

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

WILLIAM HAAS

**DESEMPENHO EM ENSAIO DE IMPACTO DE ESTRUTURAS HONEYCOMB EM ABS
PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2021

WILLIAM HAAS

**DESEMPENHO EM ENSAIO DE IMPACTO DE ESTRUTURAS HONEYCOMB EM
ABS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Adamczuk
Oliveira

PATO BRANCO

2021

FOLHA DE APROVAÇÃO

Desempenho em Ensaio de Impacto de Estruturas Honeycomb em ABS Produzidas por Manufatura Aditiva

William Haas

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 16/08/2021 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Profa. Dra. Maria Nalu Verona Gomes
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Gilson Adamczuk Oliveira
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que possibilitaram não apenas a execução do meu TCC, mas também de toda a minha graduação, oferecendo todo o apoio e ajuda possível, sempre que precisei.

Ao meu orientador, pelo suporte impecável durante a execução do trabalho e por viabilizar a conclusão do mesmo.

Ao professor Dr. Fábio Favarim por ceder sua impressora Ender-3 Pro para testes e minha tentativa pessoal de impressão dos corpos de prova.

RESUMO

HAAS, William. Desempenho em ensaio de impacto de estruturas *honeycomb* em ABS produzidas por manufatura aditiva. 2021. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Com o crescimento do emprego da Manufatura Aditiva na indústria, novas possibilidades aparecem para aplicações que requerem absorção de impacto. Uma destas é o uso de estruturas celulares, que apresentam uma boa combinação entre alta resistência mecânica e redução de massa. Neste contexto, o sanduíche de *honeycomb* se destaca como uma estrutura celular que apresenta um bom desempenho na absorção de impacto. Com o objetivo de analisar este desempenho, foram fabricados corpos de prova com estrutura sanduíche de *honeycomb* com diferentes tamanhos de célula utilizando uma impressora 3D. Espécimes maciços também foram feitos. Em seguida, foram realizados ensaios de impacto e coletado os resultados da energia absorvida em cada corpo de prova. É realizada uma descrição das fraturas ocorridas e análise estatística dos resultados obtidos. As estruturas elaboradas não apresentaram diferença significativa no seu desempenho. Os espécimes maciços absorveram em média 138% mais energia de impacto sendo apenas 84% mais pesados. Foi encontrada uma correlação entre a massa dos corpos de prova e a energia absorvida por eles. Concluiu-se que o corpo de prova maciço apresenta um desempenho superior às estruturas *honeycomb* quando submetidas a ensaio de impacto.

Palavras-chave: Impressão 3D. Manufatura aditiva. Estruturas celulares. *Honeycomb*. Ensaio de Impacto.

ABSTRACT

HAAS, William. Impact testing performance of ABS honeycomb structures produced by additive manufacturing. 2021. 58 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

With the growth in the use of additive manufacturing in the industry, new possibilities appear for applications that require impact absorption. One of these is the use of cellular structures, which have a good combination of high mechanical strength and mass reduction. In this context, the honeycomb sandwich stands out as a cellular structure that has a good performance in impact absorption. In order to analyze this performance, samples with honeycomb sandwich structure with different cell sizes were manufactured using a 3D printer. Massive specimens were also made. Then, impact tests were carried out and the results of the energy absorbed in each specimen were collected. A description of the fractures that occurred and an analysis of the results obtained is carried out. The elaborate structures do not show significant difference in their performance. Massive specimens absorb on average 138% more impact energy and are only 84% heavier. A correlation was found between the mass of the specimens and the energy absorbed by them. It was concluded that the solid specimen presents a better performance than honeycomb structures when subjected to impact testing.

Keywords: 3D printing. Additive manufacturing. Cellular structures. Honeycomb. Impact Test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema representativo do funcionamento do processo FDM da Stratasy Ltd.	15
Figura 2 – Efeito de uma mesma carga em um corpo com diferentes direções de impressão.....	16
Figura 3 – Núcleo honeycomb feito com ABS através de FDM.....	18
Figura 4 – Representação de um sanduíche de honeycomb	19
Figura 5 – Diagrama de tensão por deformação ilustrando o módulo de tenacidade.....	22
Figura 6 – Modelo elástico do corpo de um carro genérico.....	23
Figura 7 – Representação do funcionamento do martelo pendular	24
Figura 8 – Impressora Cube 3D de 2ª geração fabricada pela 3D Systems	29
Figura 9 – Impressora Ender-3 Pro fabricada pela Creality 3D Technology	30
Figura 10 – Representação proporcional da primeira célula honeycomb.....	32
Figura 11 – Representação da estrutura do primeiro corpo de prova	32
Figura 12 – Representação da estrutura do último corpo de prova.....	32
Figura 13 – Dimensões externas do corpo de prova.....	34
Figura 14 – Máquina de ensaio de impacto FIT-300, fabricada pela PANTEC	35
Figura 15 – Resultado do teste de impressão de um honeycomb pela Cube 3D.....	38
Figura 16 – Todos os corpos de prova impressos.....	39
Figura 17 – Defeito na extremidade do corpo de prova E1	40
Figura 18 – Imperfeições nos corpos de prova C1 e E3	40
Figura 19 – Corpos de prova após a realização dos ensaios.....	42
Figura 20 – Corpo de prova F1 após a realização do ensaio	43
Figura 21 – Corpo de prova D3 após a realização do ensaio	44
Figura 22 – Comparação entre a deformação dos corpos de prova A2 e C2	45
Figura 23 – Gráfico da regressão linear	46
Figura 24 – Gráfico das médias e da diferença mínima significativa entre os corpos de prova	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista dos corpos de prova ensaiados	33
Tabela 2 – Dimensões obtidas para os corpos de prova A, B e C	41
Tabela 3 – Dimensões obtidas para os corpos de prova D, E e F	41
Tabela 4 – Energia absorvida pelos corpos de prova no ensaio de impacto	41
Tabela 5 – Falhas identificadas e energia absorvida em cada corpo de prova	44
Tabela 6 – Resultados estatísticos iniciais dos ensaios	45
Tabela 7 – Tabela ANOVA da energia absorvida pelos corpos de prova	47
Tabela 8 – Tabela de comparação da diferença entre as médias dos corpos de prova	47

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três dimensões	-
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	-
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno	-
AM	Manufatura Aditiva	-
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>	-
EA	<i>Energia Absorvida</i>	J
EAE	Energia Absorvida Específica	kJ/kg
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição	-
FEM	<i>Finite Element Method</i>	-
PC	Polycarbonato	-
PLA	Poliácido láctico	-
PPSF	Polifenilsulfona	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Principal	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 MANUFATURA ADITIVA.....	14
2.1.1 Definição e Funcionamento.....	14
2.1.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).....	14
2.1.3 Materiais Utilizados	15
2.1.4 Características Resultantes na Peça	16
2.1.5 Projeto para Manufatura Aditiva e Estruturas Celulares.....	17
2.2 ESTRUTURAS <i>HONEYCOMB</i>	18
2.2.1 Caracterização	18
2.2.2 Sanduíche de <i>Honeycomb</i>	18
2.2.3 Desempenho em Carregamentos de Impacto.....	19
2.3 FÍSICA DO IMPACTO	20
2.3.1 Conceituação	20
2.3.2 Formulação Matemática	20
2.3.3 Absorção do Impacto.....	21
2.3.3.1 Requisitos do material	22
2.3.3.2 Geometrias favoráveis à absorção de impacto	23
2.3.4 Ensaios de Impacto	24
2.3.4.1 Implicações práticas	25
2.3.4.2 Outros ensaios de impacto.....	25
2.3.4.3 Ensaios de impacto em materiais feitos por impressão 3D	26

3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 MANUFATURA ADITIVA DOS CORPOS DE PROVA	28
3.1.1 Material Utilizado	28
3.1.2 Impressora 3D Utilizada	29
3.1.3 Parâmetros de Impressão	30
3.2 ESPECIFICAÇÃO DA ESTRUTURA <i>HONEYCOMB</i>	31
3.3 ENSAIO DE IMPACTO	33
3.3.1 Corpos de Prova	33
3.3.2 Equipamentos Utilizados	34
3.3.3 Procedimentos dos Ensaios	35
3.4 OBTENÇÃO DOS DADOS ESTATÍSTICOS	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA	38
4.1.1 Dimensões Obtidas	41
4.2 ENSAIO DE IMPACTO	41
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
4.3.1 Tipos de Falha	43
4.3.2 Análise Estatística	45
4.3.2.1 Regressão linear	46
4.3.2.2 Análise de variância ANOVA	47
4.3.3 Comparação do Desempenho	48
5 CONCLUSÕES	50
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
REFERÊNCIAS	52
ANEXO A – TABELA DE DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT	58

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva, também conhecida como impressão 3D, tem apresentado grande expansão do seu uso no século XXI e traz consigo uma infinidade de novas possibilidades para o *design* e a engenharia. Uma delas é a confecção de padrões estruturais complexos em tamanhos pequenos. Segundo Volpato (2017), através da Manufatura Aditiva é possível fabricar geometrias normalmente impossíveis por outros métodos, abrindo assim inúmeras oportunidades em termos de projeto.

Com estes avanços, novas possibilidades apareceram para as aplicações que requerem absorção de impacto. Uma delas é o uso de estruturas celulares que podem ser propícias para este propósito, aliando uma combinação de alta resistência a redução de massa. Além disso, elas possuem boas características em termos de absorção de energia de maneira controlada (VOLPATO, 2017).

Neste contexto o uso de estruturas *honeycomb* para a finalidade de absorção de impacto se mostra adequada. Uma prova disso é que os pés do módulo de pouso da Apollo 11 utilizavam estruturas *honeycomb* quebráveis de alumínio como absorvedores de impacto (ROGERS, 2006). No entanto, seu uso demanda o conhecimento da direção da colisão, pois tanto o *honeycomb* quanto o resultado do método de fabricação apresentam características anisotrópicas.

Portanto, para utilizar uma estrutura *honeycomb* na absorção de impacto é necessário especificar entre outras características a densidade celular, a espessura de parede e as proporções geométricas do hexágono. Esta é uma tarefa complexa, pois depende de fatores como a força do impacto, as condições atmosféricas, a orientação da colisão, a maneira como está fixo o componente, entre outros.

O presente trabalho busca avaliar o desempenho do sanduíche de *honeycomb* impresso 3D em absorver a energia em um ensaio de impacto, além de comparar a diferença entre corpos de prova com tamanhos celulares maiores ou menores. Com este fim os hexágonos devem apresentar a mesma proporção, ponto inicial de referência, material, espessura de parede e impressora utilizada para fabricação do polímero.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Principal

Analisar o desempenho em ensaio de impacto de diferentes estruturas *honeycomb* em ABS produzidas por Manufatura Aditiva.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados: (i) estudar e conceber o padrão estrutural a ser utilizado nos ensaios; (ii) especificar, modelar em 3D e imprimir os corpos de prova; (iii) executar os ensaios de impacto e capturar os dados experimentais; (iv) analisar estatisticamente os resultados e comparar o desempenho entre as variações propostas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Tecnologias de absorção de impacto são majoritariamente empregadas em itens de proteção como, por exemplo, para-choques automobilísticos que são projetados como um recurso de segurança para os ocupantes do carro (BOIS, *et al.*, 2004). Assim, manifestam por meio da preservação da vida sua importância para a sociedade. Com o desenvolvimento da Manufatura Aditiva e a consequente possibilidade de haver itens com essa finalidade sendo fabricados por esse processo de fabricação, torna-se relevante que estudos sejam realizados neste contexto.

Ademais, a crescente demanda por segurança é uma tendência visível na engenharia contemporânea, com a pesquisa mais difundida sendo voltada ao desenvolvimento de sistemas que protejam contra impactos e explosões ou carregamento ambiental severo (HOLNICKI-SZULC, *et al.*, 2015).

Dada a contextualização, o presente trabalho busca ampliar os conhecimentos relacionados ao uso da Manufatura Aditiva em dispositivos absorvedores de impacto ao contribuir com resultados experimentais e abordar o uso do sanduíche de *honeycomb* para este propósito.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

2.1.1 Definição e Funcionamento

A Manufatura Aditiva, do inglês *Additive Manufacturing* (AM) ou impressão 3D segundo Ngo *et al.* (2018) é um processo de fabricação de estruturas e geometrias complexas a partir de um modelo tridimensional, consistindo na impressão de sucessivas camadas de materiais uma em cima da outra. Frequentemente o termo 'impressão 3D' é utilizado como um sinônimo para todos os processos de AM. No entanto, ela engloba diversos processos com diferenças no seu método de fabricação por camadas, variando de acordo com o material e a tecnologia da máquina utilizada (ASHRAF; GIBSON; RASHED, 2018).

A AM é uma tecnologia em ascensão e está revolucionando a indústria. A capacidade de fabricar formas e estruturas complexas a torna inestimável na produção de protótipos como coletores de admissão de motores para indústria automobilística e ferramentas como moldes de fundição nas indústrias aeronáutica e de joias. (CHUA; LEONG, 2014). Apesar das tecnologias de Manufatura Aditiva serem utilizadas principalmente em aplicações com baixo volume de produção, várias empresas tem aderido ao seu uso também para produção fabril (CHU; GRAF; ROSEN, 2008).

