



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

Estudo do desempenho de absorvedores de energia híbridos em aço preenchidos com honeycomb de PETG

Autor: Gabriel Martins de Castro
Orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia Silva

Brasília, DF
2022



Gabriel Martins de Castro

Estudo do desempenho de absorvedores de energia híbridos em aço preenchidos com honeycomb de PETG

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia Silva

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Borges de Sousa Oliveira

Brasília, DF

2022

Gabriel Martins de Castro

Estudo do desempenho de absorvedores de energia híbridos em aço preenchidos com honeycomb de PETG/ Gabriel Martins de Castro. – Brasília, DF, 2022-
71 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia Silva

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Absorvedor de energia. 2. Honeycomb. I. Profa. Dra. Rita de Cássia Silva. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo do desempenho de absorvedores de energia híbridos em aço preenchidos com honeycomb de PETG

CDU 02:141:005.6

Gabriel Martins de Castro

Estudo do desempenho de absorvedores de energia híbridos em aço preenchidos com honeycomb de PETG

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 10 de maio de 2022:

Profa. Dra. Rita de Cássia Silva
Orientador

**Prof. Dr. Alessandro Borges de Sousa
Oliveira**
Coorientador

Profa. Dra. Sandra Luz
Membro Convidado

Prof. Dr. Cristian Vendittozzi
Membro Convidado

Brasília, DF
2022

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais por toda confiança e paciência ao longo dos últimos anos. Os quais nunca mediram esforços para que eu pudesse trilhar meu caminho da melhor maneira possível.

Também não poderia deixar de agradecer aos meus professores orientadores, que sempre estiveram dispostos a ajudar e contribuir para que eu pudesse alcançar todo o meu potencial.

Por fim, gostaria de agradecer as minhas amigas, que estiveram ao meu lado não só durante a realização deste trabalho, mas foram imprescindíveis nesses últimos anos: Daniela, Geovana e Hillary. Sem o apoio e ajuda de vocês todo o caminho percorrido até esse momento seria bem mais árduo.

Resumo

Absorvedores de energia são sistemas capazes de converter a energia cinética em outras formas de energia, principalmente energia de deformação, através da deformação plástica da estrutura. Atualmente, um dos principais elementos de segurança passiva nos veículos é o *crash box*, devido sua alta capacidade de absorção de energia, sendo posicionados entre o para-choque e a longarina de diferentes modelos de veículos. No âmbito automotivo, o desenvolvimento de estruturas eficientes em termos de absorção de energia é imprescindível para o aumento da proteção aos passageiros. Diferentes modelos de absorvedores de energia já foram propostos ao longo dos anos, sendo possível encontrar uma vasta literatura a respeito. Uma das principais geometrias de construção desses absorvedores consiste em tubos de paredes finas. No entanto, o conceito de se agregar estruturas honeycomb confeccionadas a partir de materiais compósitos, de modo a obter um absorvedor de energia híbrido, ainda não foi explorada. Portanto, o presente trabalho tem o intuito de avaliar o desempenho de tubos de paredes finas confeccionados em aço e preenchidos com estruturas honeycombs 3D-impressas em PETG, utilizando a técnica FDM (*Fused Deposition Modeling*). O desenvolvimento do trabalho também aborda a inserção de janelas laterais padronizadas, em faces opostas de absorvedores de energia, sendo aplicados indicadores de desempenho, largamente difundidos na literatura científica, de forma a avaliar e comparar a eficiência das diferentes configurações propostas aos absorvedores.

Palavras-chaves: absorvedores de energia. honeycomb. janelas padronizadas.

Abstract

Energy absorbers are systems that convert kinetic energy into another form of energy, mostly strain energy, through the plastic deformation of the structure. Nowadays, one of the main elements of passive safety in vehicles is the crash box, due to its high energy absorption capacity. It is placed between the bumper and the side members of different vehicle models. In the automotive industry, the design of efficient structures in terms of energy absorption is indispensable to increase passenger safety. Different models of energy absorbers have been proposed over the years, and it is possible to find vast literature about them. One of the main geometric constructions of these systems consists of thin-walled structures. However, the idea of using them filled with composite honeycomb structures, as hybrid energy absorbers, has not been explored. Therefore, the present work aims to assess the crashworthiness of thin-walled square steel tubes filled with FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-Printing PETG honeycomb structures. Also, this work approaches the development of lateral patterned windows on two opposite faces on the absorbers' wall, in which performance indicators were applied, widely widespread in the scientific literature, in order to evaluate and compare the efficiency of different energy absorbers.

Key-words: energy absorbers. honeycomb. patterned windows.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estatísticas de trânsito categorizadas a partir da renda per capita dos países. Fonte: Adaptado de World Health Organization (2018).	14
Figura 2 – Número de países em que foi observada mudanças no índice de mortes no trânsito desde 2013. Fonte: Adaptado de World Health Organization (2018).	15
Figura 3 – Posicionamento do crash box automotivo na estrutura veicular. Fonte: Adaptado de Guillon et al. (2014).	19
Figura 4 – Geometria da estrutura honeycomb. Fonte: Adaptado de Basurto-Vazquez et al. (2021).	21
Figura 5 – Mapa dos modos de deformação. Fonte: Adaptado de Song, Chen e Lu (2013).	22
Figura 6 – Modo de deformação simétrico para tubos de seção quadrada. Fonte: Abramowicz e Jones (1984).	23
Figura 7 – Mapa de deformação para tubos quadrados sob carregamento quase-estático. Fonte: Adaptado de Abramowicz e Jones (1997).	24
Figura 8 – Modo de deformação assimétrico I. Fonte: Adaptado de Abramowicz e Jones (1984).	25
Figura 9 – Modo de deformação assimétrico II. Fonte: Adaptado de Abramowicz e Jones (1984).	25
Figura 10 – Flexão global de tubos de seção quadrada a partir do desenvolvimento de modos simétricos de colapso. Fonte: Abramowicz (2003).	26
Figura 11 – Orientação de construção para impressão 3D. Fonte: Adaptado de Chacon et al. (2017).	35
Figura 12 – Representação do ângulo de varredura. Fonte: Liu, Lei e Xing (2019).	35
Figura 13 – Impressões feitas com diferentes porcentagens de preenchimento. Fonte: filament2print (2019).	36
Figura 14 – Representação esquemática de diferentes espessuras de camada. Fonte: Adaptado de Ayrilmis (2018).	37
Figura 15 – Corpo de prova padrão para ensaio à tração. Fonte: ASTM D638-14 (2014).	37
Figura 16 – Posicionamento do corpo de prova na máquina de teste para ensaio à tração.	39
Figura 17 – Representação do esquema de montagem para o ensaio à compressão. Fonte: ASTM C365/C365M-16 (2016).	40
Figura 18 – Modelagem do corpo de prova desenvolvido para o ensaio de compressão	42

Figura 19 – Representação da adequação da máquina de teste ao ensaio de compressão.	44
Figura 20 – Posicionamento do corpo de prova na máquina de teste para ensaio à compressão.	44
Figura 21 – Curva típica de tensão-deformação do aço SAE 1010.	45
Figura 22 – Corpo de prova padrão para materiais metálicos. Fonte: ASTM E8/E8M-21 (2021).	45
Figura 23 – Representação da geometria das janelas laterais. Fonte: Adaptado de Song, Chen e Lu (2013).	46
Figura 24 – Posicionamento do absorvedor de energia nas máquinas de teste para ensaio à compressão.	48
Figura 25 – Espécimes construídos na orientação <i>Flat</i> após o ensaio à tração.	50
Figura 26 – Espécimes construídos na orientação <i>On-edge</i> após o ensaio à tração.	50
Figura 27 – Qualidade do corpo de prova conforme a orientação de construção selecionada.	51
Figura 28 – Representação da fratura de acordo com a orientação de construção.	51
Figura 29 – Tensão verdadeira em função da deformação verdadeira dos espécimes <i>Flat</i>	52
Figura 30 – Tensão verdadeira em função da deformação verdadeira dos espécimes <i>On-edge</i>	52
Figura 31 – Espécimes honeycombs após o ensaio à compressão.	54
Figura 32 – Força em função do deslocamento obtida à compressão.	55
Figura 33 – Representação do modo de deformação dos absorvedores de energia sem o preenchimento honeycomb.	56
Figura 34 – Força em função do deslocamento obtida à compressão para os absorvedores de energia sem preenchimento da estrutura honeycomb.	57
Figura 35 – Representação do modo de deformação dos absorvedores de energia com o preenchimento honeycomb.	59
Figura 36 – Força em função do deslocamento obtida à compressão para os absorvedores de energia híbridos.	60

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros adotados para configuração da impressora	34
Tabela 2 – Principais dimensões do corpo de prova padrão para ensaio à tração. Fonte: ASTM D638-14 (2014).	38
Tabela 3 – Parâmetros de impressão para os espécimes ensaiados à tração	38
Tabela 4 – Parâmetros de dimensionamento para os espécimes ensaiados à com- pressão	41
Tabela 5 – Parâmetros de impressão para os espécimes ensaiados à compressão	42
Tabela 6 – Principais dimensões do corpo de prova padrão para materiais metáli- cos. Fonte: ASTM E8/E8M-21 (2021).	46
Tabela 7 – Configurações geométricas das janelas laterais	47
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do material obtidas à tração	53
Tabela 9 – Propriedades mecânicas conforme dados de outros fornecedores. Fonte: 3DLab (2017).	53
Tabela 10 – Propriedades mecânicas do material obtidas à compressão	55
Tabela 11 – Indicadores de desempenho para os absorvedores de energia sem pre- enchimento honeycombnb	57
Tabela 12 – Indicadores de desempenho para os absorvedores de energia híbridos	60

Lista de abreviaturas e siglas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSC	Calorimetria Diferencial Exploratória
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
MJF	<i>Multi Jet Fusion</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PC	Polycarbonato
PEI	Polieterimida
PET	Polietileno Tereftalato
PE	Polietileno
PETG	Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol
PLA	Ácido Polilático
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVA	Poliacetato de Vinila
RENAEST	Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito
rPETG	Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol reciclado
SIM	Sistema de Informação sobre Mortalidade
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>

Lista de símbolos

A	Área de seção transversal do absorvedor de energia
D	Deslocamento máximo ocorrido durante o esmagamento
E_a	Energia absorvida
F_m	Força média
F_{max}	Força máxima
LR	Razão de carregamento
m	Massa total do absorvedor de energia
$P(x)$	Força de compressão exercida sob o absorvedor de energia
SEA	Energia absorvida específica
η	Efetividade estrutural
σ_o	Tensão de escoamento do material do absorvedor de energia

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos específicos	17
1.4	Organização do documento	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Sistemas de Absorção de Energia	19
2.1.1	Absorvedores de Energia Híbridos	20
2.1.2	Absorvedores de Energia com a Presença de Descontinuidades Indutoras de Falha	21
2.2	Modos de Deformação de Absorvedores de Energia	22
2.2.1	Modo de Deformação Simétrico	23
2.2.2	Modo de Deformação Assimétrico	24
2.2.3	Flexão Global	25
2.3	Indicadores de Eficiência de Absorção de Energia	26
2.3.1	Energia Absorvida (E_a)	26
2.3.2	Energia Absorvida Específica (SEA)	27
2.3.3	Força máxima (F_{max})	27
2.3.4	Força Média (F_m)	27
2.3.5	Razão de Carregamento (LR)	28
2.3.6	Efetividade Estrutural (η)	28
2.4	Tecnologia de Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva	28
2.4.1	Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	29
2.4.2	Ácido Polilático (PLA)	30
2.4.3	Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG)	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Parâmetros de impressão	33
3.1.1	Orientação de Construção	34
3.1.2	Ângulo de Varredura	35
3.1.3	Preenchimento	36
3.1.4	Espessura de Camada	36
3.2	Ensaio à Tração	37

3.3	Ensaio à Compressão	40
3.4	Confecção dos Absorvedores de Energia	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Tração	49
4.2	Compressão	53
4.3	Absorvedores de Energia sem Preenchimento Honeycomb	55
4.4	Absorvedores de Energia Híbridos	58
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	61
5.1	Conclusões	61
5.2	Trabalhos Futuros	64
	REFERÊNCIAS	65

1 Introdução

1.1 Contextualização

Ao longo dos anos, houve a crescente preocupação acerca dos desafios da mobilidade urbana ao redor do mundo. No entanto, o número de mortes e lesões causadas por acidentes de trânsito continuam ocorrendo e, em algumas localidades, de forma crescente (NHTSA, 2022). De acordo com dados do relatório global de segurança viária fornecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS), as lesões causadas por acidentes de trânsito são, atualmente, a principal causa de morte de crianças e jovens entre 5 e 29 anos de idade (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). Ademais, considerando a população entre todas as faixas etárias, acidentes de trânsito estão entre as 10 principais causas de morte no mundo, representando cerca de 1,35 milhão de vidas perdidas em 2016.

Em face do exposto, as lesões causadas pelo trânsito se tornaram um dos principais problemas de saúde pública no mundo, tendo grande impacto social. Não obstante, segundo dados da OMS, a redução das mortes no trânsito não é uniforme em todas as regiões e países ao redor do mundo. Conforme mostrado na Figura 1, em 2016, observou-se que a maior ocorrência de óbitos estava concentrada em países de baixa e média rendas, sobretudo os de baixa renda chegando a valores de cerca de 59%, em casos de acidentes envolvendo veículos.

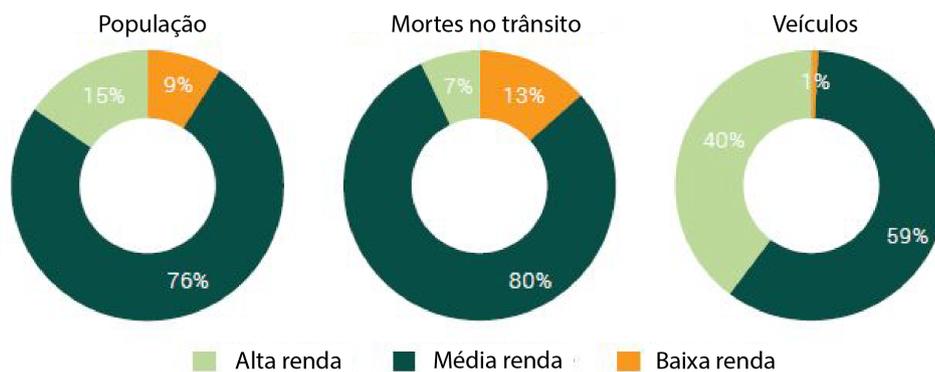


Figura 1 – Estatísticas de trânsito categorizadas a partir da renda per capita dos países. Fonte: Adaptado de World Health Organization (2018).

Nota-se ainda que, apesar de os países de baixa renda possuírem apenas 1% dos veículos motorizados do mundo, eles representam 13% de todas as mortes registradas. Ainda de acordo com a World Health Organization (2018), os maiores progressos na redução do número de óbitos nas vias estão concentrados em países de alta e média renda per capita. Sendo que em países de baixa renda não houve redução nos índices de mortes, devido aos acidentes de trânsito desde 2013, conforme demonstrado na Figura 2.

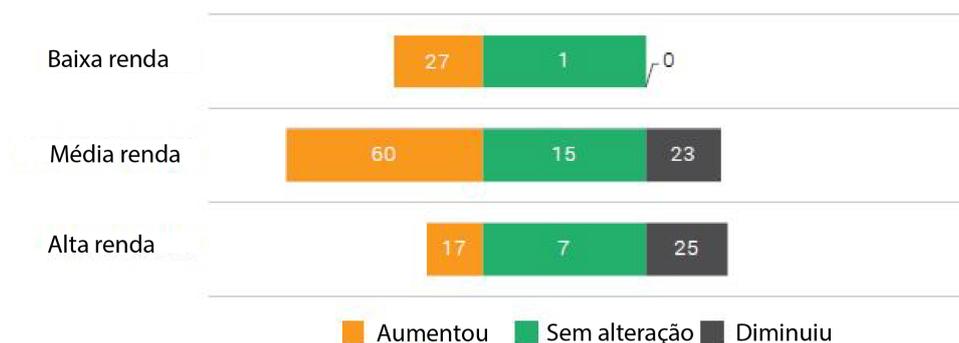


Figura 2 – Número de países em que foi observada mudanças no índice de mortes no trânsito desde 2013. Fonte: Adaptado de [World Health Organization \(2018\)](#).

No tocante ao cenário brasileiro, dados do Ministério da Saúde e do Sistema de Informação sobre Mortalidade (SIM), mostram que acidentes de trânsito são a segunda maior causa de morte externa no país ([CASTILHO, 2019](#)). Além disso, segundo o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) ([Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre, 2020](#)), os impactos dos acidentes nas vias brasileiras vão além dos problemas ocasionados à mobilidade urbana, posto que, anualmente, os acidentes de trânsito geram uma despesa de 52,2 bilhões de reais ao Brasil.

Isso posto, diversas medidas legislativas foram criadas ao longo dos anos no intuito de reduzir a crescente tendência de óbitos no trânsito. Além disso, houve a adoção por parte do governo brasileiro ao programa da "Década de Ações para Segurança no Trânsito" da Organização das Nações Unidas (ONU), que tem como principal objetivo reduzir pela metade o número global de mortes e lesões no trânsito. É notório que foram observadas reduções nas estatísticas de acidentes de trânsito, entretanto, as metas postas para a primeira década de ações não foram alcançadas. O Brasil apresentou uma redução em torno de 30% no número de mortes e lesões devido aos sinistros de trânsito, contudo a proporção de acidentes no trânsito continua significativa, demonstrando que ainda há a necessidade de melhorias no sistema viário brasileiro ([BASTOS et al., 2020](#)).

Dessa forma, o desenvolvimento de veículos mais seguros também se faz necessário para que sejam alcançados os objetivos de redução da taxa de mortalidade nas vias. Assim, no âmbito automotivo, diversos componentes foram desenvolvidos de modo a atuarem como dispositivos de segurança ativa e passiva nos veículos. Um dos elementos largamente utilizados devido à sua capacidade de absorção de energia é o *crash box*. Esse componente tem por função atuar como um absorvedor de energia, responsável por converter a energia cinética gerada durante um evento de colisão, em outras formas de energia, através do processo de deformação plástica da estrutura, sendo localizado na parte frontal dos veículos.

Contudo, nos veículos, a maior suscetibilidade às lesões decorridas de acidentes se encontra em situações de impacto lateral entre as colunas A e B do automóvel, devido a

vulnerabilidade da estrutura a essa condição de colisão. A proteção nessa região é feita através da inserção de barras de proteção fixadas internamente às portas, entretanto, não demonstram grande efetividade na segurança aos ocupantes, sendo observado a maior ocorrência de traumatismos cranianos em casos de colisão lateral, devido a redução da absorção de energia e a alta probabilidade de intrusão na carroceria (KIM et al., 2019). Ademais, comparativamente às colisões frontais, a eficiência dos cintos de segurança é reduzida no caso de impactos laterais, ocorrendo lesões a velocidades mais baixas e com menores deformações nos veículos (HILLARY et al., 2002).

Além disso, segundo dados do RENAEST (Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito) (Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito, 2021), a colisão lateral foi a principal causa conhecida de acidentes de trânsito registrados no Brasil entre os anos de 2018 a 2020. Dessa forma, têm-se na literatura diversos trabalhos a respeito do desenvolvimento de estruturas com melhores capacidades de absorção de energia, de modo a reduzir as lesões inerentes aos ocupantes em situações de colisão lateral (YILDIZHAN et al., 2016; TAY; LIM; LANKARANI, 2014).

Ainda sobre o desenvolvimento de sistemas de absorção de energia, observa-se um crescente interesse de pesquisa nos últimos anos acerca de absorvedores de energia preenchidos com materiais compósitos, visto que a inserção desse preenchimento pode atuar como forma de se obter ganhos na resistência à compressão das estruturas. Um dos principais materiais utilizados para essa finalidade são as espumas poliméricas, como, por exemplo, espumas de alumínio e de poliuretano (HUSSEIN et al., 2017; COSTAS et al., 2013; SONG et al., 2005).

Além disso, uma das estruturas usualmente utilizadas para preencher os absorvedores de energia é o honeycomb, em decorrência da alta resistência mecânica dessas estruturas e baixo acréscimo de massa ao conjunto (BALAJI; ANNAMALAI, 2018; ZHANG; ZHANG; WEN, 2014). O honeycomb pode ser confeccionado a partir de diferentes materiais. Na medida em que materiais compósitos tais como os filamentos de impressão 3D têm sido amplamente utilizados em aplicações automotivas, o seu uso na construção dessas estruturas pode ser considerado como objeto de estudo.

