



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LEONARDO DELLA GIACOMA GRECA
MELISSA BIANCA MENDES

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS TIPO *HONEYCOMB* SUBMETIDAS À
CARGA DE IMPACTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC2 - Nº DE INSCRIÇÃO - 18)

CURITIBA
2017

LEONARDO DELLA GIACOMA GRECA

MELISSA BIANCA MENDES

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS TIPO *HONEYCOMB* SUBMETIDAS À
CARGA DE IMPACTO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Marco Antônio Luersen, Dr. Eng.

CURITIBA

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia de Projeto de Pesquisa “Análise de estruturas tipo *honeycomb* submetidas à carga de impacto”, realizada pelos alunos Leonardo Della Giacoma Greca e Melissa Bianca Mendes, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Tcc 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Marco Antônio Luersen, Dr. Eng.
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Rodrigo Villaca Santos, Dr. Eng.
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Claudio Tavares da Silva, Dr. Eng.
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 13 de dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradecemos as nossa mães e avó por terem nos apoiado e, principalmente, nos alimentado durante praticamente todos os fins de semana desse ano, que passamos quase todo tempo dedicados a esse trabalho.

Agradecemos ao Prof. Dr. Marco Antônio Luersen pela sua disposição e dedicação nos ajudando a desenvolver esse trabalho. Agradecemos ao seu esforço em ler, revisar e contribuir de modo a engrandecer esse estudo. Muito obrigado pelo apoio constante, incentivo e amizade.

Agradecemos, por fim, a todos os nossos familiares e amigos que tanto nos apoiaram ao longo de toda nossa graduação e que não desistiram de nossa amizade mesmo, com nossa ausência do último ano.

*Engenharia é a arte de estar aproximadamente certo
ao invés de precisamente errado.*

Prof. Roderick A. Smith
Professor at Imperial College of London
Fatigue Expert
Chief Scientific Officer of the UK Department for Transport
Chair of the Future Railway Research Centre

RESUMO

GRECA, L. D. G.; MENDES, M. B. Análise de estruturas tipo *honeycomb* submetidas à carga de impacto. 2017. 64 f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

Existe atualmente na indústria um crescente interesse por soluções estruturais de baixa massa e alta capacidade de absorção de energia de impacto. Componentes com essas características são utilizados com frequência principalmente nos setores aeronáutico e aeroespacial. A estrutura celular hexagonal *honeycomb*, ou colmeia de abelha, fabricada de materiais metálicos como alumínio ou não metálicos como Nomex®, é um exemplo de solução para tal demanda. Entretanto, uma das dificuldades em utilizar esse tipo de estrutura está na forte dependência de parâmetros de fabricação em seu desempenho. Características como largura de aresta, espessura de parede, densidade de células (número de células por área de estrutura) e propriedades do material base influenciam diretamente a capacidade de absorver energia do *honeycomb*. Em situações de impacto, o mecanismo de falha mais comum no material se dá por deformação plástica em dobras progressivas, que promovem dissipação de energia de forma mais ou menos eficiente, de acordo com os parâmetros citados anteriormente. Por esse motivo, a análise do modo de falha do componente é importante para situações de projeto. Em um projeto eficiente, busca-se alta absorção de energia específica e alta eficiência de força de esmagamento, esta última dada pela razão entre força média e força máxima de colisão. Nesse contexto, o presente trabalho visa investigar o comportamento de estruturas *honeycomb* com diferentes combinações de parâmetros geométricos e de material constituinte em situações de impacto. Para tal, são realizadas análises por meio do método de elementos finitos, utilizando a ferramenta computacional Abaqus. Em um primeiro momento são analisados os casos de células tubulares únicas de perfil quadrado e hexagonal, de modo a compreender os mecanismos e variáveis que governam esse tipo de problema. Confirma-se que a célula de perfil hexagonal é mais indicada para a aplicação de absorção de energia, superando a célula de perfil quadrado em 47% no total de energia absorvida em uma solicitação de impacto. Em seguida, modelos numéricos de estruturas *honeycomb* de células hexagonais são criados a partir de dados de estudo experimental encontrado na literatura. Com eles, realiza-se uma análise comparativa de estruturas *honeycomb* distintas, compostas de ligas de alumínio Al 3003, Al 5052 e Al 5056 e com tamanhos de célula de $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{4}$ ". Verifica-se que a combinação de *honeycomb* de maior densidade de células (célula de $\frac{3}{8}$ ") feita com o material de maior resistência mecânica (Al 5056) apresenta a maior eficiência de força de esmagamento e a maior energia absorvida específica e, portanto, considerando os casos analisados, é a mais adequada para a aplicação em questão.

Palavras-chave: Materiais celulares, estrutura *honeycomb*, impacto, absorção de energia, elementos finitos.

ABSTRACT

GRECA L. D. G., MENDES M. B. Analysis of honeycomb structures under impact load. Brazil: Federal University of Technology - Parana; 2017: p. 64.

There is a growing interest by the industries in structural solutions that combine low mass with high impact-energy absorption. Components that have these characteristics are frequently used in aeronautical and aerospace industries. The hexagonal cellular structure called honeycomb, made of metallic materials such as aluminum or non-metallic such as Nomex®, is a solution for this demand. However, one of the challenges in using this type of structure is that its performance is heavily dependent on manufacturing parameters. Characteristics such as edge width, wall thickness, cell density (number of cells per structure area) and material properties influence the energy absorption capacity of the honeycomb. In impact situations, the most common failure mechanism is plastic deformation through progressive folding which promotes energy dissipation with more or less efficiency according to the parameters mentioned above. For this reason, the failure mode analysis of the component is important for project development. An efficient project seeks for high specific energy absorption and high crush force efficiency, the latter given by the ratio of the average crushing load to the maximum crushing load. Within this context, this study investigates the behavior of honeycomb structures with different combinations of geometric parameters and constituent materials in impact situations. In order to achieve this goal, finite element analyses are performed using the computational tool Abaqus. First, quadrilateral and hexagonal tubular cells are analyzed in order to understand the mechanisms and variables that govern this type of simulation. It is confirmed that the hexagonal cell is more suited for energy-absorption applications, surpassing the total absorbed energy of the quadrilateral cell by 47% by the end of an impact simulation. Next, hexagonal cell honeycomb numeric models are created using data provided by an experimental study found in the literature. With these models, a comparative analysis is conducted using distinct honeycomb structures made of aluminum alloys Al 3003, Al 5052 e Al 5056 and cell sizes of $\frac{3}{8}$ in, $\frac{1}{2}$ in and $\frac{3}{4}$ in. It is verified that the honeycomb parameter combination of the highest cell density ($\frac{3}{8}$ in cell) made with the highest mechanical resistance material (Al 5056) provides the highest crush force efficiency and the highest specific energy absorption and, therefore, among the tested cases, is the most appropriate for the presented application.

Keywords: Cellular materials, honeycomb structures, impact, energy absorption, finite elements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura tipo <i>honeycomb</i> de alumínio.....	13
Figura 2 - Curva tensão-deformação de uma liga de aço	17
Figura 3 - Material “sanduíche” de núcleo <i>honeycomb</i>	19
Figura 4 - Longarina do BMW i3 com <i>honeycomb</i>	20
Figura 5 - Processos de fabricação de estruturas <i>honeycomb</i>	21
Figura 6 - Curva força-deslocamento característica de uma célula submetida à carga de impacto.....	22
Figura 7 - Formação das dobras sucessivas.....	23
Figura 8 - Curva força-deslocamento característica de um material celular submetido à carga de impacto.....	24
Figura 9 - Relação entre força máxima e velocidade inicial de impacto	25
Figura 10 - Célula de estrutura <i>honeycomb</i> modelada com elementos de casca	31
Figura 11 - Representação dos três primeiros modos de flambagem de uma célula hexagonal.....	32
Figura 12 - Geometria da seção transversal das células simuladas	34
Figura 13 - Estrutura <i>honeycomb</i> modelada vs amostra <i>honeycomb</i> de Yamashita e Gotoh (2005)	35
Figura 14 – Modelagem do ensaio de impacto.....	36
Figura 15 - Geometrias <i>honeycomb</i> de diferentes densidades de célula utilizadas nas simulações	38
Figura 16 - Curva força-deslocamento de uma célula hexagonal com cinco refinamentos diferentes de malha	41
Figura 17 - Forma deformada da célula hexagonal ao longo da curva força-deslocamento.....	42
Figura 18 - Curva força-deslocamento das células hexagonal e quadrada.....	43
Figura 19 - Energia absorvida, em função do deslocamento, pelas células hexagonal e quadrada	43
Figura 20 - Configuração das estruturas hexagonal e quadrada no final do processo de deformação	43

Figura 21 - Curva tensão-deslocamento resultante da simulação numérica do estudo experimental de Yamashita e Gotoh (2005).....	44
Figura 22 - Influência da velocidade de impacto em: a. força máxima b. força média	46
Figura 23 - Curvas força-deslocamento para cinco velocidades de impacto diferentes	47
Figura 24 - Curva força-deslocamento da resposta ao impacto em uma estrutura <i>honeycomb</i>	48
Figura 25 - Aspecto da estrutura <i>honeycomb</i> ao longo do processo de impacto. As imagens se referem aos pontos A, B, C e D da figura 24	48
Figura 26 - Influência do material e da geometria de uma estrutura <i>honeycomb</i> nos parâmetros a. força máxima e b. força média	50
Figura 27 - Influência do material e da geometria de uma estrutura <i>honeycomb</i> nos parâmetros a. <i>EFE</i> e b. <i>EAE</i>	51
Figura 28 - Evolução da velocidade da placa superior em cada simulação	52
Figura 29 - Curvas força-deslocamento para diferentes geometrias de célula. Materiais (a) Al 3003; (b) Al 5052 e (c) Al 5056	59
Figura 30 - Curvas força-deslocamento para diferentes materiais. Geometria das células: (a) $\frac{3}{4}$ "; (b) $\frac{1}{2}$ " e (c) $\frac{3}{8}$ "	60
Figura 31 - Curvas de energia absorvida para diferentes geometrias de célula. Materiais: (a) Al 3003; (b) Al 5052 e (c) Al 5056.	62
Figura 32 - Curvas de energia absorvida para diferentes materiais. Geometria das células: (a) $\frac{3}{4}$ "; (b) $\frac{1}{2}$ " e (c) $\frac{3}{8}$ "	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio Al 2024.....	31
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do material da amostra experimental (A5052) .	35
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos materiais dos modelos de <i>honeycomb</i>	39
Tabela 4 - Número de elementos finitos da malha e tempo computacional relativo..	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA	12
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	12
1.3	OBJETIVOS	12
1.4	JUSTIFICATIVA	13
1.5	CONTEÚDO DO TRABALHO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	CONCEITOS GERAIS SOBRE IMPACTO.....	16
2.2	ESTRUTURAS TIPO <i>HONEYCOMB</i>	19
2.3	IMPACTO EM ESTRUTURAS <i>HONEYCOMB</i>	21
2.4	ESTUDOS ANTERIORES.....	23
3	METODOLOGIA	29
3.1	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DE CÉLULAS TUBULARES	30
3.1.1	Parâmetros da simulação numérica de células tubulares	30
3.1.2	Dimensionamento da malha de simulação de células tubulares	33
3.1.3	Análise comparativa de células tubulares hexagonais e quadradas	33
3.2	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS CELULARES <i>HONEYCOMB</i>	34
3.2.1	Criação do modelo de <i>honeycomb</i> para simulação de impacto	34
3.2.2	Simulação de <i>honeycomb</i> submetido a diferentes velocidades de impacto...	37
3.2.3	Estudo da curva de impacto em uma estrutura <i>honeycomb</i>	37
3.2.4	Simulação de diferentes materiais e geometrias em estruturas <i>honeycomb</i> .	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	SIMULAÇÕES DE CÉLULAS TUBULARES	40
4.1.1	Dimensionamento da malha de simulação.....	40
4.1.2	Estudo da curva força-deslocamento em células tubulares	41
4.1.3	Análise comparativa de células tubulares hexagonal e quadrada	42
4.2	SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS <i>HONEYCOMB</i>	44

4.2.1	Validação do modelo de simulação	44
4.2.2	Avaliação dos efeitos da velocidade de impacto	45
4.2.3	Estudo da curva força-deslocamento em uma estrutura <i>honeycomb</i>	47
4.2.4	Análise comparativa de diferentes materiais e geometrias em estruturas <i>honeycomb</i>	49
5	CONCLUSÕES	53
	APÊNDICE A – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO	58
	APÊNDICE B – CURVAS DE ENERGIA ABSORVIDA	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

O tema deste trabalho consiste no estudo da resposta dos materiais tipo *honeycomb* quando submetidos a cargas de impacto, com ênfase nas propriedades de absorção de energia.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Capacidade de absorção de energia de impacto é uma recorrente demanda da engenharia. Em diversas indústrias, como aeronáutica e automobilística, a redução de massa também é uma prioridade. Portanto, o desenvolvimento de materiais e estruturas com boas propriedades de absorção de energia e baixa massa é recomendado. Para esse tipo de aplicação, as estruturas “sanduíche” vêm sendo bastante utilizadas. Essas estruturas são usualmente compostas de duas camadas de um material rígido, separadas por um núcleo de material leve, que melhora propriedades de rigidez de flexão e de resistência ao impacto, sem adição significativa de massa.

Os materiais tipo *honeycomb* (figura 1) são conhecidos pela excelente capacidade de absorção de energia devido ao particular mecanismo de deformação de colapso progressivo, característico das estruturas celulares. O uso do *honeycomb* como núcleo de estruturas “sanduíche” se expandiu nos últimos anos, por isso é essencial entender como variações em sua geometria e composição afetam o seu desempenho final.

1.3 OBJETIVOS

Dentro do contexto apresentado, o objetivo geral deste estudo é analisar, por meio de modelagem numérica, a influência de diferentes geometrias e materiais na resposta ao impacto de estruturas tipo *honeycomb*.

Para atingir esse objetivo principal, são definidos os seguintes objetivos secundários:

- Estudo do fenômeno de flambagem progressiva em uma única célula hexagonal;
- Avaliação da capacidade de absorção de energia em diferentes geometrias de célula;
- Estudo simplificado da relação entre velocidade de impacto e a resposta das estruturas *honeycomb*;
- Avaliação da influência das propriedades do material constituinte de uma estrutura *honeycomb* em sua capacidade de absorção de energia;
- Avaliação da influência da geometria de uma estrutura *honeycomb* em sua capacidade de absorção de energia;
- Análise comparativa dos resultados obtidos.

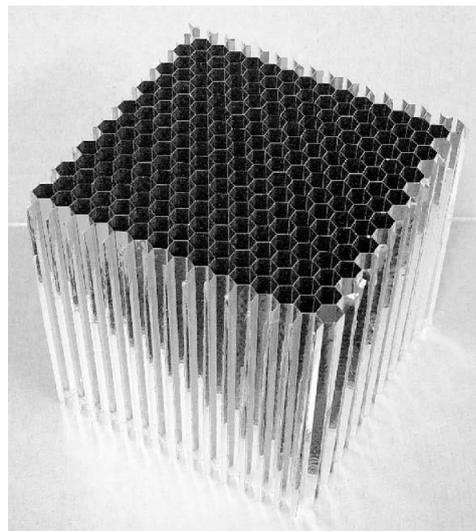


Figura 1 - Estrutura tipo *honeycomb* de alumínio
Fonte: Yamashita e Gotoh (2005)

1.4 JUSTIFICATIVA

O crescente interesse pela segurança, principalmente na indústria de transportes (privado e público) e em ações antiterrorismo, vem contribuindo para o aumento da importância dos estudos referentes aos materiais resistentes ao impacto (ZHU *et al.*, 2007). A influência da geometria na resposta das estruturas *honeycomb* a cargas de impacto ainda não é bem conhecida. Uma melhor compreensão desse

tipo de estrutura é importante para torná-la aplicável à vasta gama de demandas de engenharia, o que justifica a realização deste trabalho.

Este estudo faz parte da área da mecânica estrutural, e utiliza também conceitos da ciência dos materiais e de métodos numéricos. O conhecimento dessas áreas da engenharia é fundamental para bem representar o particular mecanismo de absorção de impacto das estruturas tipo *honeycomb*.

Além disso, há um aspecto desafiador neste trabalho, pois trata de um assunto não explorado no curso de graduação em engenharia mecânica. É comum em problemas de mecânica estrutural, abordados ao longo do curso, a adoção das hipóteses de forças estáticas e deformações elásticas, não aplicáveis a situações de impacto inelástico. De forma complementar, o uso de uma ferramenta computacional de elementos finitos amplia a capacidade de análise de problemas em mecânica estrutural.

1.5 CONTEÚDO DO TRABALHO

O trabalho é composto por cinco capítulos, dentre os quais o presente trata da introdução ao tema do projeto, uma breve contextualização, os objetivos principais e secundários e as justificativas encontradas para a realização do estudo.

O segundo capítulo trata primeiramente de uma revisão de conceitos gerais sobre impacto, com a apresentação dos parâmetros utilizados para medir a capacidade de absorção de energia de um material e/ou estrutura. Em seguida, são apresentadas as estruturas *honeycomb*, abordando suas principais características, aplicações e breve descrição dos métodos de fabricação. Os dois conceitos são então mesclados em um tópico sobre impacto em estruturas *honeycomb* e, por fim, apresenta-se estudos relevantes, encontrados na literatura, para a realização desse trabalho.

O terceiro capítulo trata da metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho e, principalmente, das etapas e parâmetros utilizados em cada uma das simulações realizadas durante a elaboração do estudo. Esse capítulo é dividido em duas partes principais: metodologia de simulação de células tubulares e metodologia de simulação de estruturas *honeycomb*. Em ambas as partes é abordada a forma utilizada para validação do modelo numérico desenvolvido e para a extração da curva

característica do fenômeno de flambagem progressiva dinâmica. Na sequência, são apresentados os dados de entrada das simulações como geometria, materiais e velocidade de impacto.

O quarto capítulo apresenta os resultados encontrados nas simulações e discussões acerca das análises realizadas. Da mesma forma que o capítulo três, há uma divisão em duas partes principais: resultados de simulação de células tubulares e resultados de simulação de estruturas *honeycomb*. Ambas as seções apresentam os resultados das simulações de validação do modelo e de geração da curva característica do fenômeno de flambagem progressiva dinâmica. A seção referente às simulações de células tubulares apresenta um estudo comparativo entre células quadradas e hexagonais. Já a seção com as simulações de estruturas *honeycomb* apresenta um breve estudo a respeito da influência da velocidade de impacto e segue com o estudo da influência da geometria e do material na capacidade de absorver energia dessas estruturas.

No quinto capítulo são mostradas as conclusões acerca dos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS GERAIS SOBRE IMPACTO

O impacto estrutural diz respeito ao comportamento de estruturas sujeitas a forças de contato intensas, que atuam em intervalos curtos de tempo (cargas dinâmicas), produzindo deformações inelásticas (JONES, 2012). A complexidade do estudo do impacto é dada pelo envolvimento de várias formas de energia, como a de deformação do material e perdas em forma de calor e som. Realizando um balanço de energia genérico em uma situação de impacto obtém-se

$$E_{potencial,i} + E_{cinética,i} = E_{potencial,f} + E_{cinética,f} + E_{deformação} + E_{dissipada}, \quad (1)$$

onde os termos do lado esquerdo da equação referem-se a energia dos corpos antes da colisão, assim como os dois primeiros termos do lado direito tratam das energias após o impacto, e os últimos termos se referem à parcela absorvida pelos corpos na forma de deformação plástica e a parcela dissipada em forma de calor e som.

