

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CAIO GABRIEL COSTA DE JESUS

**ESTUDO DE COMPÓSITOS DE ESTRUTURA SANDUÍCHE
UTILIZANDO SISAL-EPÓXI E NÚCLEO *HONEYCOMB*
A BASE DE PETG E PLA FEITO EM IMPRESSORA 3D.**

MANAUS

2023

CAIO GABRIEL COSTA DE JESUS

**ESTUDO DE COMPÓSITOS DE ESTRUTURA SANDUÍCHE
UTILIZANDO SISAL-EPÓXI E NÚCLEO *HONEYCOMB*
A BASE DE PETG E PLA FEITO EM IMPRESSORA 3D.**

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da escola superior de tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas (UEA-EST), para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Garcia del Pino

MANAUS

2023

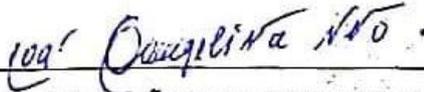
CAIO GABRIEL COSTA DE JESUS

**ESTUDO DE COMPÓSITOS DE ESTRUTURA SANDUÍCHE
UTILIZANDO SISAL-EPÓXI E NÚCLEO *HONEYCOMB*
A BASE DE PETG E PLA FEITO EM IMPRESSORA 3D.**

APROVADO POR:



PROF. DR. GILBERTO GARCIA DEL PINO (UEA)
(Orientador)



PROF. DR. JOÃO EVANGELISTA NETO (UEA)
(Examinador)



PROF. DR. ARÍSTIDES RIVERA TORRES (UEA)
(Examinador)

MANAUS

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

J58ee Costa de Jesus, Caio Gabriel
ESTUDO DE COMPÓSITOS DE ESTRUTURA
SANDUÍCHE UTILIZANDO SISAL-EPÓXI E NÚCLEO
HONEYCOMB A BASE DE PETG E PLA FEITO EM
IMPRESSORA 3D / Caio Gabriel Costa de Jesus. Manaus
: [s.n], 2023.
86 f.: color.; 21 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Mecânica -
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.
Inclui bibliografia
Orientador: Dr. Gilberto Garcia Del Pino

1. Compósito. 2. Honeycomb. 3. Impressão 3D. I. Dr.
Gilberto Garcia Del Pino (Orient.). II. Universidade do
Estado do Amazonas. III. ESTUDO DE COMPÓSITOS DE
ESTRUTURA SANDUÍCHE UTILIZANDO
SISAL-EPÓXI E NÚCLEO HONEYCOMB A BASE DE
PETG E PLA FEITO EM IMPRESSORA 3D

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família por todo o suporte durante o período de graduação, mas em especial a minha mãe, Daylene Costa, mulher que sempre acreditou nos meus objetivos e nunca desistiu. Durante a graduação aprendi muito com projetos de extensão e com os professores, destacando alguns que me marcaram como o professor Dr. Gilberto Garcia, também orientador deste trabalho e de outros dois projetos de extensão que participei. Agradeço também aos professores Aristides e Evangelista os quais sempre tivemos abertura para conversar e tirar dúvidas, dentro e fora da sala de aula. Aos técnicos e estagiários do laboratório de materiais, Victor Willian, Carlos Setúbal e Eber.

Durante boa parte da graduação, participei da Equipe Leviatã, na qual busca construir uma embarcação catamarã movida a energia solar. Na equipe pude conhecer pessoas incríveis e amigos para toda a vida. Com destaque principalmente a Tássia Forasteiro, Renato Allan, Luis Felipe, Thomas Laureano, Fabio Wesen e ao meu amigo Matheus Câmara. O senso de coletividade e de pertencimento só foi possível graças as pessoas que fizeram parte da equipe. Com isso, também agradeço aos nossos professores orientadores da equipe Leviatã, professor Eduardo Barreda e Diretora Ingrid Gadelha.