Dentre os materiais compósitos de impressão 3D, destaca-se o ABS, PLA e PETG, sendo os três principais polímeros termoplásticos empregados atualmente. Ressalta-se, ainda, que no setor automotivo, as peças confeccionadas a partir desses materiais são geralmente obtidas por processo de injeção, devido as melhores propriedades mecânicas das peças injetadas (AMZA et al., 2021; MONTERO et al., 2001). Todavia, a técnica de manufatura aditiva também pode ser aplicada no âmbito automotivo, visto que a aplicação da impressão 3D proporciona uma maior liberdade de design para criação, especialmente na possibilidade de utilização de estruturas honeycombs e peças com cavidades em veículos (LIM et al., 2016; FAN; VERPOEST; VANDEPITTE, 2006).

1.2 Justificativa

Em face aos desafios intrínsecos à segurança veicular e aos esforços frente à redução do número de mortes e lesões no trânsito, houve a crescente preocupação nas últimas décadas acerca do desenvolvimento de estruturas com alta eficiência de absorção de energia. Sendo que, no contexto da indústria automotiva, tais estruturas são imprescindíveis para garantir a proteção aos passageiros durante eventos de colisão.

À luz da literatura, têm-se diversos estudos acerca da concepção de diferentes modelos de sistemas de absorvedores de energia, sendo confeccionados, principalmente, a partir de tubos de paredes finas (HUSSEIN et al., 2017; SONG; CHEN; LU, 2013; MAMALIS et al., 2009; ABRAMOWICZ; JONES, 1997). Entretanto, a ideia de se agregar estruturas honeycomb confeccionadas a partir de materiais compósitos, de modo a obter um absorvedor híbrido, ainda não foi devidamente explorada. Portanto, o presente trabalho visa o desenvolvimento e a caracterização de absorvedores de energia híbridos.

Ademais, o polímero termoplástico selecionado para a construção da estrutura honeycomb de preenchimento dos absorvedores híbridos foi o PETG, visto que é um material já amplamente difundido no setor automotivo, podendo até mesmo ser avaliado a possibilidade de ser utilizado em um segundo momento de forma reciclada para fabricar outras estruturas (BEX et al., 2021). Além disso, devido a sua capacidade de absorção de energia e boas propriedades mecânicas, apresenta a possibilidade de ser utilizado em aplicações no âmbito da segurança veicular (CASTRO; SILVA; OLIVEIRA, 2021).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de tubos de paredes finas de aço, preenchidos com núcleo honeycomb, com e sem a presença de indutores de falha - representados pela inserção de janelas laterais retangulares em suas faces - com o intuito de promover ganhos na capacidade de absorção de energia da estrutura.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência dos parâmetros de impressão na resistência mecânica de peças impressas;
- Realizar a caracterização do material plástico que foi utilizado para confeccionar a estrutura honeycomb de preenchimento, a partir da determinação de suas propriedades mecânicas à tração e à compressão;

- Dimensionar o absorvedor de energia e a estrutura honeycomb conforme com o que é apresentado na literatura e compreender seus mecanismos de deformação e indicadores de performance;
- Determinar com base na literatura as geometrias ideais de janelas laterais para confecção dos indutores de falha nos absorvedores;
- Comparar o desempenho de diferentes configurações de absorvedores de energia em termos de seus indicadores de desempenho;

1.4 Organização do documento

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica acerca de sistemas de absorvedores de energia, bem como seus principais modos de deformação quando submetidos à compressão uniaxial, uma vez que o entendimento a respeito da deformação da estrutura é necessário para a avaliação de seu desempenho. Também são expostos os principais indicadores de eficiência de absorção energia, juntamente com uma breve explanação dos respectivos parâmetros no âmbito automotivo. Ainda são apresentadas as implicações da tecnologia de manufatura aditiva na indústria automotiva e as características dos principais filamentos de impressão 3D utilizados na atualidade.

No capítulo 3 são discutidos os principais parâmetros de impressão para a modelagem de peças 3D, assim como a influência desses parâmetros na resistência de peças impressas. Vale ressaltar que, na seção introdutória do referido capítulo é apresentado parte da revisão bibliográfica, de modo a dar embasamento teórico para o desenvolvimento do capítulo. São abordados ainda as particularidades da confecção dos corpos de prova para os testes experimentais à tração e à compressão, bem como as características de confecção dos absorvedores de energia.

As análises experimentais referentes a caracterização do material plástico são mostradas no capítulo 4, onde são apresentadas as curvas experimentais oriundas dos ensaios realizados e discutido os principais comportamentos mecânicos do material segundo os normativos utilizados. Ademais, no referido capítulo, é discutido as análises experimentais dos diferentes modelos de absorvedores de energia propostos, no qual é demonstrado o desempenho de cada configuração relativamente a seus indicadores de desempenho.

Por fim, o capítulo 5 discute as conclusões obtidas da caracterização do material e da análise comparativa entre os modelos de absorvedores de energia. É apresentado ainda as possibilidades de trabalhos futuros para continuação do presente estudo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Sistemas de Absorção de Energia

Sistemas de absorção de energia já são amplamente utilizados no âmbito automotivo como meio de proteção, posto que são mecanismos capazes de converter a energia cinética gerada no decorrer de um evento de colisão, em outras formas de energia (ALGHAMDI, 2001). Por conseguinte, sua aplicação pode atuar de forma a minimizar eventuais lesões causadas aos ocupantes durante uma colisão.

No que tange à aplicação de absorvedores de energia na indústria automotiva como um equipamento de segurança veicular, é usualmente adotada a terminologia da eficiência de *crashworthiness* da estrutura. Esse conceito pode ser compreendido como a capacidade de uma estrutura em proteger os seus ocupantes durante um impacto, tornando-se um dos principais preceitos de projeto acerca do desenvolvimento de veículos mais seguros.

Em veículos, o mecanismo de absorção de energia é comumente associado a estrutura do *crash box*. Esse dispositivo consiste em um elemento que é fixado entre o para-choque do veículo e suas longarinas, conforme ilustrado na Figura 3. Seu princípio de funcionamento se embasa na dissipação da energia cinética, oriunda da colisão, através da deformação plástica da estrutura. Dessa forma, tendo em vista a limitação de espaço para instalação dessas estruturas nos veículos, a determinação da geometria do *crash box*, em conjunto com o melhor entendimento de seu mecanismo de deformação, vêm sendo interesse de pesquisa ao longo dos anos (ABDULLAH et al., 2020; YUSOF et al., 2017).

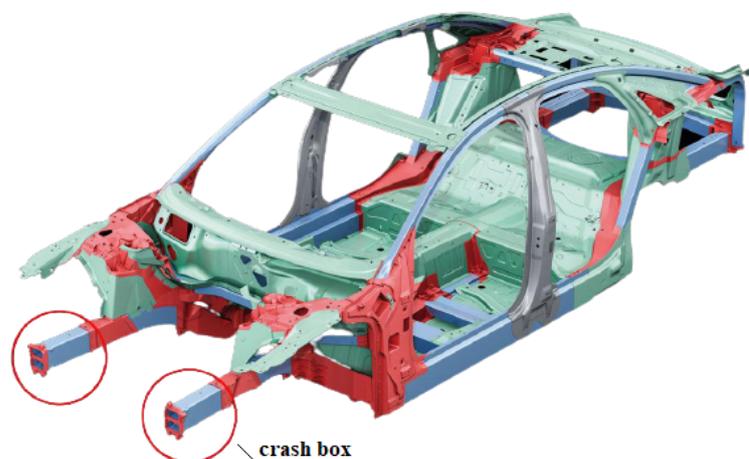


Figura 3 – Posicionamento do crash box automotivo na estrutura veicular. Fonte: Adaptado de Guillon et al. (2014).

À vista disso, têm-se uma vasta literatura a respeito do desenvolvimento de diferentes modelos de absorvedores de energia. Nota-se que tubos de paredes finas é uma das estruturas mais empregadas para essa finalidade, devido à sua alta capacidade de absorção de energia (ABRAMOWICZ; JONES, 1997; ABRAMOWICZ, 2003). Sua geometria consiste, essencialmente, em vigas com diferentes seções transversais, tais como, circular, quadrada/retangular e hexagonal.

2.1.1 Absorvedores de Energia Híbridos

Absorvedores híbridos podem ser compreendidos como estruturas preenchidas com materiais compósitos, tais como espuma de alumínio e espuma de poliuretano, ou com reforços estruturais, como fibra de vidro, fibra de carbono e honeycomb de alumínio. A utilização de materiais como preenchimento em absorvedores de energia vem sendo explorada com bastante recorrência nos últimos anos (HUSSEIN *et al.*, 2017; COSTAS *et al.*, 2016; BABBAGE; MALLICK, 2005; HANSSEN; LANGSETH; HOPPERSTAD, 1999; SANTOSA; WIERZBICKI, 1998), visto que podem atuar como uma maneira de se obter um ganho na capacidade de absorção de energia e resistência mecânica dos tubos.

Costas *et al.* (2016) analisaram a influência da utilização de reforços de estruturas de fibra de vidro em tubos circulares com um preenchimento de espuma polimérica. Nota-se um aumento significativo na absorção de energia dos tubos reforçados e preenchidos, quando comparados aos tubos vazios. Sendo observado que, devido aos efeitos de interação dos materiais de reforço e preenchimento com a estrutura do absorvedor, a eficiência de esmagamento do tubo pode sofrer maior ou menor grau de influência.

No tocante à utilização de materiais de preenchimento no âmbito do desenvolvimento de absorvedores híbridos, uma outra maneira de se obter ganhos na eficiência de absorção de energia consiste na utilização de estruturas honeycombs, conforme mostrado na Figura 4, dado que são estruturas que aliam alta resistência mecânica com baixo acréscimo de massa ao conjunto (BALAJI; ANNAMALAI, 2018; ZHANG; ZHANG; WEN, 2014). No estudo conduzido por Hussein *et al.* (2017), foi analisado o efeito no comportamento à compressão de tubos de paredes finas preenchidos com honeycomb de alumínio, espuma polimérica e a combinação de ambos os preenchimentos. Os resultados experimentais mostraram que o melhor desempenho dos tubos foi obtido com o preenchimento de honeycomb agregado a espuma polimérica. Não obstante, apenas foram observados modos de deformação progressiva nos absorvedores que não continham a combinação dos preenchimentos.

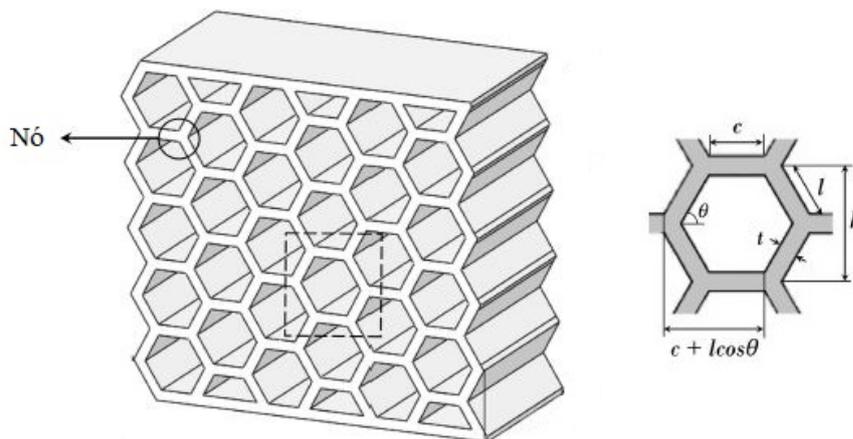


Figura 4 – Geometria da estrutura honeycomb. Fonte: Adaptado de [Basurto-Vazquez et al. \(2021\)](#).

Considerando condições de carregamentos axiais unidirecionais, a aplicação de estruturas honeycomb como material de reforço em absorvedores de energia, é mais eficiente em termos de redução de peso do que espumas poliméricas, além de que possuem maior eficiência à compressão e, por conseguinte, proporcionando maiores ganhos na capacidade de absorção de energia do conjunto. A maior eficiência do honeycomb pode ser explicada pela grande simetria das células hexagonais observadas em sua estrutura, comparativamente com a alta irregularidade observada nas espumas, devido a maior presença de vazios em sua estrutura ([SANTOSA; WIERZBICKI, 1998](#)).

2.1.2 Absorvedores de Energia com a Presença de Descontinuidades Indutoras de Falha

O interesse pelo desenvolvimento de estruturas mais eficazes em termos de absorção de energia, propiciou o surgimento de novos métodos aplicados a sistemas voltados para essa finalidade. O emprego de indutores de falha em tubos de paredes finas, atua de forma a induzir que a deformação plástica, durante a compressão ocorra em uma região pré-estabelecida, favorecendo o surgimento de modos mais uniformes de deformação e melhorando a capacidade de absorção de energia da estrutura ([DANESHI; HOSSEINIPOUR, 2003](#); [SINGACE; EL-SOBKY, 1997](#)).

[Zhou et al. \(2018\)](#) e [Song, Chen e Lu \(2013\)](#) conduziram experimentos de tubos de paredes finas com a presença de aberturas nas faces do tubo, a partir da confecção de janelas laterais com geometrias retangulares. Os resultados mostraram que a presença das janelas na estrutura otimizou a performance durante o esmagamento, comparativamente aos tubos convencionais. Ademais, também foi observado que a geometria e a localização das janelas podem exercer influência direta no modo de deformação do componente.

Destaca-se, ainda, que relativamente ao estudo de [Song, Chen e Lu \(2013\)](#), os autores demonstraram que tubos de paredes finas com a presença de janelas em suas faces

poderiam ser agrupados em três modos principais de deformação, simétrico, extensional e diamante, bem como em modos de colapso de transição, dependendo dos diferentes valores de razão entre as dimensões da janela e as dimensões do tubo.

A partir da Figura 5, nota-se que para menores valores de razão, ou seja, com janelas menores em comparação as dimensões do tubo, obtêm-se modos simétricos de colapso e, por conseguinte, otimizando a capacidade de absorção de energia dos tubos. Onde a e b representam a largura e altura da janela, respectivamente, e c e H indicam a largura e altura do tubo.

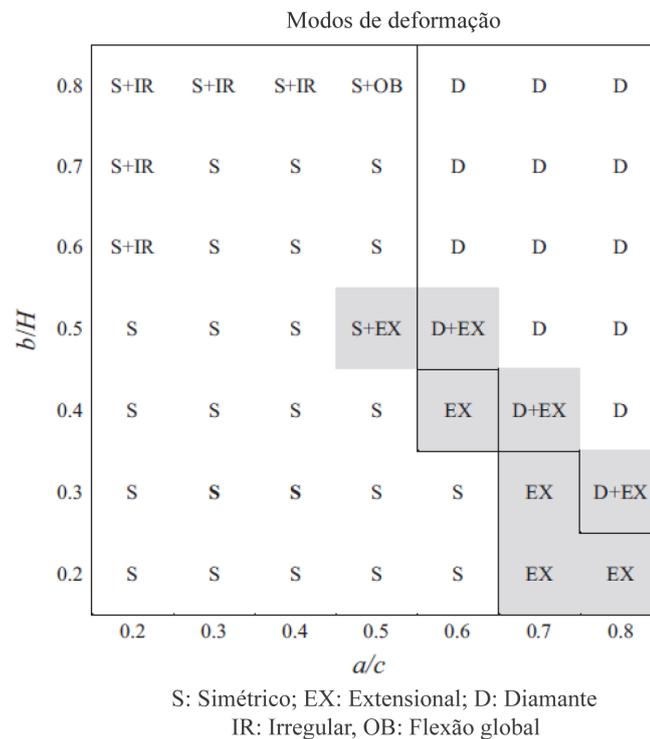


Figura 5 – Mapa dos modos de deformação. Fonte: Adaptado de Song, Chen e Lu (2013).

Em Silva, Teles e Oliveira (2021) e Mamalis et al. (2009), discutiu-se a eficiência da inserção de indutores de falha circulares nos tubos de paredes finas. Ambos demonstram que a presença dos orifícios melhora a absorção de energia, bem como acarreta na redução da força de pico inicial durante a compressão. Além disso, em alguns casos, nota-se uma maior probabilidade da formação de modos de deformação progressiva.

2.2 Modos de Deformação de Absorvedores de Energia

Na literatura, podem ser encontrados diversos estudos acerca dos diferentes mecanismos de deformação, usualmente, obtidos durante a compressão de tubos de paredes finas. Entretanto, o modo específico de deformação dessas estruturas depende de sua geometria, das condições de contorno que são impostas à estrutura e das propriedades do material, nas quais foram confeccionadas (KARAGIOZOVA; JONES, 2008).

Segundo [Abramowicz e Jones \(1986\)](#) e [Abramowicz e Jones \(1984\)](#), observa-se que existem três modos principais de deformação para absorvedores de energia com seção quadrada/retangular, sendo eles: modo simétrico, assimétrico e flexão global.

2.2.1 Modo de Deformação Simétrico

O modo de deformação simétrico, também conhecido como flambagem progressiva, pode ser obtido a partir de três condições, nas quais possuem as mesmas características de absorção de energia. A primeira consiste na formação dos lóbulos da estrutura todos para dentro. A segunda, com a deformação ocorrendo com três lóbulos para dentro e um para fora. E a terceira condição é obtida quando há a formação de dois lóbulos de faces opostas deformando-se para dentro e os outros dois lóbulos opostos deformando-se para fora ([ABRAMOWICZ; JONES, 1984](#)).

Vale salientar que, no âmbito da segurança veicular, a obtenção de modos mais simétricos de deformação são desejáveis, posto que representam uma maior absorção de energia por parte da estrutura, através da deformação plástica dos sucessivos lóbulos formados, conforme ilustrado na [Figura 6](#).

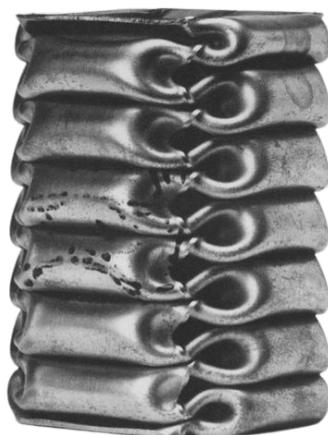


Figura 6 – Modo de deformação simétrico para tubos de seção quadrada. Fonte: [Abramowicz e Jones \(1984\)](#).

Além disso, [Abramowicz e Jones \(1997\)](#) apresentam um extenso programa experimental voltado para o estudo de tubos de paredes finas confeccionados em aço, com diferentes seções transversais - retangular e circular - e com diferentes comprimentos. Os ensaios foram conduzidos em condições de compressão axial quasi-estática e dinâmica, onde os autores observaram uma região de transição entre a flambagem progressiva e a flexão global.

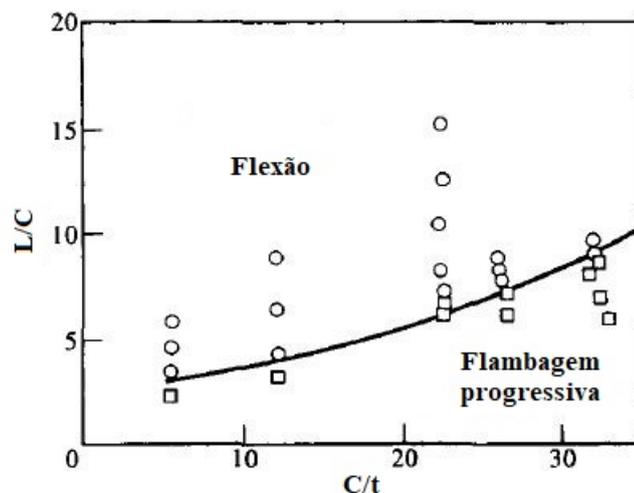


Figura 7 – Mapa de deformação para tubos quadrados sob carregamento quase-estático. Fonte: Adaptado de Abramowicz e Jones (1997).

Sendo que mesmo para colunas com configurações mais curtas, ou seja, com menores valores de comprimento do tubo e, por conseguinte, menores valores para a relação L/C , ainda são observados modos de flambagem progressiva, assim como ilustrado na Figura 7.

2.2.2 Modo de Deformação Assimétrico

Assim como descrito para o modo simétrico, a deformação dos absorvedores de energia, a partir de um modo assimétrico, também conhecida como um modo misto de deformação, pode ser desenvolvida como consequência de condições distintas de formação dos lóbulos. Na hipótese da primeira camada de lóbulos desse modo de deformação se formar de maneira simétrica, assim como ilustrado na Figura 6, uma camada assimétrica irá se desenvolver a seguir ao longo do tubo (ABRAMOWICZ; JONES, 1984). Todavia, essa característica de formação de lóbulos é vista em outras deformações para esse modo assimétrico, embora a posição dos lóbulos superiores possa mudar de localização na deformação assimétrica, conforme observado nas Figuras 8 e 9.