Na indústria metal mecânica existem várias situações em que as energias cinética e potencial dos corpos pós impacto devem ser minimizadas, ou até anuladas. Por exemplo, na aeronáutica e automobilística, espera-se que a carcaça dos veículos absorva a maior parte da energia de uma colisão, diminuindo a energia transferida para os passageiros; na aeroespacial e na geração de energia, espera-se que colisões danifiquem os sistemas apenas localmente, sem propagação dos danos; entre outros. Para que isso seja possível, a energia inicial do sistema deve ser totalmente transformada em energia de deformação e/ou dissipada na forma de calor e som. É justamente por esse motivo que materiais com grande capacidade de absorção de energia em forma de deformação têm sido desenvolvidos.

A propriedade que determina a capacidade do material de absorver energia e deformar plasticamente antes de romper é chamada tenacidade. Para situações de baixas taxas de deformação, a tenacidade pode ser medida como a área sob a curva tensão-deformação de um ensaio de tração uniaxial (figura 2) até o ponto de ruptura, em unidades de energia por volume de material (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

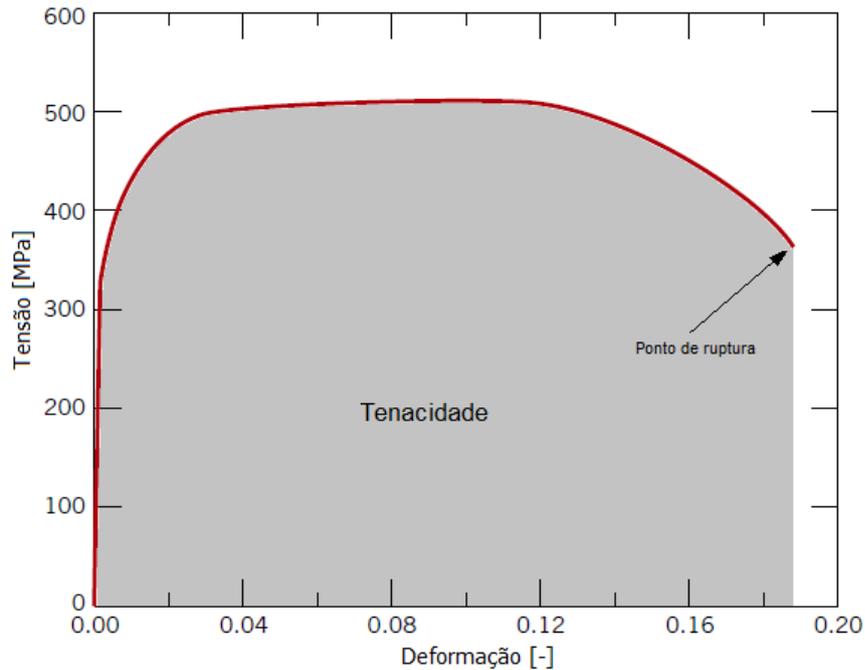


Figura 2 - Curva tensão-deformação de uma liga de aço
 Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2009)

Entretanto, a capacidade de um material ou estrutura de absorver energia de impacto é mais comumente medida pela energia absorvida específica (EAE). A energia total absorvida E_A pode ser obtida como a integral da curva força-deslocamento

$$E_A = \int F(z) dz, \quad (2)$$

onde dz é o diferencial de deslocamento na região de referência e $F(z)$ é a força aplicada em um determinado comprimento de deslocamento z . Então, a energia absorvida específica (EAE), medida em kJ/kg, é definida como a razão dessa energia pela massa do corpo de prova do material (ROMERA *et al.*, 2014)

$$EAE = \frac{E_A}{m}. \quad (3)$$

Esse parâmetro é um dos mais importantes em projetos que tem como objetivo, além da absorção de energia, a minimização de massa (MERAN; TOPRAK; MUGAN, 2014).

É importante também, em aplicações de colisão, quantificar a força máxima obtida na curva força-deslocamento, pois o material retorna a maior parte dessa força elasticamente na forma de energia cinética e/ou potencial, situação bastante indesejada na maioria das aplicações. Uma forma de medi-la é através da eficiência da força de esmagamento (EFE), dada pela razão entre a força média atuante na colisão (P_m) e a força máxima ($P_{m\acute{a}x}$),

$$EFE = \frac{P_m}{P_{m\acute{a}x}} . \quad (4)$$

Quanto maior a EFE , melhor é a capacidade de absorção de energia da estrutura. Uma EFE baixa indica um grande pico de força (ISAAC; OLUWOLE, 2015). Além da curva força-deslocamento utilizada para a obtenção das propriedades apresentadas, em situações de impacto também é interessante observar a curva de velocidade de impacto por deslocamento do meio absorvedor.

Para que um material seja tenaz (e conseqüentemente tenha alta EAE), ele deve combinar altas tensões de resistência com alta ductilidade (capacidade de se deformar plasticamente até a fratura) (CALLISTER; RETHWISCH, 2009). Um material dificilmente alia essas duas características. O alumínio e o aço doce são bastante dúcteis em condições normais de temperatura e pressão, mas possuem resistências à tração baixas para a maioria das aplicações. Para suprir essa lacuna, são desenvolvidos materiais compósitos, que combinam fibras de alta resistência com resinas tenazes.

Outra solução para essa união de propriedades é a utilização de materiais “sanduíche” (figura 3) que combinam duas lâminas de alta resistência com um núcleo de material e/ou estrutura dúctil. As lâminas resistem principalmente a cargas de tração e de compressão, enquanto que o núcleo resiste a cargas transversais de cisalhamento, concedendo ao painel uma rigidez de flexão específica elevada, além da alta capacidade de absorção de impacto (ASPRONE *et al.*, 2013). Os dois tipos mais comuns de materiais “sanduíche” para aplicações de impacto são os de núcleo celular de geometria hexagonal (*honeycomb*) e quadrada (VINSON, 1999).

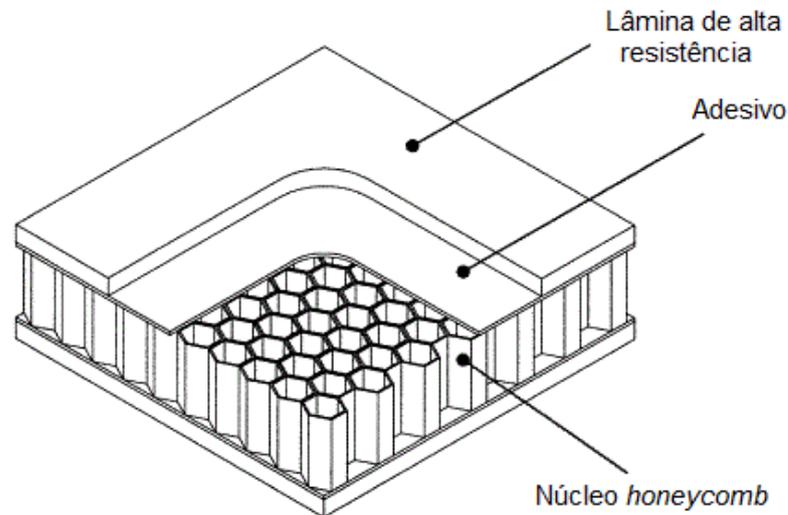


Figura 3 - Material “sanduíche” de núcleo *honeycomb*
 Fonte: Adaptado de Krayden (2017)

2.2 ESTRUTURAS TIPO *HONEYCOMB*

O *honeycomb* consiste de uma sequência de células, formadas por lâminas de material de pequena espessura unidas umas às outras. As geometrias formadas são hexagonais, semelhantes às colmeias de abelha encontradas na natureza. Os primeiros usos para esse tipo de estrutura foram em ornamentos de papel fabricados pelos chineses há cerca de 2000 anos (Bitzer, 1997). Porém, como material estrutural, as cadeias celulares se apresentaram como núcleo de estruturas “sanduíche” apenas por volta de 1845, em aplicações como: construção de pontes de núcleo tubular, móveis, entre outros. Foi somente ao fim da Segunda Guerra Mundial que a tecnologia de adesivos permitiu a produção do *honeycomb* inteiramente de alumínio.

Devido às características de alta absorção de impacto e baixo peso desse tipo de material, segundo Bitzer (1997), a grande maioria das aeronaves modernas voando atualmente possuem componentes *honeycomb* em suas bordas de asa, *flaps*, aerofólios, elevadores, assoalhos, painéis laterais, entre outros. Além da indústria aeronáutica, o *honeycomb* possui aplicações na área automobilística, como por exemplo no moderno BMW i3 (figura 4), carro elétrico fabricado em compósito de fibra de carbono e *honeycomb* nas longarinas para a absorção de impacto. A estrutura *honeycomb* também está presente em carros de corrida, equipamentos esportivos e militares, cascos de navio, trens bala, veículos espaciais, na construção civil, entre outros.



Figura 4 - Longarina do BMW i3 com *honeycomb*

Fonte: Markus (2013)

A tecnologia atual permite desenvolvimento de estruturas *honeycomb* para atender a diversas especificações. A seleção envolve propriedades mecânicas e resistências específicas como à umidade, temperatura e impacto. Para aplicações estruturais, em geral é utilizado o *honeycomb* metálico de alumínio ou o não-metálico Nomex® (fibra de aramida em resina fenólica curada a quente).

Os processos de fabricação de *honeycomb* comerciais mais comuns são os de expansão e corrugação (figura 5). O primeiro consiste no empilhamento de folhas de material que são aderidas em faixas lineares. Em seguida, o aglomerado é cortado em blocos e expandidos por tração, tomando assim o formato de cadeia hexagonal conhecido. Já no segundo método, o material passa por rolos corrugadores e as folhas conformadas são empilhadas e intercaladas com material adesivo que será curado em forno. Esse método é trabalhoso e, portanto, mais caro, contudo permite a fabricação de estruturas com maior densidade de células. Em ambos os processos, os lados dos hexágonos que ligam uma lâmina a outra constituem paredes de espessura dupla (duas vezes a espessura da folha) ligadas por uma cola de resistência diferente do material.

A manufatura dos *honeycomb* metálico e não-metálico se difere quanto à maneira que a geometria final é alcançada. Núcleos metálicos mantêm a forma expandida por deformação plástica nas regiões não aderidas. Os filmes não metálicos, porém, necessitam ser mergulhados em resina (usualmente fenólica ou de poliamida),

passando por sucessivos períodos de banho e cura em forno até que a densidade final é obtida e a forma determinada (ASPRONE *et al.*, 2013).

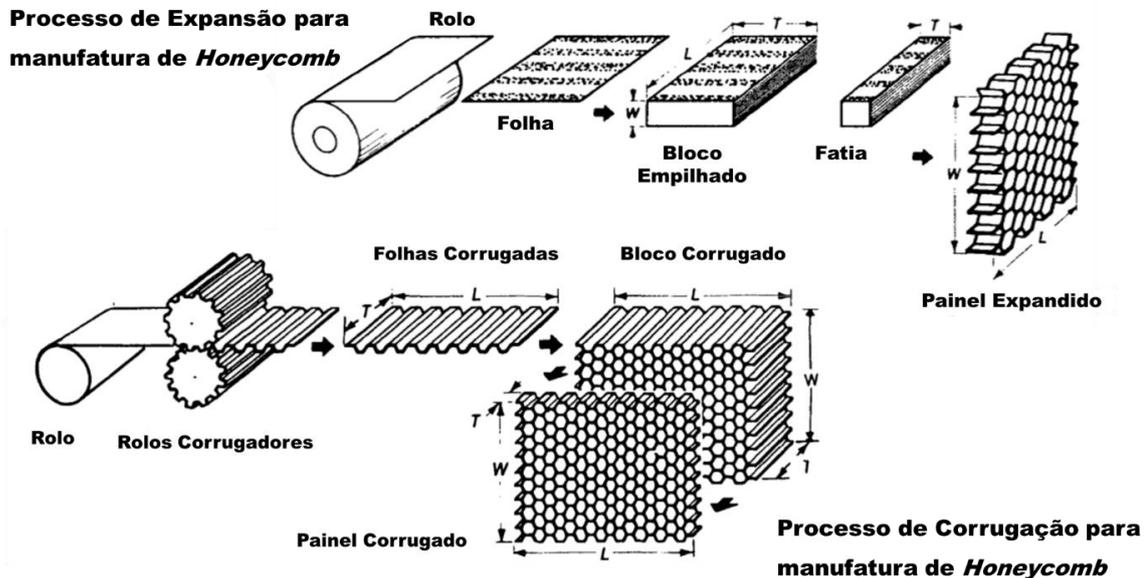


Figura 5 - Processos de fabricação de estruturas honeycomb

Fonte: Adaptado de Bitzer (1997)

2.3 IMPACTO EM ESTRUTURAS HONEYCOMB

O que confere tenacidade aos materiais “sanduíche” é o seu mecanismo de deformação e colapso do núcleo celular. Para entender esse fenômeno, inicia-se o estudo com uma única célula (tubo de paredes finas) e, posteriormente, expande-se para uma estrutura com várias células.

Quando submetidas a carregamento compressivo axial, as estruturas são submetidas a um processo de deflexão lateral instável, conhecido como flambagem. Esse fenômeno é causado por defeitos na microestrutura do material, imperfeições na geometria, por uma pequena excentricidade na aplicação da carga ou ainda pela ação de uma força lateral mínima. Na maioria dos projetos estruturais, a flambagem deve ser evitada. Entretanto, para aplicações de impacto, esse fenômeno é um meio bastante eficiente de absorção de energia de deformação (AUERSVALDT, 2014).

O desenvolvimento de absorvedores de impacto otimizados utiliza como base o mecanismo da flambagem progressiva. Esse fenômeno é caracterizado por uma sequência de dobras, resultantes de flambagens localizadas, que se formam progressivamente com o tempo devido ao surgimento de um momento fletor

localizado (JONES, 2012). A curva força-deslocamento é uma ferramenta útil para avaliar o comportamento ao impacto de uma estrutura celular em uma situação de esmagamento. A partir dela é possível identificar as forças máxima e média presentes no esmagamento da estrutura (MERAN; TOPRAK; MUGAN, 2014).

Por exemplo, na curva força-deslocamento resultante da aplicação de uma carga de impacto compressiva em um tubo circular (figura 6), observa-se que inicialmente a estrutura apresenta comportamento elástico e a força aumenta de maneira estável até seu valor máximo ($P_{m\acute{a}x}$), representado pelo ponto A, seguida de uma rápida diminuição de força, até a formação da primeira dobra (ponto B). Em seguida, a fase de pós-flambagem se desenvolve em picos secundários, que estão diretamente relacionados com a formação das dobras sucessivas, à medida que o esmagamento avança (figura 7). Os picos secundários de força têm valores significativamente menores quando comparados ao pico inicial (MERAN; TOPRAK; MUGAN, 2014). O valor $P_{m\acute{a}x}$ representa a força máxima ao esmagamento da célula, enquanto o valor médio dos picos secundários (P_m) corresponde ao valor médio ao esmagamento. Esse comportamento é observado de forma semelhante em outras geometrias celulares.

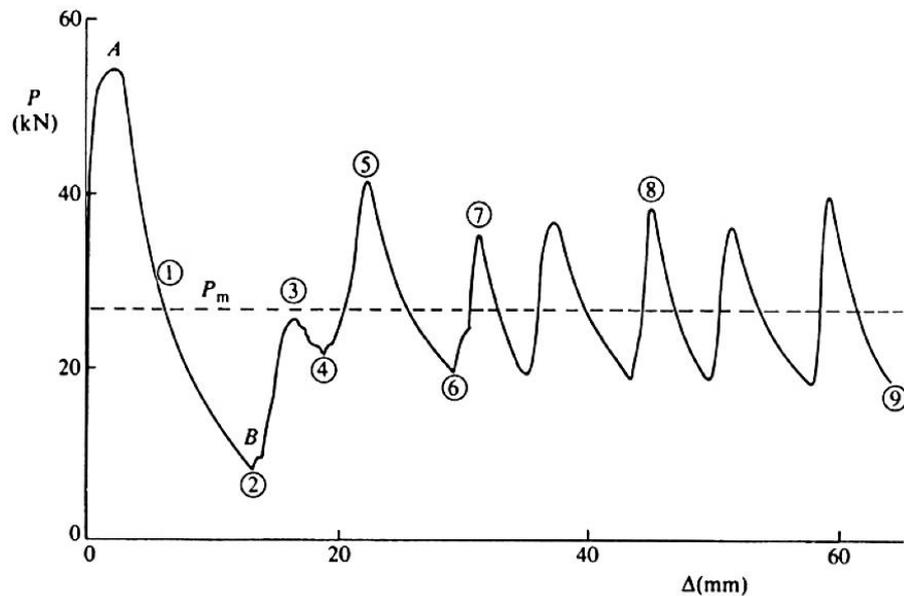


Figura 6 - Curva força-deslocamento característica de uma célula submetida à carga de impacto
Forte: Adaptado de Jones (2012)

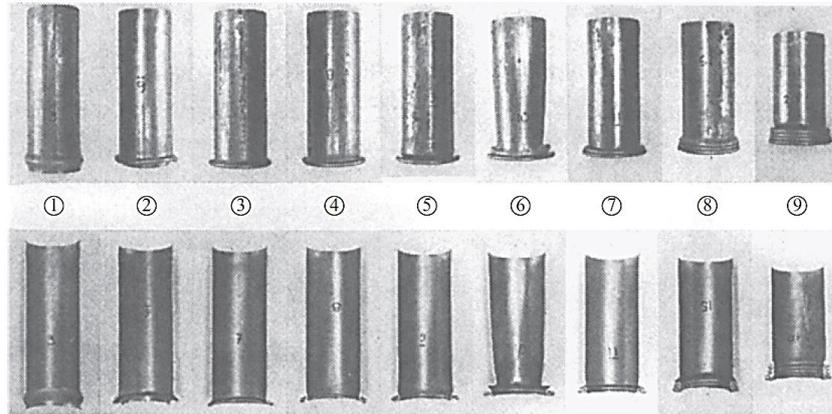


Figura 7 - Formação das dobras sucessivas.
As imagens referem-se aos pontos 1 a 9 da figura 6
Forte: Adaptado de Jones (2012)

Com a presença de mais células na estrutura fica mais difícil observar na curva força-deslocamento cada uma das dobras da flambagem progressiva. Diferentemente do que se observa em uma única célula, a presença de paredes duplas nas estruturas *honeycomb* torna o material anisotrópico em uma das direções principais (Wilbert *et. al*, 2011). Consequentemente, as dobras não ocorrem de forma simétrica, como em tubos circulares. Com exceção disso, as curvas para uma célula e uma estrutura celular são bastantes semelhantes.

Karman e Solmaz (2010) descrevem quatro regiões na curva força-deslocamento de uma estrutura *honeycomb* (figura 8): (I) região de flambagem linear, que se mantém até a força máxima; (II) região de queda brusca da força e início das deformações plásticas (dobras); (III) região em que as forças de esmagamento permanecem aproximadamente constantes enquanto o material se deforma plasticamente; (IV) região na qual o material se densifica por completo e as forças de compressão voltam a aumentar.

2.4 ESTUDOS ANTERIORES

Os primeiros estudos sobre as estruturas *honeycomb* em aplicações de impacto são da década de 1960, quando a NASA investigou o fenômeno de pós-flambagem de estruturas celulares hexagonais. Desde então, esse material tem sido bastante analisado, tanto teoricamente como experimentalmente, provando ser uma

ótima solução para alta capacidade de absorção de impacto associada a baixa massa (ROMERA *et al.*, 2014).