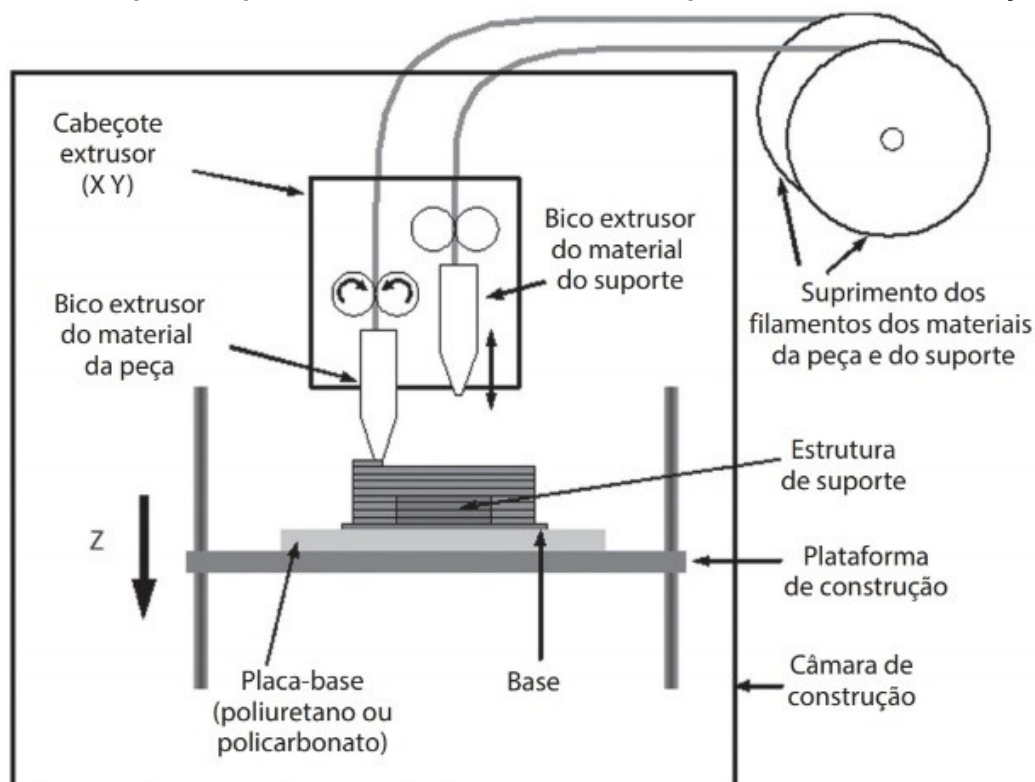
2.1.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

A modelagem por fusão e deposição é baseada na deposição de material fundido em uma plataforma suspensa e tem se tornado um dos métodos de prototipagem rápida mais utilizados para várias aplicações (DUDEK, 2013). Segundo Volpato (2017), suas vantagens incluem, entre outras, a simplicidade de deposição do material, a utilização de polímeros de engenharia estáveis e que não requerem pós-cura e tem por limitações principais a precisão dimensional (podendo chegar a 0,33 mm de espessura de camada) e a lentidão da produção.

A Figura 1 apresenta o funcionamento do processo FDM da Stratasys Ltd., a primeira empresa a comercializar um equipamento de impressão 3D deste tipo, em

1992 (VOLPATO, 2017). O funcionamento consiste do material fornecido por roletes tracionados passando pelo cabeçote extrusor e sendo depositado na base pelo bico extrusor da peça.

Figura 1 – Esquema representativo do funcionamento do processo FDM da Stratasys Ltd.



Fonte: Volpato (2017).

2.1.3 Materiais Utilizados

A Manufatura Aditiva dispõe de uma grande variedade de materiais que podem ser empregados. Segunda Chua e Leong (2014) os materiais atualmente utilizados incluem papel, polímeros, cera, resinas, metais e cerâmicos, podendo vir em formato sólido, líquido ou em pó. Se tratando especificamente de FDM, Dudek (2013) afirma que os materiais mais utilizados são o ABS, seguidos por PC, PLA, PPSF, ULTEM9085 e misturas destes. São todos termoplásticos que, segundo Chua, Leong e Lim (2010) chegam a ter até 85% da resistência mecânica de peças do mesmo material obtidas por injeção.

2.1.4 Características Resultantes na Peça

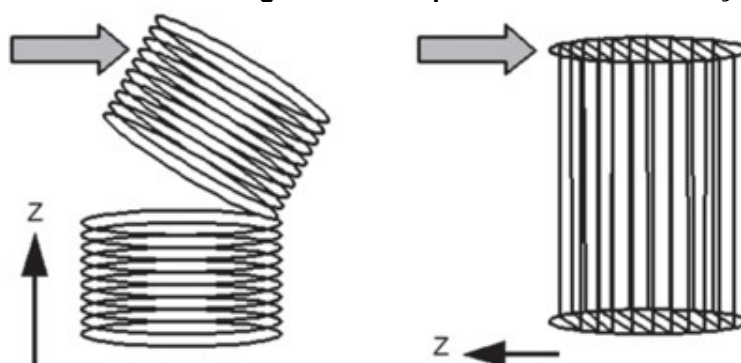
Uma peça produzida por FDM é química e mecanicamente estável, não requer pós-cura e pode ser utilizada até mesmo como componente de uso final (VOLPATO, 2017). A variabilidade das propriedades mecânicas são pequenas, com Ebel e Sinnemann (2014) obtendo uma oscilação inferior a 3% nos resultados em testes de tração de amostras destes materiais feitas por FDM em uma mesma impressora.

O desempenho mecânico em comparação com materiais injetados é inferior e varia de acordo com o material que está sendo testado, o tipo da solicitação e a direção em que ela é aplicada. Por exemplo, testes realizados em ABS feitos por FDM com diferentes especificações mostraram que a resistência a tração varia entre 65% e 72% do mesmo material injetado. Já a tensão compressiva fica entre 80% e 90% (AHN *et al.*, 2002).

Devido ao funcionamento do FDM, o objeto resultante apresenta característica anisotrópica. Isso ocorre porque o processo FDM deposita o material de maneira direcional, resultando em peças com comportamento anisotrópico (AHN, *et al.*, 2002). Callister e Rethwisch (2018, p. 86) definem anisotropia como a dependência das propriedades em relação à direção.

Assim, segundo Volpato (2017), a direção ideal em que a tensão deve ser aplicada sobre o material com o objetivo de obter maior resistência é paralela ao eixo z, ou seja, perpendicular ao eixo x-y. Isto se deve porque tensões atuantes em uma direção paralela às camadas tendem a gerar delaminação. A Figura 2 ilustra bem este efeito.

Figura 2 – Efeito de uma mesma carga em um corpo com diferentes direções de impressão



Fonte: Volpato (2017).

2.1.5 Projeto para Manufatura Aditiva e Estruturas Celulares

Devido às particularidades da AM, as suas limitações são diferentes de métodos de fabricação que utilizam a subtração de material para atingir a geometria desejada. Deste modo, os conceitos empregados em projetos para fabricação convencional não se aplicam aos processos de Manufatura Aditiva (BOOTH *et al.*, 2017).

Assim, o projeto para Manufatura Aditiva, do inglês *design for Additive Manufacturing* (DfAM) é “a síntese de formas, tamanhos, mesoestruturas, e composições de material e microestruturas para melhor utilizar as capacidades do processo de fabricação buscando atingir um desempenho desejado” (CHU; GRAF; ROSEN, 2008) e tem por objetivo a concepção de metodologias de projeto que levem em consideração as vantagens e limitações únicas da AM tanto no seu emprego para prototipagem rápida quanto para fabricação rápida (BOOTH *et al.*, 2017).

Em função da possibilidade de fabricar estruturas complexas, a AM desempenha bem, frente a outros métodos de fabricação convencionais no projeto de peças focado na redução de peso (YANG *et al.*, 2015). Neste contexto, estruturas celulares são boas candidatas para esta aplicação, pois utilizando as tecnologias de Manufatura Aditiva uma célula única de uma estrutura pode ser projetada a vontade, de maneira que o material seja posicionado apenas onde ele é necessário para uma aplicação específica." (SAVIO *et al.*, 2018). Assim, o resultado é uma estrutura que utiliza apenas a quantidade de material ideal para um determinado uso.

Estruturas celulares constituem-se por uma célula unitária repetida ao longo de um volume e podem frequentemente serem tratadas como uma combinação de células com arestas ou faces sólidas. Graças aos problemas dos métodos de fabricação convencionais, existe um número limitado de metodologias para o projeto de estruturas tridimensionais celulares que possam ser verificadas experimentalmente (YANG *et al.*, 2015).

2.2 ESTRUTURAS *HONEYCOMB*

2.2.1 Caracterização

O *honeycomb* é um padrão estrutural que segundo a definição de Bitzer (1997), é uma matriz de células abertas formadas por lâminas finas de material ligadas umas às outras. Normalmente possuem formato hexagonal, mas podem ter outras configurações. Outras variações que podem ser encontradas empregam hexágonos assimétricos, favorecendo o desempenho mecânico em diferentes situações e carregamentos com diferentes direções. A sua topologia inspirada em favos de mel atualmente já é bem conhecida e muito bem estudada (KUCEWICZ *et al.*, 2018). É possível conferir um exemplo de um núcleo *honeycomb* impresso em 3D na Figura 3.

Figura 3 – Núcleo honeycomb feito com ABS através de FDM



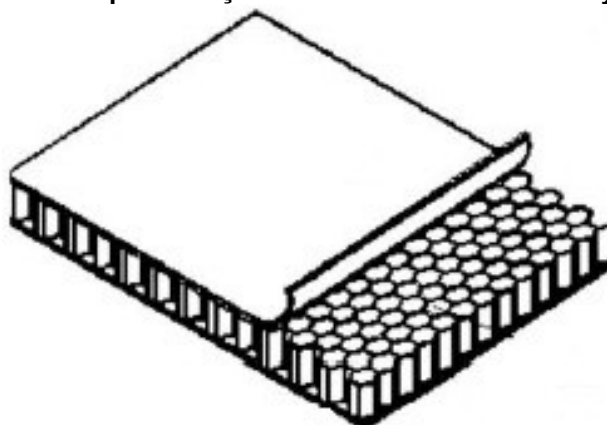
Fonte: Pollard, *et al.* (2017).

O uso do núcleo de *honeycomb* tem crescido no passado recente em diversas aplicações, com destaque para a indústria aeronáutica e aeroespacial, onde é uma escolha frequente em aplicações estruturais menos exigentes devido a suas excelentes propriedades mecânicas e peso leve (POLLARD, *et al.*, 2017).

2.2.2 Sanduíche de *Honeycomb*

Um emprego muito comum do núcleo de *honeycomb* é o sanduíche de *honeycomb* que pode ser visto na Figura 4. Em razão do seu baixo peso combinado com boa resistência mecânica é muito utilizado na indústria de embalagens, aeronáutica, construção e de móveis (WANG, 2009).

Figura 4 – Representação de um sanduíche de honeycomb



Fonte: Adaptado de Wang (2009).

Materiais em configuração de sanduíche tem sido amplamente utilizados nos últimos anos em estruturas que demandam baixo peso, especialmente na indústria naval. Um painel de sanduíche leve pode substituir a convencional placa enrijecida, provendo redução de peso ao remover a necessidade de diversos enrijecedores (CRUPI; EPASTO; GUGLIELMINO, 2013).

2.2.3 Desempenho em Carregamentos de Impacto

Por meio de suas aplicações é possível constatar o bom desempenho em impacto do *honeycomb*. Um exemplo disto pode ser visto em embalagens, onde o *honeycomb* de papel é utilizado para amortecimento, resistindo a vibrações e choques com o objetivo de proteger produtos de dano (WANG, 2009). Outros exemplos são contêineres derrubados de aviões e veículos acidentados, que podem utilizar a estrutura *honeycomb* como um amortecedor para os impactos (YAMASHITA; GOTOH, 2005).

Especificamente no sanduíche de *honeycomb*, Goldsmith e Sackman (1992) afirmam que fazendo uma escolha criteriosa do material, da espessura e da geometria da estrutura celular é possível projetar um sanduíche de *honeycomb* buscando tanto uma força de pico pré-estabelecida quanto uma quantidade de energia a ser absorvida por área do sanduíche.

2.3 FÍSICA DO IMPACTO

2.3.1 Conceituação

O impacto pode ser definido como uma colisão entre dois ou mais objetos que gera uma carga dinâmica de grande intensidade em um curto período de tempo (HIBBELER, 2010). O carregamento dinâmico é aquele que varia em função do tempo. Um corpo submetido a este tipo de carga apresenta uma resposta muito diferente do que quando é submetido a um carregamento estático (CRAIG, 2003).