No modo assimétrico I (Fig. 8a), nota-se que após o tubo desenvolver a primeira camada de lóbulos, ocorre a formação de três dobras para fora, sendo uma na face lateral do tubo e as outras duas em faces opostas (frontal e traseira), e uma dobra para dentro. Enquanto que para o modo assimétrico II (Fig. 9a), há a presença de dois lóbulos de lados adjacentes formando-se para fora e outros dois para dentro. Dessa forma, distinguindo-se das condições de formação de lóbulos descrito para o modo simétrico (seção 2.2.1).

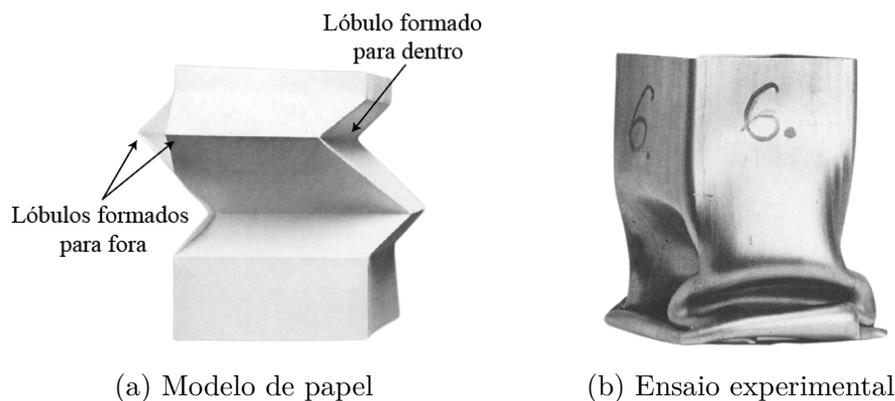


Figura 8 – Modo de deformação assimétrico I. Fonte: Adaptado de Abramowicz e Jones (1984).

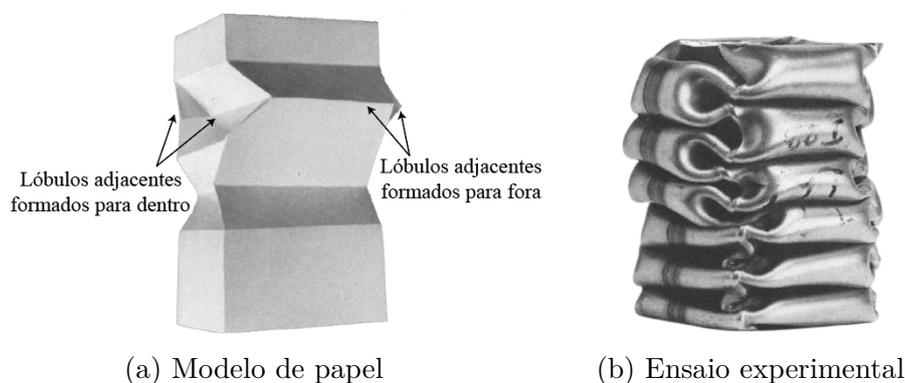


Figura 9 – Modo de deformação assimétrico II. Fonte: Adaptado de Abramowicz e Jones (1984).

Ademais, a presença de modos assimétricos de deformação dá origem a tendência da inclinação da parte não deformada da estrutura em relação ao seu eixo vertical. Sendo possível observar uma transição entre um modo progressivo de colapso, ou seja, a partir da formação de lóbulos subsequentes, para um modo de flexão global - assim como discutido em Abramowicz e Jones (1997) - caso ocorram lóbulos assimétricos suficientes para provocar instabilidade na coluna (ABRAMOWICZ; JONES, 1984).

2.2.3 Flexão Global

O surgimento da flexão global, frequentemente, está relacionado à presença de imperfeições iniciais no tubo e não aparenta ser dependente do comprimento inicial do absorvedor. Além disso, o aparecimento de um modo de flexão global também pode ser oriundo de um esmagamento simétrico, conforme supracitado. Logo, a deformação simétrica introduz perturbações na parte não comprimida do tubo, que atuam como imperfeições, induzindo à flexão global e, eventualmente, à falha (ABRAMOWICZ; JONES, 1984). A Figura 10 visa exemplificar o aparecimento da flexão global a partir de deformações simétricas.



Figura 10 – Flexão global de tubos de seção quadrada a partir do desenvolvimento de modos simétricos de colapso. Fonte: Abramowicz (2003).

Segundo Auersvaldt (2014), o modo de flexão global possui características de deformação semelhantes aos modos de Euler, onde o carregamento imposto ao tubo provoca uma instabilidade lateral da estrutura causando uma flexão lateral, a partir de dobras principais. É observado também, que a instabilidade global é causada pelo primeiro pico de força gerado pela compressão, sendo que a energia cinética é parcialmente transmitida à estrutura, ocasionando uma menor energia de deformação e, por conseguinte, menores valores de absorção de energia.

2.3 Indicadores de Eficiência de Absorção de Energia

Devido aos diferentes modelos existentes de absorvedores de energia, é necessário verificar as suas performances em detrimento de outros. Conquanto, análises de forma a avaliar o desempenho de absorvedores distintos se tornam complexas em função da variedade de modos de deformação entre os modelos, bem como pela ausência de dados - sob condições de impacto - dos materiais utilizados em sua confecção (AUERSVALDT, 2014).

Dessa forma, são encontrados na literatura diversos estudos acerca do desenvolvimento de métodos que permitam uma maior compreensão a respeito do desempenho à compressão dessas estruturas. Portanto, indicadores de desempenho são utilizados de forma a comparar e a avaliar a performance de diferentes modelos de absorvedores de energia, independentemente de seu modo de deformação e geometria adotada (TELES, 2018).

Isso posto, são apresentados os principais indicadores de desempenho adotados para sistemas de absorção de energia, bem como é apresentado uma breve discussão no que tange suas considerações no âmbito automotivo.

2.3.1 Energia Absorvida (E_a)

A energia absorvida consiste na energia que é dissipada pela estrutura durante o processo de compressão, também podendo ser determinada a partir da área abaixo da

curva da força pelo deslocamento. Devendo ser o maior valor possível nos absorvedores, visto que representa a conversão da energia cinética que é gerada durante uma colisão, através da deformação plástica do modelo e, conseqüentemente, reduzindo os efeitos inerciais sentidos pelos ocupantes.

$$E_a = \int_0^D P(x)dx \quad (2.1)$$

Onde $P(x)$ representa a força de compressão exercida sob o espécime e D é o deslocamento máximo que ocorreu durante o esmagamento.

2.3.2 Energia Absorvida Específica (SEA)

O SEA é definido como a razão da energia absorvida (E_a) pela massa total do absorvedor (m), sendo que valores mais altos são desejáveis para o referido parâmetro. Além disso, esse indicador também é utilizado para avaliar o desempenho de absorção de energia em função da redução da massa da estrutura, uma vez que sistemas mais leves são cada vez mais desejados na indústria automotiva.

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (2.2)$$

2.3.3 Força máxima (F_{max})

A força máxima representa a maior força obtida durante o esmagamento, a qual pode ser observada a partir da curva experimental do espécime submetido à compressão. Tendo em vista que esse parâmetro está intrinsecamente relacionado as lesões causadas aos ocupantes durante um evento de colisão, valores demasiadamente altos devem ser evitados.

2.3.4 Força Média (F_m)

A força média é obtida através da razão entre a energia absorvida (E_a) e o deslocamento máximo (D). Esse conceito surge devido ao ensaio quase-estático, em que forças inerciais associadas a solicitações dinâmicas não exercem grande influência. Seu valor é afetado pela variação das cargas máximas atingidas ao longo da compressão, no qual maiores valores de força média representam maiores valores de força geradas durante o esmagamento.

$$F_m = \frac{E_a}{D} \quad (2.3)$$

2.3.5 Razão de Carregamento (LR)

O LR é dado através de uma relação entre forças, calculado como a razão entre a força máxima (F_{max}) e a força média (F_m). Para o referido indicador, é desejável que seja o mais próximo de 1, posto que valores muito elevados de razão de carregamento representam maiores valores de força de pico, sendo assim transmitido ao veículo e podendo ocasionar lesões aos ocupantes no decorrer de uma colisão.

$$LR = \frac{F_{max}}{F_m} \quad (2.4)$$

2.3.6 Efetividade Estrutural (η)

A efetividade estrutural é um parâmetro que permite a comparação entre absorvedores confeccionados de materiais distintos, sendo interessante que seu valor seja o maior possível, posto que ele demonstra uma efetividade na consideração da capacidade de resistência da estrutura frente a um esforço médio.

$$\eta = \frac{F_m}{(A\sigma_o)_{aço} + (A\sigma_o)_{honey}} \quad (2.5)$$

Onde A indica a área de seção transversal de cada material e σ_o representa a tensão de escoamento do material no qual é confeccionado o absorvedor e a estrutura honeycomb de preenchimento.

2.4 Tecnologia de Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva

A técnica de manufatura aditiva consiste em diferentes tecnologias que permitem a confecção de peças tridimensionais, a partir da sobreposição de camadas. Dentre as inúmeras tecnologias existentes, a impressão 3D surge como a mais difundida, visto que alia o baixo custo de materiais e equipamentos, com a versatilidade da elaboração de geometrias complexas utilizando uma vasta opção de materiais, principalmente, polímeros termoplásticos (RODRIGUEZ-PANES; CLAVER; CAMACHO, 2018).

Ressalta-se que o universo da impressão 3D abrange diferentes tecnologias, como, por exemplo, *stereolithography* (SLA), *Selective Laser Sintering* (SLS), *Multi Jet Fusion* (MJF), entre outros. Entretanto, a prototipagem rápida pelo método de deposição de material fundido, conhecido por *Fused Deposition Modeling* (FDM), vêm se tornando uma das tecnologias mais utilizadas no âmbito técnico, demonstrando potencial de aplicação em diferentes setores da indústria, como, por exemplo, no setor automotivo. O FDM se baseia na construção de peças através da extrusão dos filamentos poliméricos e na deposição

de inúmeras camadas sobrepostas de material para constituir a peça final (GALETTO; VERNA; GENTA, 2021; MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015).

Convém salientar, ainda, que as peças fabricadas por impressão 3D pelo FDM, normalmente possuem propriedades mecânicas inferiores em comparação com as peças fabricadas por moldagem por injeção. No entanto, os custos agregados ao processo de injeção são significativamente mais elevados, quando comparados ao da peça impressa em 3D. Ademais, o processo de injeção depende de vários parâmetros externos, como, por exemplo, geometria da peça, tamanho do molde e número de peças (AMZA et al., 2021; PRIYA et al., 2019).

À vista disso, mesmo com as ressalvas aqui apresentadas acerca do processo de impressão 3D, o referido método vem sendo aplicado com relativo sucesso nas mais diversas áreas. Especialmente levando em consideração que fabricar um componente com geometria complexa, a partir do processo de injeção, como, por exemplo, uma estrutura honeycomb, é mais difícil e dispendioso (PRIYA et al., 2019).

Dessa forma, a impressão 3D na indústria teve impactos significativos na produção, uma vez que proporcionou uma mudança de conceitos e forneceu maior liberdade de design para criação. No contexto da indústria automotiva, a aplicação da impressão 3D ensejou o desenvolvimento de veículos com estruturas mais leves, seguros e com prazos de produção mais curtos. Além disso, possibilitou a utilização de estruturas com geometrias mais complexas, tal como honeycombs e peças com cavidades em veículos (LIM et al., 2016).

Dentre os diferentes tipos de materiais utilizados na manufatura por impressão 3D, pode-se destacar três principais polímeros termoplásticos empregados na forma de filamentos para impressão, são eles: ABS, PLA e PETG. Outros polímeros que podem ser utilizados para impressão 3D são o policarbonato (PC), poliacetato de vinila (PVA) e polieterimida (PEI). No entanto, apresentam certas limitações, visto que necessitam de uma alta temperatura de extrusão durante a impressão e outros requisitos específicos para reduzir o empenamento das peças (PEREZ; ROBERSON; WICKER, 2014). Posto isso, os principais polímeros utilizados no FDM são descritos em maiores detalhes nas seções abaixo.

2.4.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

O ABS é um polímero termoplástico amorfo derivado do petróleo, sendo formado a partir de 3 monômeros: Acrinolitrla, Butadieno e Estireno. No âmbito da impressão 3D, foi o primeiro filamento a ser utilizado de forma extensiva, sendo, ainda, bastante utilizado em aplicações automotivas e outras aplicações industriais distintas. Além disso, devido ao processamento do ABS ser mais complexo que o dos plásticos comuns, como

as poliolefinas, o mesmo é conhecido como plástico de engenharia (ALBURQUERQUE, 2014).

O filamento de ABS apresenta temperatura de transição vítrea em torno de 110^o C. Além disso, por se tratar de um polímero completamente amorfo, não possui uma temperatura de fusão definida (PEREZ; ROBERSON; WICKER, 2014). Conforme o trabalho de Gnatowski et al. (2019), nota-se que o ABS já é amplamente utilizado na indústria automotiva, principalmente, na produção de peças internas dos veículos, devido às suas propriedades, como, boa resistência química e alta resistência a fissuras e impactos.

Em Ahn et al. (2002) e Montero et al. (2001) foi avaliado a anisotropia do ABS, a partir de um experimento fatorial para avaliar a influência dos parâmetros de impressão do FDM, como, cor do material, ângulo de varredura, presença de vazios e espessura de camada, nas propriedades mecânicas da peça impressa. Os resultados mostraram que a presença de vazios e o ângulo de varredura afetam significativamente a resistência à tração da peça, não obstante a pigmentação do filamento e a espessura de camada não apresentaram efeitos consideráveis. Além disso, foi determinado um conjunto de regras de construção para projetar peças impressas, de modo a melhorar a resistência e a qualidade das peças fabricadas por FDM.

Ademais, segundo Rodriguez-Panes, Claver e Camacho (2018), o ABS possui elevada resistência aos impactos, à abrasão e à química, sendo o filamento mais utilizado após o PLA. Ademais, uma de suas principais vantagens está associada à sua elevada resistência térmica e longa vida útil, bem como apresenta certa flexibilidade nas peças impressas. Contudo, não é recomendado para todas as aplicações, uma vez que apresenta maiores problemas de empenamento, sendo o polímero com a maior dificuldade de impressão comparativamente ao PLA e ao PETG, e tende a liberar gases tóxicos durante a impressão (ALBURQUERQUE, 2014).

2.4.2 Ácido Polilático (PLA)

O filamento de PLA é um dos termoplásticos mais utilizados no universo de impressão 3D, nas mais diversas aplicações de Engenharia. Isto porque é um dos filamentos com maior facilidade de impressão. O PLA é um polímero biodegradável feito, a partir de fontes renováveis, tendo o potencial para substituir os polímeros baseados no petróleo. Possui bom acabamento superficial, alta resistência mecânica e baixa toxicidade, além de possuir aplicações nos casos onde as peças estão submetidas a condições de cargas cíclicas (ROCCA-SMITH et al., 2017; AFROSE et al., 2016).

O PLA possui diferentes isômeros associados em decorrência de sua natureza quiral, podendo ser obtido através de diferentes processos químicos. O homopolímero do PLA se apresenta na forma branca, opaca e rígida, com temperatura de transição vítrea

e temperatura de fusão em torno de 55° C e 180° C, respectivamente. As propriedades térmicas do PLA podem ser afetadas por diferentes parâmetros estruturais, como pesos moleculares e composição (CABREIRA, 2018; HAMAD et al., 2015). Devido à isomeria da molécula base do PLA, o respectivo polímero pode variar de um material cristalino a completamente amorfo (HAMAD et al., 2015; VELAZQUEZ-INFANTE et al., 2013).

Além disso, devido a menor temperatura de transição do material, o PLA apresenta uma baixa temperatura máxima de utilização, limitando sua aplicação em diversos casos (VELAZQUEZ-INFANTE et al., 2013; JAMSHIDIAN et al., 2010). Contudo, o PLA apresenta boas propriedades como barreira para CO_2 e O_2 , sendo comparável ao PET, além de sua baixa toxicidade, possibilitando sua utilização diretamente em contato com os alimentos, principalmente no embalado de produtos, bem como em implantes biológicos, no setor automotivo, na agricultura e em aplicações eletrônicas (CABREIRA, 2018; ROCCA-SMITH et al., 2017).

Em Rodriguez-Panes, Claver e Camacho (2018), foram realizados estudos comparativos entre o comportamento mecânico do PLA e ABS. Foi observado que as peças impressas utilizando o filamento de PLA apresentaram um desempenho mais rígido e com maior resistência à tração. Entretanto, as partes confeccionadas em PLA demonstram ter um comportamento mais frágil relativamente aos outros filamentos de impressão 3D, apresentando deformações mais baixas antes da ruptura, com menos de 10% de elongação. Portanto, não sendo indicado para aplicações que requeiram maiores performances mecânicas (CABREIRA, 2018).

Em relação aos polímeros tradicionais, como o polipropileno (PP), poliestireno (PS) e polietileno (PE), o PLA apresenta melhores propriedades mecânicas, particularmente na resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência à flexão. Todavia, exibe uma menor resistência a impactos e capacidade de deformação, quando comparado a esses mesmos polímeros (HAMAD et al., 2015).

2.4.3 Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG)

O PETG é um copolímero amorfo não cristalizável do Polietileno Tereftalato (PET), onde a letra G indica o grupo glicol adicionado na copolimerização. Além disso, o PET e o PETG exibem um comportamento de deformação similar, bem como possuem uma temperatura de transição vítrea semelhante. Todavia, o PET apresenta cristalizações induzidas através da deformação do material, enquanto que o PETG exibe níveis muito baixos de cristalização em temperaturas de processamento, sendo menos de 3% (DUPAIX; BOYCE, 2005). No entanto, convém salientar que o PETG pode ser obtido como um polímero semicristalino, sendo que tal verificação da cristalinidade do material pode ser realizada através de um ensaio de Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC).

A adição do grupo glicol confere ao PETG uma maior flexibilidade e maior resistência ao impacto. A temperatura de transição vítrea do polímero é em torno de 85° C. Segundo [Santana et al. \(2018\)](#), o PETG demonstrou ser um material mais resistente à degradação térmica, mais estável termicamente e flexível, comparativamente ao PLA. Além disso, o filamento de PETG alia boas propriedades mecânicas com uma facilidade de impressão, apresentando baixo empenamento nas peças impressas. Portanto, devido às suas propriedades mecânicas e térmicas, o PETG vêm sendo amplamente empregado na impressão 3D, sendo, atualmente, o terceiro polímero mais utilizado nesse campo, atrás apenas do ABS e do PLA ([AMZA et al., 2021](#)).

Conforme abordado no estudo de [Castro, Silva e Oliveira \(2021\)](#), o PETG foi avaliado em relação ao seu comportamento mecânico em aplicações automotivas. Os resultados mostraram que a resistência mecânica das peças é sensível aos parâmetros de impressão selecionados, além de que foi observado que o filamento de PETG demonstra possuir aplicações no âmbito da segurança veicular, em decorrência da sua capacidade de absorção de energia e boas propriedades mecânicas.

No estudo de [Amza et al. \(2021\)](#), foi avaliada a influência de um tratamento térmico pós-processamento nas peças impressas em PETG visando a melhorar suas propriedades mecânicas, de modo a reduzir a diferença no desempenho mecânico entre as partes fabricadas por impressão 3D e por moldagem por injeção. Após a impressão das peças, as amostras eram embaladas em pó de cloreto de sódio e, posteriormente, tratadas termicamente a uma temperatura de 220 °C por 5 a 15 minutos. Os resultados evidenciaram que as propriedades à tração e à compressão das peças aumentaram significativamente após o tratamento térmico. Sendo observado que o tratamento proporcionou um ganho nas propriedades mecânicas das peças impressas em PETG, reduzindo a diferença de desempenho entre a impressão 3D e a injeção ao utilizar polímeros comuns.

Ademais, devido às preocupações globais em relação à poluição gerada por resíduos plásticos e o aumento na conscientização acerca da sustentabilidade, o uso de polímeros reciclados em tecnologias de impressão 3D vêm sendo foco de estudo atualmente ([BEX et al., 2021](#)). Conforme o trabalho de [Bex et al. \(2021\)](#), foram avaliadas as características do PETG reciclado (rPETG) em relação ao PETG natural, bem como a utilização desses polímeros como matriz para impressão de peças reforçadas com fibras de carbono. Os resultados obtidos demonstraram que as propriedades à tração do rPETG eram inferiores ao do PETG natural, contudo, as propriedades de flexão de ambos os materiais eram semelhantes. Ressalta-se, ainda, que a adesão entre as camadas do rPETG e a fibra de carbono era superior do que a adesão observada com o PETG. Sendo que foi evidenciado a capacidade do PETG em ser reciclado e utilizado para fabricação de novos produtos com alto valor agregado ([BEX et al., 2021](#)).