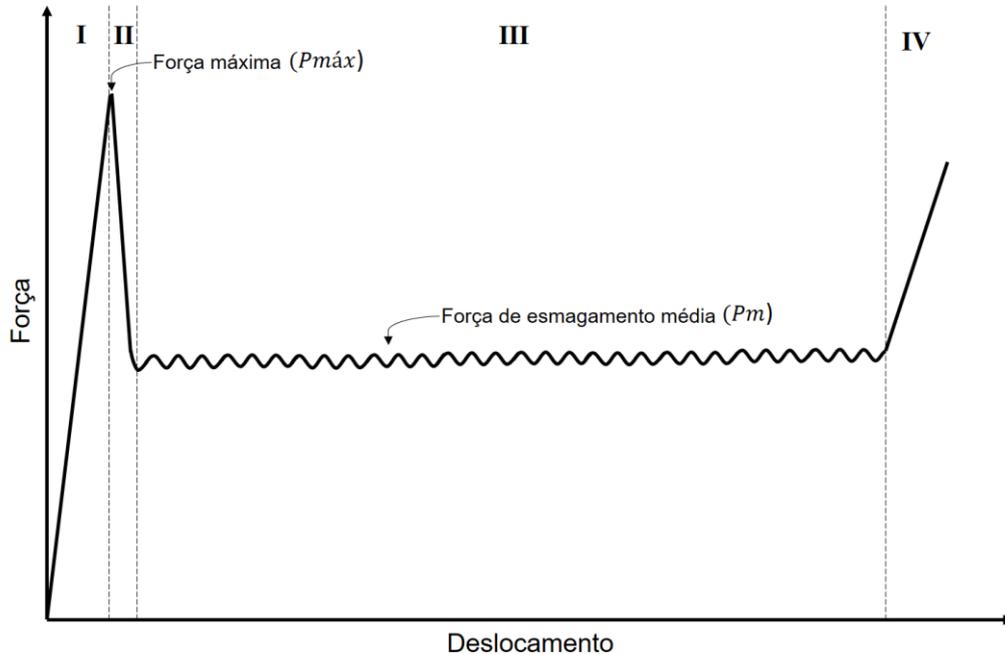


Figura 8 - Curva força-deslocamento característica de um material celular submetido à carga de impacto
 Forte: Adaptado de Bitzer (1997)

A capacidade de absorção de energia por deformação no impacto é fortemente influenciada pelo material constituinte, pela configuração geométrica da célula hexagonal e pela velocidade inicial de impacto. Tais parâmetros são estudados por vários pesquisadores por meio de análises experimental e numérica.

Wu e Jiang (1997) investiga experimentalmente a resposta ao impacto de estruturas *honeycomb* considerando efeitos da dimensão e número de células, rigidez dos materiais e velocidade inicial de impacto. Para isso, consideram células hexagonais de 3,2 e 4,7 mm de comprimento, em estruturas de 10, 19 e 23 células, fabricadas nas ligas de alumínio Al 5052 e Al 5056 e submetidas a impactos de com velocidades iniciais entre 10 e 30 m/s. A recomendação final dos pesquisadores é utilizar células menores e em maior número, fabricadas em material de maior resistência mecânica¹ para uma maior absorção de energia por deformação. Além

¹ Importante ressaltar que os resultados para um melhor desempenho ao impacto apontam para um material de maior resistência mecânica, porém sem deixar de ser dúctil nas condições normais de temperatura e pressão, pois trata-se de ligas de alumínio.

disso, nota-se em seus resultados uma relação diretamente proporcional entre a velocidade inicial de impacto e a força máxima de esmagamento das estruturas.

Bitzer (1997) também realiza estudos experimentais em diferentes densidades de células, quatro ligas de alumínio e quatro materiais compósitos submetidos a várias velocidades de impacto. Mais uma vez fica claro que quanto maior a densidade de células e resistência do material constituinte, maior a capacidade de absorção de energia da estrutura. Além disso, ainda segundo Bitzer (1997), essa relação é linear. Os estudos de velocidade apontam que a força máxima de esmagamento pode aumentar até 30% com aumento de 150 m/s na velocidade de impacto (figura 9). Bitzer ainda conclui que as estruturas *honeycomb* tem uma das maiores relações força de esmagamento - peso conhecidas.

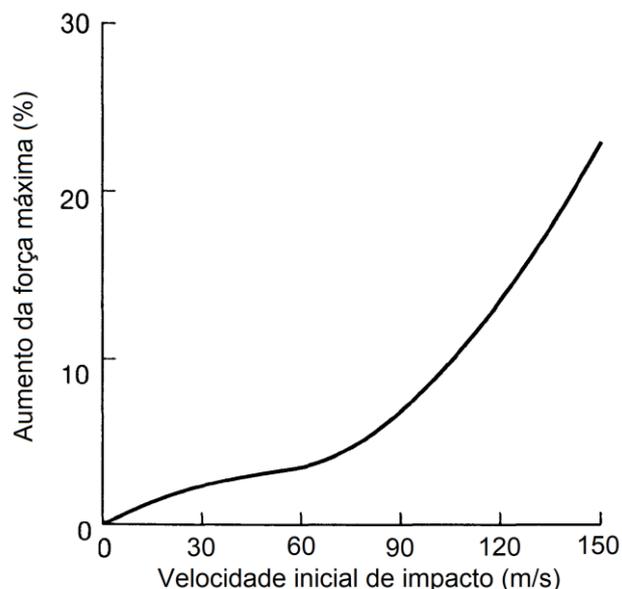


Figura 9 - Relação entre força máxima e velocidade inicial de impacto
Forte: Adaptado de Bitzer (1997)

Yamashita e Gotoh (2005) analisa experimentalmente e numericamente a influência do ângulo interno e da espessura da parede sobre o comportamento em impacto de estruturas *honeycomb*. Em simulações numéricas, usando um único modelo de coluna em "Y", os autores mostram que a energia de esmagamento por unidade de massa atinge o maior valor quando a forma da célula é um hexágono regular (ângulo interno igual a 120°). Além disso, verificam também que a irregularidade no padrão de dobramento se torna mais notável para espessuras menores de folha.

Zhang e Ashby (1991) mostra que o comportamento ao impacto de uma estrutura *honeycomb* é geralmente independente da altura das células e altamente sensível à densidade do material. Meran, Toprak e Mugan (2014) conduz um estudo para investigar os efeitos de diversos parâmetros sobre as propriedades de resistência ao impacto de estruturas *honeycomb*. Uma série de modelos com diferentes combinações de tamanho e número de células é criada com espessura de folha ajustados de tal forma que a massa total seja mantida constante. Seus resultados mostram que o modelo de maior densidade de células (por consequência, menor tamanho de lado e espessura de folha) absorvem maior quantidade de energia ao deformar. Os autores também avaliam a influência da velocidade e da massa de impacto. Para velocidades de impacto maiores, maiores energias específicas são absorvidas e para massas de impacto maiores, maiores distâncias de amassamento são atingidas.

Deqiang *et al.* (2010) realiza um extenso estudo numérico a respeito da influência da velocidade de impacto na resposta ao impacto das estruturas *honeycomb*. Conclui que a velocidade de impacto influencia diretamente na força máxima de resistência das estruturas em diversas geometrias de célula, mas que sua influência é bastante reduzida na força média.

O conhecimento das propriedades do material constituinte e da sensibilidade das estruturas *honeycomb* a diferentes tipos de defeitos também são fundamentais para o desenvolvimento de um modelo numérico capaz de captar o comportamento de tais estruturas, incluindo o limite de flambagem e o mecanismo de dobra que ocorre durante o impacto.

Segundo Auersvaldt (2014), a etapa de compressão linear da estrutura absorvedora de impacto é responsável por uma parcela da absorção de energia e exerce uma influência sobre o modo de flambagem posterior, pois a deformação elástica sofrida nesta etapa altera as condições iniciais do fenômeno subsequente. Com esse fato, o autor justifica a influência da tensão de escoamento do material na formação do modo de flambagem, uma vez que a tensão de escoamento é diretamente proporcional à capacidade de absorção de energia do tubo na fase de compressão inicial (força máxima). Kaman e Solmaz (2010) também relaciona o módulo de elasticidade com o crescimento do pico de força. Por exemplo, uma estrutura fabricada em Nomex® apresenta maior resistência a flambagem do que uma estrutura em alumínio. Entretanto, outros trabalhos tais como Aktay, Johnson e Kröplin

(2007), observa que o material Nomex®, por ser mais frágil que o alumínio, apresenta desempenho inferior no fenômeno de flambagem progressiva dinâmica.

É praticamente consenso entre autores que estudam materiais metálicos para a fabricação de estruturas *honeycomb* que o alumínio é bastante adequado, devido à sua baixa densidade e alta ductilidade, o que o torna capaz de absorver energia com massa razoável. Romera *et al.* (2014) ainda propõe o preenchimento das células de alumínio com espumas artificiais, o que combina o colapso estável das espumas com a ductilidade do alumínio.

As propriedades de muitos materiais em condições de carga dinâmica são diferentes dos valores estáticos correspondentes. Em particular, a relação tensão-deformação é sensível à velocidade de ensaio (taxa de deformação). Maiores taxas de deformação afetam a resistência final da estrutura, aumentando a tensão de ruptura do material (JONES, 2012). Isso ocorre, pois, os mecanismos de escoamento não conseguem acompanhar a velocidade da deformação total, gerando um intertravamento da estrutura molecular do material, chamado de encruamento. Os aços são materiais sensíveis à taxa de deformação, já o alumínio é capaz de escoar facilmente sob altas taxas de deformação, sem apresentar significativas alterações em suas propriedades mecânicas (SEIFRIED; MINAMOTO; EBERHARD, 2010).

Sabendo disso, a sensibilidade à taxa de deformação do alumínio pode ser desconsiderada (ZHAO; GARY, 1998). Dessa forma, os dados de propriedade obtidos a partir do ensaio de compressão quase estático podem ser utilizados em casos de impacto em ligas de alumínio (YAMASHITA; GOTOH, 2005).

Diferentes tipos de imperfeições e irregularidades afetam a estrutura celular e modificar o seu comportamento mecânico. Segundo Wilbert *et al.* (2011), o processo de conformação realizado na fabricação de estruturas celulares introduz tensões residuais e imperfeições geométricas no material. Os defeitos são responsáveis pelo início do processo de deformação e pela sua propagação e, portanto, influenciam de forma expressiva na resposta da estrutura ao impacto. Vários estudos são realizados abordando essa questão. Um modelo ideal sem imperfeições tende a superestimar as propriedades mecânicas, em particular a força máxima (ASPRONE *et al.*, 2013).

Como consequência da variedade de defeitos que existem numa estrutura real, diferentes métodos são desenvolvidos para incluí-los em modelos numéricos. As imperfeições geométricas são implementadas com base em observações experimentais ou podem ser criadas no modelo por meio de desvios aleatórios nas

posições nodais das malhas, tal como em Asprone *et al.* (2013). Outra técnica utilizada para modelar imperfeições é considerar os modos globais de flambagem linear das células (WIERZBICKI, 1983). O fenômeno de flambagem linear é modelado por um problema de autovalores e autovetores, representado por

$$([K] + \lambda[K_\sigma])\{U\} = \{0\}, \quad (5)$$

onde $[K]$ é a matriz de rigidez do material; λ é o autovalor, que representa a relação entre carga de flambagem e a carga aplicada; $[K_\sigma]$ é a matriz de rigidez geométrica, que depende das tensões atuantes; $\{U\}$ é o autovetor, que descreve o modo de flambagem. Xue e Hutchinson (2006) define autovetores por análise de flambagem quase estática, com o *software* Abaqus/Standard, e aplicam-nos para perturbar a geometria perfeita do *honeycomb* de metal, possibilitando o início dos dobramentos da parede celular. Os autores relataram que a escolha do autovetor dominante e a magnitude da escala utilizada para a perturbação têm uma forte influência na curva força-deslocamento resultante.

Em particular, diferentes imperfeições correspondem a diferentes modos de falha, afetando a assertividade na determinação da rigidez inicial e da carga máxima de compressão. Além disso, a utilização do primeiro autovetor não necessariamente permite descrever todos os tipos de defeitos e pode não ser apropriado quando os materiais constituintes não são homogêneos (ASPRONE *et al.*, 2013).

Para tratar da modelagem do impacto e deformação não-linear, inicialmente são propostas várias abordagens, englobando modelos analíticos, modelos de elementos finitos que adotam formulações analíticas, bem como modelos puramente numéricos. No entanto, os dois primeiros tipos de abordagens apresentam limitações relacionados principalmente com a previsão do comportamento de flambagem progressiva das células hexagonais. Por essas razões, os problemas envolvendo estruturas *honeycomb* são muitas vezes analisados através de modelos numéricos, que tem como base de comparação os testes experimentais (ASPRONE *et al.*, 2013). De fato, métodos numéricos possibilitam a reprodução não apenas do comportamento elástico, mas também do comportamento de esmagamento plástico, caracterizado por mecanismos de dobra complexos.

3 METODOLOGIA

De modo a garantir a progressão adequada do projeto, é adotada uma sequência de trabalho focada nos objetivos principais e secundários propostos. Além das etapas globais do estudo, estão descritos em detalhes os procedimentos metodológicos utilizados na obtenção dos resultados para o caso de geometrias tubulares e para estruturas celulares *honeycomb*.

A sequência do projeto é composta por:

A. Revisão bibliográfica:

Revisão bibliográfica dos principais conceitos sobre estruturas celulares tipo *honeycomb*, bem como seu comportamento sob cargas de impacto.

B. Estudo do *software* Abaqus:

Prática com a ferramenta computacional selecionada para realização das simulações numéricas propostos. Aplicação do *software* para situações de impacto e obtenção de dados a partir dos modelos.

C. Estudo do mecanismo de flambagem progressiva em geometria tubular hexagonal de paredes finas:

Aplicação do método de simulação numérica em duas etapas, linear e não linear, para casos de flambagem; Dimensionamento da malha de simulação; Avaliação da curva força-deslocamento da geometria tubular hexagonal resultante da simulação numérica.

D. Avaliação da capacidade de absorção de energia de geometrias tubulares hexagonais e quadradas.

Simulação de impacto em geometrias tubulares de perfil quadrado e perfil hexagonal seguida de uma análise comparativa dos resultados.

E. Obtenção de modelo numérico de *honeycomb* a partir de resultados experimentais:

Validação de modelo de estrutura celular *honeycomb* pela reprodução de resultados experimentais encontrados na literatura. Definição de parâmetros de simulação, condições de contorno e configurações do *software* para simulações subsequentes.

F. Avaliação da influência da velocidade de impacto na resposta das estruturas *honeycomb*:

Simulação do modelo gerado na etapa anterior submetido a diferentes velocidades de impacto.

G. Definição de geometrias e materiais a serem estudados:

Seleção de combinação de parâmetros geométricos das estruturas *honeycomb* de acordo com padrões comerciais. Seleção de três ligas de alumínio comerciais e usuais nessa aplicação com propriedades mecânicas distintas.

H. Modelagem e simulação das geometrias *honeycomb* definidas.

I. Análise comparativa dos resultados obtidos através das simulações numéricas.

3.1 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DE CÉLULAS TUBULARES

3.1.1 Parâmetros da simulação numérica de células tubulares

O *software* comercial de elementos finitos Abaqus² é muito utilizado pelos pesquisadores de materiais compósitos e estruturas “sanduíche” para análise do comportamento estrutural. Por esse motivo ele é utilizado neste estudo para a realização das análises propostas. Segundo Romera (2015), as simulações de modelos numéricos executadas no Abaqus *Explicit* apresentam resultados de

² Abaqus versão 6.14-1

qualidade, mesmo que ocorram grandes deformações plásticas, contato e ruptura. O Abaqus *Explicit* foi utilizado devido a orientações do fabricante do *software* para casos de impacto.

Modelagem, simulação e análise de geometrias tubulares (de uma célula) são úteis para a compreensão dos fenômenos envolvidos antes de haver uma progressão para simulações de geometrias mais complexas como estruturas celulares *honeycomb*. Para isso, uma única célula de perfil hexagonal, com 120° de abertura entre arestas, extrudada por um comprimento de 450 mm é modelada (figura 10). A espessura de parede é 2 mm e a largura de aresta 65,33 mm.

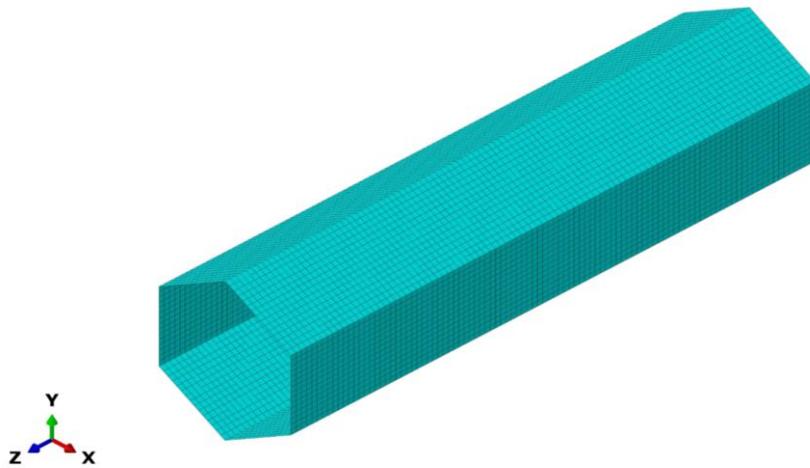


Figura 10 - Célula de estrutura *honeycomb* modelada com elementos de casca

Os parâmetros de entrada para simulações de deflexão envolvem, além da geometria, a definição de propriedades de material, condições de contorno, modo de aplicação de carga (ou deslocamento) e seleção do tipo de elemento finito.

Observa-se na literatura que o alumínio é um material comum em estruturas *honeycomb*, portanto é utilizado nessas simulações. As propriedades mecânicas do material selecionado, a liga de alumínio Al 2024, estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio Al 2024

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	2700	kg/m ³
Módulo de elasticidade	73,1	GPa
Coefficiente de Poisson	0,35	-
Tensão de escoamento	160	MPa
Tensão pós-escoamento (*)	340	MPa

(*) Tensão referente à uma deformação de 0,3%

Fonte: Landgraf (1996)

Para fornecer os resultados desejados, o modelo de elementos finitos deve ser delimitado por condições de contorno adequadas. Nas simulações em questão, a célula tem sua superfície inferior completamente unida à uma placa rígida que se mantém parada. A superfície superior da célula é fixada à uma placa plana rígida que possui translação permitida somente no eixo Z (sentido do comprimento). O movimento de rotação não é permitido em nenhum dos eixos.

A placa superior se desloca verticalmente (ao longo do eixo Z) de maneira quase estática, comprimindo a estrutura celular em 200 mm. A curva força-deslocamento é extraída a partir da força de reação obtida na placa superior, contabilizada a cada incremento de 1 mm deslocado, ao longo de toda a deformação.

Para que o comportamento da estrutura, em particular as forças máximas, obtidas nas simulações não-lineares não sejam superestimadas e se aproximem mais do caso real, imperfeições são aplicadas na malha considerando os modos globais de flambagem linear das células. Para isso, inicialmente é realizada uma análise de flambagem linear sob aplicação de uma carga unitária, utilizando o Abaqus/Standard. Dos resultados dessa análise, selecionam-se os três primeiros autovetores (figura 11), os quais são utilizados para introduzir imperfeições na malha, que auxiliam no início do processo de flambagem. As imperfeições são pequenos deslocamentos nos nós da malha, a uma proporção da espessura de parede. Esses deslocamentos são de 20% da espessura na posição do primeiro autovetor, 10% no segundo e 5% no terceiro, como utilizado em Xue e Hutchinson (2006).