Já as colisões são divididas entre colisões elásticas e inelásticas. A colisão elástica é quando a energia cinética do sistema permanece a mesma e não representa um cenário realista. Em condições de impacto normais, parte da energia cinética sempre é dissipada em outras formas de energia, como térmica e sonora (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

Em impactos de baixa intensidade a deformação no material que sofre a colisão é elástica, o que significa que assim que a carga cessa o material volta a sua dimensão original. No caso de impactos cuja carga ultrapassa a tensão de escoamento do material a deformação passa a ser plástica, ou seja, se mantém mesmo após a aplicação da carga cessar.

2.3.2 Formulação Matemática

Em carregamentos estáticos é possível calcular o trabalho realizado (W) ao criar uma deformação (x) através da equação (1). Desde que esta deformação ocorra inteiramente no regime elástico, este trabalho é armazenado no corpo que sofre esta força (F) como energia de deformação (U_E) (HIBBELER, 2010; CRAIG, 2003).

$$W = U_E = \int_0^x F \cdot dx \quad (1)$$

No entanto, o carregamento de impacto é dinâmico e a deformação que ocorre é plástica. Segundo Jones (1990), nos casos de carga dinâmica a elasticidade do material é negligenciada, pois a energia dinâmica total é muito maior que a que pode ser absorvida de maneira exclusivamente elástica.

Desta maneira, se faz necessária uma abordagem diferente para o cálculo da energia absorvida pelo impacto. Romera *et al.* (2014) obteve experimentalmente o gráfico da força do impacto pelo deslocamento (z) de uma estrutura *honeycomb*, propondo o cálculo da energia absorvida pelo impacto (E_a) e a energia absorvida específica (EAE) pelas equações (2) e (3), respectivamente:

$$E_a = \int_0^{\delta} F \cdot dz \quad (2)$$

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

Com base na energia absorvida específica é possível avaliar quão eficiente uma estrutura é com a massa disponível (m) em absorver uma carga de impacto. Outro dado utilizado, segundo Jones (1990) é a eficiência de golpe (S_{te}), obtida pela equação (4).

$$S_{te} = \frac{S}{L} \quad (4)$$

A eficiência do golpe representa quanto do comprimento do dispositivo é efetivamente empregado na absorção da colisão (S) em comparação ao seu comprimento total (L).

2.3.3 Absorção do Impacto

Existem aplicações de absorção de impacto que não envolvem falha na estrutura empregada, como por exemplo um trem de pouso. No entanto o presente trabalho aborda o caso em que a intensidade da colisão supera a tensão de escoamento e a deformação plástica ocorrente dissipa a energia cinética, atuando como um mecanismo de absorção de impacto.

Vários estudos referem-se a esta capacidade de uma estrutura de absorver impacto como *crashworthiness* (AHMAD, THAMBIRATNAM, 2009; HOLNICKI-SZULC, *et al.*, 2008; NAGEL, THAMBIRATNAM, 2004). Segundo Jones (2003) esta área de estudo busca melhorar a resistência de meios de transporte a colisões,

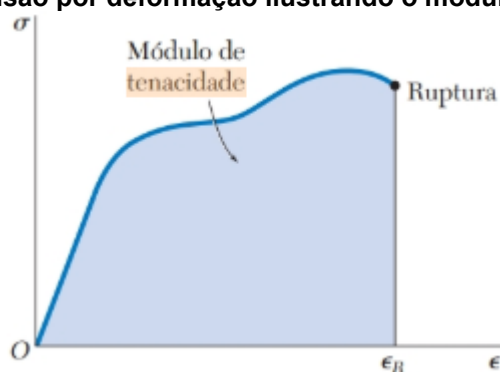
sacrificando a estrutura para absorver a energia da colisão e assim proteger os passageiros ou uma carga.

Elementos absorvedores de energia buscam reduzir as forças atuantes nas estruturas protegidas e são caracterizados principalmente por alta deformabilidade, plasticidade e apresentam uma grande razão de rigidez por densidade (KUCEWICZ *et al.*, 2018). Segundo Jones (1990) um absorvedor de impacto ideal é o que mantém a máxima força retardante admissível ao longo de um golpe. Com o objetivo de alcançar um dispositivo tão próximo quanto possível do ideal é necessário que o material e a geometria utilizadas sejam dimensionadas especificamente para a aplicação em que serão empregadas.

2.3.3.1 Requisitos do material

A principal propriedade mecânica requisitada de um material que será aplicado em absorção de impacto é a tenacidade. Segundo Callister e Rethwisch (2018), ela pode ser definida como a habilidade de um material absorver energia e deformar plasticamente antes de fraturar e é representada pela área sob a curva do gráfico de tensão por deformação do material, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama de tensão por deformação ilustrando o módulo de tenacidade



Fonte: Beer (2015).

Como o gráfico de tensão por deformação nos informa o limite de resistência do material e o quão dúctil ele é, fica claro que o desempenho de uma estrutura submetida a uma força de impacto depende diretamente da tenacidade do seu material componente (BEER, *et al.*, 2015).

Desta maneira é possível concluir que com o objetivo de absorver o máximo de energia por meio de deformação plástica é necessário que o material não seja apenas resistente ou dúctil, mas que apresente uma combinação de ambas características na temperatura ambiente.

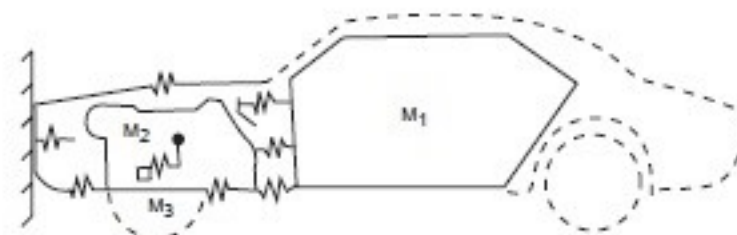
2.3.3.2 Geometrias favoráveis à absorção de impacto

Apesar de o material ser o principal fator para se determinar a absorção de energia de um corpo submetido a impacto, a geometria entre outros fatores também é determinante no seu desempenho. Por exemplo, uma amostra espessa apresenta maior resistência a deformação (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Uma boa alternativa é a utilização de estruturas celulares. Padrões de geometrias tubulares com formato cilíndrico, cônico e esférico deformam-se majoritariamente de maneira estável e progressiva sob cargas estáticas e de impacto, levando a uma eficácia na transformação de energia cinética em energia de deformação plástica relativamente alta (KUMAR; MANEIAH, 2019).

Já automóveis utilizam zonas progressivas de esmagamento que dissipam a energia cinética do impacto antes desta atingir a cabine dos passageiros (BOIS, *et al.*, 2004). Uma representação visual destas zonas de esmagamento progressivas pode ser vista no modelo elástico do corpo de um carro, na Figura 6.

Figura 6 – Modelo elástico do corpo de um carro genérico



Fonte: Adaptado de Bois (2004).

É possível constatar pelo estudo bibliográfico que a solução geométrica adequada para cada aplicação de absorção de impacto dependerá do espaço disponível para o dispositivo absorvedor, da intensidade da colisão e da disponibilidade financeira e construtiva para sua execução. No entanto, de maneira geral, geometrias favoráveis à absorção de impacto são projetadas para dispersar o maior valor possível da energia aplicada externamente ao transformá-la em energia

interna através de trabalho realizado por deformação plástica (KUCEWICZ *et al.*, 2018).

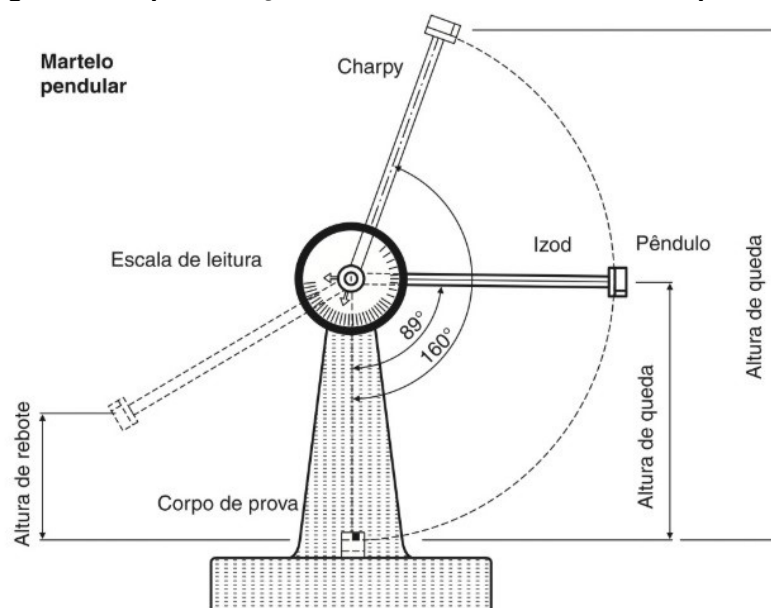
2.3.4 Ensaio de Impacto

Normalmente não é possível prever ou controlar todas as variáveis envolvidas em uma situação de impacto na vida real. Desta maneira, o ensaio de impacto é um método rápido e barato de comparar a tenacidade de diferentes materiais (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Os ensaios de impacto existentes são o Charpy e Izod, sendo o primeiro mais utilizado nos Estados Unidos e o segundo na Europa. Suas diferenças residem principalmente na maneira como o corpo de prova é posicionado, na face do entalhe e na altura de queda do pêndulo, resultando em um impacto com maior ou menor energia (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Em ambos os ensaios a carga de impacto é aplicada por um martelo solto a partir de uma posição e altura pré-definida. Logo após a sua liberação o martelo fratura o corpo de prova, continuando o seu movimento após a colisão. A diferença entre a altura inicial e a altura alcançada após o impacto nos fornece a energia absorvida, que pode ser medida pela escala do equipamento (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Figura 7 – Representação do funcionamento do martelo pendular



Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012).

Além da energia absorvida também é avaliado o tipo de falha do corpo de prova, classificando a sua fratura de diferentes maneiras de acordo com a norma utilizada de referência. Um exemplo de caracterização é a de quebra completa, parcial ou incompleta. Outro uso destes ensaios de impacto tem por objetivo encontrar a zona de transição dúctil-frágil de um material, que interfere na absorção de energia dele dependendo da temperatura em que ele se encontra (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

2.3.4.1 Implicações práticas

Os resultados dos ensaios de impacto são qualitativos e de pouca utilidade para fins de projeto. A energia de impacto resultante é de interesse para uma avaliação relativa e principalmente para realização de comparações, já que os valores absolutos têm pouco significado (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Assim, conclui-se que o ensaio de impacto pode ser utilizado como meio de comparação do desempenho entre diferentes corpos de prova, desde que se esteja ciente das limitações envolvidas no uso deste método. Apesar de normalmente ser utilizado para comparar materiais Flasar, Triska e Junas (2017) já utilizaram este tipo de ensaio para comparar corpos de prova não-maciços ao avaliar o desempenho de sanduíches de *honeycomb*.

Outra aplicação do ensaio de impacto é na determinação se um material apresenta uma região de transição dúctil-frágil ao reduzir a temperatura e, caso presente, em que faixa de temperaturas ela ocorre (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). Esta informação é útil ao evitar o emprego de ligas que apresentam fragilidade em baixas temperaturas em aplicações que envolvam impacto.

2.3.4.2 Outros ensaios de impacto

Apesar dos ensaios de impacto Charpy e Izod serem os mais utilizados, não são os únicos a serem empregados na avaliação da capacidade de absorção de impacto de um determinado corpo de prova. Quaresimin *et al.* (2013) utilizaram uma torre de queda de peso para avaliar a absorção de energia de laminados de compósitos. Este tipo de teste tem o seu procedimento padrão definido pela ASTM

D5628-18 *Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass)*.

Atualmente os ensaios vem perdendo espaço para as simulações numéricas quando se trata da avaliação da capacidade de absorção de impacto em estruturas complexas. O método dos elementos finitos (FEM) tem sido largamente empregado, fornecendo resultados como Romera *et al.* (2014) obtiveram, com gráficos detalhados da força pelo deslocamento ao longo do impacto, bem como a força máxima a qual o objeto simulado foi submetido.

2.3.4.3 Ensaios de impacto em materiais feitos por impressão 3D

Tsouknidas *et al.* (2016) realizou ensaios de impacto em PLA com espessuras de camada de 0,1, 0,2 e 0,3 mm, variando também a densidade dos corpos de prova e o padrão de preenchimento. Seus resultados indicam que o desempenho mecânico de amostras com diferentes espessuras de camada depende da densidade de preenchimento. Por exemplo, corpos de prova com baixa densidade mostraram um desempenho superior sob impacto com uma espessura de camada de 0.1 milímetros, enquanto os completamente densos mostraram resposta superior com uma espessura de camada de 0,2 mm. Outro resultado interessante obtido foi que corpos de prova com 25% de densidade apresentaram maior absorção de energia por unidade de volume, indicando que espécimes porosos tendem a dissipar energia de maneira mais efetiva do que um completamente denso. Apesar deste desempenho por volume superior, apresentaram uma força pico de impacto até 84% menor que os elementos densos, compensando pouco seu uso em aplicações estruturais reais.