3 Metodologia

De maneira a obter uma maior compreensão acerca das propriedades mecânicas do material utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho, foi realizada a caracterização do filamento de impressão 3D. Os ensaios foram executados com base em normativos padrões fornecidos pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*), de forma a avaliar a performance mecânica tanto à tração quanto à compressão do material.

O filamento comercial de PETG de 1,75 mm de diâmetro foi utilizado para a impressão dos corpos de prova submetidos aos ensaios experimentais. A escolha se baseou, principalmente, na facilidade de impressão proporcionada pelo PETG, concomitantemente com suas boas propriedades mecânicas e devido ao fato de ser uma realidade já aplicada ao setor automotivo, conforme abordado na seção 2.4.3. Ademais, vale ressaltar que os parâmetros de impressão selecionados para a confecção dos espécimes exercem influência direta em seu desempenho, sendo necessário um maior entendimento a respeito das especificidades de cada parâmetro, conforme apresentado na seção 3.1.

Os testes experimentais foram realizados em uma máquina universal de ensaios servo-hidráulica da marca Instron, modelo 8801, com capacidade de carga de 100 kN. Devido às particularidades do ensaio à compressão, foi necessário a adaptação de dois suportes cilíndricos à máquina de ensaio, de modo a executar os testes, conforme prescrito em norma. As características de cada ensaio são abordadas de forma mais elucidativa nas seções 3.2 e 3.3.

Um tubo comercial de aço SAE 1010 com seção quadrada de 50x50 mm e espessura de 1,60 mm foi utilizado para a confecção dos absorvedores de energia. As janelas laterais foram usinadas em um centro de usinagem D600 com três configurações geométricas distintas, conforme abordado na seção 3.4. Analogamente aos testes experimentais de caracterização do material plástico, os ensaios de compressão dos absorvedores foram realizados em máquina universal de ensaios servo-hidráulica da marca Instron, modelo 8801, com capacidade de carga de 100 kN. Contudo, alguns modelos dos absorvedores de energia híbrido ultrapassavam a capacidade de carga do equipamento. Dessa forma, parte dos ensaios foram realizados em uma máquina EMIC com capacidade de carga de 200 kN.

3.1 Parâmetros de impressão

O filamento de PETG foi adquirido da fabricante 3D Fila, sendo designado comercialmente pela mesma como PETG XT. O filamento possui 1,75 mm de diâmetro, sendo comprado com a pigmentação *Blue Metal*. De acordo com as instruções da fabricante,

ressalta-se a importância dos parâmetros de temperatura e velocidade ideais de impressão, de modo a obter uma melhor qualidade das peças. A Tabela 1 visa sumarizar as recomendações fornecidas pela fabricante e os respectivos valores utilizados no presente trabalho.

A escolha por uma velocidade de impressão abaixo da recomendada, foi feita de modo a garantir uma maior qualidade da impressão, evitando a ocorrência de vazios internos entre as deposições das camadas e, principalmente, devido às características do bico de extrusão utilizado, uma vez que, em função da espessura de camada selecionada para a impressão dos espécimes, foi necessário utilizar um bico extrusor de 0,25 mm de diâmetro. Logo, a vazão do material deveria ocorrer de forma mais lenta, ou seja, com uma menor velocidade de impressão, para garantir uma maior uniformidade do material durante a deposição.

Tabela 1 – Parâmetros adotados para configuração da impressora

Parâmetros	Recomendação da fabricante	Valor utilizado
Temperatura de impressão	225 ~ 260 °C	255 °C
Temperatura da plataforma	80 ~ 90 °C	70 °C
Velocidade de impressão	45 ~ 60 mm/s	55 mm/min

Dessa forma, observa-se que os parâmetros de impressão podem ser compreendidos a partir de dois contextos. O primeiro deles, está mais relacionado com as configurações adotadas para a impressora, como, por exemplo, as temperaturas e velocidade de impressão, conforme apresentado na Tabela 1. Já o segundo está intrinsecamente relacionado com os parâmetros geométricos da peça, ou seja, nas características de construção selecionadas para a confecção da peça impressa, conforme elucidado nas seções a seguir.

Entre os principais parâmetros de impressão voltados para o âmbito geométrico, a orientação de construção, ângulo de varredura, preenchimento e espessura de camada, exercem efeitos consideráveis na qualidade e resistência das peças (ROYAN et al., 2021; CHACON et al., 2017; MONTERO et al., 2001). Os respectivos parâmetros foram selecionados separadamente, levando em consideração as particularidades de cada teste experimental que foi executado, tração e compressão. A seguir é apresentada uma breve explanação para maior entendimento dos parâmetros de impressão adotados neste trabalho.

3.1.1 Orientação de Construção

A orientação de construção pode ser compreendida como a maneira na qual a peça é posicionada na plataforma de impressão. Assim dizendo, representa a direção na qual as camadas serão depositadas para confeccionar a peça impressa.

De acordo com [Chacon et al. \(2017\)](#), a orientação de construção afeta significativamente as propriedades mecânicas da peça, sobretudo, a ductibilidade e a forma na qual ocorre a falha. A Figura 11 ilustra as três possibilidades de orientação para impressão 3D, onde os espécimes orientados na direção *Flat* e *On-edge* exibem as maiores propriedades mecânicas.

3.1.2 Ângulo de Varredura

O ângulo de varredura pode ser definido como a orientação da deposição do filamento em relação à aplicação da carga. Logo, é um fator que exerce influência significativa na resistência mecânica das peças. No entanto, por se tratar de um parâmetro que influencia o desempenho mecânico da peça em detrimento da solicitação na qual elas são submetidas, não há um consenso na literatura acerca do valor ideal para essa característica de impressão.

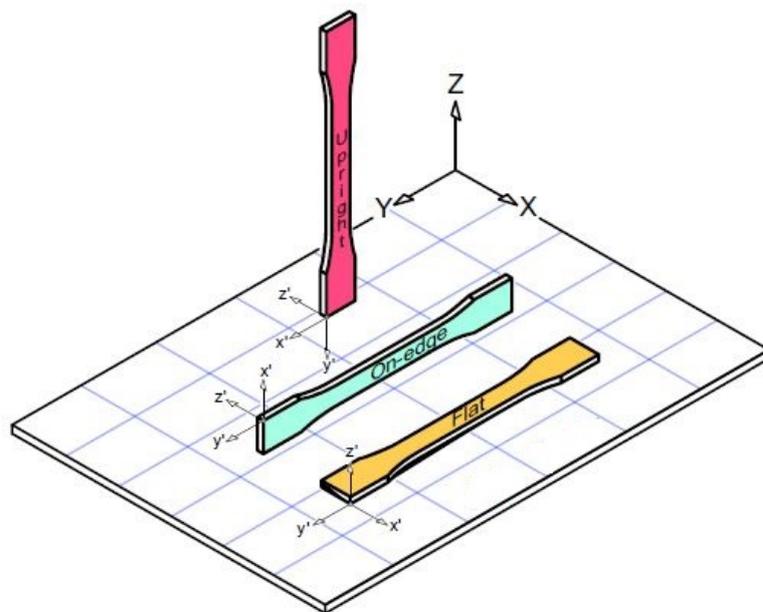


Figura 11 – Orientação de construção para impressão 3D. Fonte: Adaptado de [Chacon et al. \(2017\)](#).

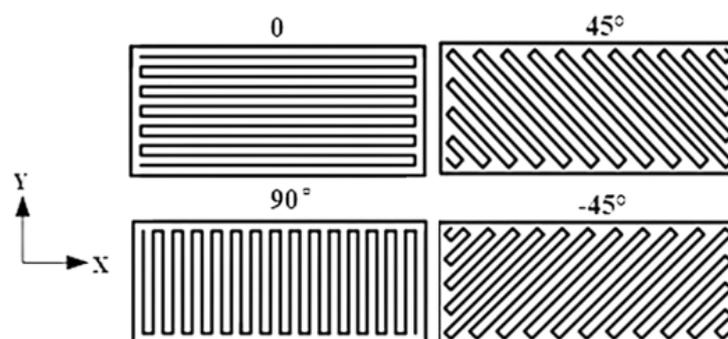


Figura 12 – Representação do ângulo de varredura. Fonte: [Liu, Lei e Xing \(2019\)](#).

A Figura 12 demonstra os principais ângulos de varredura utilizados durante a confecção das peças.

3.1.3 Preenchimento

A relação da quantidade de material presente na peça e a quantidade de espaços vazios internos, representa a porcentagem de preenchimento utilizado, ou seja, peças com menores porcentagens de preenchimento, irão apresentar maiores quantidades de espaços vazios internamente. Assim, quanto maior a porcentagem de preenchimento, mais próximo de uma peça sólida a impressão se aproxima, conforme mostrado na Figura 13.

Nota-se, que uma maior presença de vazios acarreta em menores propriedades mecânicas. Contrariamente, à medida que se aumenta a porcentagem de preenchimento, ganha-se em rigidez e resistência da peça (FERNANDEZ-VICENTE et al., 2016).

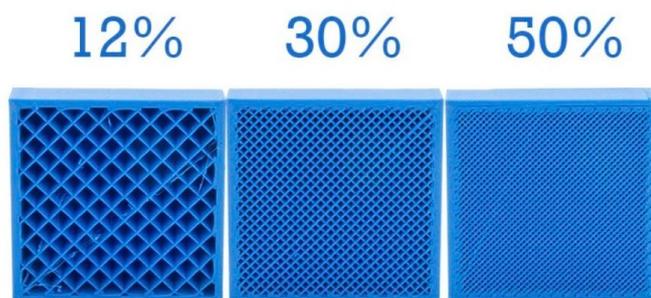


Figura 13 – Impressões feitas com diferentes porcentagens de preenchimento. Fonte: [filament2print \(2019\)](#).

3.1.4 Espessura de Camada

A espessura de camada indica qual a espessura do filamento que será depositado para formar as sucessivas camadas da peça, sendo que esse parâmetro de impressão pode ser controlado, a partir da seleção de diferentes bicos de extrusão. Impressões com menores espessuras de camada exibem melhores propriedades mecânicas (CHACON et al., 2017).

Além disso, a redução da espessura da camada proporciona o aumento do número de camadas que constituem a peça final, criando partes mais uniformes e com menores espaços vazios, conforme ilustrado na Figura 14.

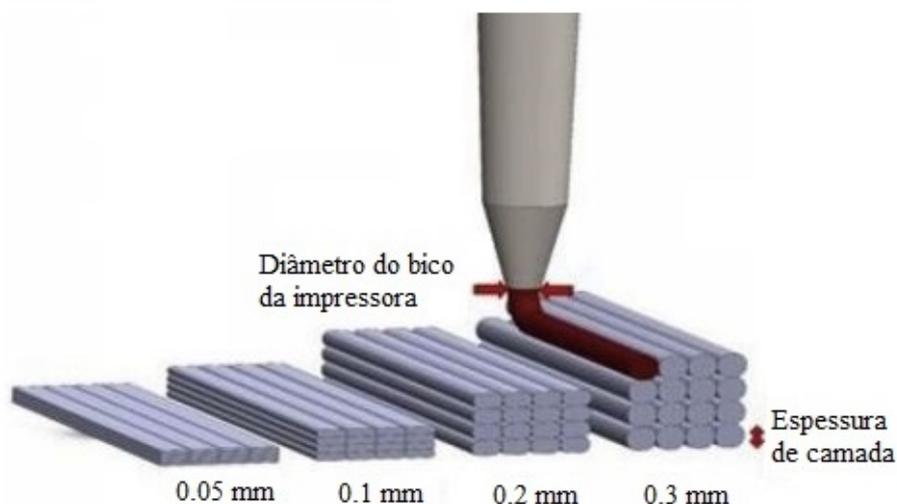


Figura 14 – Representação esquemática de diferentes espessuras de camada. Fonte: Adaptado de [Ayrilmis \(2018\)](#).

3.2 Ensaios à Tração

Os testes experimentais à tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios da marca Instron, modelo 8801, com capacidade de carga de 100 kN. A aquisição de dados foi feita através do software *Bluehill*, no qual é voltado especificamente para ensaios de materiais, também desenvolvido pela empresa Instron. Todos os ensaios foram executados à temperatura ambiente e conforme as previsões da norma ASTM D638-14 ([ASTM D638-14, 2014](#)).

A norma padrão [ASTM D638-14 \(2014\)](#) compreende a determinação das propriedades à tração de materiais plásticos. Segundo suas prescrições, o corpo de prova pode ser construído de cinco formas distintas. Para o presente ensaio, a peça foi confeccionada conforme o Tipo I do método de teste utilizado, no qual corresponde a seção de teste para plásticos rígidos e semirrígidos. A representação do corpo de prova para o ensaio à tração, bem como as principais dimensões que o constituem, são apresentadas na Figura 15 e Tabela 2, respectivamente.

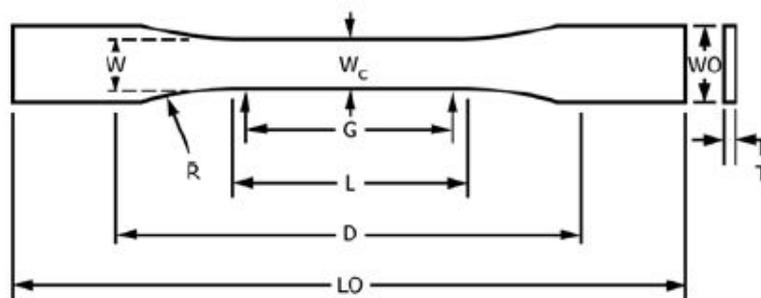


Figura 15 – Corpo de prova padrão para ensaio à tração. Fonte: [ASTM D638-14 \(2014\)](#).

Tabela 2 – Principais dimensões do corpo de prova padrão para ensaio à tração. Fonte: [ASTM D638-14 \(2014\)](#).

Dimensões	Valores (mm)
LO - Comprimento total	165
D - Distância entre as garras	115
R - Raio de filete	76
L - Comprimento da seção estreita	57
WO - Largura total	19
W - Largura da seção estreita	13
T - Espessura	3,2

O corpo de prova foi desenvolvido no software CAD CATIA V5 R21, conforme as dimensões supracitadas e, posteriormente, exportado como arquivo STL para o software Cura, responsável pelo fatiamento da modelagem realizada e leitura da impressora 3D. Para a impressão dos espécimes, foi utilizada a impressora Stratasys Dimensions sst 1200es, devido à disponibilidade e à qualidade de suas impressões.

Conforme abordado na seção 3.1, a seleção dos parâmetros de impressão para peças impressas afeta diretamente sua performance mecânica. Dessa forma, a Tabela 3 descreve os parâmetros utilizados para a impressão dos corpos de prova ensaiados à tração.

Tabela 3 – Parâmetros de impressão para os espécimes ensaiados à tração

Parâmetros de impressão	Valores
Orientação de construção	<i>Flat e On-edge</i>
Ângulo de varredura	0°
Porcentagem de preenchimento	100%
Espessura de camada	0,2 mm

A orientação de construção foi escolhida de modo a utilizar as orientações que apresentam maiores resistências mecânicas, bem como avaliar a influência desse parâmetro no desempenho dos espécimes. Tendo em vista que o corpo de prova está submetido a uma força axial de tração, a escolha do ângulo paralelo à aplicação da carga foi feita para proporcionar uma maior região de contato entre as camadas, favorecendo a resistência do espécime, conforme observado no estudo de [Montero et al. \(2001\)](#).

A porcentagem de preenchimento foi mantida em 100%, de maneira a obter peças completamente sólidas, uma vez que é consenso na literatura que é o valor de preenchimento no qual se obtém melhor resistência mecânica. Por fim, assim como discutido, menores espessuras de camadas produzem peças de melhor qualidade e com melhores propriedades mecânicas. De acordo com o trabalho de [Chacon et al. \(2017\)](#), é observado uma faixa de valores para espessuras de camada entre 0,12 e 0,24 mm em que não há variações significativas na resistência à tração, enquanto se mantém valores satisfatórios de resistência, portanto foi utilizado o valor de 0,2 mm de espessura de camada para confecção dos corpos de prova.

De acordo com a norma utilizada, foram confeccionados cinco corpos de prova para cada orientação de construção. A menor velocidade de ensaio recomendada por norma para espécimes do Tipo I é de 5 mm/min, entretanto a velocidade adotada nos testes experimentais foi de 1 mm/min. Todavia, a escolha da realização dos ensaios com uma velocidade menor que a recomendada ainda cumpriu o requisito de produzir uma ruptura do corpo de prova entre 0,5 e 5 minutos.

Para o posicionamento dos espécimes na máquina de ensaio, foi feita uma marcação à caneta a trinta milímetros de cada extremidade de todas as peças, de modo a facilitar e proporcionar uma boa área de fixação com a garra do equipamento (SILVA, 2018). Por se tratar de um ensaio de material plástico, também foi necessário utilizar menores pressões de trabalho para evitar que as garras da máquina danificassem o corpo de prova.

Um extensômetro da marca Instron, modelo 2620-601, foi fixado no centro do corpo de prova para aquisição dos dados referentes à deformação do espécime, consoante à norma utilizada. De forma a garantir que a fratura ocorresse na região central do corpo de prova (região da leitura do extensômetro), foram realizadas seis marcações à caneta na peça. Primeiramente, foi marcada a região correspondente a metade de seu comprimento. A partir dessa medição, foram feitas mais duas marcações, dez milímetros acima e abaixo da região central do espécime.

Todas as marcações foram feitas nos dois lados do corpo de prova. Com o auxílio de um estilete, foi feito um leve risco em cima das marcações que correspondiam ao centro da peça, de forma a induzir que a ruptura ocorresse necessariamente na região central do espécime. Isso posto, a Figura 16 ilustra o posicionamento da peça na máquina de ensaio.



Figura 16 – Posicionamento do corpo de prova na máquina de teste para ensaio à tração.

3.3 Ensaio à Compressão

Os ensaios de esmagamento foram realizados na mesma máquina universal de testes utilizada para os ensaios à tração. No entanto, devido às previsões do normativo utilizado, houve a necessidade de fazer adaptações à máquina de ensaio - com a utilização de suportes cilíndricos metálicos com 100 mm de diâmetro e 25 mm de espessura - para execução dos testes experimentais. Todos os testes ocorreram à temperatura ambiente e segundo às instruções da norma ASTM C365M-16 ([ASTM C365/C365M-16, 2016](#)).

A norma [ASTM C365/C365M-16 \(2016\)](#) compreende a determinação das propriedades compressivas de painéis sanduíches, a partir da aplicação de uma carga uniaxial compressiva, na face normal ao plano das células que constituem o painel. Segundo a norma, a força uniaxial deve ser introduzida ao espécime através de placas planas, devendo estar alinhadas de modo a não aplicar forças excêntricas ao corpo de prova, conforme indicado na Figura 17.



Figura 17 – Representação do esquema de montagem para o ensaio à compressão. Fonte: [ASTM C365/C365M-16 \(2016\)](#).

Assim como no ensaio à tração, o corpo de prova submetido à compressão foi desenvolvido no software CAD CATIA V5 R21 e, em seguida, exportado como arquivo STL para o software Cura, para então ser impresso, sendo utilizada a mesma impressora. De acordo com a norma, ao menos cinco espécimes são necessários para a realização do ensaio, a menos que seja possível obter resultados satisfatórios utilizando menos corpos de prova. Assim, para o referido ensaio, foram confeccionados apenas três espécimes, visto que os resultados obtidos foram suficientes para realizar as análises.

O corpo de prova submetido ao ensaio compressivo foi confeccionado, a partir de uma estrutura honeycomb. Dessa forma, diferentes fatores podem influenciar as propriedades mecânicas obtidas, como, por exemplo, a geometria das células, a geometria da

amostra, a densidade das células, entre outros. À vista disso, os ensaios foram realizados na direção *out-of-plane* do honeycomb, ou seja, com a carga aplicada na face das células, perpendicularmente ao seu eixo de construção, posto que é a direção onde se obtém as melhores propriedades compressivas para a estrutura (KHAN; BAIG; MIRZA, 2012).