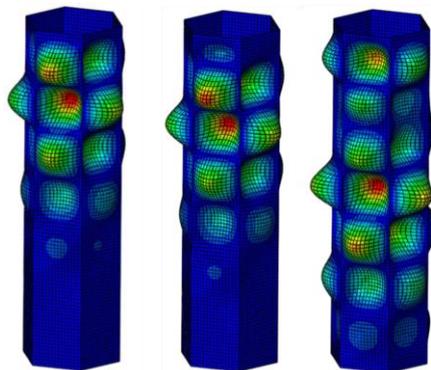


Figura 11 - Representação dos três primeiros modos de flambagem de uma célula hexagonal

O elemento finito utilizado é do tipo casca (*shell*) S4R, apropriado para simulações de geometrias com espessuras finas. Esse tipo de elemento é totalmente

definido por uma superfície média, delimitada por 4 nós com 6 graus de liberdade cada, e por uma espessura. As tensões resultantes no sentido da espessura são insignificantes, portanto desprezadas, dada a baixa proporção desta medida geométrica quando comparada às outras. Para a definição da malha, o Abaqus utiliza um parâmetro adimensional de tamanho global aproximado do elemento (TGA), relacionado com o grau de refinamento da malha. Quanto maior o comprimento global, maiores serão os elementos e menor será o número de elementos por malha. O oposto também é válido.

3.1.2 Dimensionamento da malha de simulação de células tubulares

Como o problema é resolvido utilizando um método numérico, a malha escolhida influencia diretamente nos resultados obtidos. Isso ocorre, pois, as equações que regem o comportamento físico são solucionadas de maneira aproximada. Em geral, quanto mais refinada a malha, mais acurados são os resultados, pois os erros relativos às aproximações são menores. Entretanto, o número de elementos em uma malha influencia diretamente no tempo computacional necessário para a solução do problema. Normalmente procura-se encontrar um equilíbrio entre as duas situações (refino da malha e tempo computacional).

A fim de encontrar essa condição ideal, a estrutura com a célula hexagonal é simulada com cinco malhas diferentes, modificando-se o tamanho global aproximado (TGA) entre os valores 3 e 6. Dessa forma permite, portanto, a definição de um refino de malha adequado para o presente caso.

Além de encontrar uma convergência nos resultados, é importante que o fenômeno da flambagem progressiva seja bem representado pelas simulações. Para isso, é realizada uma análise sobre uma das curvas força-deslocamento geradas pelas simulações, a fim de encontrar seus pontos característicos.

3.1.3 Análise comparativa de células tubulares hexagonais e quadradas

Nas aplicações de material *honeycomb*, encontra-se na literatura que a geometria de célula mais utilizada é a hexagonal apesar da disponibilidade de alternativas mais simples. De modo a confirmar essa tendência, são simuladas duas

células: uma de perfil quadrado e uma de perfil hexagonal perfeito, com dimensões apresentadas na figura 12. Para fins comparativos, a massa total da célula é mantida constante.

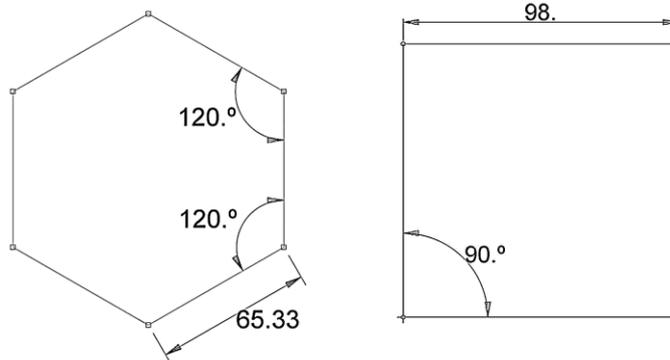


Figura 12 - Geometria da seção transversal das células simuladas

3.2 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS CELULARES *HONEYCOMB*

3.2.1 Criação do modelo de *honeycomb* para simulação de impacto

Yamashita e Gotoh (2005) e Deqiang *et al.* (2010) realizam análises numéricas dinâmicas envolvendo estruturas *honeycomb*, ambos propõem a utilização de uma massa de impacto que atinge uma estrutura com condições de não rotação a uma determinada velocidade inicial que é freada pela colisão. A modelagem do problema de impacto de uma estrutura *honeycomb* utilizado no presente estudo é, portanto, definida a partir das recomendações dessa literatura.

Buscando obter resultados realistas, desenvolve-se um modelo numérico a partir do ensaio mecânico proposto por Yamashita e Gotoh (2005), possibilitando confronto de resultados para verificar a acurácia da simulação numérica. A geometria modelada é exibida ao lado da amostra experimental na figura 13.

A geometria experimental possui 230 células, dispostas em 17 colunas, formando uma área transversal de aproximadamente 150x150 mm². A altura do *honeycomb* é de 150 mm. O tamanho das células é constante e mede $\frac{3}{8}$ de polegada (9,525 mm), sendo esta a medida de um lado a outro de cada célula hexagonal. A estrutura é fabricada em Al 5052, com folhas de espessura 0,066 mm. O procedimento

de fabricação dessas estruturas envolve a adesão das folhas pelas arestas, portanto no modelo computacional as espessuras nas uniões medem 0,132 mm, o equivalente a duas folhas.

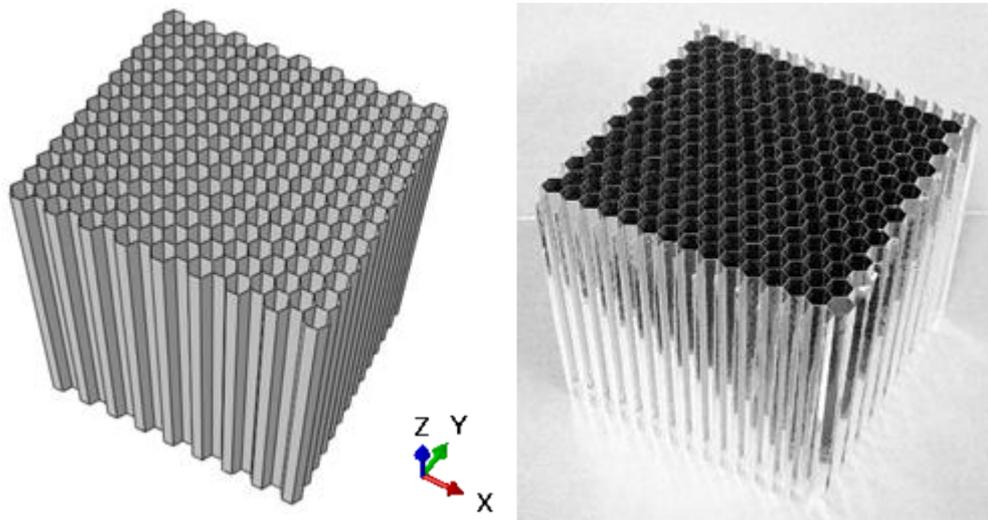


Figura 13 - Estrutura *honeycomb* modelada vs amostra *honeycomb* de Yamashita e Gotoh (2005)

As propriedades do material da amostra utilizadas na simulação estão dispostas na tabela 2. Os dados que compõem a curva tensão-deformação do material são especialmente importantes pois definem o comportamento do material nas regiões elástica e plástica. Vale ressaltar que o alumínio em folha passa por processos de estiramento em sua fabricação e dessa forma apresenta valor relativamente alto de tensão de escoamento e pouca região de deformação plástica. Por isso percebe-se valores de tensão de escoamento próximos da tensão de ruptura.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do material da amostra experimental (A5052)

Material	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Escoamento máximo (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Densidade (kg/m ³)
Al 5052	291	301,0	2,9	72,0	0,34	2700

Fonte: Adaptado de Yamashita e Gotoh (2005)

As condições de contorno simulam uma situação de ensaio de impacto por projeção de uma massa sobre a amostra. A base da estrutura é fixa em uma placa plana, com zero graus de liberdade em sua face inferior evitando deslizamento. A face superior do *honeycomb* possui uma condição de não rotação e tem deslocamento permitido somente no eixo z (da altura). A uma pequena distância, um plano rígido com massa equivalente a 65 kg simula o peso do ensaio mecânico realizado pelos autores. A massa se desloca verticalmente para baixo com uma velocidade inicial de 10 m/s, comprimindo a amostra (figura 14). Aplica-se um coeficiente de atrito entre as paredes para evitar penetração de elementos durante o processo de dobra. Utiliza-se, por recomendação de Yamashita e Gotoh (2005), um coeficiente de atrito para deslizamento de 0,2.

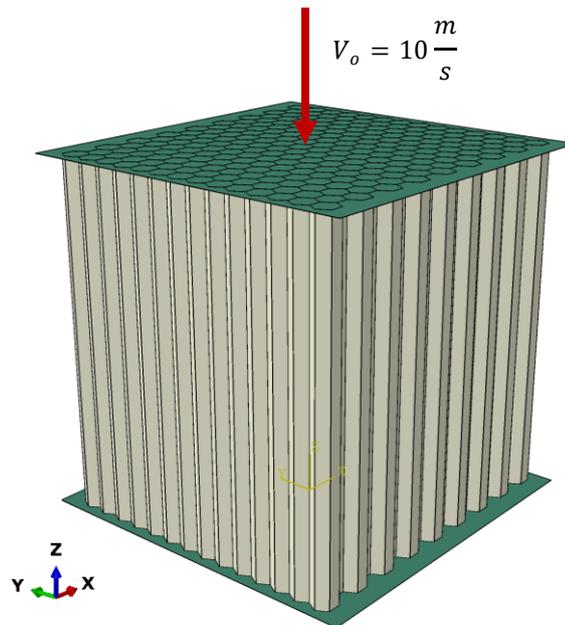


Figura 14 – Modelagem do ensaio de impacto

A criação do modelo é feita com a extensão Abaqus/Explicit adequada para casos dinâmicos sob grandes deformações. A malha é formada de 563.250 elementos de casca quadriláteros S4R (*shell*). Essa quantidade equivale a um nó de malha para cada 1 mm da altura de uma célula do *honeycomb*, totalizando 150 nós em cada aresta da altura.

Os dados extraídos do modelo são tomados a partir da criação de pontos de interesse na malha. Um ponto de referência é criado na placa superior para que sejam monitorados o deslocamento e a velocidade ao longo do tempo de simulação. Na placa inferior outro ponto de referência fornece os dados de reação de força. Além

disso, na fase de pós-processamento é possível verificar visualmente o progresso das deformações geradas pela placa superior. Para comparar os resultados obtidos com os dos autores divide-se a curva força-deslocamento pela área da placa superior ponto a ponto, obtendo assim a curva tensão-deslocamento.

3.2.2 Simulação de *honeycomb* submetido a diferentes velocidades de impacto

Um importante dado de entrada em situações de impacto é a velocidade inicial da colisão. Deseja-se verificar a influência dessa velocidade nas curvas força-deslocamento das estruturas e, conseqüente, na capacidade de absorção de energia. São realizadas simulações com velocidades iniciais equivalentes a 5, 10, 15, 20 e 50 m/s. Os demais parâmetros de simulação utilizados são mantidos do experimento anterior. A partir dos resultados é selecionada a velocidade para a continuidade do trabalho.

3.2.3 Estudo da curva de impacto em uma estrutura *honeycomb*

O fenômeno de impacto em estruturas celulares possui curvas força-deslocamento com regiões típicas bem definidas. Com o objetivo de visualizar todas as regiões, uma simulação de impacto é realizada em um *honeycomb* composto de células de $\frac{3}{4}$ ", fabricado em Al 5056.

Para que seja possível observar a densificação total da estrutura, o tempo de simulação deve ser suficiente para que a placa superior, com velocidade inicial de 15 m/s seja desacelerada completamente. O tempo de simulação é de 7 milissegundos, para essa estrutura.

Vale ressaltar que quanto maior o tempo de simulação, maior o tempo computacional, pois é necessário definir mais pontos de iteração para que a curva gerada tenha resolução satisfatória. Por esse motivo, as demais simulações do estudo possuem tempo de simulação de 3 milissegundos e não chegam a densificação, porém geram dados suficientes para a realização das análises comparativas.

3.2.4 Simulação de diferentes materiais e geometrias em estruturas *honeycomb*

Para atingir o objetivo principal do estudo, a influência de diferentes geometrias e materiais na resposta ao impacto de estruturas tipo *honeycomb* é analisada. Para isso utiliza-se o modelo apresentado nos tópicos anteriores, mantendo as mesmas condições de contorno, elementos de malha e método de simulação. Ao total, nove estruturas são modeladas, combinando três materiais constituintes com três tamanhos de célula distintos.

Os materiais das paredes são folhas de ligas de alumínio: Al 3003, Al 5052 e Al 5056, selecionados devido às distintas propriedades mecânicas e a aplicabilidade comum como núcleos de *honeycomb*, (Bitzer, 1997).

As geometrias escolhidas são encontradas em catálogos comerciais de *honeycomb*: $\frac{1}{2}$ polegada, $\frac{1}{4}$ de polegada e $\frac{3}{8}$ de polegada. Calcula-se o número de células que compõe cada estrutura de diferentes tamanhos de célula, de modo a atingir o melhor aproveitamento da área de impacto delimitada pela placa superior ($150 \times 150 \text{ mm}^2$). Os perfis das geometrias simuladas estão dispostos na figura 15, onde S equivale ao tamanho de célula e t à espessura de folha. A altura das amostras é de 100 mm, medida suficiente para a realização do estudo comparativo e observação dos fenômenos de absorção de impacto sem o acréscimo desnecessário de tempo computacional.

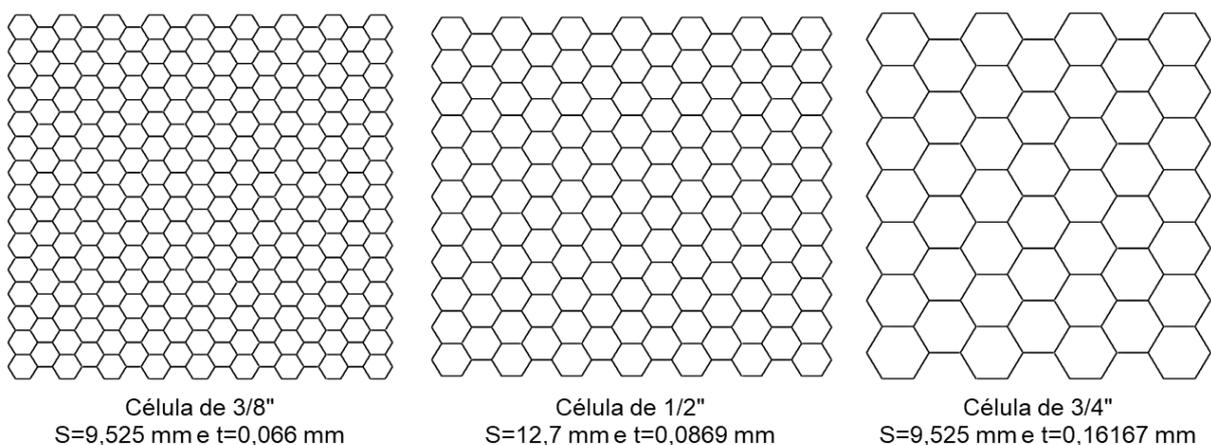


Figura 15 - Geometrias *honeycomb* de diferentes densidades de célula utilizadas nas simulações

Para que a análise comparativa seja possível, a massa total das estruturas de mesma geometria é mantida constante pela variação da espessura da folha,

compensando a quantidade distinta de paredes que compõe cada estrutura. As massas totais dos modelos assim como as propriedades mecânicas dos materiais estão dispostas na tabela 3. Devido à proximidade das densidades dos materiais, a massa de todas as estruturas pode ser considerada aproximadamente constante.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos materiais dos modelos de *honeycomb*.

Material	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação máxima (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Densidade (kg/m ³)	Massa (kg)
Al 3003	220	250	3,5	69,0	0,33	2730	0,106
Al 5052	325	330	4,0	70,0	0,33	2680	0,104
Al 5056	435	450	3,5	72,0	0,33	2640	0,102

Fonte: Metals Handbook (1990)

Os dados obtidos das simulações são utilizados para calcular os parâmetros de avaliação da capacidade de absorção de impacto (força máxima, força média, EAE e EFE, conforme apresentado na seção 2.1).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SIMULAÇÕES DE CÉLULAS TUBULARES

4.1.1 Dimensionamento da malha de simulação

A análise de influência da malha nos resultados de simulação de células tubulares é realizada para um grau de refino definido por TGA 6 a TGA 3,5; sendo o primeiro referente a malha mais grosseira e o segundo a mais refinada.

O número de elementos total da malha para cada TGA, assim como os tempos computacionais requeridos para as simulações, se encontram na tabela 4. Nessa tabela, os tempos computacionais são normalizados em relação ao tempo de simulação do modelo com a malha TGA 4,5.

Tabela 4 - Número de elementos finitos da malha e tempo computacional relativo

TGA	Nº de elementos	Tempo computacional relativo (*)
3,5	14706	1,5
4,0	10848	1,2
4,5	9000	1
5,0	7020	0,8
6,0	4950	0,8

(*) Normalizado em relação ao tempo TGA 4,5.

De cada simulação, são extraídas as curvas força-deslocamento, apresentadas na figura 16. É possível observar na figura que a força máxima não sofre influência do tamanho dos elementos. Isso ocorre devido a linearidade do modelo que representa o fenômeno físico até esse ponto (deformações elásticas). Após esse ponto, na região não-linear de deformações plásticas, é evidente a influência do refinamento das malhas. As malhas de TGA 3,5; 4 e 4,5 resultam em curvas praticamente sobrepostas, enquanto que as malhas de TGA 5 e 6 apresentam discrepâncias maiores em relação às outras.

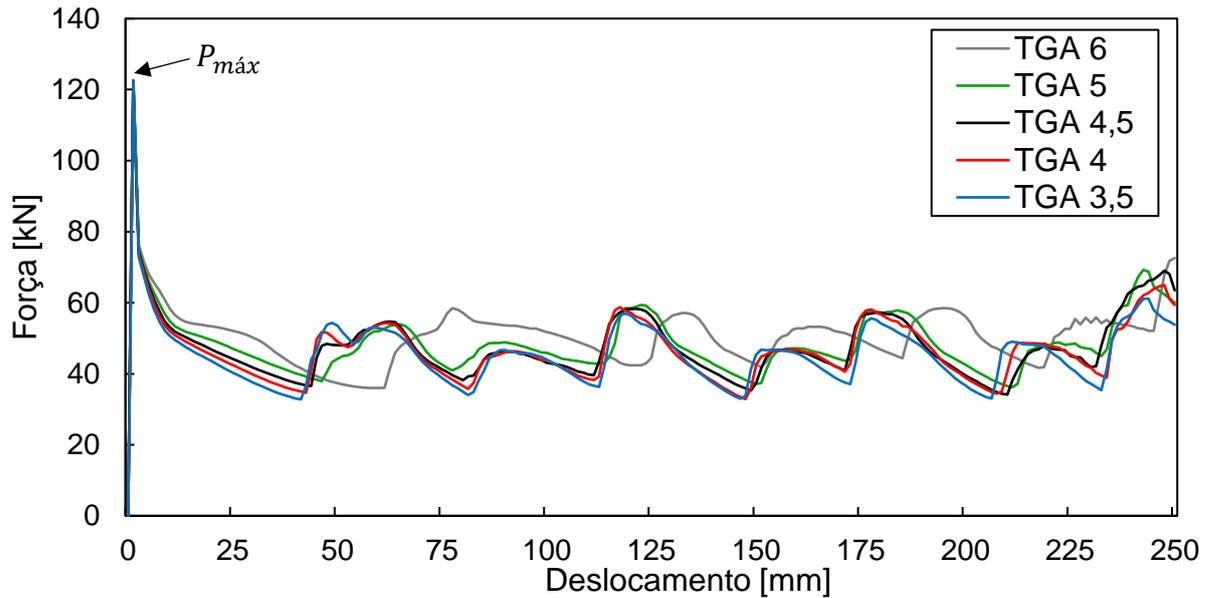


Figura 16 - Curva força-deslocamento de uma célula hexagonal com cinco refinamentos diferentes de malha

Como o aumento dos tempos computacionais é bastante expressivo comparado com a diferença dos resultados das malhas de TGA 3,5; 4 e 4,5; a malha de TGA 4,5 é considerada adequada para as simulações. Todas as simulações de estruturas tubulares utilizam, portanto, essa malha.