Benwood *et al.* (2018) também realizou ensaios com PLA e descobriu que um ângulo de construção no plano x-y de 45° é a orientação ideal para se obter melhores propriedades mecânicas. No entanto, a relevância deste fator foi consideravelmente pequena nos resultados. Outra conclusão foi que o reaquecimento do corpo de prova e o aumento da temperatura da base de construção resultaram em maior cristalinidade nos espécimes, afetando positivamente a resistência ao impacto.

Já Caminero *et al.* (2018) estudou entre outras variáveis o efeito da espessura de camada no desempenho sob impacto em diferentes orientações de impressão. No caso de corpos de prova com a carga sendo aplicada paralelamente ao plano das camadas, espécimes com espessura de camada maiores absorveram

mais energia. Isso pode ser explicado porque com maior espessura, menos camadas são feitas e assim, há menos falhas por delaminação. Já quando a carga é aplicada perpendicular ao plano das camadas, menores espessuras obtiveram desempenho superior.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que o trabalho fosse apropriadamente executado um planejamento metodológico foi estabelecido e seguido, começando por uma revisão bibliográfica sobre Manufatura Aditiva, estruturas *honeycomb* e ensaios de impacto com o objetivo de buscar a fundamentação teórica necessária para a elaboração dos ensaios, da estrutura e do trabalho.

Em seguida foi realizada a definição do material a ser utilizado, baseando a escolha no que foi visto na revisão bibliográfica. Após esta especificação, seguiu-se para a etapa de verificação da impressora utilizada na fabricação dos corpos de prova e definição dos parâmetros de impressão a serem utilizados.

Com o material e a impressora tendo sido escolhidos, foi realizada a especificação dos corpos de prova e a determinação das geometrias do sanduíche de *honeycomb* a serem ensaiadas. O próximo passo foi a criação do modelo 3D de cada um dos corpos de prova.

Por fim, foi realizada a impressão dos corpos de prova, a aferição das dimensões obtidas nos objetos impressos, a execução dos ensaios de impacto, a captura dos dados do ensaio e análise dos resultados obtidos.

3.1 MANUFATURA ADITIVA DOS CORPOS DE PROVA

3.1.1 Material Utilizado

As impressoras a disposição ofereciam duas opções de material para impressão: o ABS e o PLA. Segundo a pesquisa de Bolelli e Lebrão (2019), a tenacidade do ABS supera a do PLA, sendo assim a opção mais indicada para uma aplicação que envolva absorção de impacto.

O ABS é uma combinação dos copolímeros acrilonitrila, butadieno e estireno e alia boa resistência mecânica, rigidez e tenacidade (ASKELAND; WRIGHT, 2014). Segundo Lokensgard (2014), o ABS é um termoplástico que possui uma excelente resistência ao tempo e ao ultravioleta, boa estabilidade dimensional e é fácil de fabricar. Como desvantagens apresenta sua combustibilidade, baixa resistência a solventes e temperatura de serviço limitada. O filamento específico utilizado na impressão foi o ABS Premium mármore, da distribuidora 3D Lab.

Divyathej, Varun e Rajeev (2016) obtiveram para o ABS impresso 3D por FDM com uma espessura de camada de 0,2 mm um limite de resistência a tração de 33 MPa e um limite de resistência a compressão de 3 MPa. A variação no desempenho dos corpos de prova impressos com 0,1 e 0,15 mm de espessura de camada foram praticamente desprezíveis em comparação ao de 0,2 mm.

Já Ebel e Sinnemann (2014) comprovaram que os resultados em uma mesma impressora são reprodutíveis e apresentam pouca variação, apesar de encontrar uma variação de até 39% no desempenho mecânico de um mesmo ABS impresso em diferentes impressoras.

3.1.2 Impressora 3D Utilizada

Três impressoras foram utilizadas para teste e tentativa de impressão dos corpos de prova, com apenas os espécimes resultantes da terceira sendo utilizados.

A primeira tentativa de impressão dos corpos de prova foi realizada na impressora Cube 3D de 2ª geração, fabricada pela 3D Systems e disponibilizada pelo departamento de mecânica da UTFPR para uso do acadêmico.

O tamanho máximo de impressão da Cube 3D compreende um cubo de 140 mm em cada lado com espessura de camada vertical pré-definida de 0,25 mm. O modelo pode ser visto na Figura 8 e atinge uma temperatura de impressão máxima de 280 °C, podendo trabalhar com ABS ou PLA (3D Systems, 2013).

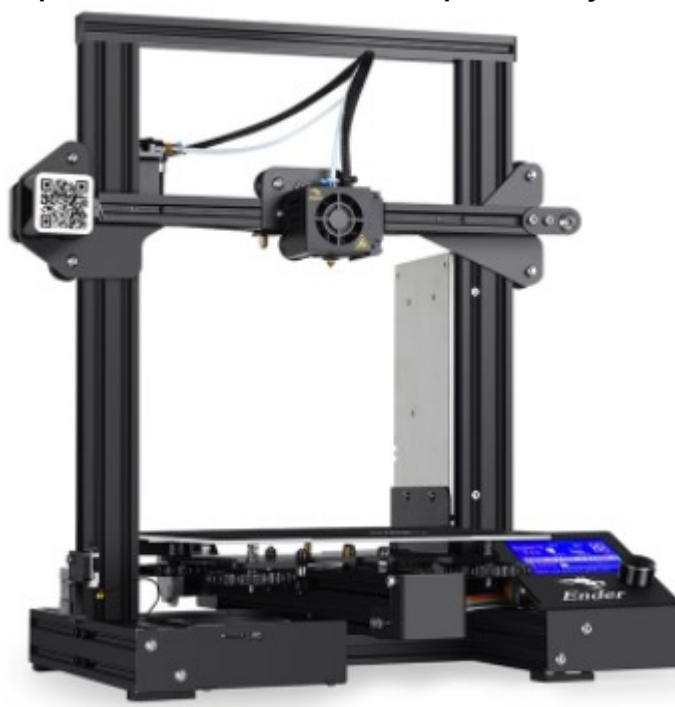
Figura 8 – Impressora Cube 3D de 2ª geração fabricada pela 3D Systems



Fonte: 3D Systems (2013).

A segunda tentativa foi realizada em uma impressora Ender-3 Pro, fabricada pela Creality 3D Technology e gentilmente cedida ao acadêmico para a execução do trabalho pelo Dr. Fábio Favarim. Seu tamanho máximo de impressão compreende uma área de 220 por 220 mm e uma altura de 250 mm com espessura de camada variando de 0,12 a 0,28 mm. A precisão informada pelo fabricante é de 0,1 mm. O modelo pode ser visto na Figura 9 e atinge uma temperatura no bico de extrusão de 255 °C (3D Systems, 2013).

Figura 9 – Impressora Ender-3 Pro fabricada pela Creality 3D Technology



Fonte: Creality 3D Technology (2021).

A terceira tentativa foi realizada em outra Ender-3 Pro e a empresa Tesseracto 3D ficou encarregada da execução. Como os corpos de prova foram encomendados, apenas 18 dos 60 espécimes inicialmente pretendidos foram feitos, tanto devido a limitação financeira quanto ao prazo curto.

3.1.3 Parâmetros de Impressão

Buscando obter corpos de prova com características favoráveis à absorção de impacto, foi definida uma altura de camada de 0,2 mm, 100% de densidade de enchimento e preenchimento concêntrico. Estas especificações foram escolhidas de

acordo com o que foi observado no trabalho de Tsouknidas *et al.* (2016), que estudou os efeitos do padrão de enchimento, altura de camada e densidade de enchimento em diferentes propriedades mecânicas do material resultante.

Os demais parâmetros de impressão foram especificados livremente pela Tesseracto 3D, tendo por objetivo atingir a qualidade necessária nos corpos de prova. Assim, a temperatura de fusão empregada foi de 240 °C, a temperatura da base foi de 90 °C, o fluxo de material de 100% e a espessura de parede de 1,2 mm.

3.2 ESPECIFICAÇÃO DA ESTRUTURA *HONEYCOMB*

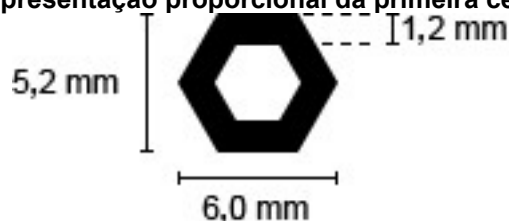
A fabricante da impressora utilizada não informa uma espessura de parede mínima que pode ser feita sem suporte, informação essencial para o dimensionamento da estrutura *honeycomb* do corpo de prova. Por meio de pesquisa em sites especializados foi possível descobrir que a espessura mínima recomendada para impressoras 3D comerciais que funcionam por FDM é de 1,2 mm (FABIAN, 2018) e, portanto, este foi o valor adotado.

Outra informação relevante é o diâmetro do bico de extrusão, que neste caso é de 0,4 mm. Para atingir o melhor nível de precisão na impressão é recomendado que as espessuras de parede possuam um tamanho que seja múltiplo do diâmetro do bico de extrusão (FORMLABS, 2020). Desta forma foi possível confirmar que a espessura de parede de 1,2 mm é adequada, visto que é múltipla de 0,4.

Como a fabricação por FDM é realizada por adição de camadas, o material resultante tem propriedades diferentes para cada eixo de construção (VOLPATO, 2017). Assim, foi necessária uma atenção especial ao definir a direção em que o corpo de prova seria impresso levando em consideração também a direção na qual ele receberia o impacto posteriormente. Portanto, a face superior ou inferior da peça impressa é a que sofreu o impacto no ensaio.

Como a menor espessura de parede que pode ser utilizada é de 1,2 mm, esta foi a espessura adotada para todos os corpos de prova. A fim de determinar um valor base, foi estipulado um tamanho de célula (lado do hexágono) de 3 mm para o primeiro corpo de prova. Assim, estas dimensões resultaram na célula representada pela Figura 10.

Figura 10 – Representação proporcional da primeira célula honeycomb



Fonte: Aatoria própria (2020).

Com a finalidade de que o posicionamento das células seja realizado de maneira similar, a primeira célula foi colocada no centro do corpo de prova, com as adjacentes sendo preenchidas de acordo com o padrão. A estrutura do primeiro corpo de prova ficou similar a representação da Figura 11, com duas lâminas de 1,2 mm nas extremidades dos corpos de prova, completando o sanduíche de *honeycomb*.

Figura 11 – Representação da estrutura do primeiro corpo de prova



Fonte: Aatoria própria (2020).

Os demais corpos de prova foram elaborados com aumento de 0,3 mm no tamanho de célula em cada, com o último apresentando 4,2 mm. Uma representação da última estrutura pode ser vista na Figura 12.

Figura 12 – Representação da estrutura do último corpo de prova



Fonte: Aatoria própria (2020).

Além destas 5 variações também foi feita uma maciça para fins de comparação dos resultados. Assim, houve um total de 6 variações com 3 espécimes cada, totalizando 18 corpos de prova para ensaio.

Após a execução dos desenhos tridimensionais dos corpos de prova, eles foram exportados para o formato STL e posteriormente importados em um *software* “fatiador” que prepara a geometria para a impressão, exportando um arquivo que

carrega consigo a forma e as dimensões do objeto e também as configurações de impressão.

A fim de diferenciar os elementos ensaiados foi estabelecido um código para cada corpo de prova composto por uma letra e um número. A letra indica qual é a variação e o número de 1 a 3 qual o espécime pertencente a esta variação. Na Tabela 1 é possível identificar todos os corpos de prova.

Tabela 1 – Lista dos corpos de prova ensaiados

Corpo Nº	Variação	Espécime	Código	Descrição
1		1	A1	
2	A	2	A2	Completamente maciço
3		3	A3	
4		1	B1	
5	B	2	B2	<i>Honeycomb</i> com tamanho de célula de 3 mm
6		3	B3	
7		1	C1	
8	C	2	C2	<i>Honeycomb</i> com tamanho de célula de 3,3 mm
9		3	C3	
10		1	D1	
11	D	2	D2	<i>Honeycomb</i> com tamanho de célula de 3,6 mm
12		3	D3	
13		1	E1	
14	E	2	E2	<i>Honeycomb</i> com tamanho de célula de 3,9 mm
15		3	E3	
16		1	F1	
17	F	2	F2	<i>Honeycomb</i> com tamanho de célula de 4,2 mm
18		3	F3	

Fonte: Autoria própria (2021).