Para o dimensionamento da estrutura celular do honeycomb, foram considerados os parâmetros nos quais, com base na literatura, apresentam maior influência em suas propriedades mecânicas (MERAN; TOPRAK; MUGAN, 2014; BALAJI; ANNAMALAI, 2018). A Tabela 4 descreve os principais parâmetros de dimensionamento adotados para os espécimes submetidos aos ensaios à compressão.

Tabela 4 – Parâmetros de dimensionamento para os espécimes ensaiados à compressão

Dimensões da estrutura honeycomb	Valores
Densidade	260,71 kg/m ³
Ângulo interno da célula	120°
Comprimento de parede da célula	3 mm
Espessura de parede da célula	0,4 mm
Espessura da amostra	60 mm
Área de seção transversal	2699,84 mm ²

A densidade da estrutura está diretamente relacionada com a geometria da célula, ou seja, com seu comprimento e espessura de parede, visto que células com menores dimensões acarretam em uma quantidade total de células superior por unidade de área, proporcionando o aumento da densidade do honeycomb. Além disso, observa-se que o aumento da densidade promove ganhos nos valores de força de esmagamento obtidas (MERAN; TOPRAK; MUGAN, 2014; BALAJI; ANNAMALAI, 2018).

Segundo Meran, Toprak e Mugan (2014), em termos da capacidade de absorção de energia e eficiência de esmagamento, estruturas honeycombs constituídas, a partir de hexágonos regulares, ou seja, que possuem células com ângulo interno de 120°, demonstram melhor desempenho. Além disso, foi observado que menores valores de espessura e comprimento de parede, apresentam ganhos na energia absorvida, eficiência de esmagamento e no SEA da estrutura. Assim, os valores selecionados aliam, concomitantemente, a obtenção de melhores propriedades de *crashworthiness* do honeycomb, bem como a viabilidade de impressão da peça, uma vez que há limitações de equipamento para dimensões muito pequenas.

A geometria do corpo de prova deve ter uma área de seção transversal quadrada ou circular, sendo que a espessura (altura) da amostra deve ser igual à da peça original, no caso, 60 mm. Além disso, de acordo com o normativo utilizado, a área da face exigida para a amostra depende do tamanho da célula utilizada para confeccionar o honeycomb, de modo a garantir que um número mínimo de células seja testado. Dessa forma, é estabelecido que deve ser fornecido aproximadamente 60 células, no mínimo, na amostra de

teste.

Considerando as dimensões utilizadas para modelar a célula do honeycomb no presente trabalho (Tab. 4) e conforme a norma [ASTM C365/C365M-16 \(2016\)](#), para garantir que um número mínimo de células seja testado, é necessário ter uma área de seção transversal mínima de 2500 mm². Ademais, com a geometria e dimensões utilizadas para modelar o honeycomb, foram obtidas aproximadamente 105 células em sua face. Assim, estando em consonância com as prescrições do normativo supracitado.

Isso posto, de modo a evitar a compressão local de algumas células do honeycomb, é desejável acrescentar uma peça de suporte às faces que estarão sob compressão. Dessa forma, foi adicionada uma placa fina de seção quadrada em ambas as faces do espécime, sendo assim, realizado um ensaio de compressão estabilizado, segundo a norma [ASTM C365/C365M-16 \(2016\)](#). As Figuras 18a e 18b visam a demonstrar a estrutura das células que constituem o honeycomb e a modelagem final da amostra com a inserção da placa de reforço para a realização do teste estabilizado, respectivamente.

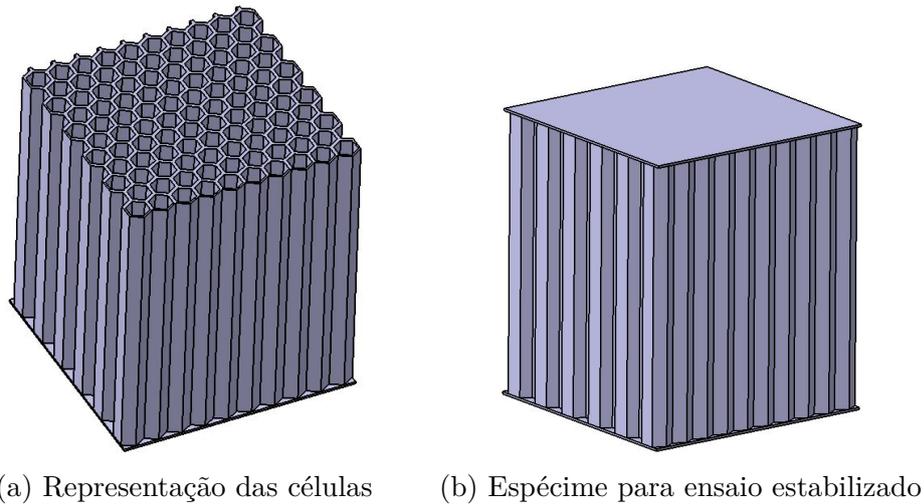


Figura 18 – Modelagem do corpo de prova desenvolvido para o ensaio de compressão

Para a impressão dos corpos de prova, foram considerados os mesmos parâmetros utilizados na confecção dos espécimes submetidos à tração. A Tabela 5 descreve os parâmetros de impressão adotados para as peças ensaiadas à compressão.

Tabela 5 – Parâmetros de impressão para os espécimes ensaiados à compressão

Parâmetros de impressão	Valores
Orientação de construção	<i>Flat</i>
Ângulo de varredura	90°
Porcentagem de preenchimento	100%
Espessura de camada	0,4 mm

Levando em consideração a aplicação de uma força uniaxial de compressão, bem como o posicionamento do espécime na plataforma de impressão, a deposição das camadas

foi feita de tal forma a ter um ângulo de varredura de 90° em relação à carga, proporcionando uma região de adesão satisfatória entre as camadas. Ademais, dada a estratégia de impressão adotada, a orientação de construção *Flat* foi a única a ser utilizada para a confecção dos respectivos corpos de prova.

Analogamente ao ensaio à tração, a porcentagem de preenchimento escolhida foi de 100%, de modo a adquirir peças totalmente sólidas e com maior resistência. Relativamente a espessura de camada, a escolha foi feita de forma a ter uma espessura correspondente à espessura de parede de célula do honeycomb dimensionado.

De acordo com a norma utilizada, uma pré-carga de 45 N foi aplicada inicialmente ao corpo de prova. A velocidade sugerida para realização dos ensaios é de 0,5 mm/min, no entanto a velocidade utilizada foi de 3 mm/min, não obstante, os ensaios cumpriram a exigência de produzir a falha da amostra entre 3 e 6 minutos.

Devido a necessidade de introduzir a carga ao corpo de prova através de uma superfície plana, conforme supracitado, foi necessário realizar algumas adequações à máquina de ensaio. Os espécimes foram fixados ao equipamento a partir de um dispositivo que permitisse a instalação de duas peças metálicas cilíndricas, com 100 mm de diâmetro e 25 mm de espessura. Tais peças foram fabricadas de modo a não apresentarem deformações durante o ensaio, sendo que para realizar a junção das peças aos suportes foi feito um furo passante e cônico em seu centro.

Assim, foram retiradas as garras do equipamento utilizadas nos ensaios à tração e realizado o posicionamento dos suportes à máquina de ensaio (Figura 19a). Em seguida, os suportes foram devidamente presos ao equipamento por meio de parafusos fixados à máquina. As peças cilíndricas foram presas à máquina de teste através de dois adaptadores com rosca inseridos aos suportes, no qual as peças eram posicionadas em cima do conjunto dos suportes com os adaptadores e, posteriormente, aparafusadas aos respectivos adaptadores por meio de parafusos de cabeça cônica (Figura 19b).

Uma vez finalizada a montagem, os corpos de prova eram posicionados concentricamente entre as peças, a partir das marcações realizadas, de forma a evitar a aplicação de forças excêntricas aos espécimes. A Figura 20 demonstra o posicionamento do espécime na máquina de ensaio.

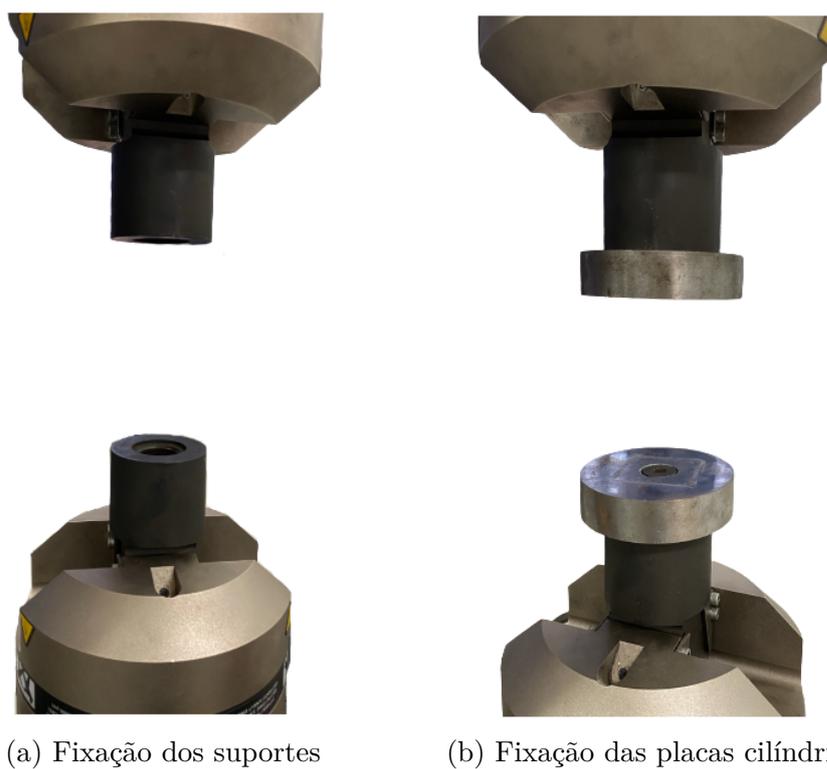


Figura 19 – Representação da adequação da máquina de teste ao ensaio de compressão.



Figura 20 – Posicionamento do corpo de prova na máquina de teste para ensaio à compressão.

3.4 Confeção dos Absorvedores de Energia

O material utilizado na confecção dos absorvedores de energia consiste em um aço SAE 1010 com área de seção transversal quadrada 50x50 mm e 1,60 mm de espessura. O tubo de aço foi adquirido na loja Pinheiro Ferragens, situada no setor de indústrias e abastecimento do Distrito Federal.

As propriedades mecânicas do SAE 1010 foram determinadas a partir de um ensaio quase-estático à tração utilizando uma máquina Instron, modelo 8801. Os valores médios obtidos para o Módulo de Young e tensão de escoamento são 195 GPa e 182 MPa, respectivamente. A Figura 21 ilustra a curva típica de tensão-deformação à tração para o aço SAE 1010.

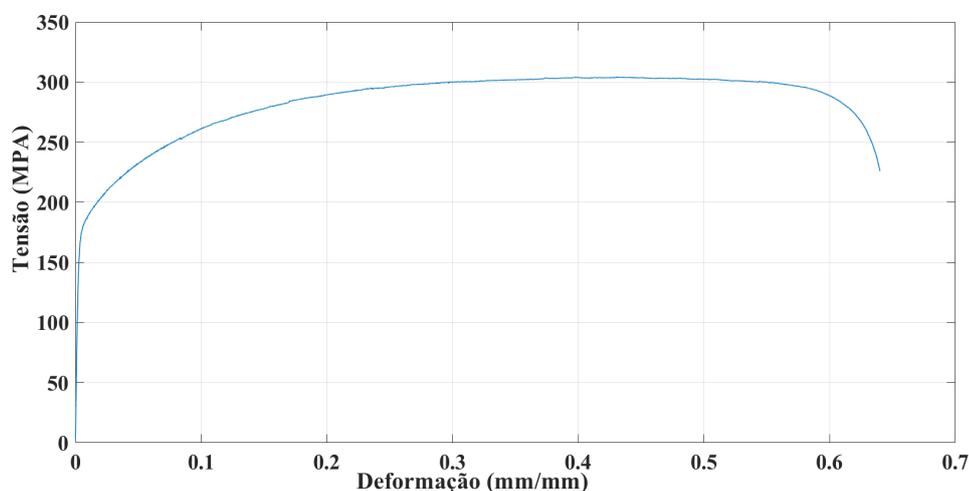


Figura 21 – Curva típica de tensão-deformação do aço SAE 1010.

Para a confecção do corpo de prova padrão foi utilizada a norma ASTM E8/E8M-21 (ASTM E8/E8M-21, 2021), a qual estabelece o método de teste à tração de materiais metálicos. A Figura 22 e a Tabela 6 apresentam o modelo do corpo de prova para o ensaio de materiais metálicos e as principais dimensões que o constituem, respectivamente.

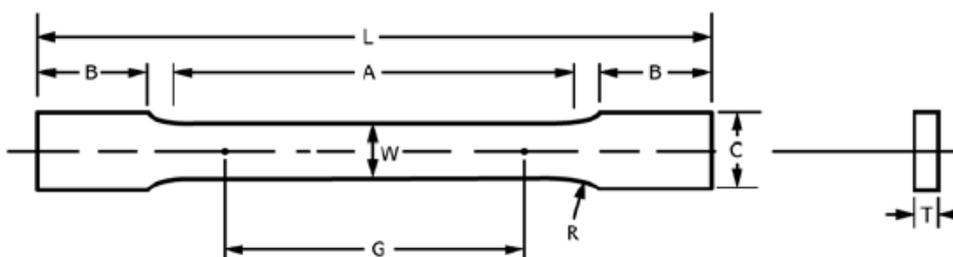


Figura 22 – Corpo de prova padrão para materiais metálicos. Fonte: ASTM E8/E8M-21 (2021).

Tabela 6 – Principais dimensões do corpo de prova padrão para materiais metálicos. Fonte: [ASTM E8/E8M-21 \(2021\)](#).

Dimensões	Valores (mm)
L - Comprimento total	200
A - Comprimento da seção estreita	57
G - Distância entre as garras	50
B - Comprimento da seção de aderência	50
C - Largura da seção de aderência	20
W - Largura	12,5
R - Raio de filete	12,5
T - Espessura	espessura do material

Os absorvedores de energia foram confeccionados com um comprimento padrão de 60 mm. Posteriormente ao corte dos absorvedores no comprimento supracitado, indutores de falha na forma de janelas laterais foram inseridos às paredes opostas dos tubos. A geometria da janela e o local de posicionamento foram definidos conforme o estudo de [Song, Chen e Lu \(2013\)](#).

A Figura 23 visa ilustrar a geometria das janelas laterais, sendo constituída a partir de um formato retangular, com largura a e altura b . As respectivas janelas foram usinadas em um centro de usinagem D600, sendo proposto no presente trabalho a utilização de três configurações geométricas distintas de indutores de falha, de modo a avaliar a influência da geometria selecionada nos indicadores de desempenho dos absorvedores de energia.

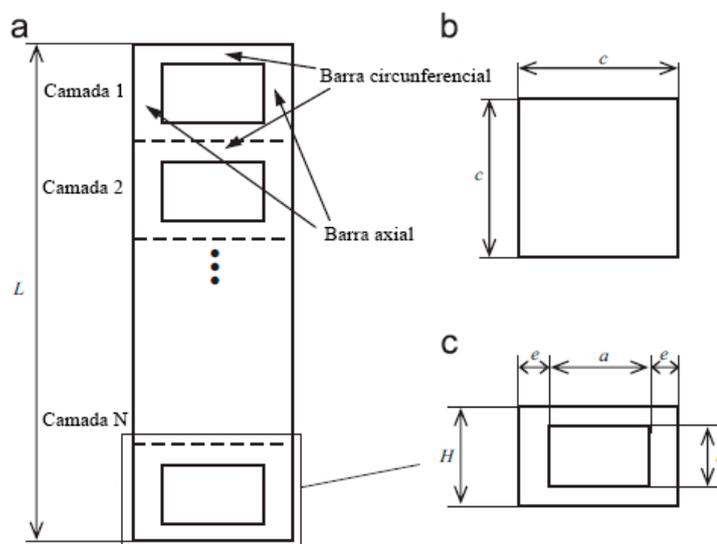


Figura 23 – Representação da geometria das janelas laterais. Fonte: Adaptado de [Song, Chen e Lu \(2013\)](#).

Convém salientar que foi mantida uma configuração de absorvedor convencional, ou seja, sem a presença dos indutores de falha, de forma a avaliar e comparar a influência da inserção das janelas nos parâmetros de performance da estrutura. A Tabela 7 apresenta as configurações geométricas utilizadas para confeccionar as janelas laterais. A escolha

das dimensões das janelas foi baseada no estudo de [Song, Chen e Lu \(2013\)](#), conforme abordado na seção 2.1.2.

Tabela 7 – Configurações geométricas das janelas laterais

Identificação da geometria	Parâmetro geométrico	
	a (mm)	b (mm)
15x30	15	30
20x20	20	20
20x30	20	30

Analogamente aos ensaios efetuados para a caracterização do material plástico, os testes experimentais à compressão dos absorvedores também foram realizados em uma máquina universal de ensaios servo-hidráulica da marca Instron 8801 com capacidade de carga de 100 kN. Não obstante, vale salientar que a configuração dos absorvedores de energia híbridos, ou seja, aqueles que possuem o preenchimento da estrutura honeycomb, excediam a capacidade de carga do equipamento.

À vista disso, uma parcela dos ensaios foi executada em uma máquina EMIC com capacidade de carga de 200 kN. A velocidade de ensaio foi mantida em 1 mm/min em ambos os equipamentos, de modo a ser realizado um ensaio quase-estático. Nessa condição, as forças inerciais são desprezíveis, originando uma resistência, durante a compressão em torno de uma força de esmagamento média (F_m).

Dada as características do ensaio experimental realizado, houve a necessidade de fazer adaptações à máquina de testes, de modo semelhante ao exposto na seção 3.3. Sendo que, para os ensaios de esmagamento dos absorvedores de energia, foi utilizada a mesma adaptação na máquina Instron descrita na seção supracitada.

Não obstante, tendo em vista que uma parcela dos ensaios de esmagamento foi realizada em uma máquina de ensaio EMIC, não foi necessário implementar nenhuma adaptação a esse equipamento, visto que a máquina já era dotada de uma superfície plana para introduzir carga ao absorvedor. As Figuras 24a e 24b demonstram o posicionamento do absorvedor de energia na máquina Instron - após a adaptação do equipamento - e na máquina EMIC, respectivamente.

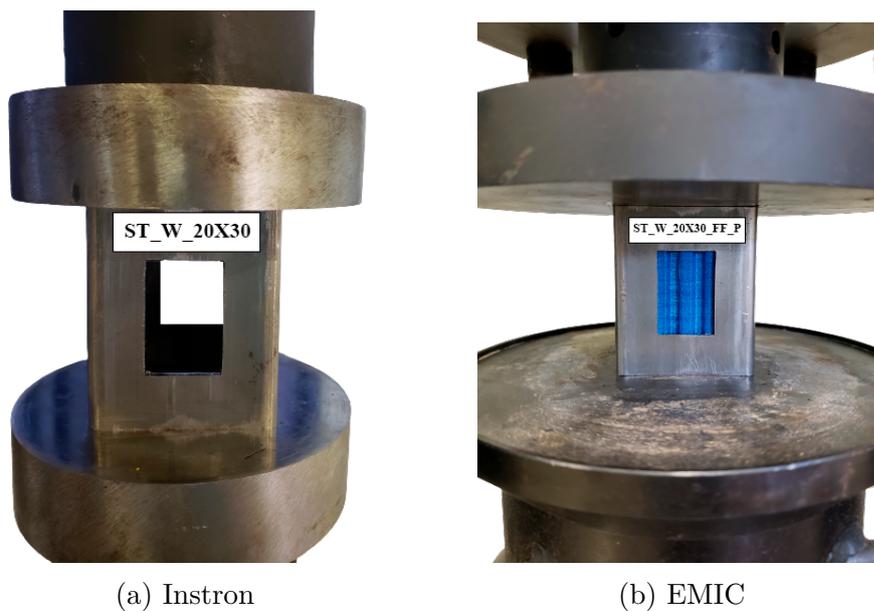


Figura 24 – Posicionamento do absorvedor de energia nas máquinas de teste para ensaio à compressão.

4 Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para a caracterização do polímero termoplástico, que tem por finalidade a utilização como material de preenchimento dos absorvedores de energia. Ao todo, são mostrados treze ensaios, sendo separados em duas seções. Primeiramente, são apresentados os resultados do ensaio à tração para as duas orientações de construção utilizadas na confecção do corpo de prova. Em seguida, são expostos os resultados para o ensaio à compressão do espécime honeycomb.