4.1.2 Estudo da curva força-deslocamento em células tubulares

A figura 17 apresenta a curva força-deslocamento resultante do fenômeno de impacto em células tubulares e, em cada estágio da curva, mostra a forma deformada da célula simulada. Em A, a célula está sendo deformada elasticamente e a força aumenta linearmente; em B a célula inicia a primeira flambagem localizada, com deformação plástica³, causando uma queda brusca na força e começando o processo de formação da primeira dobra; em C a primeira dobra está completamente formada e a força torna a subir; em D uma nova flambagem localizada se forma, voltando a diminuir a força. Esse processo se mantém de forma praticamente cíclica até que toda a coluna se densifica e a força da célula volta a subir, como representado em E. Essa curva é bastante semelhante àquela apresentada por Jones (2012), o que indica que

³ Para prever o início do escoamento no modelo numérico é utilizado o critério de von Mises.

o fenômeno de impacto em células tubulares está sendo bem representado pelas simulações numéricas.

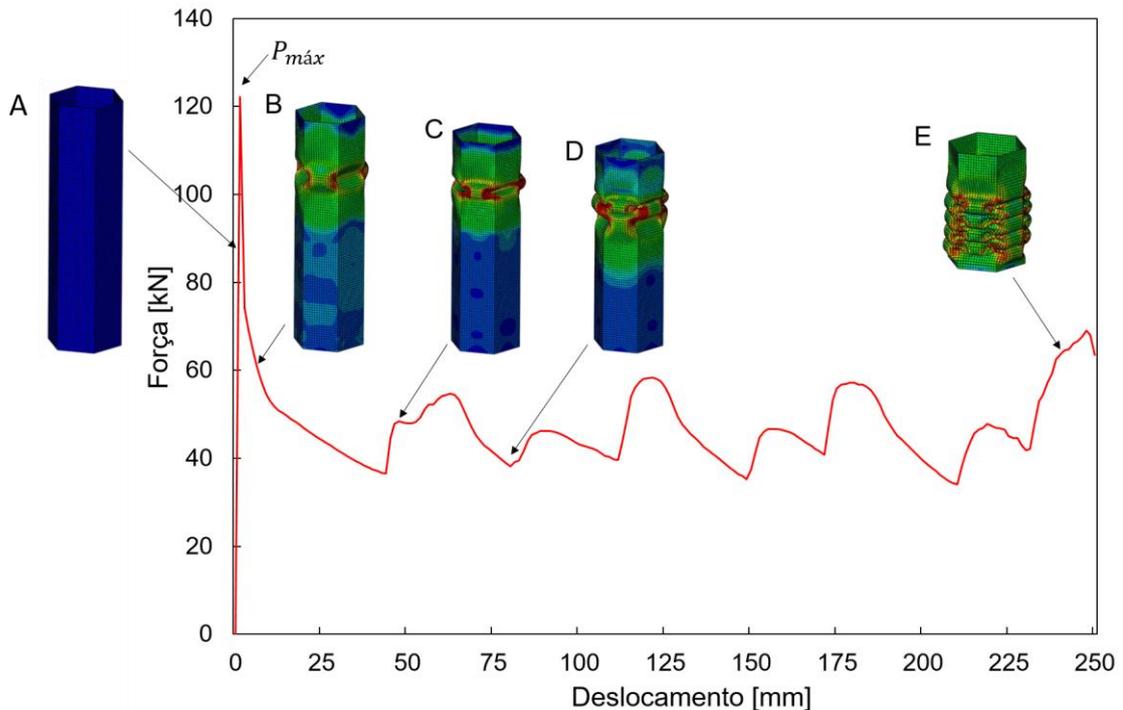


Figura 17 - Forma deformada da célula hexagonal ao longo da curva força-deslocamento

4.1.3 Análise comparativa de células tubulares hexagonal e quadrada

A partir das simulações são obtidos os dados necessários para a realização das análises. É possível observar nos gráficos força-deslocamento e energia total absorvida (figuras 18 e 19) que a célula de perfil hexagonal absorve 47% mais energia do que a célula quadrada. Essa diferença provém, em grande parte, do número de dobras formadas durante o amassamento: enquanto a geometria quadrada dobra cinco vezes, a hexagonal dobra oito vezes até a total condensação (figura 20).

Os valores de eficiência da força de esmagamento (*EFE*) calculados são 0,39 para a geometria hexagonal e 0,42 para a quadrada. Apesar da geometria quadrada apresentar resultados mais favorável neste critério, a diferença entre eles é de apenas 8%, valor pequeno quando comparado com a diferença na capacidade de absorção de energia. Em suma, com a seção hexagonal, perde-se um pouco no critério de baixar o pico de força, mas ganha-se muito em absorção de energia.

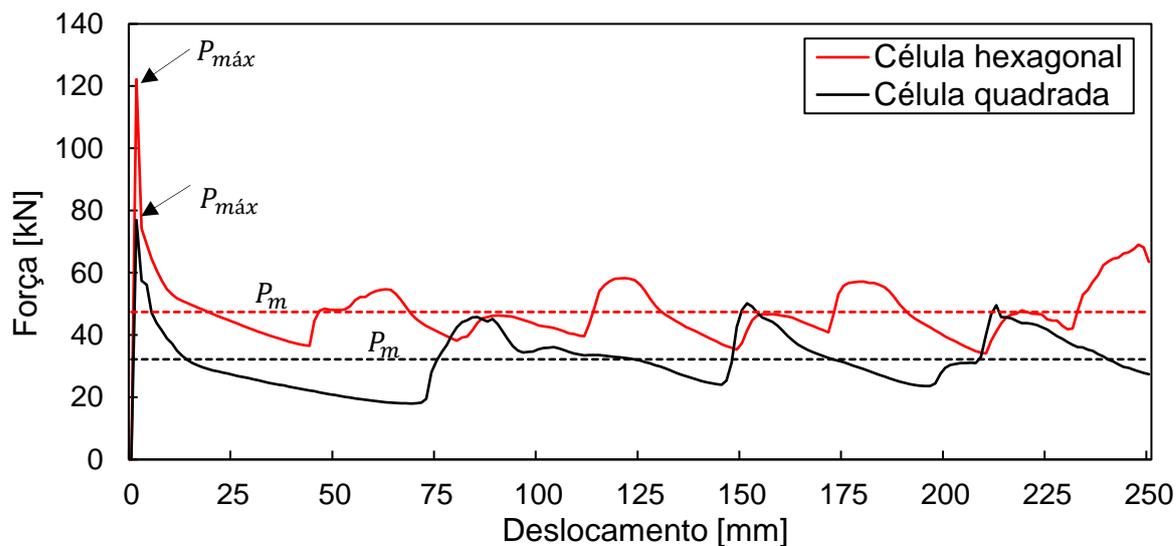


Figura 18 - Curva força-deslocamento das células hexagonal e quadrada

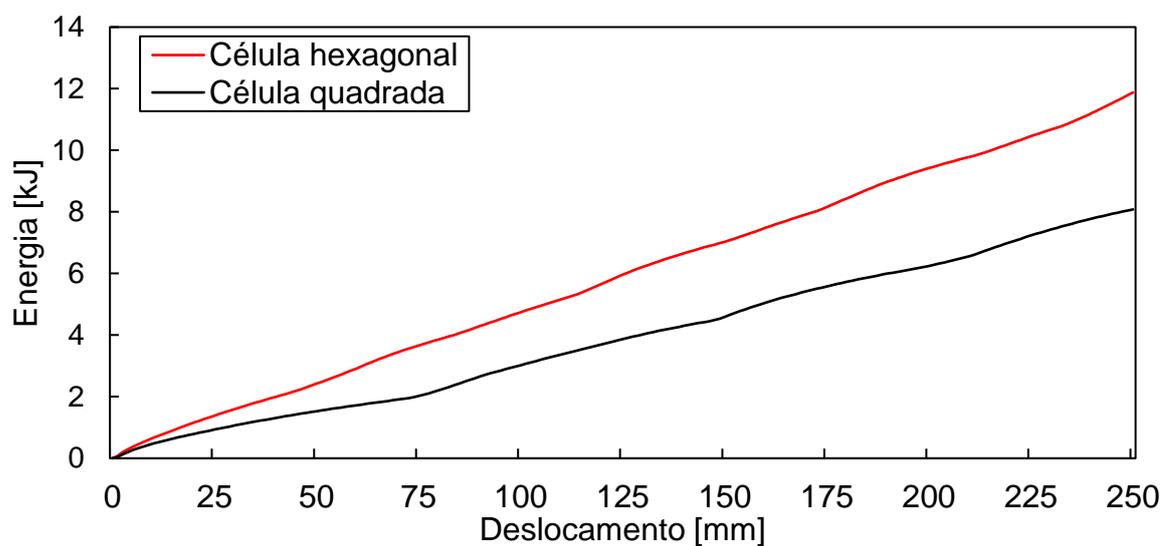


Figura 19 - Energia absorvida, em função do deslocamento, pelas células hexagonal e quadrada

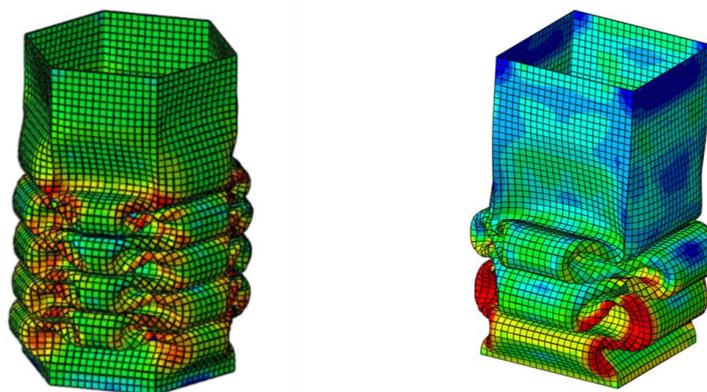


Figura 20 - Configuração das estruturas hexagonal e quadrada no final do processo de deformação

Por esses motivos, considera-se a geometria hexagonal mais adequada para aplicações de resistência ao impacto. Meran, Toprak e Mugan (2014) chega a resultados semelhantes estudando a influência do ângulo interno da célula na força máxima e na energia absorvida. No caso, a célula com ângulo interno de 120° (hexágono perfeito) apresenta os melhores resultados. Os autores ainda afirmam que tal característica se deve ao fato das tensões de flambagem serem idênticas nas direções x e y.

4.2 SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS *HONEYCOMB*

4.2.1 Validação do modelo de simulação

Assim como na modelagem de uma célula tubular, uma validação do modelo de simulação empregado é realizada. Para isso é utilizado o modelo do estudo experimental de Yamashita e Gotoh (2005). A curva tensão média-deslocamento, como é representada no artigo, resultante das simulações está apresentada na figura 21. Nela é possível observar que a metodologia empregada é suficiente para bem representar os fenômenos estudados, pois a curva possui aspecto bastante semelhante à curva experimental presente no artigo e na literatura, apresentando um pico máximo e uma região de patamar constante.

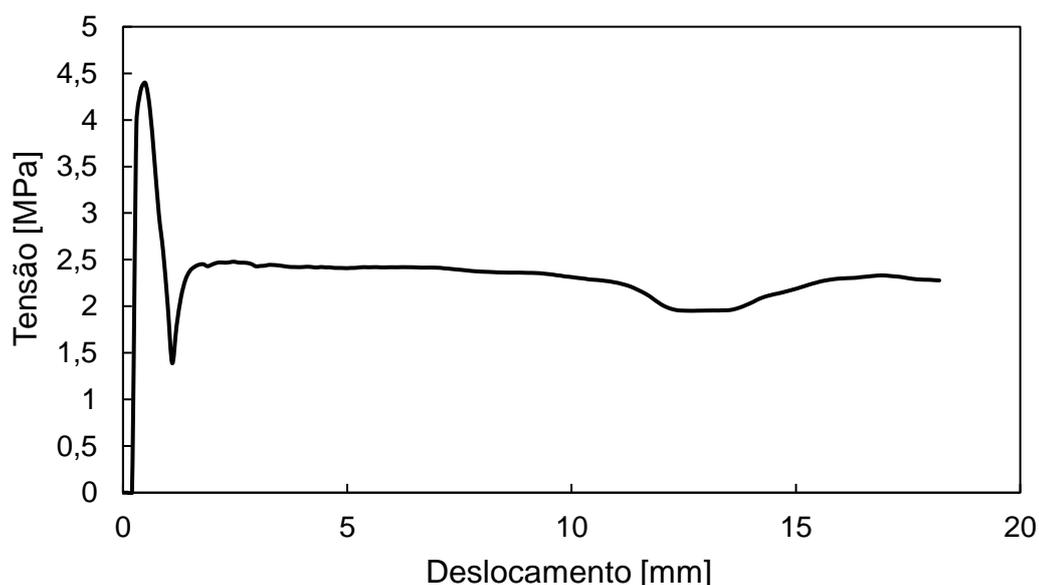


Figura 21 - Curva tensão-deslocamento resultante da simulação numérica do estudo experimental de Yamashita e Gotoh (2005)

Os valores de pico de força e força média apresentam uma diferença quando comparados com os resultados experimentais. Porém, a relação *EFE* (relação entre tensão média e tensão máxima, equivalente à relação força média e força máxima) encontrada é muito próxima da referência e vale 0,52. Isso mostra que há uma diferença proporcional entre os valores de força encontrados na simulação e os valores de força experimentais. É possível relacionar essa diferença com a idealização do modelo numérico, quando comparado com o experimental. Não são modelados os cantos arredondados, a cola entre as folhas, as tensões residuais no material, os defeitos na estrutura do material, entre outros detalhes. Como o objetivo deste trabalho não é realizar uma análise de defeitos e todas as análises subsequentes são comparativas, a modelagem é considerada adequada.

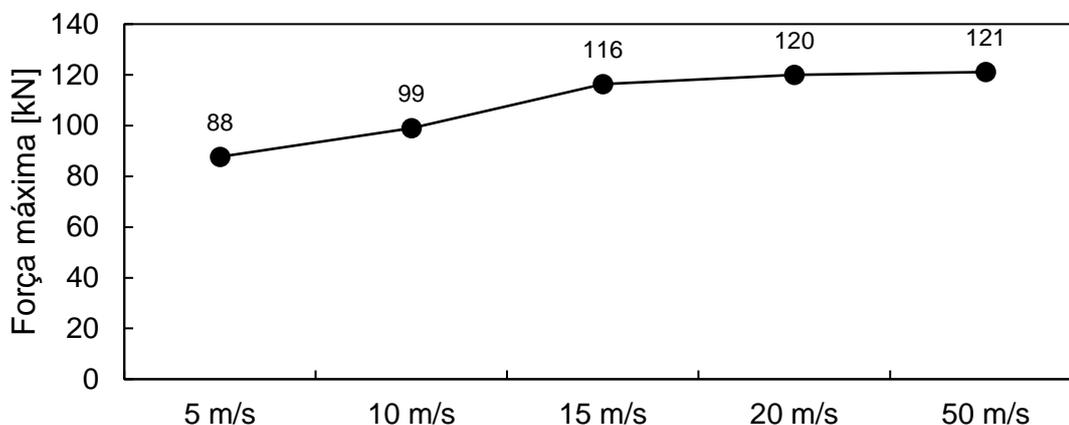
4.2.2 Avaliação dos efeitos da velocidade de impacto

Após a validação do modelo, é necessário entender como a velocidade de impacto influencia na resposta das estruturas *honeycomb* ao impacto. Os resultados de força máxima e força média para cada uma das cinco velocidades simuladas estão apresentados nas figuras 22(a) e 22(b). Fica claro que a velocidade de impacto influencia no pico de força, sendo esta mais alta a medida que a velocidade aumenta. Nota-se que da velocidade mais baixa para a mais alta há um aumento de 38% na força máxima. Todavia, a velocidade de impacto não é capaz de influenciar expressivamente na força média de impacto das estruturas. Esses resultados estão de acordo com o estudo realizado por Deqiang *et al.* (2010).

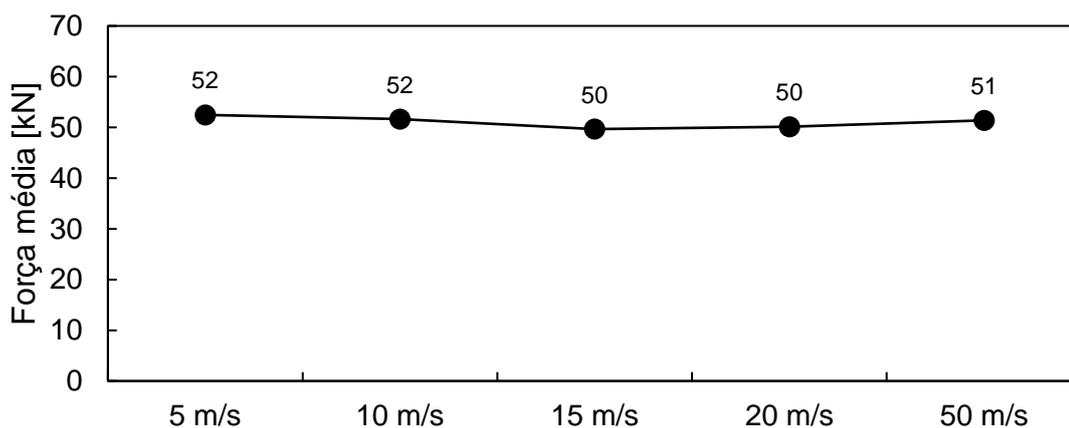
Além disso, para um mesmo tempo de impacto, as distâncias de amassamento observadas para as velocidades mais altas são muito maiores do que as observadas para velocidades mais baixas, como evidenciado em Meran, Toprak e Mugan (2014). Enquanto a simulação de 50 m/s chegou a densificação, a de 5 m/s percorreu apenas 7% do comprimento total da amostra.

Como o objetivo principal deste trabalho é observar a influência da geometria e dos materiais sobre a capacidade de absorção de impacto de estruturas *honeycomb*, apenas uma velocidade é selecionada para a continuidade do trabalho. Por uma questão de custo computacional, procura-se escolher a maior velocidade que atende as necessidades da simulação. Ao observar o início das curvas força-deslocamento

das cinco velocidades (figura 23) nota-se que a maior velocidade que bem descreve o fenômeno de impacto (região elástica, queda brusca de resistência e posterior estabilização da força) é a de 15 m/s.



(a)



(b)

Figura 22 - Influência da velocidade de impacto em: a. força máxima b. força média

Além disso, a norma ABNT NBR 15300-2, baseada na norma americana FVMSS 208, a qual guia os ensaios de impacto de veículos contra uma barreira rígida, emprega uma velocidade inicial de impacto de 56 km/h, ou 15,56 m/s (Auersvaldt, 2014). Em conformidade com os estudos realizados na indústria e na literatura, a velocidade inicial de impacto estabelecida para as simulações finais é de 15 m/s.