Sem dúvidas a UEA me preparou para o mercado de trabalho, conquistei minha vaga de estágio em 2019 na Essilor da Amazônia, empresa que sigo até hoje trabalhando como analista de processos. Os meus colegas de trabalho, Naiza Reis, José Henrique, Tércio Sales e Yann Colombani, meus sinceros agradecimentos por todo aprendizado. Por fim, agradecer meu grande irmão, André Briglia por estar presente, mesmo morando em outro país, em todos os momentos da graduação, me apoiando e dando total suporte.

RESUMO

Os compósitos de matriz polimérica têm sido amplamente utilizados em diversas indústrias, graças às vantagens oferecidas pelos polímeros, como facilidade de processamento, baixo custo, alta produtividade e versatilidade. Dentre as aplicações mais comuns estão a indústria aeroespacial, automotiva, militar, construção civil e a produção de equipamentos esportivos. A manufatura aditiva, por meio da impressão 3D FDM, é uma técnica que possibilita a criação de peças com baixo custo, liberdade de design e ciclos de prototipagem mais rápidos, sendo amplamente utilizada na engenharia e apresentando um forte crescimento nos próximos anos.

O sisal é uma planta que foi introduzida na Bahia, mais especificamente no município de Santaluz, em 1910, mas só passou a ser comercialmente explorada a partir da década de 30. Sua adaptação às condições edafoclimáticas da região semiárida do Nordeste conferiu ao sisal uma grande importância socioeconômica, gerando emprego e renda para aproximadamente 700 mil agricultores familiares, além de postos de trabalho nas outras etapas da cadeia, geralmente nos centros urbanos.

Os painéis sanduíche são utilizados para suportar tensões normais de tração, compressão e cisalhamento associados à flexão, e a escolha das faces que compõem o painel é diretamente influenciada pelo número e orientação das camadas sobrepostas. O núcleo do painel, por sua vez, deve manter as faces afastadas e ser rígido perpendicularmente a elas. Testes de flexão demonstraram que os compósitos sanduíches apresentam melhor desempenho com PETG, um tipo de polímero mais resistente que o PLA, utilizado em impressão 3D, embora os compósitos com PLA sejam mais leves por conta da densidade do núcleo ser menor.

Os testes de flexão demonstraram que os compósitos sanduíches tiveram melhor desempenho com PETG. Em todos os testes o PETG foi mais resistente, de um modo geral de 21% a 32% mais resistente que o PLA. Apesar de não haver ruptura nos corpos de prova, os núcleos em PETG deformaram de 0,5% a 3,6% menos que o PLA. Os compósitos com PLA foram mais leves, por conta da densidade do núcleo ser 13,8% menor que os núcleos em PETG.

Palavras Chave: Sisal, PLA, PETG, Impressão 3D, Painel Sanduíche, Compósito.

ABSTRACT

Polymeric matrix compounds have been widely used in several industries, thanks to the advantages offered by polymers, such as ease of processing, low cost, high productivity and versatility. Among the most common applications are aerospace, automotive, military, civil construction and the production of sports equipment. Additive manufacturing, through 3D FDM printing, is a technique that enables the creation of parts at low cost, design freedom and faster prototyping cycles, being widely used in engineering and showing strong growth in the coming years.

Sisal is a plant that was designed in Bahia, more specifically in the municipality of Santaluz, in 1910, but it only started to be commercially exploited from the 1930s onwards. socioeconomic importance, generating employment and income for approximately 700,000 family farmers, in addition to jobs in other stages of the chain, usually in urban centers.

Sandwich panels are used to withstand normal tensile emotions, stresses and shear associated with bending, and the choice of faces that make up the panel is directly influenced by the number and inspiration of the overlaps. The core of the panel, in turn, must keep the faces apart and be rigid perpendicularly to them. Bend tests tolerated that sandwich composites perform better with PETG, a type of polymer stronger than PLA, used in 3D printing, although composites with PLA are lighter due to the lower core density.

