já estrutura hierárquica de primeira ordem até o dia da realização desse trabalho não foi encontrada para venda, apenas modelos impressos em 3D que foram utilizados em outros artigos para fins de estudos.

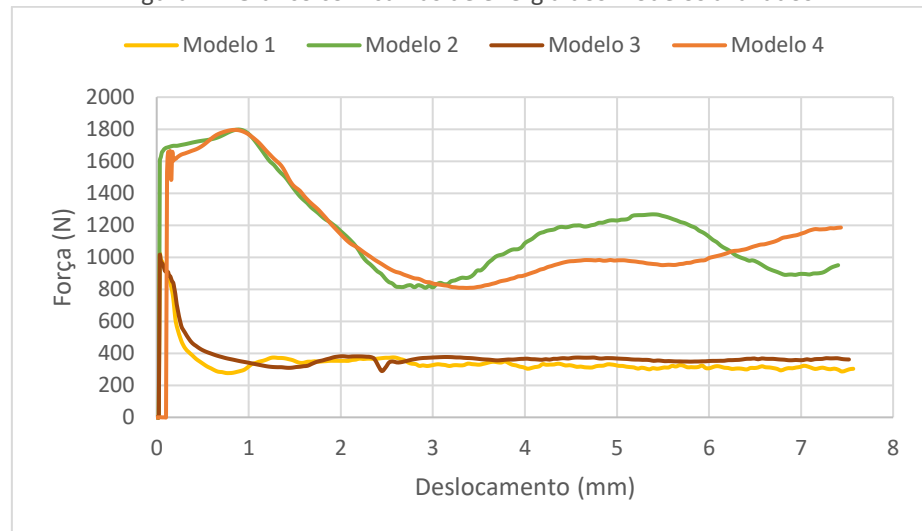
A tabela 3 e a figura 4 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 3. Resultado parâmetros de interesse

Modelo	TEA	SEA	CFE
1	2,5812	8,2730	3,1379
2	8,7271	15,5841	1,5383
3	2,8302	2,7801	2,7832
4	8,2852	6,3053	1,8222

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 4 – Gráfico com curvas de energia dos modelos avaliados.



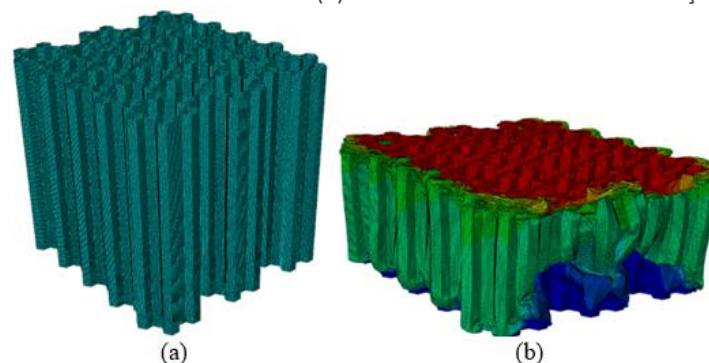
Fonte: Autoria própria (2019).

A curva do modelo regular quando comparada com o hierárquico se mostra diferente, analisando a curva do modelo 1 percebemos um pico elevado de força e após isso uma queda brusca com uma deformação constante, a presença dessa constante na curva é algo muito positivo, porém o pico de força é tão grande que quando calculado sua eficiência o modelo começa a se mostrar um pouco “ineficiente”. Analisando a curva do modelo hierárquico é possível perceber que o pico não está no início, algo esperado em situações de impacto, uma das hipóteses para tal ocorrência é a densificação precoce da base do modelo.

Nos modelos sanduíche, 3 e 4, pode-se notar uma clara semelhança com os modelos simulados apenas os núcleos, isso se deve principalmente por ser o núcleo que absorve a energia, os laminados compósitos nessa situação não apresentam função visto que a função principal desses laminados seria trabalhar sobre flexão.

Na eficiência dos modelos não foi possível obter um bom entendimento já que quando comparado modelo 1 com modelo 3, o modelo sanduiche se saiu melhor, mas quando visto os modelos 2 e 4, o modelo apenas do núcleo foi o superior, sendo assim não chegamos em uma resposta se foi o laminado que causou isso, algum erro na simulação ou qual outra causa possível. A figura 5 exemplifica um modelo indeformado e deformado do núcleo.

Figura 5 - Modelo 2 indeformado (a) e deformado ao final da simulação (b).



Fonte: Autoria própria (2019).

CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados das diferentes simulações, é possível concluir que o modelo de *honeycomb* hierárquico de primeira ordem se mostrou superior quando se trata de absorção de energia, tanto no aspecto do valor total de energia absorvida (TEA) quanto na energia específica (SEA) e também em sua eficiência de força de esmagamento (CFE).

A inclusão das placas de laminados compósitos se mostrou ineficiente para a finalidade de absorção de impacto, pois com elas a absorção de energia específica nos modelos sanduíche pioraram. Porém, não foi possível obter uma conclusão em relação a eficiência de deformação, levando isso em conta e pensando nesses modelos como itens comerciais, não traria vantagens o uso do laminado pois ele só vem a aumentar o preço de venda do absorvedor de energia.

REFERÊNCIAS

"Aerospace Engineering Blog," 28 06 2013. [Online]. Available: <https://aerospaceengineeringblog.com/wp-content/uploads/2013/06/Unbenannt.png>. [Accessed 31 07 2019].

MOUSANEZHAD, D. *et al.* Hierarchical honeycomb auxetic metamaterials. *Sci. Rep.* **5**, 18306; doi: 10.1038/srep18306 (2015).

ALQASSIM, Ghanim. **Mechanical Properties of Hierarchical Honeycomb Structures**. 2011. 30-38 p. FINAL PAPER (MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING) - NORTHEASTERN UNIVERSITY, BOSTON, MASSACHUSETTS, 2011. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/4d16/097f4c68833c5f93d26d51c8b0bbdccb6a98.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à UTFPR e ao LAMES pelo espaço e possibilidade da realização do estudo e ao CNPq pelo apoio financeiro em forma de bolsa de iniciação científica.