Além disso, são apresentados os resultados dos ensaios de esmagamento dos absorvedores de energia, sendo ao todo seis espécimes com a presença das janelas laterais e dois modelos convencionais, sem os indutores de falha. Os respectivos resultados foram separados em duas seções. Inicialmente, são demonstrados os resultados obtidos para os indicadores de desempenho dos absorvedores sem o preenchimento honeycomb e, em seguida, são apresentados os resultados após a inserção da estrutura honeycomb, de modo a constituir absorvedores de energia híbridos.

4.1 Tração

De modo a diferenciar os espécimes utilizados nos ensaios à tração, foi adotada uma nomenclatura padronizada, consistindo da seguinte formação: CP_XX_YY_ZZ. No qual, CP indica o espécime ensaiado (CP = Corpo de Prova), XX representa a orientação de construção adotada (F = *Flat*, OE = *On-edge*), YY refere-se ao ângulo de varredura da amostra e ZZ é o número sequencial do corpo de prova que está sendo ensaiado.

Em todos os corpos de prova, a fratura ocorreu na região central de seu comprimento, ou seja, na região de leitura do extensômetro, assim como estabelecido pela norma. As Figuras 25 e 26, ilustram as amostras após o ensaio à tração para a orientação de construção *Flat* e *On-edge*, respectivamente. Nota-se que, todas as fraturas ocorreram conforme as características de um material frágil, independente da orientação de construção selecionada.

Além disso, vale ressaltar que, foi observado uma maior tendência a ocorrência de fragmentação do material dos corpos de prova impressos na configuração *Flat*, conforme observado com a ausência de partes do espécime na região de fratura da Figura 25, diferentemente das fraturas obtidas na configuração *On-edge*, assim como demonstrado na Figura 26.



Figura 25 – Espécimes construídos na orientação *Flat* após o ensaio à tração.



Figura 26 – Espécimes construídos na orientação *On-edge* após o ensaio à tração.

Ademais, conforme mostrado na Figura 27, é observado que a qualidade da peça impressa também é afetada pela orientação de construção selecionada, uma vez que nota-se um melhor acabamento com a deposição das camadas na amostra *Flat*, obtendo uma aparência menos rugosa e áspera que o espécime *On-edge*. Nota-se, ainda, que na orientação *On-edge* ocorreram pequenas irregularidades nos contornos do corpo de prova, assim como indicado pela seta na Figura 27.

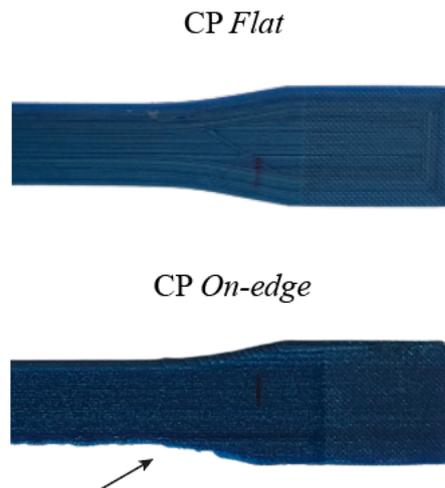


Figura 27 – Qualidade do corpo de prova conforme a orientação de construção selecionada.

De modo a se ter uma melhor visualização do mecanismo de falha dos espécimes, a Figura 28 demonstra a natureza frágil do rompimento para ambas as orientações de construção.

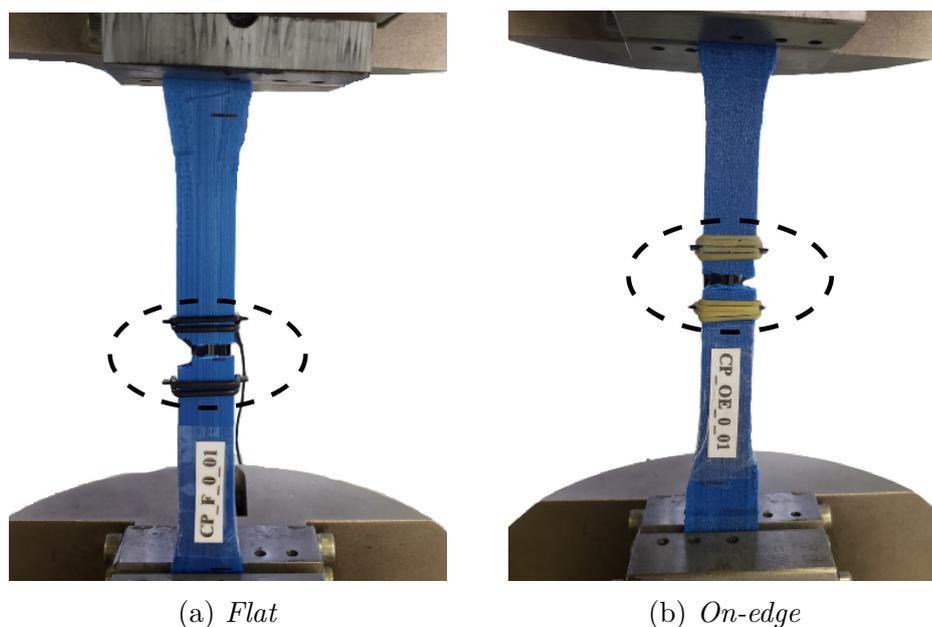


Figura 28 – Representação da fratura de acordo com a orientação de construção.

Dessa forma, a partir dos dados experimentais obtidos, são mostradas nas Figuras 29 e 30 as curvas de tensão verdadeira em função da deformação verdadeira das amostras

ensaiadas nas configurações *Flat* e *On-edge*, respectivamente. Observa-se que, os corpos de prova na configuração *Flat* possuem maiores deformações até a ruptura, bem como são obtidos maiores valores de tensão, comparativamente aos espécimes *On-edge*.

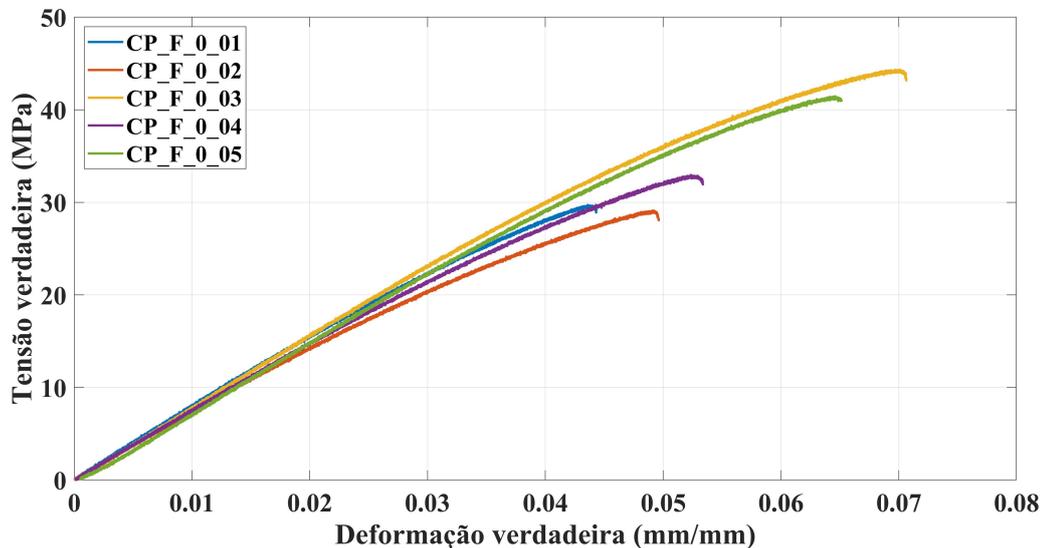


Figura 29 – Tensão verdadeira em função da deformação verdadeira dos espécimes *Flat*.

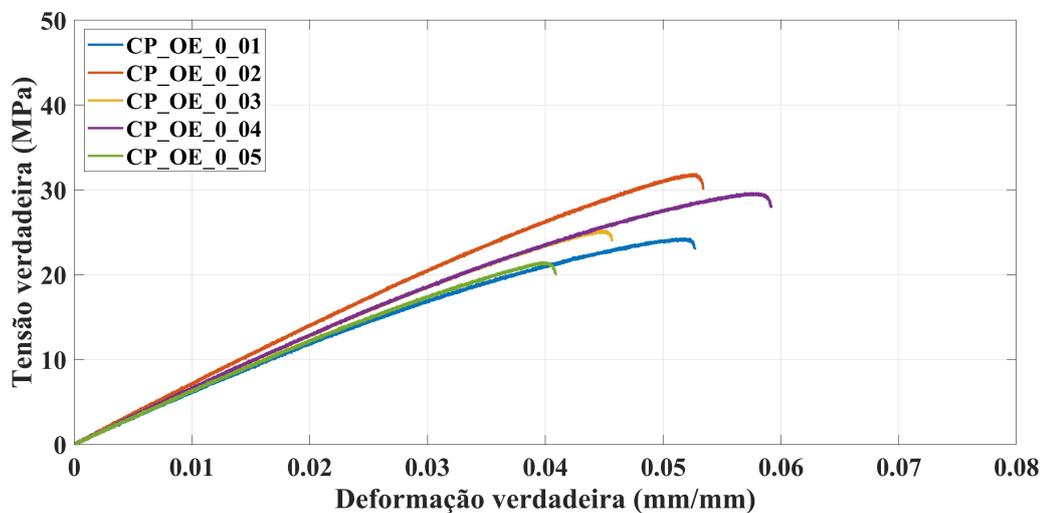


Figura 30 – Tensão verdadeira em função da deformação verdadeira dos espécimes *On-edge*.

Assim como discutido na seção 3.1, a escolha dos parâmetros de impressão exerce influência direta no desempenho mecânico das peças. A Tabela 8 visa sumarizar as principais propriedades mecânicas obtidas conforme a norma [ASTM D638-14 \(2014\)](#).

A tensão de escoamento é determinada a partir da intersecção de uma reta paralela traçada em relação a fase elástica do corpo de prova, dada uma deformação de 0,5 %. O referido valor de deformação é adotado quando não se observa nitidamente o fenômeno de escoamento, sendo usual em materiais poliméricos definir o limite de escoamento como a

tensão necessária para produzir uma deformação de 0,5 % (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

O módulo de elasticidade é dado pelo valor médio obtido da razão entre a tensão aplicada e a deformação provocada no espécime, sendo considerado os valores de tensão e deformação até o limite de escoamento do material. A resistência à tração na ruptura e o alongamento, são determinados a partir dos valores onde é indicado a falha da amostra, conforme as Figuras 29 e 30.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do material obtidas à tração

Orientação de construção	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>
Tensão de escoamento (MPa)	29,8 ± 4,4	22,9 ± 2,9
Módulo de elasticidade (MPa)	706,6 ± 27,4	611,8 ± 36,6
Resistência à tração na ruptura (MPa)	30,8 ± 6,2	22,7 ± 3,8
Alongamento (%)	6,12 ± 1,2	5,43 ± 0,7

Isso posto, nota-se o melhor desempenho à tração demonstrado pela orientação de construção *Flat*. Onde se obtém espécimes com maiores capacidades de deformação, bem como com maior resistência mecânica. Ademais, os resultados encontrados convergem com dados de outros fornecedores de filamentos de impressão que utilizam a mesma norma padrão para caracterização do material, conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades mecânicas conforme dados de outros fornecedores. Fonte: 3DLab (2017).

Propriedades mecânicas	PETG
Tensão de escoamento (MPa)	18,6
Módulo de elasticidade (MPa)	1067,9
Resistência à tração na ruptura (MPa)	32,6
Alongamento (%)	7,74

Contudo, observa-se maiores variações relativamente a tensão de escoamento e módulo de elasticidade do material. Vale ressaltar que, o referido fornecedor não informa todos os parâmetros de impressão utilizados para a confecção dos corpos de prova, podendo ser a fonte das divergências encontradas.

4.2 Compressão

De maneira análoga aos ensaios à tração, também foi adotada uma nomenclatura para os espécimes submetidos à compressão, de forma a distingui-los. O formato geral da nomenclatura para os ensaios compressivos consiste em: HC_P_XX, onde HC indica a estrutura do espécime (HC = Honeycomb), P representa o material (P = PETG) e XX é o número sequencial do ensaio.

Em relação ao modo de falha dos ensaios compressivos, observa-se que a primeira e a terceira amostra tiveram a tendência de apresentar cisalhamento em suas faces, sendo indicado pela linha tracejada na Figura 31. Contudo, esse comportamento não foi observado no segundo espécime, se diferenciando em seu modo de falha, apresentando um modo de esmagamento contínuo.

Com o auxílio de um nível fornecido pelo aplicativo de dispositivos móveis da *Makita tools* (MAKITA, 2015), foi realizada a medição dos ângulos de cisalhamento indicados nas faces representadas da Figura 31, sendo em torno de 50° para o HC_P_01 e 35° para o HC_P_03. Vale ressaltar que, o aparecimento de modos de falha a partir do cisalhamento das faces do honeycomb já foi observado em outros estudos, conforme tratado em McFarland (1963) e Jin et al. (2015).

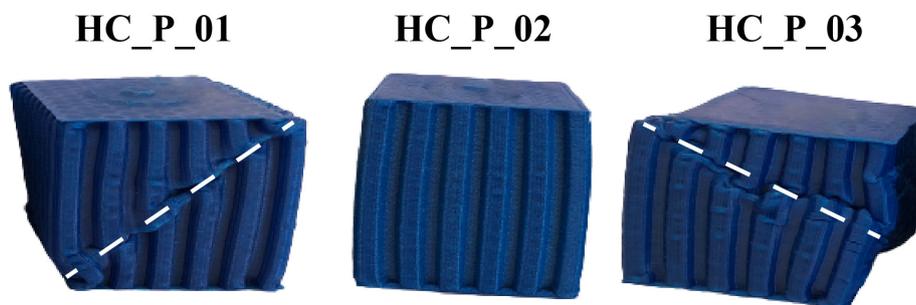


Figura 31 – Espécimes honeycombs após o ensaio à compressão.

As curvas experimentais da força em função do deslocamento são mostradas na Figura 32. Nota-se o comportamento semelhante das amostras HC_P_01 e HC_P_03, apresentando um aumento de carga até um platô, no qual a partir desse ponto a força registrada decresce, ocorrendo a formação de um vale. Conforme o deslocamento da compressão avança após essa região, a estrutura apresenta novamente um incremento de carga. Entretanto, conforme discutido anteriormente, o espécime HC_P_02 demonstra um modo de compressão distinto, onde há o aumento linear de carga, conforme a progressão do deslocamento.

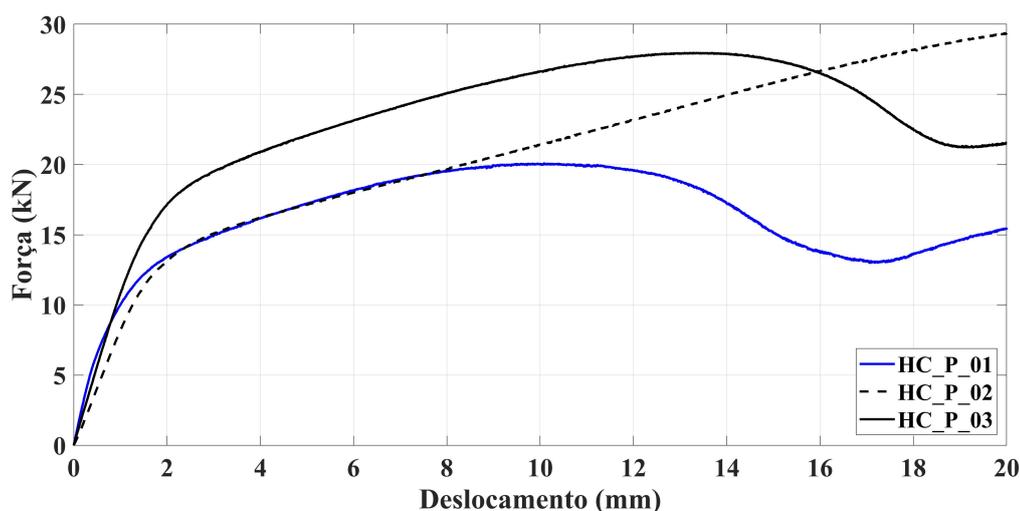


Figura 32 – Força em função do deslocamento obtida à compressão.

Isso posto, a Tabela 10 expressa os resultados obtidos para o ensaio de compressão, conforme o método de teste padrão ASTM C365/C365M-16 (2016). A resistência máxima à compressão refere-se à máxima capacidade compressiva da estrutura. A tensão de deflexão representa a tensão compressiva registrada, dada uma deflexão de 2%. Sendo que, a deflexão, segundo a norma é obtida através da razão entre a deformação e a espessura da amostra. Por último, o módulo compressivo é definido como a inclinação na região linear da curva de tensão em função da deformação. Segundo o referido método de teste, a estimativa do módulo compressivo da amostra envolve o cálculo através de dois pontos de deflexão na região linear da curva da força pelo deslocamento (Fig. 32).

Tabela 10 – Propriedades mecânicas do material obtidas à compressão

Propriedades mecânicas	Honeycomb
Resistência máxima à compressão (MPa)	9,56 ± 1,9
Tensão de deflexão (MPa)	4,10 ± 0,5
Módulo compressivo (MPa)	252,0 ± 78,1

4.3 Absorvedores de Energia sem Preenchimento Honeycomb

Para os ensaios dos absorvedores de energia sem o preenchimento do núcleo honeycomb, foi adotada a seguinte nomenclatura padrão: ST_X_YYxZZ. Onde ST indica o material do absorvedor (ST = *Steel*), X representa a presença das janelas laterais nas paredes do absorvedor (W = com janela e 0 = sem janela) e, por fim, YY e ZZ se referem a geometria das janelas (15x30, 20x20 e 20x30).

Todos os absorvedores ensaiados apresentaram um modo de deformação simétrico, sendo que para o espécime ST_W_20x30 foi observada a ocorrência de um modo simétrico no qual três lóbulos se formaram para dentro e um para fora, assim como descrito no

estudo de [Abramowicz e Jones \(1984\)](#). A Figura 33 demonstra os absorvedores de energia após a compressão.

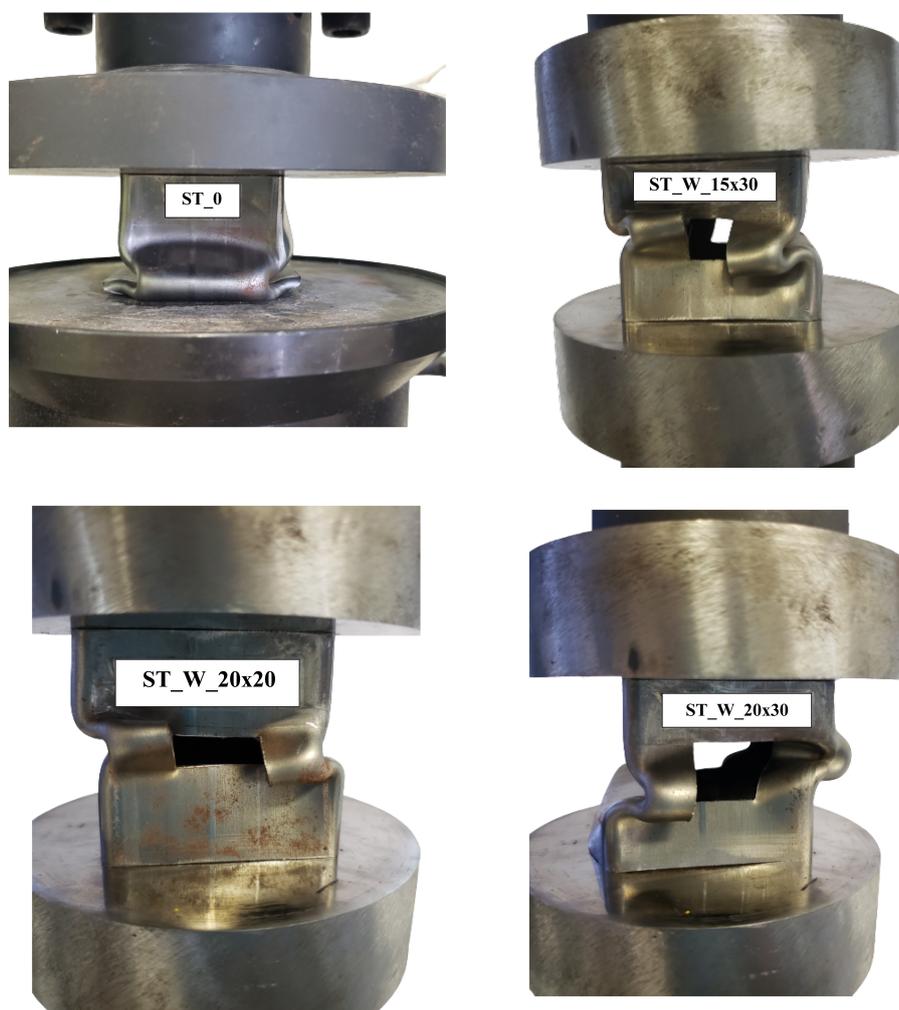


Figura 33 – Representação do modo de deformação dos absorvedores de energia sem o preenchimento honeycomb.