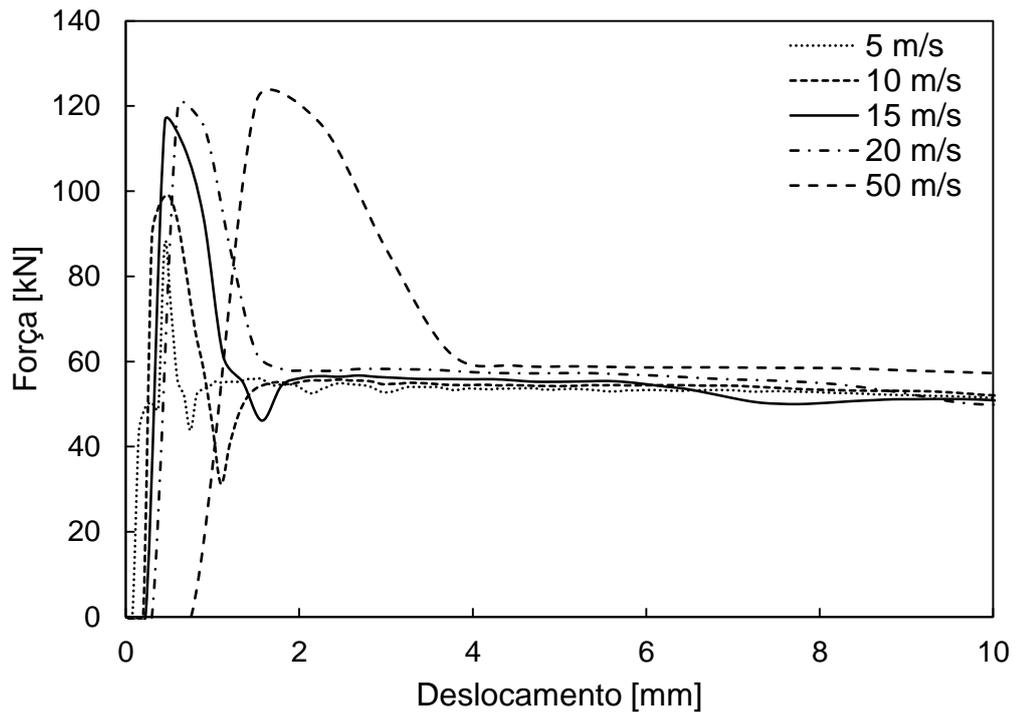


Figura 23 - Curvas força-deslocamento para cinco velocidades de impacto diferentes

4.2.3 Estudo da curva força-deslocamento em uma estrutura *honeycomb*

A figura 24 apresenta a curva força-deslocamento resultante do fenômeno de impacto em uma estrutura *honeycomb*, bastante semelhante ao apresentado para uma célula tubular na seção 4.2.1. Em A, a estrutura está sendo deformada elasticamente e a força aumenta linearmente; em B inicia-se a primeira flambagem localizada (deformação plástica), causando uma queda brusca na resistência e começando o processo de formação da primeira dobra; em C, diferente da célula tubular, estabelece-se uma força aproximadamente constante, pois a presença de muitas dobras simultâneas resulta na anulação das oscilações na curva. Esse patamar permanece até que toda a estrutura se densifique e a resistência volte a subir, como representado em D. Essa curva é bastante semelhante a apresentada por Bitzer (1997), o que indica que o fenômeno de impacto em estruturas *honeycomb* está sendo bem representado pelas simulações numéricas.

As figuras 25(a), (b), (c) e (d) mostram o aspecto da estrutura *honeycomb* nos pontos A, B, C e D representados na curva da figura 24. Nelas é possível observar a

formação das múltiplas dobras progressivas, responsáveis pela formação da região de patamar constante na curva força-deslocamento.

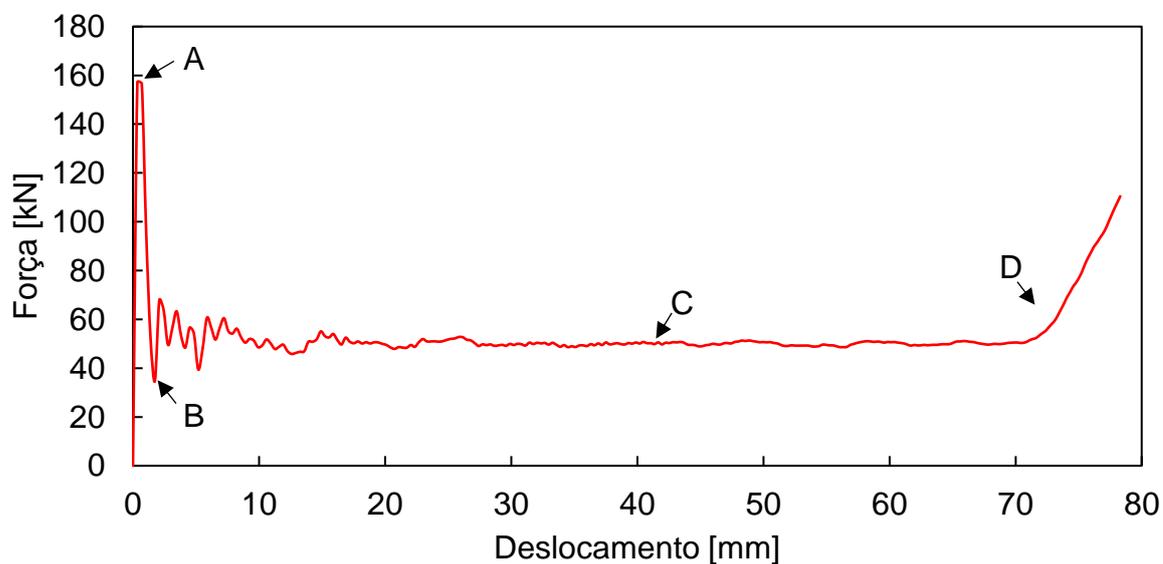


Figura 24 - Curva força-deslocamento da resposta ao impacto em uma estrutura *honeycomb*

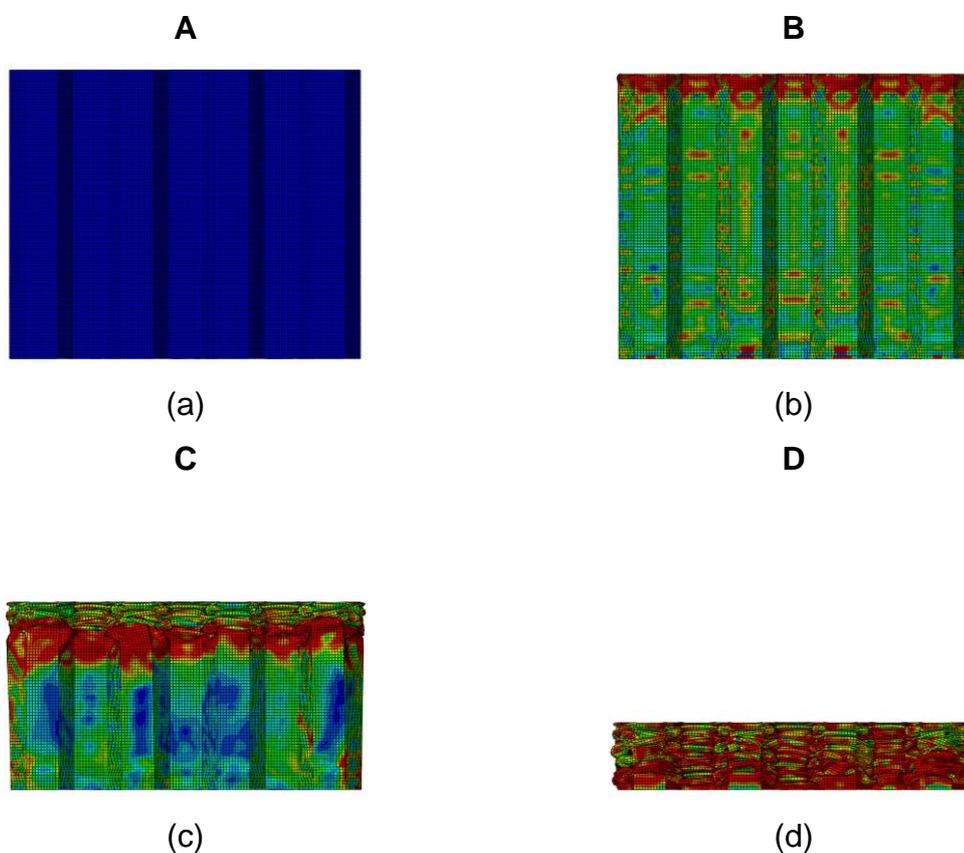


Figura 25 - Aspecto da estrutura *honeycomb* ao longo do processo de impacto. As imagens se referem aos pontos A, B, C e D da figura 24

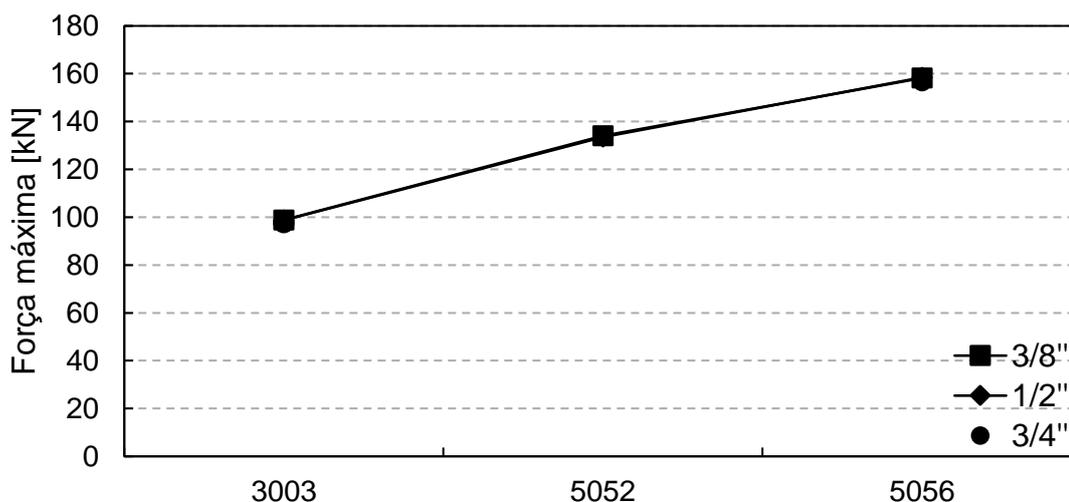
4.2.4 Análise comparativa de diferentes materiais e geometrias em estruturas *honeycomb*

Das simulações de três diferentes geometrias fabricadas em três diferentes materiais, são geradas nove curvas força-deslocamento. A fim de facilitar a análise, o deslocamento é mostrado nas curvas como percentual (deslocamento de amassamento em relação ao comprimento total da estrutura, 100 mm). Para a realização das comparações, as curvas são dispostas por material e por geometria. As seis figuras estão apresentadas no Apêndice A enquanto as curvas de energia estão no Apêndice B.

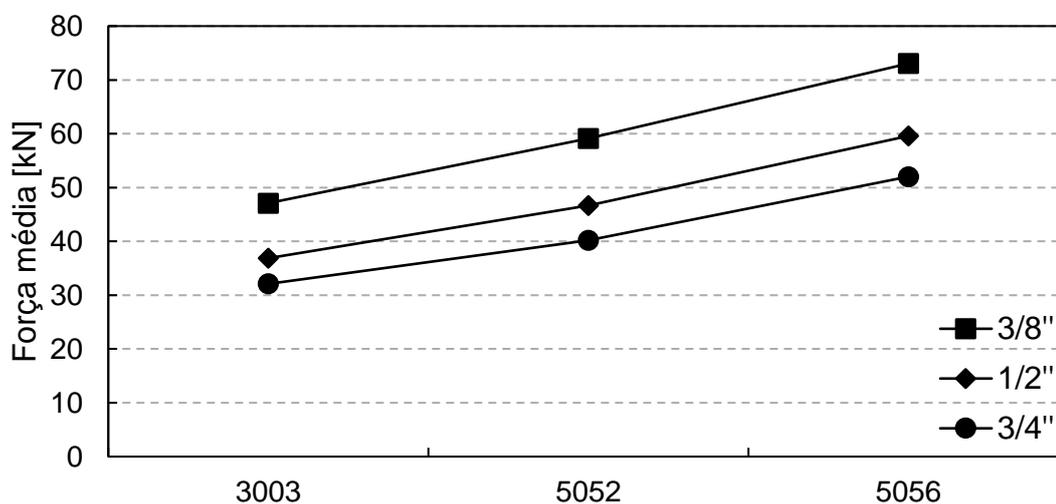
Das curvas é possível analisar a influência do material e da geometria em quatro parâmetros: força máxima de esmagamento, força média de esmagamento, eficiência da força de esmagamento (*EFE*) e energia absorvida específica (*EAE*).

Na figura 26 (a) observa-se que a força máxima de esmagamento é diretamente relacionada à resistência do material do qual o *honeycomb* é fabricado, mas não é afetada pela geometria da estrutura. Esse resultado é esperado, pois até o pico de força a estrutura se deforma linearmente até atingir a tensão de escoamento, portanto quanto maior for essa tensão, mais difícil será a formação da primeira dobra, aumentando a força máxima. É importante lembrar que a massa total é mantida constante para estruturas de mesmo material e aproximadamente constante em estruturas de geometrias iguais com material diferente (ver tabela 3).

Já na figura 26.b observa-se que a força média de esmagamento é influenciada tanto pela geometria quanto pelo material do *honeycomb*. A força média é maior para o material mais resistente (Al 5056), semelhante a força máxima pelo mesmo motivo: quanto maior a resistência do material maior é a dificuldade de formação das dobras. Além disso, a força é maior para estruturas com maior densidade de células, ou seja, células menores ($\frac{3}{8}$ "), o que corrobora os resultados de Bitzer (1997) e Meran, Toprak e Mugan (2014).



(a)



(b)

Figura 26 - Influência do material e da geometria de uma estrutura *honeycomb* nos parâmetros a. força máxima e b. força média

A figura 27 a. apresenta a influência da geometria e material sobre a eficiência de força de esmagamento (razão entre a força média e a força máxima) da estrutura *honeycomb*. Observa-se que esse parâmetro não é influenciado pelo material, pois o aumento no pico de força e na força média devido ao aumento da resistência do material são da mesma magnitude. Já a geometria influi diretamente na *EFE*: quanto maior a densidade de células, maior a *EFE*. Como para aplicações de absorção de impacto recomenda-se maiores valores de *EFE*, a geometria de $\frac{3}{8}$ " é a mais indicada entre as três.

Já a figura 27 b. mostra que a energia absorvida específica (*EAE*) é influenciada pelas duas variáveis: quanto maior a resistência do material, maior a *EAE* e quanto maior a densidade de células maior a *EAE*. Com esses resultados é possível concluir que em uma situação de impacto geometrias mais densas de células e construídas em material de maior resistência absorvem mais energia. Dentre os casos estudados, essa estrutura é a de células de 3/8" fabricadas em Al 5056.

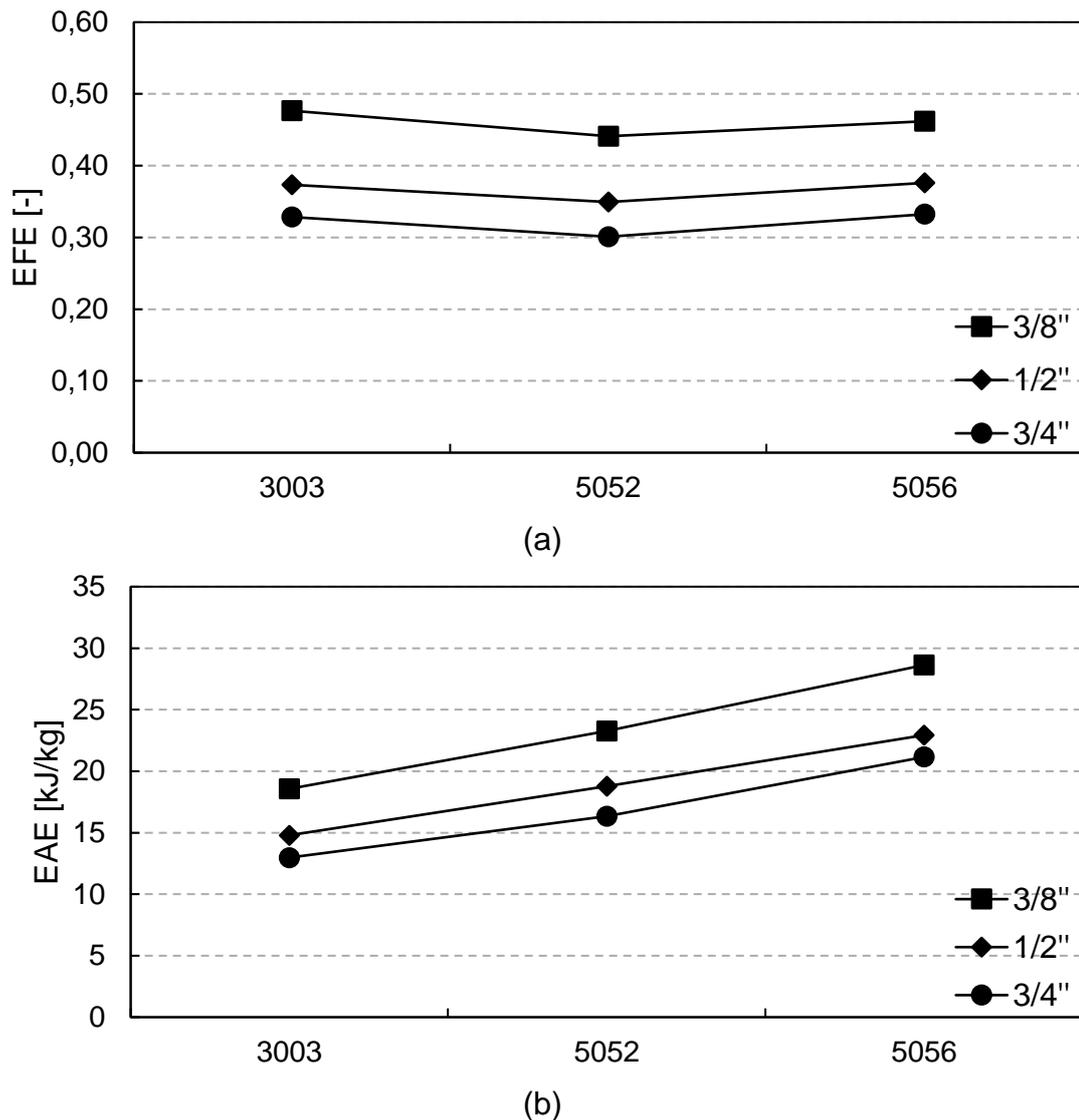


Figura 27 - Influência do material e da geometria de uma estrutura *honeycomb* nos parâmetros a. *EFE* e b. *EAE*

É muito importante lembrar que todos os materiais analisados são ligas de alumínio e, portanto, materiais dúcteis em condições normais de temperatura e pressão. A afirmação sobre aumentar a resistência do material para aumentar a

absorção de energia não seria válida para um material com maior resistência e mais rígido pois esse não seria capaz de reproduzir o fenômeno da flambagem progressiva dinâmica.

Por fim, entende-se que a estrutura com maior capacidade de absorção de energia seja capaz de diminuir o efeito do impacto mais rapidamente, refletindo, portanto, em uma redução mais acentuada da velocidade ao longo do deslocamento. A figura 28 mostra a evolução da velocidade da placa superior da simulação para cada uma das nove estruturas. É possível observar a combinação de maior capacidade de absorção até a de menor. Nota-se que algumas combinações absorvem praticamente a mesma quantidade de energia, como a $\frac{3}{8}$ " em Al 5052 e $\frac{1}{2}$ " em Al 5056 e também a $\frac{3}{8}$ " em Al 3003 e a $\frac{1}{2}$ " em Al 5052. Para esses casos, outros parâmetros de comparação deveriam ser utilizados, como custo por exemplo. Ainda, como o modelo simulado é idealizado, toda a energia cinética dissipada é transformada em energia de deformação absorvida pelas estruturas (na simulação não se tem dissipação de energia por eventual geração de calor ou de som, por exemplo).