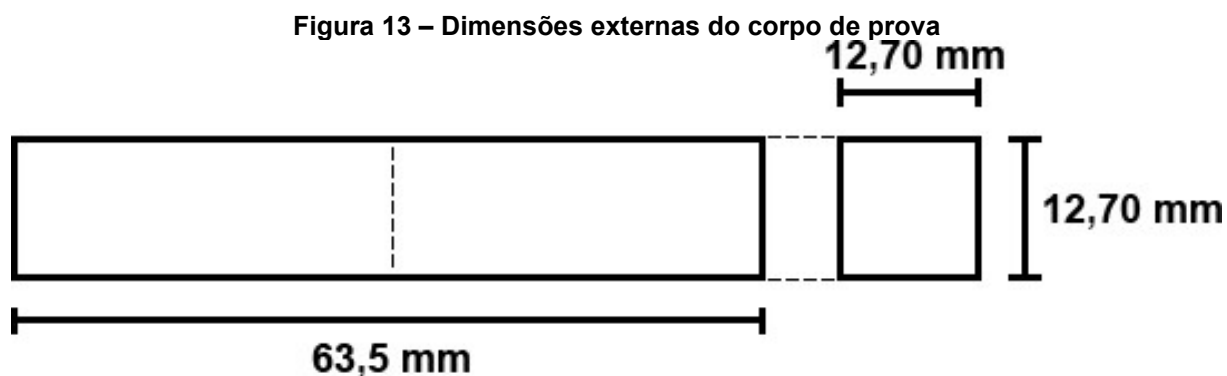
3.3 ENSAIO DE IMPACTO

Segundo Divyathej, Varun e Rajeev (2016), o ensaio mais comumente utilizado para materiais plásticos é o Izod e, portanto, foi este o ensaio adotado para o presente trabalho. Devido à natureza atípica dos corpos de prova propostos não foram encontradas normas específicas para ensaios de impacto em espécimes não-maciços ou impressos 3D por FDM. Desta maneira, as dimensões e procedimentos adotados foram da norma mais próxima possível, a ASTM D256-04 *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*.

3.3.1 Corpos de Prova

Buscando verificar a influência da concentração de tensão do entalhe no desempenho do sanduíche de *honeycomb* seria inicialmente feito duas versões de

cada corpo de prova, uma com e outra sem entalhe. No entanto, devido a redução na quantidade de corpos de prova a serem feitos apenas as versões sem entalhe foram executadas. Os corpos de prova tiveram as dimensões externas especificadas pela norma e estão apresentadas na Figura 13.



Fonte: ASTM D256-04 (2004).

A opção pelos corpos de prova sem entalhe é justificada por dois motivos principais, baseados no trabalho de Yang *et al.* (2015). Células incompletas não contribuem para a estrutura da mesma maneira que células completas e podem afetar o desempenho geral da estrutura. Além disso, a perda de simetria estrutural nas bordas do corpo de prova também resultam em componentes de força e momento adicionais, que criam um "ponto fraco" nas estruturas celulares.

Como o foco é avaliar o desempenho individual de cada estrutura, o entalhe poderia impactar cada variação do corpo de prova de maneira diferente, tornando-se assim uma variável adicional a ser levada em conta ao analisar os resultados.

A norma recomenda que o ensaio seja realizado em no mínimo cinco espécimes de um mesmo corpo de prova com o objetivo de validar os resultados obtidos e esta era a quantidade pretendida de espécimes impressos para cada estrutura estipulada. Com a redução do número de corpos de prova, apenas três espécimes de cada estrutura foram feitos.

3.3.2 Equipamentos Utilizados

A máquina utilizada para os ensaios de impacto é o modelo FIT-300, fabricada pela PANTEC. Ela realiza ensaios Charpy com energia de impacto de 300

J e ensaios Izod com energia de impacto de 170 J. É possível conferir o modelo na Figura 14.

Figura 14 – Máquina de ensaio de impacto FIT-300, fabricada pela PANTEC



Fonte: Autoria própria (2020).

Posteriormente foi verificado que o equipamento está adaptado para a norma ISO 180:1993, que utiliza um corpo de prova menor que o da norma ASTM D256-04. Portanto, os espécimos feitos não encaixavam na matriz da máquina. Logo, optou-se pela execução do ensaio de impacto com o corpo de prova deitado, de maneira semelhante ao ensaio Charpy. Ainda assim, o pêndulo foi solto da altura determinada para o teste Izod. Desta maneira a energia do impacto que atinge o corpo de prova mantém-se adequada para o material ensaiado.

Como as comparações realizadas são apenas entre os corpos de prova fabricados, a análise mantém-se válida pela igualdade de condições aplicada aos espécimes ensaiados.

Para a obtenção das dimensões e do peso dos corpos de prova foi utilizado um paquímetro analógico de aço com precisão de 0,02 mm e uma balança analítica AB204-S, fabricada pela Mettler Toledo, com 4 casas de precisão.

3.3.3 Procedimentos dos Ensaios

Os ensaios de impacto foram realizados assim que todos os corpos de prova terminaram de ser impressos. A maioria dos passos está documentado

formalmente na norma técnica ASTM D256-04 e o método 'A' de ensaio foi adotado. O procedimento seguido foi o seguinte:

1. Posicionamento de cada corpo de prova na balança individualmente e anotação do peso indicado.
2. Medição do comprimento, largura e altura dos corpos de prova com o uso do paquímetro e o registro dos dados logo em seguida.
3. Verificação das leituras do pêndulo sem corpo de prova de acordo com o item 10.3 da norma.
4. Preparação do pêndulo para a execução do ensaio, fixando o martelo na posição adequada.
5. Posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio.
6. Realização do ensaio, soltando o pêndulo.
7. Registro da quantidade de energia absorvida pelo corpo de prova e coleta da peça após a fratura.
8. Aquisição de fotografias do corpo de prova para análise posterior e classificação de acordo com o tipo de fratura.
9. Repetição dos itens 4 a 8 até a conclusão do ensaio de todos os corpos de prova.

3.4 OBTENÇÃO DOS DADOS ESTATÍSTICOS

Após a coleta dos resultados dos ensaios, foi calculado para cada corpo de prova a média e o desvio padrão amostrais de acordo com as equações (5) e (6) respectivamente (DEVORE, 2018).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (6)$$

Com estas métricas em mãos foi possível determinar se os resultados para cada corpo de prova eram satisfatórios. Para isso foi considerado uma distribuição normal que utilizando a equação (7) e o Anexo A (Tabela de Distribuição *T* de Student) permitiram obter um intervalo onde a confiança dos resultados é de 95%, com dois graus de liberdade (n-1) e nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

$$\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Uma regressão linear pode então ser realizada de acordo com o método explicitado por Neto (2006), que utiliza a equação (8) para o cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson.

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (8)$$

Com o objetivo de avaliar se as médias obtidas para cada corpo de prova são estatisticamente diferentes, a análise de variância de uma via, ANOVA, é adequada. A metodologia seguiu os procedimentos apresentados por Virgillito (2017) e um software de cálculo estatístico foi empregado na execução das tabelas e cálculo dos resultados.

Dependendo do resultado da análise ANOVA, é pertinente uma verificação da diferença mínima significativa entre os corpos de prova. Novamente, um software foi utilizado na execução dos procedimentos, que estão evidenciados no trabalho de Williams e Abdi (2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

Na primeira impressão de teste utilizando a Cube 3D foi possível constatar que a impressora não possuía precisão suficiente para a execução dos corpos de prova, como pode ser visto na Figura 15. Os contornos do *honeycomb* ficaram excessivamente suavizados, lembrando mais um círculo do que um hexágono.

Figura 15 – Resultado do teste de impressão de um honeycomb pela Cube 3D



Fonte: Autoria própria (2021).

Apesar de uma quantidade razoável de tempo ter sido utilizada para recondicionar a impressora e aprender a utilizá-la, não foi possível empregá-la no presente trabalho. No entanto, um manual de uso foi elaborado e será disponibilizado para que outros alunos possam futuramente usufruir do equipamento.

Na segunda tentativa, a impressora possuía precisão suficiente para atingir a geometria desejada e algumas semanas foram empregadas no aprendizado do funcionamento e em testes variando os parâmetros de impressão, buscando atingir uma configuração ideal para a execução dos corpos de prova. Houveram problemas para atingir uma boa qualidade nos corpos de prova, que apresentavam empenamento devido a baixa temperatura ambiente, que fazia com que o ABS contraísse.

De qualquer maneira a impressão dos corpos de prova foi iniciada. No entanto, durante a fabricação do terceiro conjunto de espécimes a impressora teve um curto circuito no cartucho de aquecimento e termostato. Após a troca de ambos e o devido ajuste do equipamento, foi constatado que os conectores do tubo que leva o filamento à cabeça de impressão não conseguiam mais mantê-lo conectado, comprometendo o fornecimento adequado de filamento para a extrusão.

Apesar de utilizar uma impressora do mesmo modelo, os corpos de prova fabricados na segunda tentativa não puderam ser aproveitados devido a diferença dos parâmetros de impressão empregados e no material utilizado na terceira tentativa.

A terceira tentativa teve êxito em imprimir todos os corpos de prova. Na Figura 16 é possível observar todos os espécimes prontos para o ensaio e devidamente identificados, com os de final 2 virados a fim de exibir uma visão lateral da estrutura.

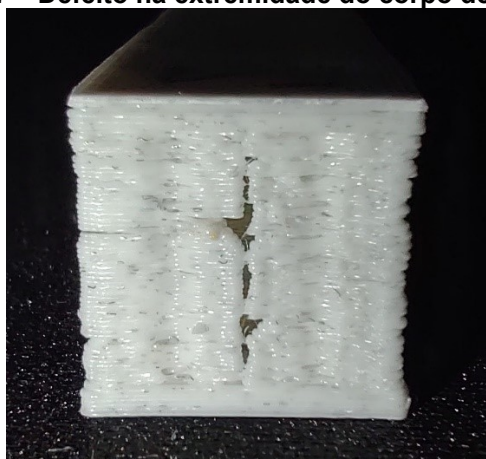
Figura 16 – Todos os corpos de prova impressos



Fonte: Autoria própria (2021).

Os corpos de prova não apresentaram grandes defeitos de fabricação aparentes, com exceção do corpo de prova E1, que possuía uma rachadura na extremidade que pode ser vista na Figura 17.

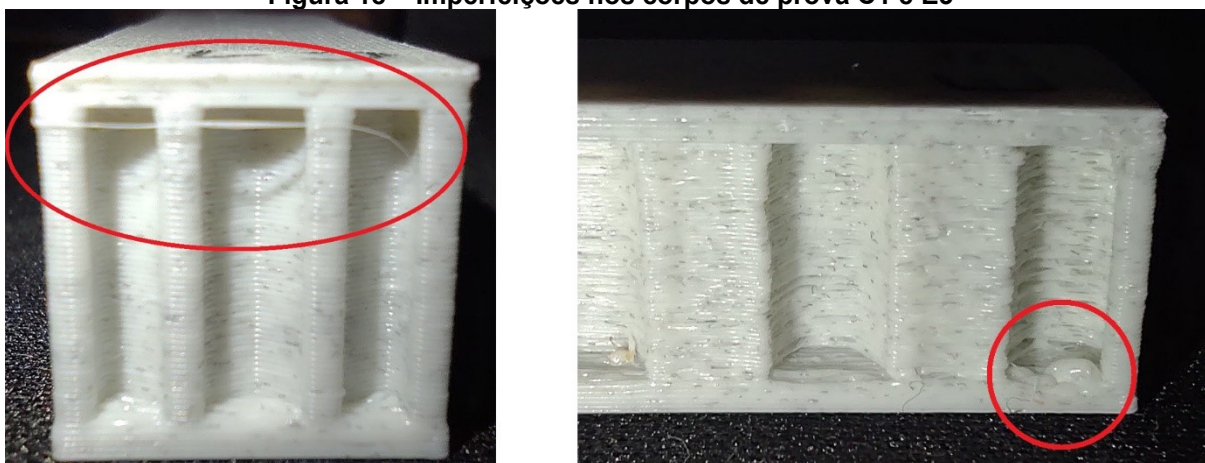
Figura 17 – Defeito na extremidade do corpo de prova E1



Fonte: Autoria própria (2021).

Os demais corpos de prova apresentaram fidelidade à geometria requisitada, com algumas imperfeições como fios de filamento soltos ou excesso de material. Por serem detalhes pequenos, concluiu-se que estas imperfeições não impactariam significativamente nos resultados. Elas podem ser vistas circuladas em vermelho na Figura 18 nos corpos de prova C1 e E3, respectivamente.

Figura 18 – Imperfeições nos corpos de prova C1 e E3



Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.1 Dimensões Obtidas

As dimensões foram registradas e estão presentes nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Dimensões obtidas para os corpos de prova A, B e C

	A			B			C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Largura (mm)	13,04	12,88	13,04	12,88	12,94	13,04	13,02	12,98	13,04
Altura (mm)	12,78	12,08	12,64	12,46	12,46	12,50	12,50	12,52	12,54
Comprimento (mm)	63,44	63,40	63,62	63,34	63,50	63,50	63,40	63,50	63,54
Massa (g)	10,55	10,19	10,49	6,29	6,40	6,45	5,81	5,94	6,01

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 3 – Dimensões obtidas para os corpos de prova D, E e F

	D			E			F		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Largura (mm)	12,88	12,76	12,84	13,00	13,20	13,00	12,90	13,00	12,86
Altura (mm)	12,66	12,60	12,62	12,50	12,50	12,56	12,64	12,62	12,66
Comprimento (mm)	63,44	63,34	63,50	63,44	63,66	63,60	63,50	63,58	63,24
Massa (g)	5,64	5,44	5,68	5,26	5,45	5,53	5,06	5,07	4,96

Fonte: Autoria própria (2021).