Além disso, nota-se que para o modelo convencional (ST_0) a formação do lóbulo ocorreu na base da estrutura, sendo que após a inserção das janelas laterais, foi observado que o surgimento do lóbulo ocorreu na região central do absorvedor, corroborando com a ideia de que a inserção dos indutores de falha favorece a ocorrência da deformação progressiva na região na qual está inserido e o surgimento de modos mais simétricos de deformação ([DANESHI; HOSSEINIPOUR, 2003](#); [SINGACE; EL-SOBKY, 1997](#)).

A partir dos dados experimentais obtidos, é mostrado na Figura 34 as curvas experimentais da força em função do deslocamento para cada modelo de absorvedor de energia. Nota-se uma redução na força de pico obtida nos modelos que possuem a presença das janelas laterais relativamente ao absorvedor convencional (ST_0), assim como previsto por [Song, Chen e Lu \(2013\)](#). Ademais, cabe salientar que a configuração da janela com geometria 20x20 (ST_W_20x20) demonstrou um desempenho mecânico satisfatório, re-

duzindo a força de pico e mantendo os valores de carga, durante a compressão acima das demais configurações.

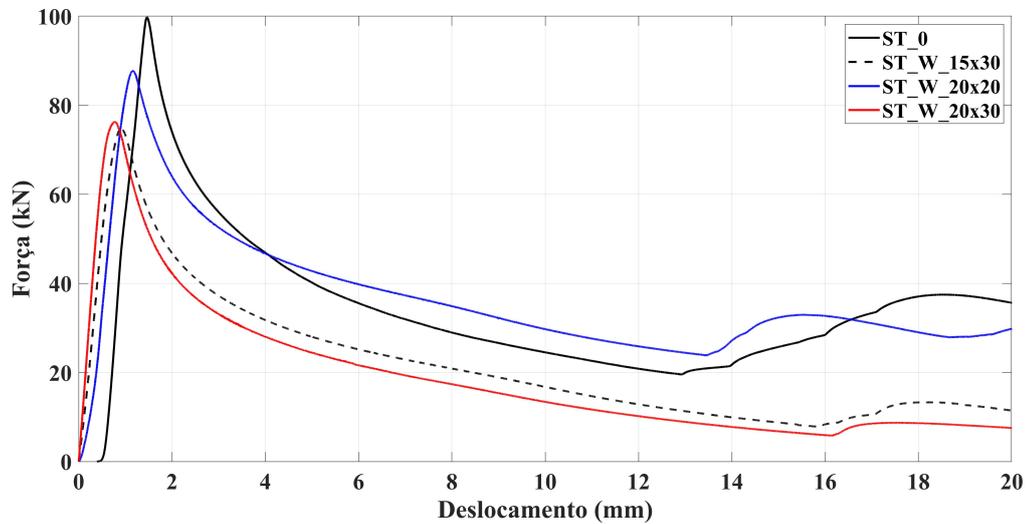


Figura 34 – Força em função do deslocamento obtida à compressão para os absorvedores de energia sem preenchimento da estrutura honeycomb.

Após o tratamento dos dados experimentais, foi feita a determinação dos parâmetros de performance para avaliar a habilidade de *crashworthiness* dos absorvedores de energia, conforme abordado na seção 2.3. A Tabela 11 sumariza os valores obtidos para cada indicador de desempenho.

De forma sucinta, E_a representa a energia absorvida durante a compressão. O SEA indica o desempenho de absorção de energia em função da massa do absorvedor. F_{max} e F_m indicam a força de pico e a força média durante a compressão, respectivamente. A razão de carregamento é denotada por LR e η caracteriza a efetividade estrutural do absorvedor de energia.

Tabela 11 – Indicadores de desempenho para os absorvedores de energia sem preenchimento honeycomb

Modelo	E_a (kJ)	SEA (kJ/kg)	F_{max} (kN)	F_m (kN)	LR	η
ST_0	0,69	4,95	99,8	34,3	2,91	0,64
ST_W_15x30	0,44	3,42	74,7	21,8	3,43	0,48
ST_W_20x20	0,73	5,67	87,7	36,6	2,40	0,87
ST_W_20x30	0,38	3,07	76,3	19,0	4,02	0,45

Nota-se que relativamente a capacidade de absorção de energia, houve uma tendência de redução do respectivo indicador ao inserir as janelas laterais na estrutura, sendo observada uma redução em torno de 45% na energia absorvida obtida para o modelo ST_W_20x30. Outrossim, o SEA dos modelos com janelas também não demonstrou ganhos relativamente ao modelo convencional (ST_0). Contudo, para o modelo ST_W_20x20, foi observada um aumento em torno de 6% e 15% na capacidade de absorção de energia e energia absorvida específica (SEA), respectivamente.

A razão de carregamento (LR) é determinada através de uma relação entre a força máxima e média, sendo desejável que seja o mais próximo de 1, representando o equilíbrio das forças atingidas. Os modelos com a presença das janelas laterais demonstraram um desempenho inferior em relação a esse indicador quando comparados ao absorvedor convencional, exceto pelo absorvedor ST_W_20x20. Por fim, de forma semelhante ao discutido previamente, no que se refere à efetividade estrutural (η), a única configuração que obteve ganho no respectivo indicador foi a ST_W_20x20, com um aumento em torno de 36%.

Em face do exposto, verifica-se que a melhor configuração dos absorvedores de energia sem a presença do preenchimento da estrutura honeycomb é obtida com o modelo ST_W_20x20, o qual está destacado em cinza na Tabela 11. Demonstrando ganho em todos os principais parâmetros de performance avaliados entre as topologias propostas.

4.4 Absorvedores de Energia Híbridos

Similarmente a seção 4.3, foi adotada parcialmente a nomenclatura dos absorvedores de energia sem preenchimento, entretanto, foi acrescida a seguinte terminação "FF_P". Dessa forma, a nomenclatura utilizada para os absorvedores de energia híbridos consiste em: ST_X_YYxZZ_FF_P, onde ST, X, YY e ZZ representam o material do absorvedor, a presença das janelas e a sua geometria, respectivamente, assim como descrito na seção supracitada. FF indica a presença da estrutura honeycomb de preenchimento (FF = *Full-filled*) e P representa o material da estrutura honeycomb (P = PETG).

Após a inserção do núcleo honeycomb, modos de deformação simétricos ainda foram obtidos para todos os modelos ensaiados. Observa-se que para a configuração ST_W_15x30_FF_P, a formação inicial do lóbulo ocorreu mais próxima da extremidade inferior do absorvedor. Além disso, para o espécime ST_0_FF_P também se notou uma mudança na localização da formação do lóbulo, sendo que se inicia na região central do absorvedor mesmo sem a presença das janelas laterais.

A Figura 35 ilustra os absorvedores de energia preenchidos após a compressão. Verifica-se que os modelos ST_W_15x30_FF_P e ST_W_20x30_FF_P apresentaram uma tendência de ter o material de preenchimento saindo pela janela durante a compressão, indicando que as janelas laterais podem criar uma zona de escape para o núcleo honeycomb em situações com altas taxas de deformação, como, por exemplo, em uma colisão. Dessa forma, as janelas atuam de modo a reduzir a pressão lateral nas paredes do absorvedor oriunda do confinamento do material de preenchimento, podendo reduzir a força máxima durante a compressão e, por conseguinte, tendo o potencial de mitigar as lesões causadas aos ocupantes devido à desaceleração experimentada em uma colisão.

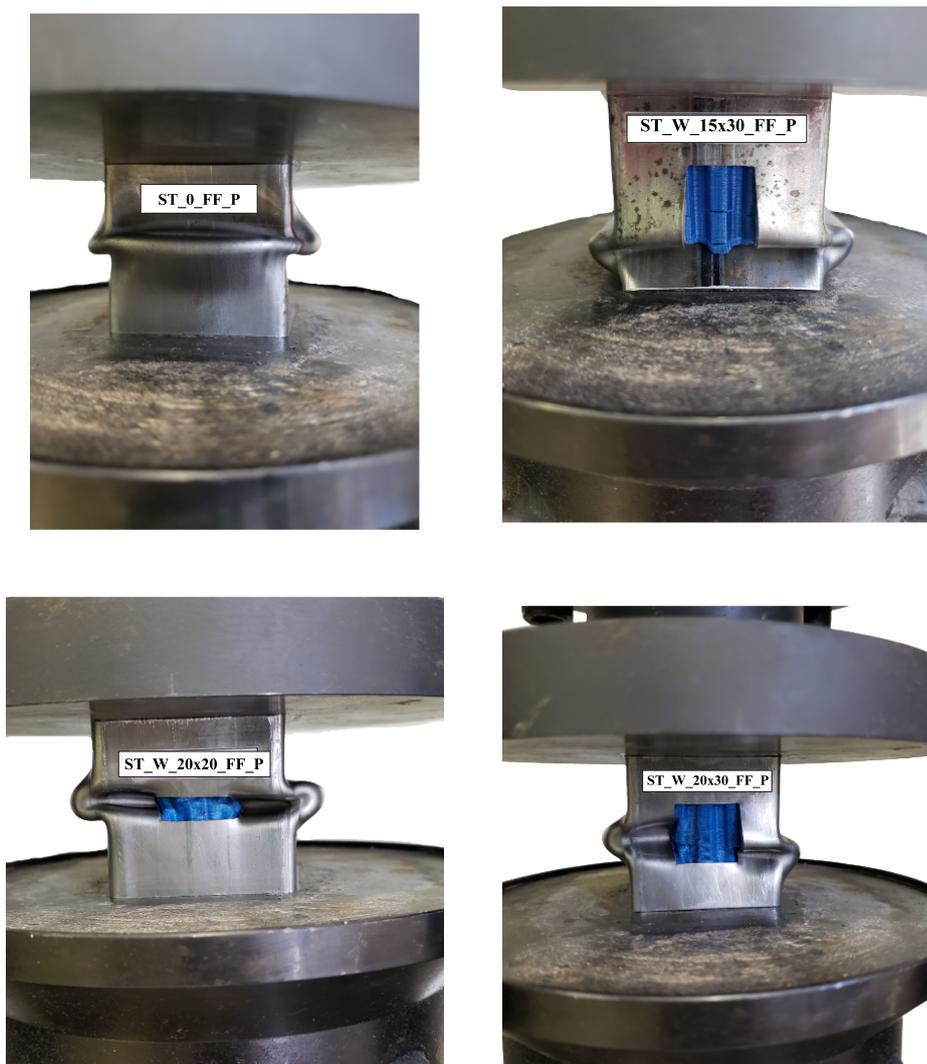


Figura 35 – Representação do modo de deformação dos absorvedores de energia com o preenchimento honeycomb.

As curvas experimentais da força em função do deslocamento para os absorvedores híbridos são mostradas na Figura 36. É notório que após a inserção do material de preenchimento, a diferença entre a força de pico inicial (F_{max}) e a flutuação de carga em torno de um valor médio (F_m) se tornou menos acentuada, comparativamente aos espécimes vazios (Fig. 34). Ademais, nota-se uma suavização da curva após atingir a F_{max} , causada, possivelmente, pela resistência mecânica à compressão da estrutura honeycomb, a qual aparenta atuar semelhantemente a um amortecimento.

A partir da Figura 36, observa-se, ainda, que foram obtidos maiores valores de força ao longo de todo o processo de compressão. O resultado encontrado corrobora com o fato de que tubos híbridos podem apresentar maiores valores de força de pico do que tubos vazios, assim como mencionado por Hussein et al. (2017).

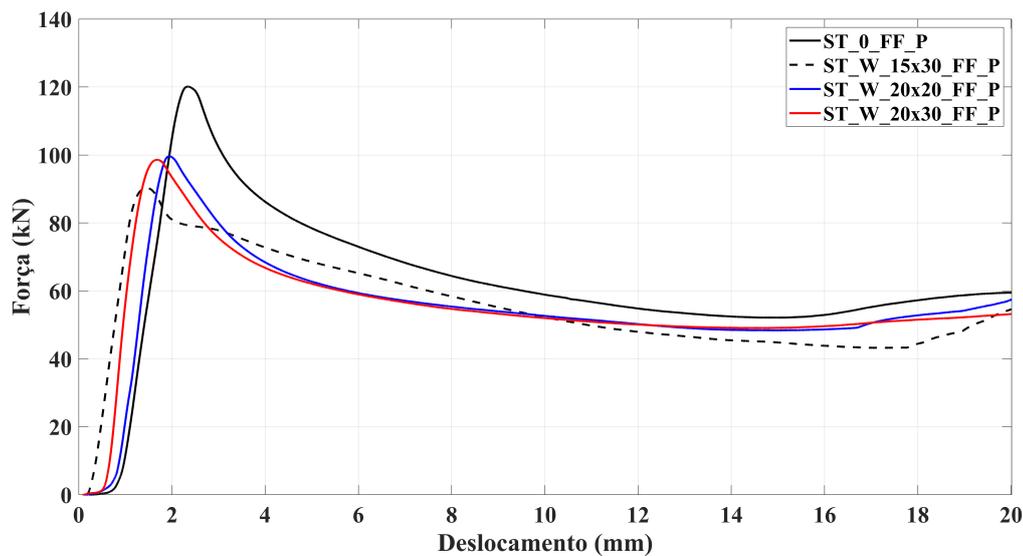


Figura 36 – Força em função do deslocamento obtida à compressão para os absorvedores de energia híbridos.

A Tabela 12 apresenta os valores obtidos para os indicadores de desempenho dos absorvedores híbridos. Diferentemente dos absorvedores vazios, verifica-se uma redução menos significativa na energia absorvida (E_a) dos espécimes após a inserção das janelas laterais, assim como previsto no estudo de Song, Chen e Lu (2013). Sendo observada uma redução em torno de 10% para os modelos ST_W_15x30_FF_P e ST_W_20x30_FF_P.

Além disso, relativamente à energia absorvida específica (SEA), não houve um aumento no respectivo indicador dos modelos com janela, quando comparados ao modelo convencional. Contudo, a inserção do honeycomb provocou um maior equilíbrio de forças, reduzindo a razão de carregamento em todos os espécimes com janela, sendo o melhor resultado obtido para o ST_W_20x30_FF_P. Do mesmo modo, o preenchimento dos tubos evidenciou a efetividade estrutural do conjunto híbrido (η), apresentando um ganho em torno de 5% para o espécime ST_W_20x30_FF_P.

Tabela 12 – Indicadores de desempenho para os absorvedores de energia híbridos

Modelo	E_a (kJ)	SEA (kJ/kg)	F_{max} (kN)	F_m (kN)	LR	η
ST_0_FF_P	1,24	6,66	120,1	61,8	1,94	0,85
ST_W_15x30_FF_P	1,11	6,33	90,3	55,3	1,63	0,85
ST_W_20x20_FF_P	1,09	6,29	99,6	54,6	1,82	0,88
ST_W_20x30_FF_P	1,11	6,51	98,6	55,2	1,78	0,89

Mediante o exposto, para a configuração dos absorvedores híbridos, o espécime que apresentou a melhor performance nos parâmetros de desempenho entre todas as topologias propostas foi o ST_W_20x30_FF_P, o qual está destacado em cinza na Tabela 12. Além disso, a janela 20x30 representa a maior área removida de material das faces do tubo, tendo o maior potencial de reduzir a pressão interna às faces do absorvedor, em casos com altas taxas de deformação, dada a maior abertura para escape do material.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou a caracterização do polímero termoplástico PETG a partir da realização de ensaios à tração e à compressão. Uma maior compreensão a respeito das propriedades mecânicas do material se constitui como uma etapa primordial relativamente ao desenvolvimento do trabalho, uma vez que o referido material é utilizado como preenchimento na confecção dos absorvedores de energia híbridos.

Tendo em vista que as peças submetidas aos ensaios experimentais foram produzidas a partir de impressão 3D e, por conseguinte, tendo o seu desempenho mecânico sensível aos critérios de construção adotados, parâmetros de impressão foram estabelecidos com base na literatura e apresentados na seção 3.1. Para a realização dos ensaios, métodos de teste padrão fornecidos pela ASTM foram utilizados.

Além da caracterização do material plástico, foram realizados testes experimentais à compressão nos absorvedores de energia sem e com o preenchimento da estrutura honeycomb em PETG. Para análise dos resultados, indicadores de desempenho foram estabelecidos, de modo a verificar a performance das topologias propostas, assim como exposto na seção 2.3. Os respectivos indicadores foram obtidos através da curva experimental da força em função do deslocamento, a qual é amplamente utilizada por diversos autores.

Ainda sobre os ensaios dos absorvedores de energia, indutores de falha no formato de janelas laterais com três geometrias distintas (15x30, 20x20 e 20x30 mm²) foram inseridas nos absorvedores. Ressalta-se, ainda, que foi mantido um modelo convencional, ou seja, sem a presença das janelas, de modo a avaliar a influência dos indutores de falha nos parâmetros de performance da estrutura.

Para o desenvolvimento do trabalho, duas configurações de absorvedores de energia foram estudadas. A primeira se refere aos absorvedores vazios, sem a presença do núcleo honeycomb, e a segunda representa os absorvedores híbridos. Indicadores de desempenho foram determinados para ambas as configurações.

Dessa forma, as principais conclusões acerca do desenvolvimento do presente trabalho são apresentadas abaixo.

1. Caracterização do polímero termoplástico PETG

Para os ensaios à tração, dez corpos de prova padrão foram confeccionados conforme o método de teste utilizado, cinco para cada orientação de construção selecionada,

Flat e *On-edge*. Nota-se que todos os espécimes submetidos aos ensaios à tração tiveram sua fratura ocorrendo de forma frágil, independente da orientação de construção selecionada. Apresentando uma ruptura abrupta do corpo de prova após atingir a tensão última do material.

Ademais, as propriedades mecânicas obtidas com base nos ensaios de tração convergiram com dados disponibilizados por outros fabricantes que utilizaram o mesmo método de teste padrão de ensaio. Entretanto, maiores variações foram observadas na tensão de escoamento e módulo de elasticidade do material. Não obstante, o fornecedor não informa os parâmetros de impressão que foram utilizados, podendo ser a fonte das divergências observadas.

A orientação de construção *Flat* apresentou melhor desempenho à tração comparativamente à orientação *On-edge*, obtendo melhor resistência mecânica. Sendo em torno de 23% e 26% maior em termos de tensão de escoamento e resistência à tração na ruptura, respectivamente. Ademais, as amostras construídas na orientação *Flat* demonstraram maior capacidade de deformação antes da ruptura.

Os ensaios de compressão foram realizados em três corpos de prova confeccionados, a partir de uma estrutura honeycomb, sendo executados na direção *out-of-plane* do espécime, ou seja, com a carga aplicada na face das células perpendicularmente ao seu eixo de construção, visto que é a direção onde se obtém as melhores propriedades compressivas para a estrutura. Observou-se que os espécimes HC_P_01 e HC_P_03 apresentaram modo de falha característico por cisalhamento, sendo observados ângulos de cisalhamento em torno de 50° e 35° nas faces externas do honeycomb, respectivamente.

O modo de deformação descrito no parágrafo anterior já foi observado em outros estudos encontrados na literatura, agindo de modo a provocar uma aparente instabilidade da estrutura. Todavia, para o ensaio de compressão do espécime HC_P_02, observou-se um comportamento distinto de falha, apresentando um modo de compressão com aumento linear de carga conforme a progressão do deslocamento.

Em face do exposto, é possível inferir que o filamento de PETG pode ser aplicado na confecção de estruturas de reforço devido suas propriedades mecânicas satisfatórias obtidas mesmo em espécimes com pequenas dimensões, tendo a capacidade de suportar cargas de até aproximadamente 30 kN quando construído com a geometria de um honeycomb, assim como apresentado no presente trabalho.

2. Influência da presença de janelas laterais nas paredes dos absorvedores de energia e da inserção da estrutura honeycomb em PETG

Para o estudo da compressão dos tubos de paredes finas, três configurações de janelas laterais foram propostas, 15x30, 20x20 e 20x30 mm², bem como foi mantido um modelo convencional de absorvedor para avaliar a influência da inserção das janelas nos

indicadores de desempenho do conjunto. Além disso, foram fabricados absorvedores de energia vazios e híbridos, os quais eram preenchidos com a estrutura honeycomb em PETG.