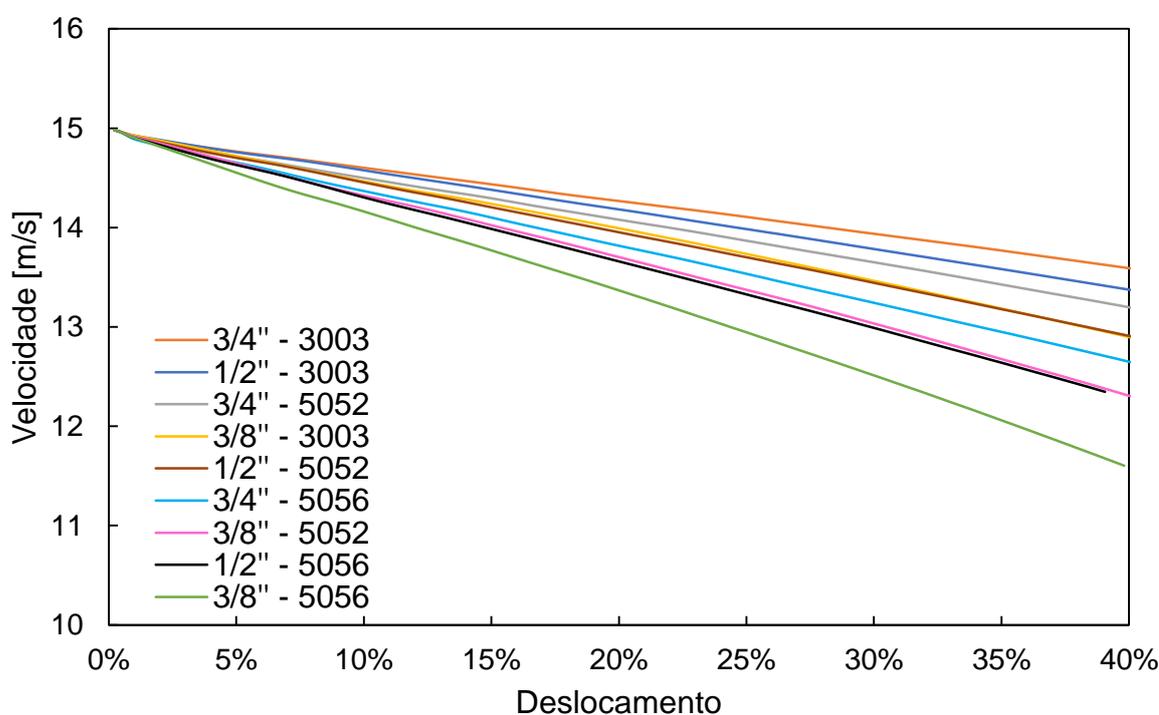


Figura 28 - Evolução da velocidade da placa superior em cada simulação

5 CONCLUSÕES

As estruturas tipo *honeycomb* são utilizadas nas indústrias aeroespacial e automobilística com frequência devido à sua alta capacidade de absorção de energia de impacto e baixa massa. O mecanismo de deformação plástica por dobras progressivas confere a essas estruturas tais características. Nesse contexto, no presente trabalho é avaliado este fenômeno através de simulações numéricas de impacto envolvendo células tubulares (quadradas e hexagonais) e estruturas *honeycomb*.

Comprova-se que a célula hexagonal regular é mais eficiente que a quadrada para aplicações de absorção de impacto, confirmando estudos anteriores, tal como Meran, Toprak e Mugan (2014). Fica evidente nas simulações que isso se dá devido à maior capacidade de dissipar energia pela formação de maior número de dobras durante a compressão. É reproduzida a curva força-deslocamento de células tubulares apresentada por Jones (2012), validando as análises numéricas e permitindo a visualização do fenômeno de absorção de energia em todas as suas etapas.

O modelo numérico de estrutura *honeycomb*, criado a partir de dados de ensaios experimentais de Yamashita e Gotoh (2004), é capaz de reproduzir curvas força-deslocamento semelhantes as observadas na literatura e é utilizado para simular o impacto dos *honeycomb* de diferentes tamanhos de célula e material constituinte. É observada a influência da velocidade inicial de impacto nas curvas força-deslocamento e a velocidade de 15m/s é selecionada, alinhada com a norma brasileira de ensaios de impacto de veículos.

Pela análise comparativa dos resultados das simulações com diferentes materiais e dimensões de células, observa-se que o *honeycomb* com células de $\frac{3}{8}$ " fabricadas em Al 5056 apresenta maior capacidade de absorção de energia. Confirma-se, portanto, que estruturas com maior densidade de células apresentam maior eficiência de força de esmagamento e materiais com maior resistência mecânica apresentam maior energia absorvida específica. Os resultados referentes a esses parâmetros estão de acordo com a literatura.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de análises experimentais para validar e melhorar os resultados numéricos. Além disso, o modelo numérico pode ser aprimorado pela remoção de algumas idealizações, como, por exemplo, considerar o efeito de adesivos entre as lâminas do *honeycomb*. O estudo comparativo também pode ser expandido para outros materiais comuns na fabricação de *honeycomb*, como o Nomex®.

REFERÊNCIAS

AKTAY, L.; JOHNSON, A. F.; KROPLIN, B. Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 75, p. 2612-2630, 2007.

ALI, M.; OHIOMA, E.; KRAFT, F.; ALAM, K.; Theoretical, numerical, and experimental study of dynamic axial crushing of thin walled pentagon and cross-Shape tubes. **Thin-Walled Structures**, v. 94, p. 253-272, 2015.

ASPRONE, D.; AURICCHIO, F.; MENNA, C.; MORAGANTI, S.; PROTA, A.; REALI, A. Statistical finite element analysis of the buckling behavior of honeycomb structures. **Composite Structures**. v. 105, p. 240-255, 2013.

AUERSVALDT, R. R.; **Análise paramétrica de absorvedores de energia de impacto poligonais com janelas laterais**. 2014. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

BITZER, T. **Honeycomb technology**: materials, design, manufacturing, applications and testing. 1^a ed. Dublin: Springer-Science+Business Media, B.V., 1997.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 8^a ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

DEQIANG, S.; WEIHONG, Z.; YANBIN, W. Mean out-of-plane dynamic plateau stresses of hexagonal honeycomb cores under impact loadings. **Composite Structures**, v. 92, p.2609-2621, 2010.

GIGLIO, M.; MANES, A.; GILIOLI, A.; Investigations on sandwich core properties through an experimental–numerical approach. **Composites: Part B**, v. 43, p. 361-374, 2012.

ISAAC, C.; OLUWOLE, O. Finite element comparative analysis of the crushing behaviour of square steel tubes. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 6, p. 1650-1655, 2015.

JONES, N. **Structural Impact**. 2^a ed. New York: Cambridge University Press, 2012.

KAMAN, M.; SOLMAZ, M. Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels. **Journal of Composite Materials**, v. 44, p. 2819-2831.

KHOSHRAVAN, M. R.; POUR, M. N. Numerical and experimental analyses of the effect of different geometrical modelings on predicting compressive strength of honeycomb core. **Thin-Walled Structures**, v. 84, p. 423-431, 2014.

KRAYDEN. ARALDITE 8545-1 Panel Lamination Bonding. Denver, 2017. Disponível em: <<http://krayden.com/araldite-8545-1-panel-lamination-bonding/>>. Acesso em: 01 mai. 2017.

LANDGRAF, R. Monotonic and cyclic stress-strain properties of selected aluminum alloys. In: *Metals Handbook. Fatigue and Fracture*. Ohio: American Society for Metals, 1996. v.19, p. 565.

MARKUS, F. Touring the innovative BMW i3 assembly plant. **Motor Trend Magazine**, Los Angeles, abr. 2013. Seção Auto News. Disponível em: <<http://www.motortrend.com/news/touring-the-innovative-bmw-i3-assembly-plant-359439/>>. Acesso em: 01 mai. 2017.

MERAN, A. P.; TOPRAK, T. T.; MUGAN, A.; Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures. **Thin-Walled Structures**, v. 78, p. 87-94, 2014.

ROMERA, L.; PAZ, J.; COSTAS, M.; DÍAZ, J.; HERNÁNDEZ, S. Crashworthiness response of honeycomb metallic-GFRP energy absorption devices. **Transactions on The Built Environment**, v. 137, p. 225-234, 2014.

SEIFRIED, R.; MINAMOTO, H.; EBERHARD, P.; Viscoplastic Effects Occurring in Impacts of Aluminum and Steel Bodies and Their Influence on the Coefficient of Restitution. **Journal of Applied Mechanics**, v. 77, 2010.

VINSON, J. R. **The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials**. 1ª ed. Lancaster: Technomic Publishing Company, Inc., 1999.

WILBERT, A.; JANG W.; KYRIAKIDES, S.; FLOCCARI, J. Buckling and progressive crushing of laterally loaded honeycomb, **International Journal of Solids and Structures**, v. 48, p. 803-816, 2010.

WIERZBICKI, T. Crushing analysis of metal honeycombs. **International Journal of Impact Engineering**, v. 1, p. 157-174, 1983.

WU, E.; JIANG, W. Axial crush of metallic honeycombs. **International Journal of Impact Engineering**, v.19, p. 439-456, 1996.

XUE, Z.; HUTCHINSON, J.; Crush dynamics of square honeycomb sandwich cores. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 65, p. 2221-2245, 2006.

YAMASHITA, M.; GOTOH M. Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications - numerical simulation and experiment. **International Journal of Impact Engineering**, v. 32, p. 618-630, 2005.

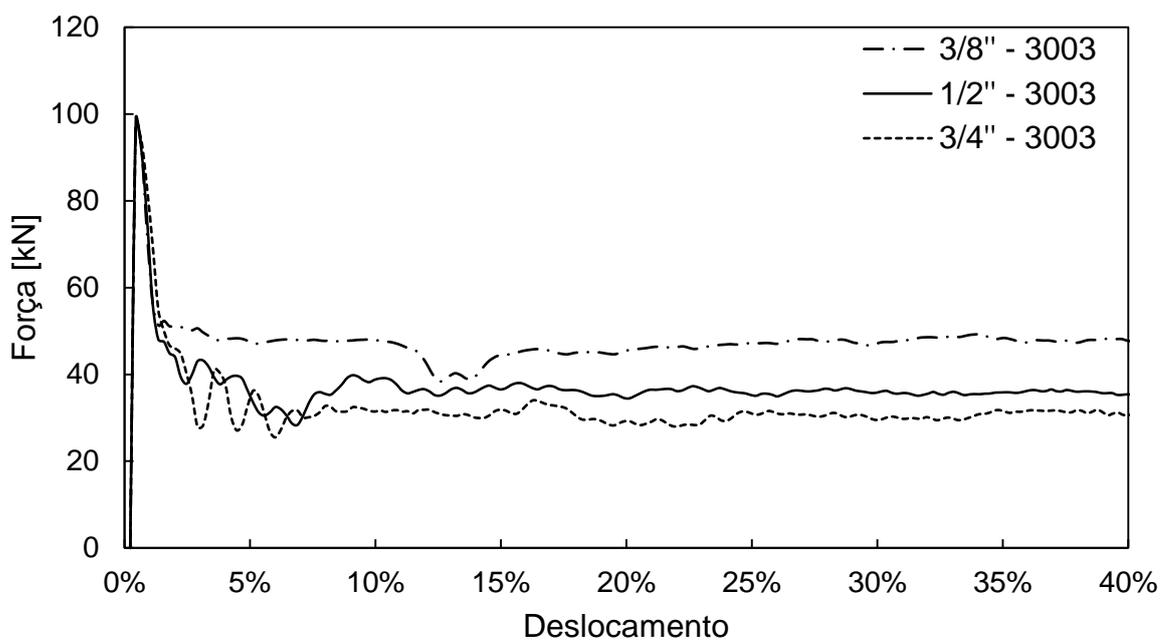
ZHANG, J.; ASHBY M. F. The out-of-plane properties of honeycombs. **International Journal of Mechanical Science**, v. 34, p. 475-489, 1991.

ZHAO, H.; GARY, G. Crushing behaviour of aluminium honeycombs under impact loading. **International Journal of Impact Engineering**, v. 21, p. 827-836, 1998.

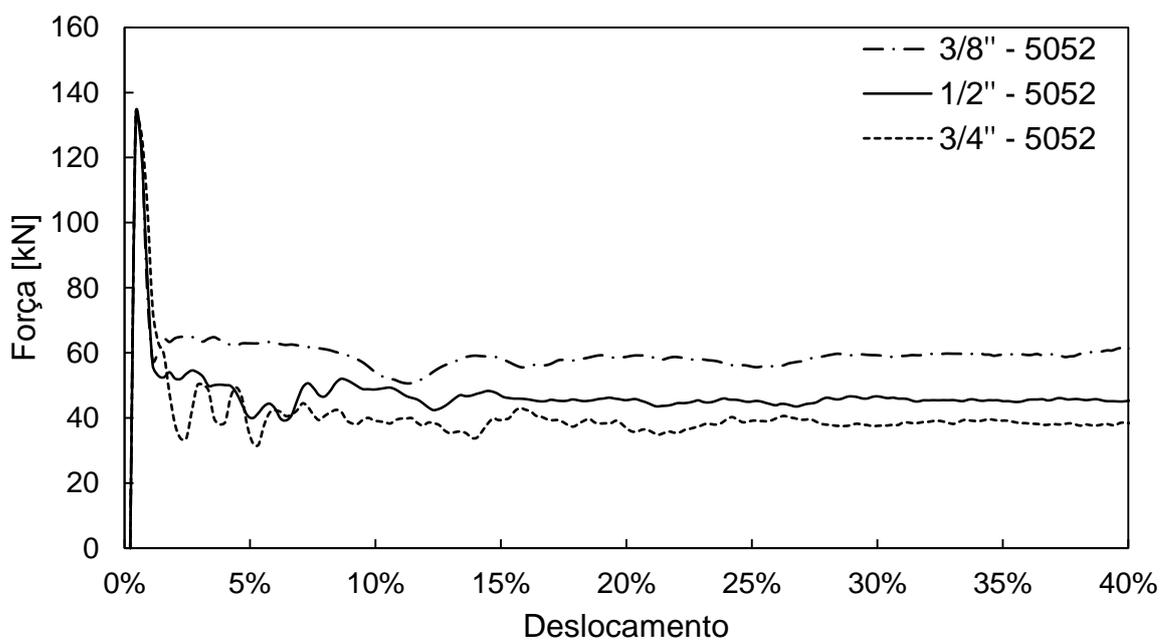
ZHU, F.; ZHAO, L.; LU, G.; WANG, Z.; Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels - Experimental investigations. **International Journal of Impact Engineering**, v. 35, p. 937-951, 2008.

APÊNDICE A – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO

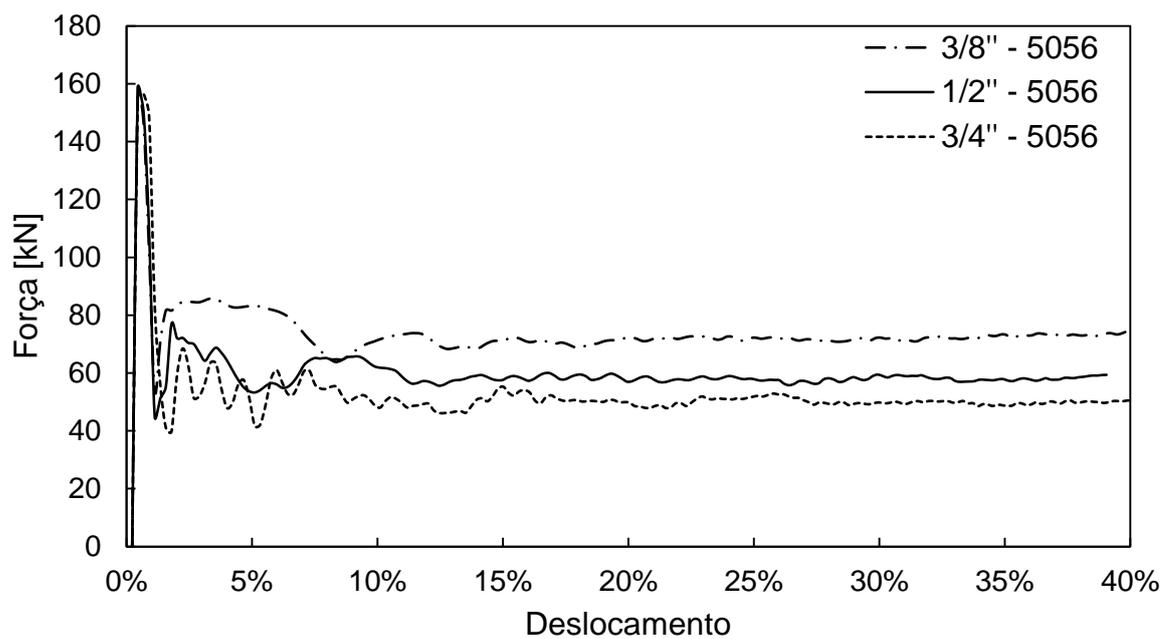
a. Curvas de geometria variável e material fixo



(a)



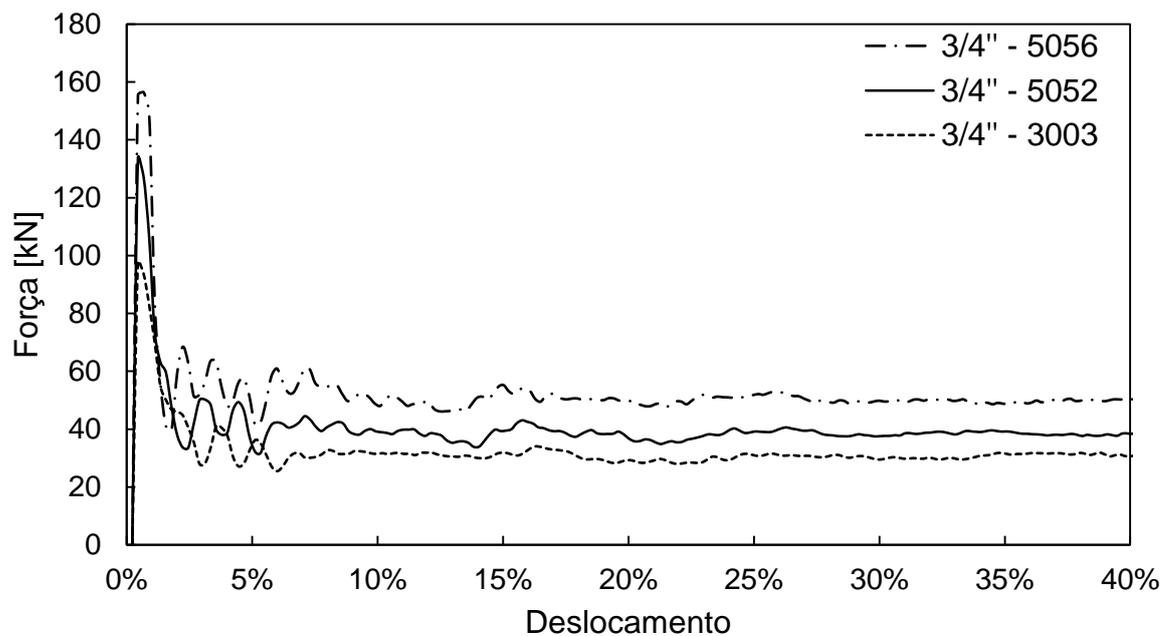
(b)