Considerando que os corpos de prova apresentaram desvios de até 0,62 mm na largura e na altura e a tolerância máxima apresentada na norma para esta dimensão é de 0,2 mm acima ou abaixo da medida nominal, a impressão 3D não atingiu a precisão desejada para os ensaios, com apenas 27,7% dos corpos de prova apresentando dimensões dentro das tolerâncias. Por outro lado, o comprimento foi satisfatório em todos eles.

4.2 ENSAIO DE IMPACTO

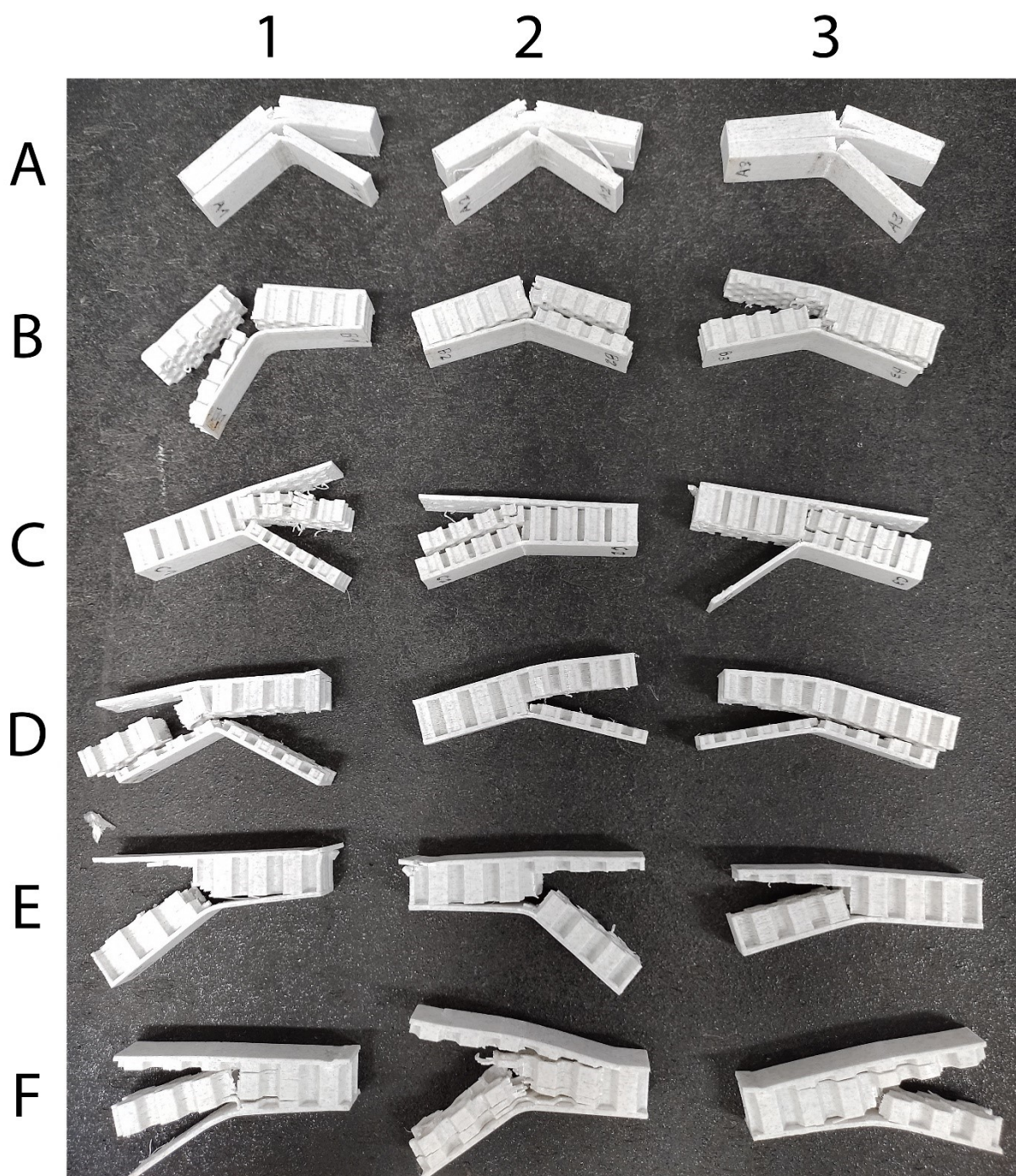
Os ensaios ocorreram de acordo com o que foi especificado no item 3.3.3. Os resultados numéricos podem ser encontrados na Tabela 4 e uma fotografia com todos os corpos de prova fraturados na Figura 19. Durante o ensaio do corpo de prova C1 o pêndulo atingiu um gancho enquanto percorria a trajetória, invalidando o valor obtido. Assim, este resultado foi desconsiderado.

Tabela 4 – Energia absorvida pelos corpos de prova no ensaio de impacto

Energia Absorvida no Ensaio (J)																		
A			B			C			D			E			F			
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
23,4	22,0	21,2	11,0	10,5	6,2	-	5,4	8,0	11,0	6,6	7,0	10,2	11,5	6,2	14,0	9,0	14,0	

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 19 – Corpos de prova após a realização dos ensaios



Fonte: Autoria própria (2021).

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A norma para o ensaio de impacto por pêndulo Izod classifica o tipo de fratura e avalia os resultados levando em consideração que metade do corpo de prova está fixo no suporte da máquina e a outra metade livre para movimento. Como o

posicionamento da peça foi feito de maneira semelhante ao ensaio Charpy, a avaliação segundo o método da norma para pêndulo Izod estaria incorreta.

A norma para o ensaio de impacto por pêndulo Charpy, por outro lado, requer que a quebra do corpo de prova seja completa. Alguns corpos de prova dividiram-se completamente ao meio, no entanto, nestes casos houve uma divisão completa longitudinal devido a delaminação e não uma fratura, conforme requerido.

Desta maneira, a análise dos resultados, seja caracterizando a falha dos corpos ou comparando os resultados numéricos não pode ser feito de acordo com as normas vigentes. Como mencionado previamente na seção 3.3, não há normas específicas para ensaio de impacto em espécimes não-maciços ou impressos em 3D, logo, a avaliação dos resultados deve ser feita de maneira crítica, levando em consideração a proposta atípica do experimento.

4.3.1 Tipos de Falha

Em todos os corpos de prova houve delaminação, com poucos espécimes apresentando fratura com direção perpendicular às camadas. Um exemplo deste último caso pode ser visto na Figura 20, no corpo de prova F1.

Figura 20 – Corpo de prova F1 após a realização do ensaio



Fonte: Autoria própria (2021).

A fim de verificar se haveria uma relação entre o tipo de falha ocorrida e a energia absorvida no impacto, foi elaborada a Tabela 5, que lista as falhas identificadas ao lado da energia absorvida (EA) por cada corpo de prova.

Tabela 5 – Falhas identificadas e energia absorvida em cada corpo de prova

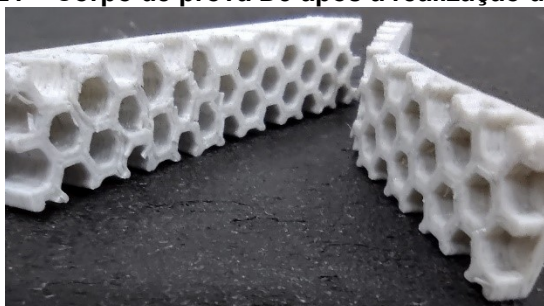
Corpo	EA [J]	Delaminação	Fratura Transversal no Centro
A1	23,4	Todo o comprimento do espécime	Algumas
A2	22	Todo o comprimento do espécime	Algumas
A3	21,2	Metade do comprimento do espécime	Algumas
B1	11	Metade do comprimento do espécime	Quase total
B2	10,5	Metade do comprimento do espécime	Quase total
B3	6,2	Todo o comprimento do espécime	Parcial
C1	-	-	-
C2	5,4	Metade do comprimento do espécime	Pouca
C3	8	Todo o comprimento do espécime	Boa parte
D1	11	Metade do comprimento do espécime	Várias
D2	6,6	Metade do comprimento do espécime	Não teve
D3	7	Todo o comprimento do espécime	Não teve
E1	10,2	Quase todo o comprimento do espécime	Quase total
E2	11,5	Quase todo o comprimento do espécime	Boa parte
E3	6,2	Metade do comprimento do espécime	Pouca
F1	14	Metade do comprimento do espécime	Quase total
F2	9	Parcial, em diversos pontos do espécime	Algumas
F3	14	Quase todo o comprimento do espécime	Parcial

Fonte: Autoria própria (2021).

Após a comparação da energia absorvida com as falhas identificadas, não foi possível estabelecer um critério que associasse definitivamente a falha ocorrida com uma absorção maior ou menor de energia.

É perceptível que em vários casos houve uma maior absorção de energia quando o corpo de prova apresentou grandes fraturas perpendiculares à direção das camadas, tendo por exemplo os corpos de prova A, B1, B2, D1, E1, E2, F1 e F3. No entanto, também houveram os casos que obtiveram fraturas significativas mas ainda assim absorveram uma quantidade de energia menor no impacto, como os corpos de prova B3 e E3.

Outro ponto perceptível foi que os corpos de prova que apresentaram mais delaminação absorveram menos energia do impacto, com destaque para o espécime D3, que absorveu apenas 7 J e não apresentou quase nenhuma fratura. Ele pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 – Corpo de prova D3 após a realização do ensaio

Fonte: Autoria própria (2021).

Assim, foi possível estabelecer apenas hipóteses quanto a influência dos tipos de falha na quantidade de energia absorvida. Mais ensaios e corpos de prova seriam necessários para a confirmação do que foi teorizado.

Outro fator a ser levado em consideração é que alguns corpos de prova apresentaram uma deformação mais acentuada que outros, o que influencia na quantidade de energia absorvida no impacto. É possível realizar esta comparação por meio da Figura 22, com o corpo de prova C2 que deformou apenas em uma extremidade com um ângulo mais suave e o A2, que deformou em ambas as extremidades com um ângulo acentuado. Eles absorveram 5,4 e 22 J respectivamente.

Figura 22 – Comparação entre a deformação dos corpos de prova A2 e C2



Fonte: Autoria própria (2021).

4.3.2 Análise Estatística

Após o registro dos resultados do ensaio foi realizada a aferição da mínima, máxima, mediana e da amplitude e as equações (5) e (6) foram utilizadas para obter os primeiros dados estatísticos, que estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados estatísticos iniciais dos ensaios

Corpo de Prova	A	B	C	D	E	F
Número de Espécimes	3	3	2	3	3	3
Média	22,2	9,2	6,7	8,2	9,3	12,3
Mediana	22,0	10,5	6,7	7,0	10,2	14,0
Desvio Padrão	1,11	2,64	1,84	2,43	2,76	2,89
Coefficiente de Variação	5,02%	28,58%	27,44%	29,67%	29,70%	23,41%
Mínima	21,2	6,2	5,4	6,6	6,2	9,0
Máxima	23,4	11,0	8,0	11,0	11,5	14,0
Amplitude	2,2	4,8	2,6	4,4	5,3	5,0
Intervalo de Confiança	19,40 - 24,96	2,67 - 15,78	-9,81 - 23,21	2,15 - 14,24	2,43 - 16,16	5,16 - 19,50

Fonte: Autoria própria (2021).

Com o uso da equação (7) foi possível calcular o intervalo onde a confiança dos resultados é de 95%. Devido ao número reduzido de espécimes, o intervalo resultante é grande, de maneira que há intersecções no intervalo entre praticamente todos os corpos de prova.

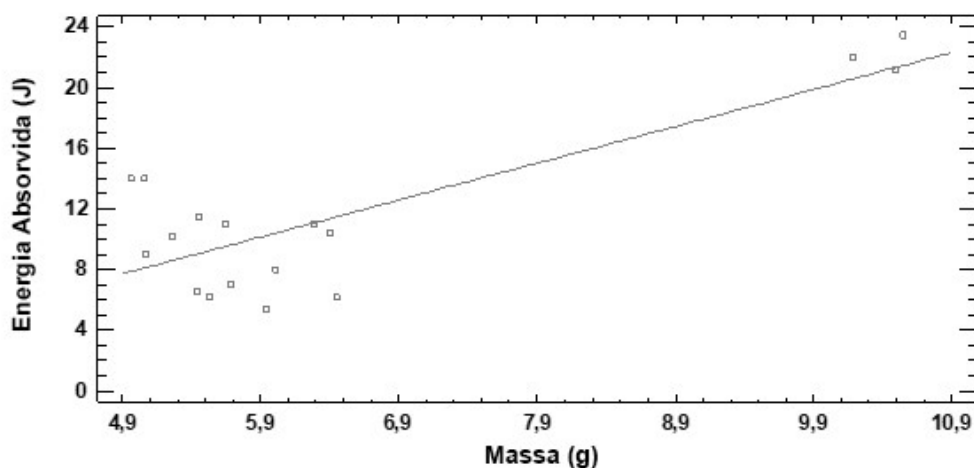
Um em cada três espécimes dos corpos de prova B, D, E e F apresentaram um valor para a energia absorvida no mínimo 4 J abaixo dos outros dois espécimes ensaiados, sendo este o motivo pelo qual apresentam um desvio padrão maior do que os corpos de prova A e C.