Destaca-se que todos os espécimes de absorvedores vazios apresentaram um modo de deformação simétrico, sendo que para o modelo convencional (ST_0), a formação do lóbulo ocorreu na extremidade inferior da estrutura. Todavia, ao inserir as janelas laterais, a formação do lóbulo ocorreu na região central do absorvedor, corroborando com o encontrado na literatura, de que a inserção de indutores de falha favorece o surgimento de modos mais simétricos de deformação e induz que a deformação progressiva (lóbulo) ocorra na região que o indutor está inserido.

Convém salientar, ainda, que a inserção das janelas laterais provocou a redução da força de pico dos absorvedores comparativamente ao modelo convencional (ST_0). Contudo, em relação a capacidade de absorção de energia, foi observada uma redução mais significativa no referido parâmetro, sendo em torno de 45% para o modelo ST_W_20x30. Todavia, para o modelo ST_W_20x20, houve ganhos em todos os indicadores de desempenho avaliados, sendo obtido um aumento em torno de 6% e 36% na energia absorvida e efetividade estrutural, respectivamente, quando comparado ao modelo convencional.

Em relação aos absorvedores híbridos, os espécimes permaneceram com modos de deformação simétricos. Destaque é dado que ao modelo ST_0_FF_P, o qual a inserção do preenchimento fez com que o lóbulo se iniciasse na região central do absorvedor mesmo sem a presença das janelas laterais. A partir da inserção do honeycomb, foi observada a tendência de ter o material saindo pelas janelas durante a compressão nos modelos ST_W_15x30_FF_P e ST_W_20x30_FF_P, indicando que a janela pode criar uma zona de escape para o material de preenchimento em situações com altas taxas de deformação, como, por exemplo, em eventos de colisão.

Tendo como base as forças obtidas durante a compressão, os absorvedores híbridos apresentaram uma diferença entre a F_{max} e F_m menos acentuada que os espécimes vazios, causada, possivelmente, pela resistência mecânica à compressão do honeycomb, a qual aparenta atuar semelhantemente a um amortecimento. Ademais, maiores valores de força ao longo do processo de compressão foram obtidos para os tubos híbridos, assim como previsto na literatura.

A partir dos indicadores de desempenho dos absorvedores híbridos, constatou-se que a presença do honeycomb provocou um maior equilíbrio de forças, reduzindo a razão de carregamento em todas as topologias. Além disso, uma redução menos significativa na capacidade de absorção de energia dos modelos com janelas laterais foi observada nos espécimes híbridos, bem como o preenchimento evidenciou a efetividade estrutural do conjunto, com um aumento em torno de 5% na E_a para o modelo ST_W_20x30_FF_P.

Por fim, através das comparações realizadas, confirmou-se que a melhor configuração dos absorvedores de energia vazios é obtida com o modelo ST_W_20x20, apresentando ganhos em todos os parâmetros de performance avaliados. Relativamente aos absorvedores híbridos, a melhor configuração é obtida com o modelo ST_W_20x30_FF_P, o qual apresentou a melhor performance nos indicadores de desempenho dentre as topologias estudadas.

Destaca-se, ainda, que a janela 20x30 representa a maior área removida de material das faces do tubo, tendo maior potencial de redução da pressão interna às faces do absorvedor, podendo reduzir a força máxima durante a compressão e, por conseguinte, tendo o potencial de mitigar as lesões causadas aos ocupante em decorrência da desaceleração experimentada em uma colisão.

5.2 Trabalhos Futuros

Para continuação do trabalho aqui apresentado sugere-se os estudos descritos a seguir.

1. Experimento fatorial 2^k das especificações técnicas da impressora 3D

Sugere-se que as peças impressas sejam avaliadas em termos de um experimento fatorial 2^k relativamente as diferentes especificações técnicas que podem ser adotadas no software da impressora 3D. A partir da análise dos referidos parâmetros, obtém-se os melhores valores para cada variável e se determina quais exercem maior influência no processo de impressão, estabelecendo uma configuração ideal para a impressão das peças. Sugere-se que a resistência mecânica das novas impressões seja comparada com os resultados apresentados no presente trabalho, de modo a determinar a influência da configuração da impressora no desempenho mecânico das peças.

2. Teste das peças plásticas confeccionadas através do processo de injeção

Como uma forma de obter melhores propriedades mecânicas do polímero termoplástico, sugere-se a utilização do processo de injeção para confeccionar a estrutura honeycomb de preenchimento. Os resultados obtidos dos ensaios compressivo do honeycomb e do absorvedor híbrido seriam comparados com os resultados aqui apresentados, de modo a validar o melhor desempenho mecânico de peças injetadas.

3. Teste dos absorvedores de energia sob altas taxas de deformação

Sugere-se que os absorvedores de energia expostos no presente trabalho sejam estudados em condições de esmagamento sob altas taxas de deformação.

Referências

- 3DLAB. *Tabela de propriedades dos materiais para impressora 3D*. 2017. Acessado em 14/09/2021. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 53.
- ABDULLAH, N. A. Z. et al. A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, v. 153, p. 106795, 2020. ISSN 0263-8231. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795>>. Citado na página 19.
- ABRAMOWICZ, W. Thin-walled structures as impact energy absorbers. *Thin-Walled Structures*, v. 41, n. 2, p. 91–107, 2003. ISSN 0263-8231. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(02\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(02)00082-4)>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 20 e 26.
- ABRAMOWICZ, W.; JONES, N. Dynamic axial crushing of square tubes. *International Journal of Impact Engineering*, v. 2, n. 2, p. 179–208, 1984. ISSN 0734-743X. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0734-743X\(84\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0734-743X(84)90005-8)>. Citado 5 vezes nas páginas 7, 23, 24, 25 e 56.
- ABRAMOWICZ, W.; JONES, N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *International Journal of Impact Engineering*, v. 4, n. 4, p. 243–270, 1986. ISSN 0734-743X. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0734-743X\(86\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0734-743X(86)90017-5)>. Citado na página 23.
- ABRAMOWICZ, W.; JONES, N. Transitional from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically. *International Journal of Impact Engineering*, v. 19, n. 5-6, p. 415–437, 1997. Citado 6 vezes nas páginas 7, 17, 20, 23, 24 e 25.
- AFROSE, M. F. et al. Effects of part build orientations on fatigue behaviour of fdm-processed pla material. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 1, n. 1, p. 21–28, 2016. Citado na página 30.
- AHN, S.-H. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs. *Rapid Prototyping Journal*, v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/13552540210441166>>. Citado na página 30.
- ALBURQUERQUE, A. J. *Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas*. Monografía (Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales) — Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, ES, 2014. Citado na página 30.
- ALGHAMDI, A. Collapsible impact energy absorbers: an overview. *Thin-Walled Structures*, v. 39, p. 189–213, 2001. Citado na página 19.
- AMZA, C. G. et al. Enhancing mechanical properties of polymer 3d printed parts. *Polymes*, v. 13, p. 562, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym13040562>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 29 e 32.

ASTM C365/C365M-16. *Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores*. ASTM International West Conshohocken, PA, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 7, 40, 42 e 55.

ASTM D638-14. *Standard test method for tensile properties of plastics*. ASTM International West Conshohocken, PA, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 7, 9, 37, 38 e 52.

ASTM E8/E8M-21. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International West Conshohocken, PA, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 45 e 46.

AUERSVALDT, R. R. *Análise paramétrica de absorvedores de energia de impacto poligonais com janelas laterais*. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2014. Citado na página 26.

AYRILMIS, N. Effect of layer thickness on surface properties of 3d printed materials produced from wood flour/pla filament. *Polymer Testing*, v. 71, p. 163–166, 2018. ISSN 0142-9418. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.09.009>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 37.

BABBAGE, J. M.; MALLICK, P. K. Static axial crush performance of unfilled and foam-filled aluminum–composite hybrid tubes. *Composite Structures*, v. 70, p. 177–184, 2005. Disponível em: <[10.1016/j.compstruct.2004.08.021](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.08.021)>. Citado na página 20.

BALAJI, G.; ANNAMALAI, K. Numerical investigation of honeycomb filled crash box for the effect of honeycomb’s physical parameters on crashworthiness constants. *International Journal of Crashworthiness*, v. 24, n. 2, p. 184–198, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/13588265.2018.1424298>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 20 e 41.

BASTOS, J. T. et al. *Desempenho brasileiro na década de ação pela segurança no trânsito: análise, perspectivas e indicadores 2011-2020*. [S.l.]: Brasília: Viva editora, 2020. Citado na página 15.

BASURTO-VAZQUEZ, O. et al. Load distribution on pet-g 3d prints of honeycomb cellular structures under compression load. *Polymers*, v. 13, n. 12, 2021. ISSN 2073-4360. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/12/1983>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 21.

BEX, G. J. P. et al. Sustainable approach to produce 3d-printed continuous carbon fiber composites: “a comparison of virgin and recycled petg”. *Polymer Composites*, v. 42, n. 9, p. 4253–4264, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/pc.26143>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 32.

CABREIRA, V. *Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido lático*. 104 f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2018. Citado na página 31.

- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. [S.l.]: Rio de Janeiro: LTC, 2012. ISBN 978-85-216-2124-9. Citado na página 53.
- CASTILHO, I. *Homens são os que mais morrem de acidentes no trânsito*. 2019. Acessado em 07/09/2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/homens-sao-maiores-vitimas-de-acidentes-no-transito>>. Citado na página 15.
- CASTRO, G. M. de; SILVA, R. de C.; OLIVEIRA, A. B. de S. Evaluation of petg mechanical behavior for application in vehicle protection. In: *Anais do XXVIII SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA*. [S.l.: s.n.], 2021. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 32.
- CHACON, J. et al. Additive manufacturing of pla structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, v. 124, p. 143–157, 2017. ISSN 0264-1275. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>>. Citado 5 vezes nas páginas 7, 34, 35, 36 e 38.
- COSTAS, M. et al. Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers. *International Journal of Impact Engineering*, v. 62, p. 166–181, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.06.011>>. Citado na página 16.
- COSTAS, M. et al. Axial crushing of aluminum extrusions filled with pet foam and gfrp. an experimental investigation. *Thin-Walled Structures*, v. 99, p. 45–57, 2016. Citado na página 20.
- DANESHI, G. H.; HOSSEINIPOUR, S. J. Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression. *Materials and Design*, v. 23, p. 611–617, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 56.
- Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre. *Acidentes de trânsito: a colisão é mais do que você imagina*. 2020. Acessado em 07/09/2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/acidentes-de-transito-a-colisao-e-mais-do-que-voce-imagina>>. Citado na página 15.
- DUPAIX, R. B.; BOYCE, M. C. Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (pet) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (petg). *Polymer*, v. 46, n. 13, p. 4827–4838, 2005. ISSN 0032-3861. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.03.083>>. Citado na página 31.
- FAN, X.; VERPOEST, I.; VANDEPITTE, D. Finite element analysis of out-of-plane compressive properties of thermoplastic honeycomb. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, v. 8, p. 437–458, 2006. Citado na página 16.
- FERNANDEZ-VICENTE, M. et al. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3d printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, v. 3, n. 3, p. 183–192, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036>>. Citado na página 36.

- filament2print. *The importance of the type of infill in 3D printing*. 2019. Acessado em 25/08/2021. Disponível em: <https://filament2print.com/gb/blog/71_importance-infill-3d-printing.html#:~:text=Tips%20%20Comments-,All%20users%20of%203D%20printers%20know%20that%203D%20printed%20parts,printing%20time%20and%20the%20cost.> Citado 2 vezes nas páginas 7 e 36.
- GALETTO, M.; VERNA, E.; GENTA, G. Effect of process parameters on parts quality and process efficiency of fused deposition modeling. *Computers & Industrial Engineering*, v. 156, p. 107238, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107238>>. Citado na página 29.
- GNATOWSKI, A. et al. The research of the thermal and mechanical properties of materials produced by 3d printing method. *Thermal Science*, v. 23, n. 4, p. 1211–1216, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.2298/TSCI19S4211G>>. Citado na página 30.
- GUILLON, D. et al. Experimental study aiming to identify optimal material for an automotive crash box. In: *ECCM16-16th European Conference on Composite Materials*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 22–26. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 19.
- HAMAD, K. et al. Properties and medical applications of polylactic acid: A review. *Polymer Letters*, v. 9, n. 5, p. 435–455, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2015.42>>. Citado na página 31.
- HANSEN, A. G.; LANGSETH, M.; HOPPERSTAD, O. S. Static crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 41, p. 967–993, 1999. Citado na página 20.
- HILLARY, F. G. et al. Motor vehicle collision factors influence severity and type of tbi. *Brain Injury*, v. 16, n. 8, p. 729–741, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02699050110119844>>. Citado na página 16.
- HUSSEIN, R. D. et al. Crushing response of square aluminium tubes filled with polyurethane foam and aluminium honeycomb. *Thin-Walled Structures*, v. 110, p. 140–154, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 16, 17, 20 e 59.
- JAMSHIDIAN, M. et al. Poly-lactic acid: Production, applications, nanocomposites, and release studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 9, n. 5, p. 552–571, 2010. Disponível em: <[10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x](https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x)>. Citado na página 31.
- JIN, T. et al. Experimental study on the effects of specimen in-plane size on the mechanical behavior of aluminum hexagonal honeycombs. *Materials Science and Engineering: A*, v. 635, p. 23–35, 2015. ISSN 0921-5093. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.053>>. Citado na página 54.
- KARAGIOZOVA, D.; JONES, N. On the mechanics of the global bending collapse of circular tubes under dynamic axial load—dynamic buckling transition. *International Journal of Impact Engineering*, v. 35, n. 5, p. 397–424, 2008. ISSN 0734-743X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.04.002>>. Citado na página 22.
- KHAN, M.; BAIG, T.; MIRZA, S. Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb. *Materials Science and Engineering: A*,

- v. 539, p. 135–142, 2012. ISSN 0921-5093. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.070>>. Citado na página 41.
- KIM, J.-M. et al. Preventive effects of seat belts on traumatic brain injury in motor vehicle collisions classified by crash severities and collision directions. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, v. 47, p. 1437–1449, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00068-019-01095-4>>. Citado na página 16.
- LIM, C. W. J. et al. An overview of 3-d printing in manufacturing, aerospace, and automotive industries. *IEEE Potentials*, v. 35, n. 6, p. 18–22, 2016. Disponível em: <[10.1109/MPOT.2016.2540098](https://doi.org/10.1109/MPOT.2016.2540098)>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 29.
- LIU, Z.; LEI, Q.; XING, S. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based pla composites fabricated by fdm. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 5, p. 3741–3751, 2019. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 35.
- MAKITA. *Makita mobile tools*. 2015. Acessado em 15/09/2021. Disponível em: <<https://makitauk.com/mobile-apps>>. Citado na página 54.
- MAMALIS, A. G. et al. The effect of the implementation of circular holes as crush initiators to the crushing characteristics of mild steel square tubes: experimental and numerical simulation. *International Journal of Crashworthiness*, v. 14, n. 5, p. 489–501, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 22.
- MCFARLAND, R. K. Hexagonal cell structures under post-buckling axial load. *AIAA Journal*, v. 1, n. 6, p. 1380–1385, 1963. Disponível em: <<https://doi.org/10.2514/3.1798>>. Citado na página 54.
- MERAN, A. P.; TOPRAK, T.; MUGAN, A. Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures. *Thin-Walled Structures*, v. 78, p. 87–94, 2014. ISSN 0263-8231. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.12.012>>. Citado na página 41.
- MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.*, v. 3, p. 42–53, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>>. Citado na página 29.
- MONTERO, M. et al. Material characterization of fused deposition modeling (fdm) abs by designed experiments. In: *Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, Society of Manufacturing Engineers*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 1–21. Citado 4 vezes nas páginas 16, 30, 34 e 38.
- NHTSA. *NHTSA data estimates indicate traffic fatalities continued to rise at record pace in first nine months of 2021*. 2022. Acessado em 30/04/2022. Disponível em: <<https://www.nhtsa.gov/press-releases/traffic-fatalities-estimates-jan-sept-2021>>. Citado na página 14.
- PEREZ, A. R. T.; ROBERSON, D. A.; WICKER, R. B. Fracture surface analysis of 3d-printed tensile specimens of novel abs-based materials. *J Fail. Anal. and Preven.*, v. 14, p. 343–353, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

PRIYA, M. S. et al. A comparative study between in-house 3d printed and injection molded abs and pla polymers for low-frequency applications. *Materials Research Express*, v. 6, p. 085345, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2776>>. Citado na página 29.

Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito. *RENAEST: Panorama dos Acidentes*. 2021. Acessado em 16/10/2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/arquivos-denatran/docs/renaest>>. Citado na página 16.

ROCCA-SMITH, J. et al. Effect of the state of water and relative humidity on ageing of pla films. *Food Chemistry*, v. 236, p. 109–119, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.113>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

RODRIGUEZ-PANES, A.; CLAVER, J.; CAMACHO, A. M. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of pla and abs pieces manufactured by fdm: A comparative analysis. *Materials*, v. 11, n. 8, 2018. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1333>>. Citado 3 vezes nas páginas 28, 30 e 31.

ROYAN, N. R. et al. Current state and challenges of natural fibre-reinforced polymer composites as feeder in fdm-based 3d printing. *Polymers*, v. 13, n. 14, 2021. ISSN 2073-4360. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/14/2289>>. Citado na página 34.

SANTANA, L. et al. Estudo comparativo entre petg e pla para impressão 3d através de caracterização térmica, química e mecânica. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 4, 2018. ISSN 1517-7076. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0601>>. Citado na página 32.

SANTOSA, S.; WIERZBICKI, T. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam. *Computers and Structures*, v. 68, p. 343–367, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

SILVA, M. V. B. da. *Caracterização mecânica de materiais utilizados em prototipagem rápida por deposição de material fundido para aplicação aeroespacial*. Monografia (Graduação em Engenharia Aeroespacial) — Faculdade UnB Gama - FGA, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018. Citado na página 39.

SILVA, R. C.; TELES, J. C. S.; OLIVEIRA, A. B. S. Experimental and numerical performance assessment of square aluminum and steel energy absorbers with circular hole discontinuities. *International Journal of Crashworthiness*, p. 1–17, 2021. Citado na página 22.

SINGACE, A. A.; EL-SOBKY, H. Behaviour of axially crushed corrugated tubes. *Int. J. Mech. Sci.*, v. 39, n. 3, p. 249–268, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 56.

SONG, H.-W. et al. Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections. *International Journal of Solids and Structures*, v. 42, p. 2575–2600, 2005. Disponível em: <[10.1016/j.ijsolstr.2004.09.050](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.09.050)>. Citado na página 16.

- SONG, J.; CHEN, Y.; LU, G. Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 66, p. 239–248, 2013. Citado 9 vezes nas páginas 7, 8, 17, 21, 22, 46, 47, 56 e 60.
- TAY, Y. Y.; LIM, C. S.; LANKARANI, H. M. A finite element analysis of high-energy absorption cellular materials in enhancing passive safety of road vehicles in side-impact accidents. *International Journal of Crashworthiness*, v. 19, n. 3, p. 288–300, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/13588265.2014.893789>>. Citado na página 16.
- TELES, J. C. de S. *Estudo do desempenho de absorvedores de energia de seção quadrada solicitados por esmagamento axial: análise experimental e numérica*. 105 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) — Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018. Citado na página 26.
- VELAZQUEZ-INFANTE, J. C. et al. Effect of the unidirectional drawing on the thermal and mechanical properties of pla films with different l-isomer content. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 127, p. 2661–2669, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/app.37546>>. Citado na página 31.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Global status report on road safety 2018*. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 7, 14 e 15.
- YILDIZHAN, M. et al. Design of improved energy absorbing pads to reduce occupant injuries in vehicle side impact. *International Journal of Vehicle Design*, v. 71, n. 1-4, p. 174–190, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1504/IJVD.2016.078775>>. Citado na página 16.
- YUSOF, N. S. B. et al. Design and materials development of automotive crash box: a review. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 29, n. 3, p. 129–144, 2017. ISSN 0870-8312. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2017.09.003>>. Citado na página 19.
- ZHANG, X.; ZHANG, H.; WEN, Z. Experimental and numerical studies on the crush resistance of aluminum honeycombs with various cell configurations. *International Journal of Impact Engineering*, v. 66, p. 48–59, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.
- ZHOU, C. et al. The energy absorption of rectangular and slotted windowed tubes under axial crushing. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 141, p. 106795, 2018. ISSN 0020-7403. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.03.036>>. Citado na página 21.