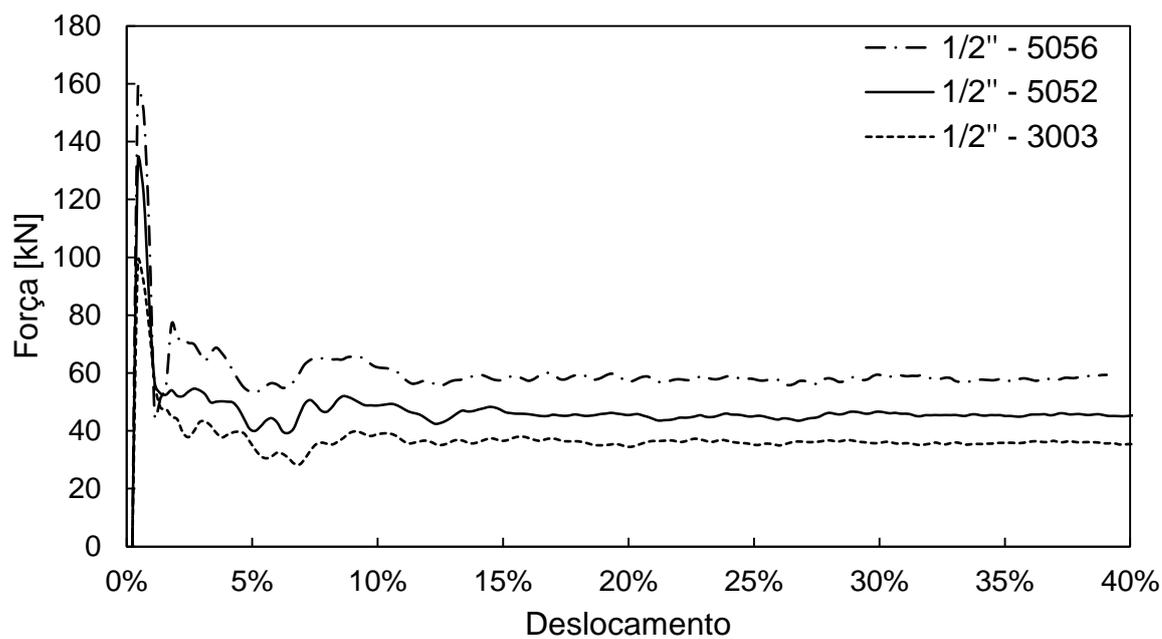
(c)

Figura 29 - Curvas força-deslocamento para diferentes geometrias de célula. Materiais (a) Al 3003; (b) Al 5052 e (c) Al 5056

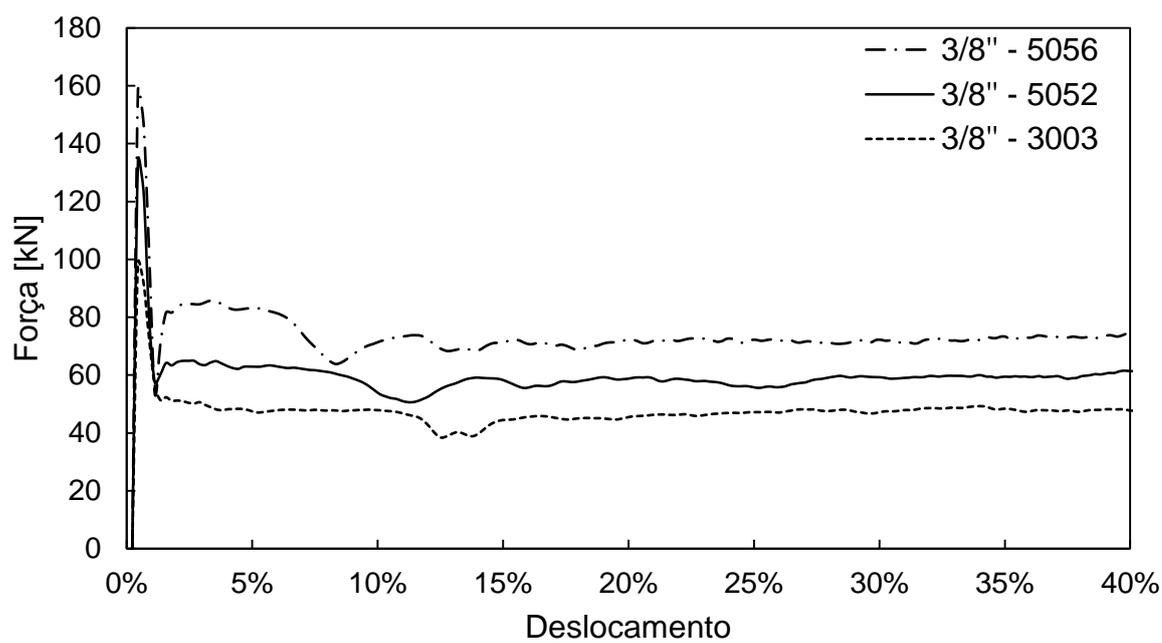
b. Curvas de material variável e geometria fixa



(a)



(b)

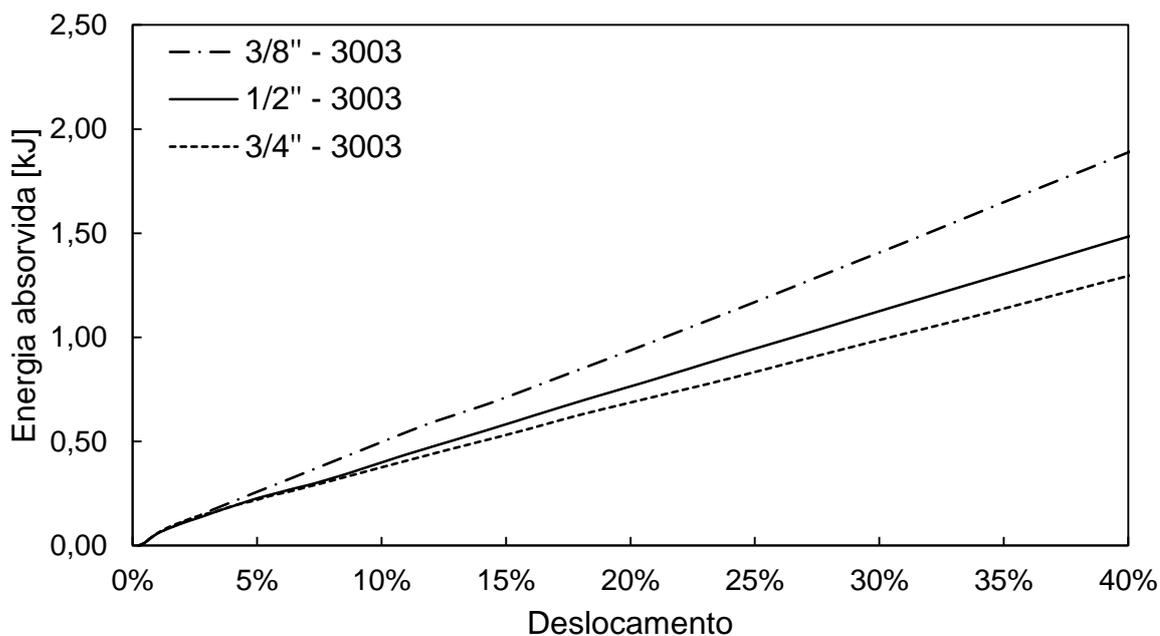


(c)

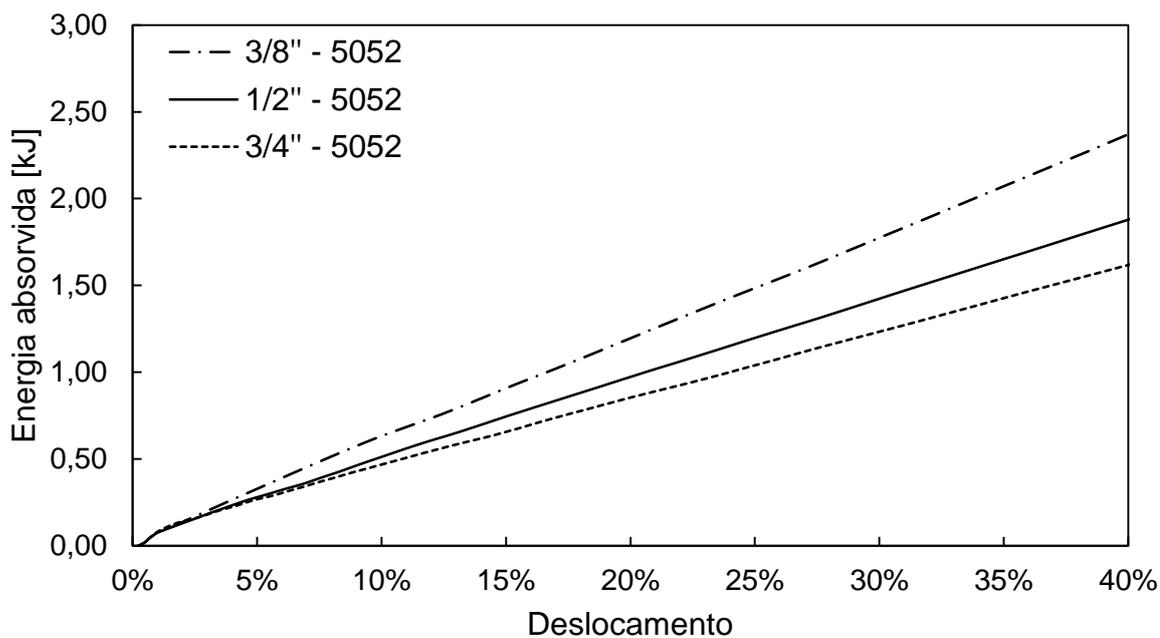
Figura 30 - Curvas força-deslocamento para diferentes materiais. Geometria das células: (a) 3/4"; (b) 1/2" e (c) 3/8"

APÊNDICE B – CURVAS DE ENERGIA ABSORVIDA

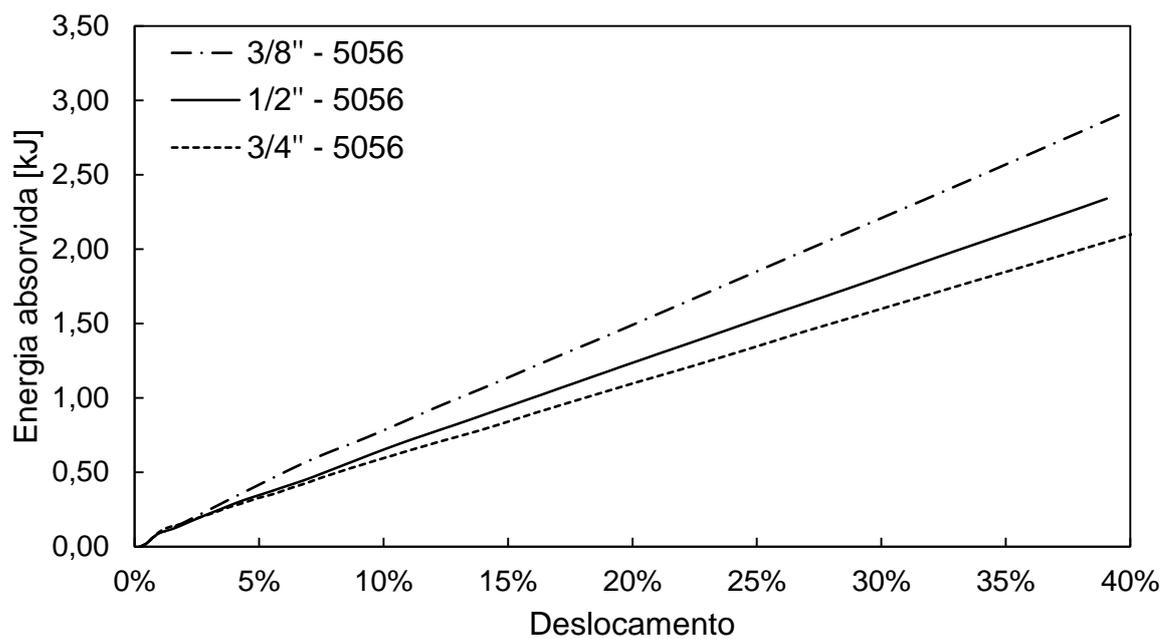
a. Curvas de geometria variável e material fixo



(a)



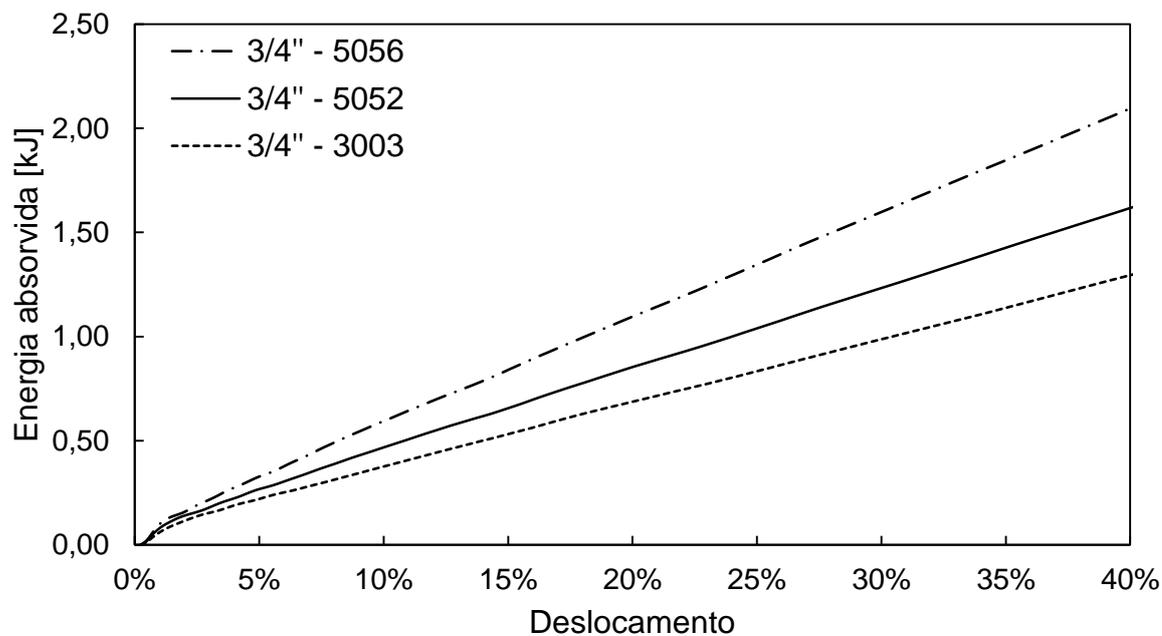
(b)



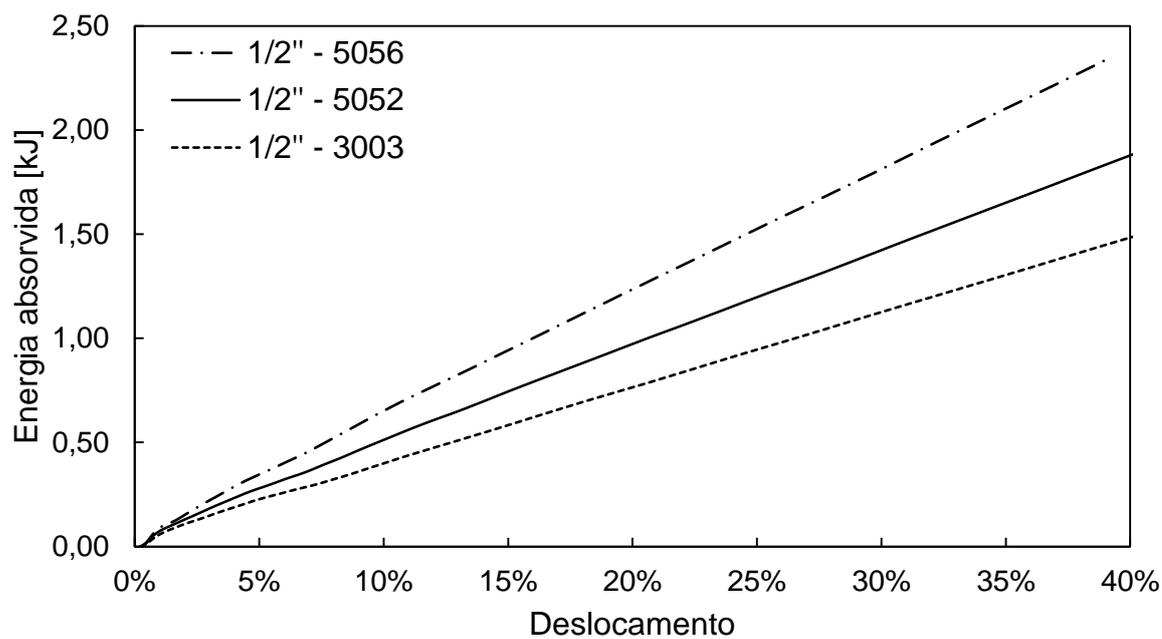
(c)

Figura 31 - Curvas de energia absorvida para diferentes geometrias de célula. Materiais: (a) Al 3003; (b) Al 5052 e (c) Al 5056.

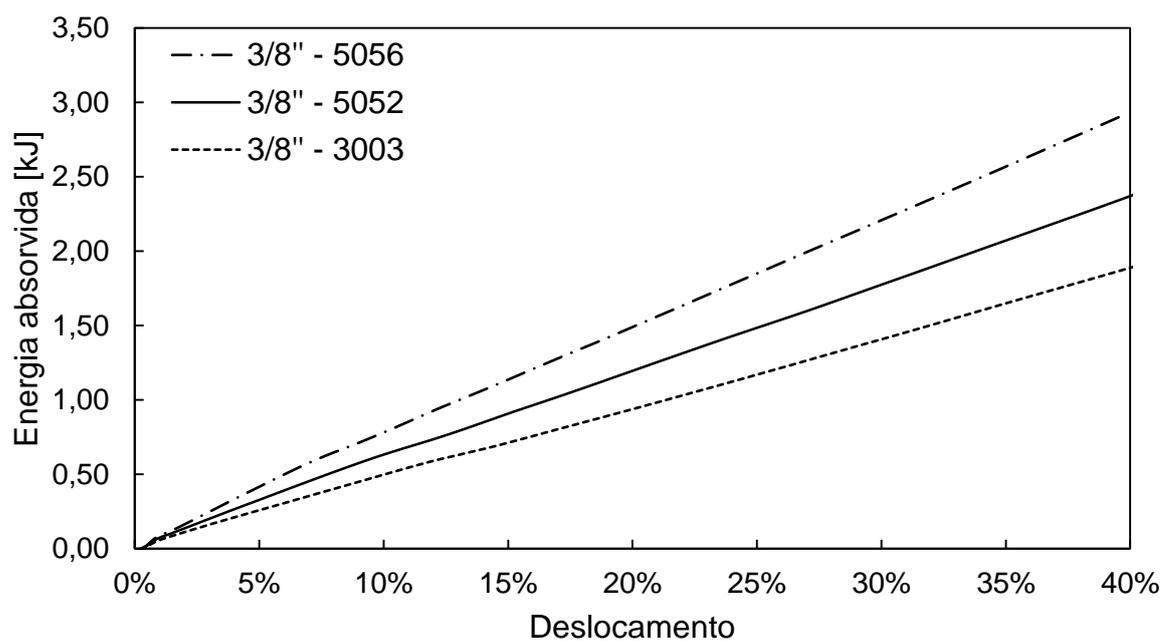
b. Curvas de material variável e geometria fixa



(a)



(b)



(c)

Figura 32 - Curvas de energia absorvida para diferentes materiais. Geometria das células: (a) 3/4"; (b) 1/2" e (c) 3/8".