4.3.2.1 Regressão linear

Com o objetivo de verificar a existência de uma relação entre a energia absorvida nos ensaios e a massa dos corpos de prova, uma regressão linear foi realizada. Um gráfico com os pontos obtidos nos ensaios, os coeficientes angular e linear e a linha da equação obtida podem ser vistos na Figura 23.

Figura 23 – Gráfico da regressão linear

$$EA = -4,16058 + 2,42677*m$$



Fonte: Autoria própria (2021).

O coeficiente de correlação linear de Pearson dado pela equação (8) resultou em 0,819839 para os dados obtidos. Considerando que este valor varia entre 0 e 1 para correlações positivas, é possível dizer que, estatisticamente falando, há uma relação significativa entre a massa dos corpos de prova ensaiados e a energia absorvida por eles.

Outro dado útil para avaliar a relação entre as variáveis da regressão é o coeficiente de determinação, que nada mais é que o coeficiente de correlação linear elevado ao quadrado. O valor obtido indica que o modelo resultante explica os dados de entrada com 67,21% de precisão.

4.3.2.2 Análise de variância ANOVA

A primeira tabela obtida pela análise ANOVA é a Tabela 7.

Tabela 7 – Tabela ANOVA da energia absorvida pelos corpos de prova

Fonte	Soma dos Quadrados	gl	Média Quadrática	Estatística do teste F	Valor-P
Entre os grupos	454,067	5	90,8133	15,72	0,0001
Dentro dos grupos	63,5533	11	5,77758		
Total	517,62	16			

Fonte: Autoria própria (2021).

Nesta tabela é dividida a variância em um componente entre os grupos e outro dentro dos grupos. Após o cálculo da estatística F, é obtido então o valor-P que neste caso é abaixo de 0,05, indicando que existe uma diferença estatística significativa entre os corpos de prova com 95% de confiança.

Com o objetivo de investigar a diferença entre os corpos de prova, foi calculada a diferença mínima significativa das médias entre cada um dos corpos de prova, resultado que pode ser conferido na Tabela 8.

Tabela 8 – Tabela de comparação da diferença entre as médias dos corpos de prova

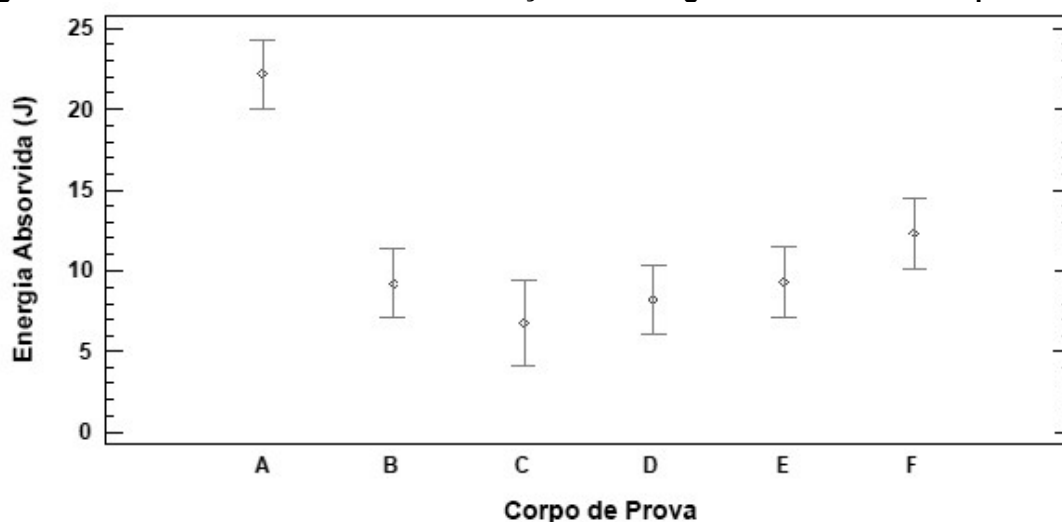
Comparação	Diferença Real	Diferença Mínima Significativa	A diferença foi significativa?
A – B	12,97	4,32	Sim
A – C	15,50	4,83	Sim
A – D	14,00	4,32	Sim
A – E	12,90	4,32	Sim
A – F	9,87	4,32	Sim
B – C	2,53	4,83	Não
B – D	1,03	4,32	Não
B – E	-0,07	4,32	Não
B – F	-3,10	4,32	Não
C – D	-1,50	4,83	Não
C – E	-2,60	4,83	Não
C – F	-5,63	4,83	Sim
D – E	-1,10	4,32	Não
D – F	-4,13	4,32	Não
E – F	-3,03	4,32	Não

Fonte: Autoria própria (2021).

Assim, é possível concluir que o corpo de prova A é significativamente diferente dos demais e o corpo de prova C é significativamente diferente do F. Os demais casos não apresentam diferença relevante nas suas médias.

Em suma, este resultado nos permite concluir que não há diferenças estatísticas significativas entre os corpos de prova B, C, D, E e F. A diferença constatada previamente na Tabela 7 se devia a média do corpo A em comparação com as demais. Na Figura 24 é possível ver uma representação gráfica das médias de cada corpo de prova e da diferença mínima significativa entre eles.

Figura 24 – Gráfico das médias e da diferença mínima significativa entre os corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2021).

4.3.3 Comparação do Desempenho

Levando em consideração os dados obtidos no item 4.3.2, é possível concluir que não houve diferença estatística significativa no desempenho das variações do sanduíche de *honeycomb*. Assim, torna-se inviável uma comparação destes, restando apenas a diferença entre o corpo de prova A com relação aos demais para ser analisada.

Uma das diferenças é na massa dos espécimes testados, que foi em média 84% maior nos maciços enquanto a energia absorvida no impacto foi em média 138% maior. Assim, o corpo de prova maciço apresenta não apenas um desempenho superior, mas também uma maior eficiência na absorção de energia, absorvendo 2,13 J/g enquanto os não-maciços absorveram em média 1,65 J/g.

Outra diferença significativa está na área de contato entre as camadas delaminadas. Um corpo de prova maciço possui camadas com uma área de contato maior entre si do que um com padrão estrutural. O mesmo pode ser pontuado sobre as fraturas transversais: os espécimes maciços possuem uma área maior rompida, dissipando mais energia do impacto no processo.

Por fim, a rigidez estrutural do corpo de prova maciço também é consideravelmente superior, consumindo mais energia para ser deformado do que o não-maciço.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho efetuou uma análise do desempenho no ensaio de impacto de sanduíches de *honeycomb* com diferentes tamanhos de célula, tendo estes sido fabricados em ABS com o processo de Manufatura Aditiva disponível para uso dos acadêmicos de Engenharia Mecânica da UTFPR Pato Branco. Devido à falta de precisão da impressora empregada na primeira tentativa e defeito apresentado pela impressora durante a execução da segunda tentativa, optou-se por terceirizar a produção dos espécimes, tendo por isso sofrido atraso no cronograma de execução do trabalho e limitação na quantidade de corpos de prova testados. Esta limitação na quantidade de corpos de prova afetou os resultados de maneira significativa, inviabilizando a comparação entre os espécimes não-maciços. Isto foi constatado por meio de dois recursos estatísticos: a análise de variância de uma via e a análise da diferença mínima significativa entre os corpos de prova. No entanto, isto não conclui necessariamente que não há uma diferença real no desempenho destes, apenas que os resultados aqui obtidos não poderiam especificá-la.

Assim, conclui-se que 3 corpos de prova são insuficientes para a obtenção de dados conclusivos em ensaios de impacto. Logo, em caso de limitação no número de espécimes, é preferível que haja uma diminuição das variações propostas e não nas repetições feitas em cada uma delas.

Os parâmetros de impressão seguidos foram estipulados observando os resultados de Tsouknidas *et al.* (2016), buscando propriedades favoráveis a absorção de impacto. No entanto, todos os espécimes ensaiados apresentaram delaminação, evidenciando uma fraqueza do desempenho mecânico de objetos impressos em 3D, que está de acordo com o que foi relatado na literatura.

Os espécimes impressos apresentaram também algumas imperfeições e imprecisão dimensional, com poucos atendendo as tolerâncias indicadas por norma. Apesar disso os ensaios foram conduzidos com sucesso e os dados experimentais puderam ser obtidos. Com o uso de regressão linear, foi evidenciada uma correlação entre a massa dos corpos de prova e a energia absorvida no impacto.

A partir dos resultados obtidos também foi possível concluir que o desempenho de estruturas *honeycomb* impressas em 3D é consideravelmente inferior ao da estrutura maciça, resultado de acordo com o que foi observado na revisão

bibliográfica. Além disso, o corpo de prova maciço também apresentou uma maior absorção de energia por unidade de massa.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como o presente trabalho possui um tema multidisciplinar, é possível expandir a pesquisa de diversas maneiras, indo desde o teste de outras estruturas celulares, entre elas estruturas tridimensionais, até uma investigação profunda das causas da delaminação nos corpos de prova. A repetição dos ensaios com um número maior de espécimes também é válida, podendo confirmar se o tamanho de célula do *honeycomb* interfere de maneira significativa ou não no desempenho sob impacto.

A principal sugestão para um trabalho experimental a ser realizado envolvendo Manufatura Aditiva é quanto ao uso da impressora 3D. É necessário que haja uma quantidade razoável de tempo para testes, aprendizagem sobre o funcionamento do equipamento e por fim a impressão do objeto ou dos corpos de prova desejados.

Para trabalhos envolvendo ensaios de impacto, a sugestão é da utilização de um número robusto de corpos de prova, pois a variabilidade dos resultados tende a ser grande. Com muitos espécimes sendo testados é possível aplicar uma análise estatística com mais graus de liberdade, aumentando a confiança dos resultados.

REFERÊNCIAS

3D SYSTEMS. **CUBE 2nd Generation User Guide**. 2013.

AHMAD, Z.; THAMBIRATNAM, D. P. Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical. **Computers and Structures**. Brisbane. vol. 87. 2009. p. 186-197.

AHN, S. H. *et al.* Anisotropic material. **Rapid Prototyping**. Bingley. v. 4. p. 248-257. 2002. ISSN: 1355-2546. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.13.9413&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 1 set. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. ASTM D256-04. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, www.astm.org.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass)**. ASTM D5628-18. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.

ASHRAF, Mahmud; GIBSON, Ian; RASHED, M. Golam. Challenges and prospects of 3D printing in structural engineering. **13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures**. Perth. University of Western Australia. 2018. p. 65. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320943125>. Acesso em: 31 ago. 2020.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. Tradução de Solange Aparecida Visconti. 2ª. ed. São Paulo. Cengage Learning Brasil. 2014. ISBN: 978-85-221-1801-4. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522118014/>. Acesso em: 10 set. 2020.

BEER, F. P. *et al.* **Mecânica dos Materiais**. Tradução de José Benaque Rubert. 7ª. ed. AMGH Editora Ltda. 2015. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580554991/>. Acesso em: 5 set. 2020.

BENWOOD, C. **Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly (Lactic Acid)**. ACS Omega. 2018. p. 4400-4411. DOI: 10.1021/acsomega.8b00129

BITZER, T. N. **Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing**. 1. ed. Dublin. Springer Science & Business Media. v. 1. 1997. p. 1-84. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=oBNSdDN84hIC&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s. Acesso em: 3 set. 2020.

BOIS, P. D. et al. **Vehicle crashworthiness and occupant protection**. Southfield. American Iron and Steel Institute. 2004. Disponível em: https://steel.org/~media/Files/Autosteel/Research/Safety/safety_book.pdf. Acesso em: 10 set. 2020.

BOLELLI, R. M.; LEBRÃO, G. W. **Avaliação das propriedades de material produzido por FDM em impressora 3D**. 19º Congresso Nacional de Iniciação Científica. São Paulo. 2019. Disponível em: <https://maua.br/files/122019/avaliacao-das-propriedades-material-produzido-por-fdm-impressora-3d-261425.pdf>. Acesso em: 2 out. 2020.

BOOTH, J. W. et al. **The Design for Additive Manufacturing Worksheet**. Journal of Mechanical Design. v. 139. 2017. 100904-1-9. DOI: 10.1115/1.4037251

CALLISTER, Jr., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro. LTC. 2018. ISBN: 9788521632375. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521632375/>. Acesso em: 1 set. 2020.

CAMINERO, M. A. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. **Composites Part B**. v. 148. 2018. p. 93-103.

CHU, C.; GRAF, G.; ROSEN, D. W. **Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures**. Computer-Aided Design and Applications. 5:5. 2008. p. 686-696. DOI: 10.3722/cadaps.2008.686-696

CHUA, C. K.; LEONG, K. F. **3D Printing And Additive Manufacturing: Principles And Applications**. 4. ed. Singapura. World Scientific Publishing Company. 2014.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Rapid Prototyping: Principles And Applications**. 3. ed. Singapura. World Scientific Publishing Company. 2010.

CRAIG Jr., Roy R. **Mecânica dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro. Grupo GEN. 2003. ISBN: 978-85-216-2674-9. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2674-9/>. Acesso em: 4 set. 2020.

CREALITY 3D TECHNOLOGY. **Creality Ender-3 Pro**. <https://www.creality.com/br/goods-detail/ender-3-pro-3d-printer>. Acesso em: 8 out. de 2021.

CRUPI, V.; EPASTO, G.; GUGLIELMINO, E. Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam. **Marine Structures**. vol. 30. 2013. p. 74-96.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências** – Tradução da 9ª edição norte-americana. São Paulo. Cengage Learning Brasil. 2018. ISBN: 9788522128044. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522128044/>. Acesso em: 12 out. 2020

DIVYATHEJ, M. V.; VARUN, M.; RAJEEV, P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. **International Journal of Scientific & Engineering Research**. v. 7. n. 3. 2016. p. 116-124. ISSN: 2229-5518.

DUDEK, P. FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. **Archives of Metallurgy and Materials**. v. 58. n. 4. 2013. p. 1415-1418. DOI: <http://dx.doi.org/10.2478%2Famm-2013-0186>.

EBEL, E.; SINNEMANN, T. **Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties**. RTEjournal. 2014. Disponível em: <https://www.rtejournal.de/ausgabe11/3872/>. Acesso em: 9 out. 2020.

FABIAN. **How to Choose the Perfect Wall Thickness for 3D Printing**. Materialise. 2018. Disponível em: <https://i.materialise.com/blog/en/how-to-get-the-perfect-wall-thickness-when-turning-your-3d-model-into-a-3d-print/>. Acesso em 7 out. 2020.

FLASAR, O.; TRISKA, V.; JUNAS, M. Experimental study of impact properties of aluminium honeycomb sandwich structure. **MATEC Web of Conferences 133**. 2017. DOI: 10.1051/matecconf/201713305002

FORMLABS. **Minimum Wall Thickness for 3D Printing**. 2020. Disponível em <https://formlabs.com/blog/minimum-wall-thickness-3d-printing/>. Acesso em: 7 out. 2020.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos Materiais**. 2ª ed. Rio de Janeiro. Grupo GEN. 2012. ISBN: 978-85-216-2114-0. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2114-0/>. Acesso em: 29 set. 2020.

GOLDSMITH, W.; SACKMAN, J. L. An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates. **International Journal of Impact Engineering**. v. 12. n. 2. 1992. p. 241-262.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física**. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. 8. ed. Rio de Janeiro. LTC. v. 1. 2009. ISBN: 978-85-216-1605-4.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. Tradução de Arlete Simille Marques. 7. ed. São Paulo. Pearson Education do Brasil. 2010. ISBN: 978-85-7605-373-6.

HOLNICKI-SZULC, J. et al. Adaptive impact absorption - the Concept and Potential Applications. **International Journal of Protective Structures**. Warsaw. vol. 6. 2015. p. 357-377.

HOLNICKI-SZULC, J. et al. Adaptive impact absorption and applications to landing devices. **Advances in Science and Technology**. Warsaw. vol. 56. 2008. p. 609-613. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267362335_Adaptive_Impact_Absorption_and_Applications_to_Landing_Devices. Acesso em: 6 set. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO. **ISO 180:1993 Plastics - Determination of Izod impact strength**. Geneva: ISO, 1993.

JONES, N. Several phenomena in structural impact and structural crashworthiness. **European Journal of Mechanics A/Solids**. Liverpool. vol. 22. 2003. p. 693-707.

JONES, N. **Structural Impact**. Cambridge. Cambridge University Press. 1990.

KUCEWICZ, M. et al. **Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures**. *Materials and Design*. v. 142. 2018. p. 177-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.028>

KUMAR, A. P.; MANEIAH, D. Deformation studies on the significance of combined geometry tubes as energy absorbing structures. **International Journal of Civil Engineering and Technology**. vol. 10. 2019. p. 2812–2820. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/332380322>. Acesso em: 10 set. 2020.

LOKENSARD, E. **Plásticos Industriais: Teoria e aplicações** - Tradução da 5ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2014. 9788522115419. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522115419/>. Acesso em: 18 ago. 2021.

NAGEL, G. M.; THAMBIRATNAM, D. P. A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes. **International Journal of Mechanical Sciences**. Brisbane. vol. 46. 2004. p. 201-216.

NETO, P.L.D.O. C. **Estatística**. São Paulo: Editora Blucher, 2006. 9788521215226. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521215226/>. Acesso em: 2021 ago. 10.

NGO, Tuan D.; KASHANI, Alireza; IMBALZANO, Gabriele; NGUYEN, Kate T. Q.; HUI, David. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**. Londres. v. 143. 2018. p. 172-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

POLLARD, D. C. et al. The manufacture of honeycomb cores using Fused Deposition Modeling. **Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science**. Abingdon. n. 2. 2017. p. 21-31. DOI: <https://doi.org/10.1080/20550340.2017.1306337>.

QUARESIMIN, M. *et al.* Energy absorption in composite laminates under impact loading. **Composites: Part B**. v. 44. 2013. p. 133-140. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.020>.

ROGERS, W. F. Apollo Lunar Module Landing Gear. **The Apollo Lunar Surface Journal**. 2006. p. 123-133. Disponível em: https://www.hq.nasa.gov/alsj/LM_Landing%20Gear1973010151.pdf. Acesso em: 1 set. 2020.

ROMERA, Luis. et al. Crashworthiness response of honeycomb metallic-GFRP energy absorption devices. **High Performance and Optimum Design of Structures and Materials**. Southampton. WIT Press. 2014. p. 225-234. DOI: 10.2495/HPSM140201. Disponível em: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/137/26288>. Acesso em: 10 set. 2020.

SAVIO, G. et al. **Geometric Modeling of Cellular Materials for Additive Manufacturing in Biomedical Field: A Review**. Applied Bionics and Biomechanics. v. 2018. ID 1654782. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1654782>

TSOUKNIDAS, A. *et al.* Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling. **Materials & Design**. v. 102. 2016. p. 41-44. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.154

VIRGILLITO, S. B. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Editora Saraiva, 2017. 9788547214753. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788547214753/>. Acesso em: 2021 ago. 10.

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. 1. ed. São Paulo. Editora Blucher. 2017. ISBN: 9788521211518. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/>. Acesso em: 23 ago. 2020.

WANG, D. M. Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels. **International Journal of Impact Engineering**. v. 36. n. 1. 2009. p. 110-114. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.03.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X08000420>. Acesso em: 3 set. 2020.

WILLIAMS, Lynne J.; ABDI, Herve. **Fisher's least significant difference (LSD) test**. Encyclopedia of research design, v. 218, p. 840-853, 2010.

YAMASHITA, M.; GOTOH, M. Impact behavior of honeycomb structures with various cell. **International Journal of Impact Engineering**. v. 32. n. 1-4. 2005. p. 618-630. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X04001897>. Acesso em: 3 set. 2020.

YANG, L. et al. **Additive Manufacturing of Metal Cellular Structures: Design and Fabrication**. JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. v. 67. n. 3. 2015. p. 608-615. DOI: 10.1007/s11837-015-1322-y

ANEXO A – TABELA DE DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT

GL	Áreas bilaterais								
	0.5	0.2	0.1	0.05	0.04	0.02	0.01	0.005	0.001
1	1.0000	3.0777	6.3138	12.7062	15.8945	31.8205	63.6567	127.3213	636.6192
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	4.8487	6.9646	9.9248	14.0890	31.5991
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	3.4819	4.5407	5.8409	7.4533	12.9240
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7764	2.9985	3.7469	4.6041	5.5976	8.6103
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	2.7565	3.3649	4.0321	4.7733	6.8688
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	2.6122	3.1427	3.7074	4.3168	5.9588
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.5168	2.9980	3.4995	4.0293	5.4079
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.4490	2.8965	3.3554	3.8325	5.0413
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.3984	2.8214	3.2498	3.6897	4.7809
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.3593	2.7638	3.1693	3.5814	4.5869
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.3281	2.7181	3.1058	3.4966	4.4370
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.3027	2.6810	3.0545	3.4284	4.3178
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.2816	2.6503	3.0123	3.3725	4.2208
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.2638	2.6245	2.9768	3.3257	4.1405
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1314	2.2485	2.6025	2.9467	3.2860	4.0728
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.2354	2.5835	2.9208	3.2520	4.0150
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.2238	2.5669	2.8982	3.2224	3.9651
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.2137	2.5524	2.8784	3.1966	3.9216
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.2047	2.5395	2.8609	3.1737	3.8834
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.1967	2.5280	2.8453	3.1534	3.8495
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.1894	2.5176	2.8314	3.1352	3.8193
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.1829	2.5083	2.8188	3.1188	3.7921
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.1770	2.4999	2.8073	3.1040	3.7676
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.1715	2.4922	2.7969	3.0905	3.7454
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.1666	2.4851	2.7874	3.0782	3.7251
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.1620	2.4786	2.7787	3.0669	3.7066
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.1578	2.4727	2.7707	3.0565	3.6896
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.1539	2.4671	2.7633	3.0469	3.6739
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.1503	2.4620	2.7564	3.0380	3.6594
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.1470	2.4573	2.7500	3.0298	3.6460
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.1438	2.4528	2.7440	3.0221	3.6335
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.1409	2.4487	2.7385	3.0149	3.6218
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.1382	2.4448	2.7333	3.0082	3.6109
34	0.6818	1.3070	1.6909	2.0322	2.1356	2.4411	2.7284	3.0020	3.6007
35	0.6816	1.3062	1.6896	2.0301	2.1332	2.4377	2.7238	2.9960	3.5911
36	0.6814	1.3055	1.6883	2.0281	2.1309	2.4345	2.7195	2.9905	3.5821
37	0.6812	1.3049	1.6871	2.0262	2.1287	2.4314	2.7154	2.9852	3.5737
38	0.6810	1.3042	1.6860	2.0244	2.1267	2.4286	2.7116	2.9803	3.5657
39	0.6808	1.3036	1.6849	2.0227	2.1247	2.4258	2.7079	2.9756	3.5581
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.1229	2.4233	2.7045	2.9712	3.5510
41	0.6805	1.3025	1.6829	2.0195	2.1212	2.4208	2.7012	2.9670	3.5442
42	0.6804	1.3020	1.6820	2.0181	2.1195	2.4185	2.6981	2.9630	3.5377
43	0.6802	1.3016	1.6811	2.0167	2.1179	2.4163	2.6951	2.9592	3.5316
44	0.6801	1.3011	1.6802	2.0154	2.1164	2.4141	2.6923	2.9555	3.5258
45	0.6800	1.3006	1.6794	2.0141	2.1150	2.4121	2.6896	2.9521	3.5203
46	0.6799	1.3002	1.6787	2.0129	2.1136	2.4102	2.6870	2.9488	3.5150
47	0.6797	1.2998	1.6779	2.0117	2.1123	2.4083	2.6846	2.9456	3.5099
48	0.6796	1.2994	1.6772	2.0106	2.1111	2.4066	2.6822	2.9426	3.5051
49	0.6795	1.2991	1.6766	2.0096	2.1099	2.4049	2.6800	2.9397	3.5004
50	0.6794	1.2987	1.6759	2.0086	2.1087	2.4033	2.6778	2.9370	3.4960
60	0.6786	1.2958	1.6706	2.0003	2.0994	2.3901	2.6603	2.9146	3.4602
70	0.6780	1.2938	1.6669	1.9944	2.0927	2.3808	2.6479	2.8987	3.4350
80	0.6776	1.2922	1.6641	1.9901	2.0878	2.3739	2.6387	2.8870	3.4163
90	0.6772	1.2910	1.6620	1.9867	2.0839	2.3685	2.6316	2.8779	3.4019
100	0.6770	1.2901	1.6602	1.9840	2.0809	2.3642	2.6259	2.8707	3.3905
110	0.6767	1.2893	1.6588	1.9818	2.0784	2.3607	2.6213	2.8648	3.3812
120	0.6765	1.2886	1.6577	1.9799	2.0763	2.3578	2.6174	2.8599	3.3735
>120	0.674	1.282	1.645	1.960	2.054	2.326	2.576	2.807	3.290
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,02	0,01	0,005	0,0025	0,0005
Áreas unilaterais									

Fonte: Instituto de Matemática e Estatística da UFRGS (2019).