Flexural tests showed that composite sandwiches performed better with PETG. In all tests PETG was more resistant, generally speaking 21% to 32% more resistant than PLA. Although there was no rupture in the specimens, the cores in PETG deformed from 0.5% to 3.6% less than the PLA. The PLA composites were lighter, due to the core density being 13.8% lower than the PETG cores.

Keywords: Sisal, PLA, PETG, 3D Printing, Sandwich Panel, Composite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Propriedades mecânicas dos filamentos de impressão 3D	19
Figura 2 – Material compósito	23
Figura 3 – Estrutura do anel epóxico	24
Figura 4 – Classificação das fibras	25
Figura 5 – Estrutura fibrocelular do sisal	26
Figura 6 – Sisal (Agave sisalana)	27
Figura 7 – Fibras de Sisal	28
Figura 8 – Esquema de classificação dos compósitos	28
Figura 9 – Representações esquemáticas dos compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, (c) descontínuas e aleatórias	29
Figura 10 – Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra que está submetida à aplicação de uma carga de tração	30
Figura 11 – Diagrama de sessão transversal de um painel sanduíche	30
Figura 12 – Materiais compósitos no EMB170	31
Figura 13 – Estrutura de colmeia na natureza	32
Figura 14 – Diagrama esquemático da construção de um painel sanduíche com núcleo <i>honeycomb</i>	32
Figura 15 – Diagrama de fabricação de núcleo <i>honeycomb</i>	33
Figura 16 – Estrutura de absorção de impacto em <i>honeycomb</i> feita de polímero termoplástico moldado por injeção em um BMW I3	34
Figura 17 – Impressora 3D	35
Figura 18 – Esquema de impressão 3D	36
Figura 19 – Etapas da manufatura aditiva	37
Figura 20 – PLA versus PETG	39
Figura 21 – Vigas biapoiada com carregamento pontual aplicada no centro da viga	40
Figura 22 – (A) Ensaio de flexão de 3 pontos e (B) Ensaio de flexão de 4 pontos para os painéis sanduíche	41
Figura 23 – (A) Ensaio de flexão de 3 pontos e (B) Ensaio de flexão de 4 pontos para compósitos de matrizes poliméricas	43
Figura 24 – Fluxograma de atividades	44
Figura 25 – Amostras de fibras de sisal antes do tratamento químico	45

Figura 26 – (a) NaOH 98% em escamas; (b) Preparação de 80g de NaOH	46
Figura 27 – (a) Solução com 10% de NaOH; (b) Fibras de sisal imersas na solução; (c) Secagem das fibras de sisal	46
Figura 28 – Estufa: (a) Estufa de secagem; (b) Fibras de sisal na estufa de secagem	47
Figura 29 – Partes do Molde: (a) Base; (b) Topo; (c) Placa Metálica	47
Figura 30 – Folha de Papel Paraná	48
Figura 31 – Cera desmoldante Tec Glace–N	48
Figura 32 – Nível de bolha	49
Figura 33 – Resina Epóxi: (a) Resina Epóxi 2004; (b) Endurecedor Epóxi 3154; (c) Anti–bolhas para resina epóxi SILADIT–53 FR	49
Figura 34 – Preparação da Resina	50
Figura 35 – Aplicação da resina no molde	50
Figura 36 – Aplicação da resina no molde	51
Figura 37 – Placa de Sisal–Epóxi	51
Figura 38 – Placa de Sisal–Epóxi após lixamento	52
Figura 39 – Faces de Sisal–Epóxi 200mm x 70mm	52
Figura 40 – Dimensões do Hexágono	53
Figura 41 – Modelo 3D de Núcleo Estrutural	54
Figura 42 – Impressora 3D ENDER 3 V2	55
Figura 43 – Calibração do E–STEP	56
Figura 44 – Cubo de Calibração no Ultimaker CURA	57
Figura 45 – Impressão e medição do cubo de calibração	57
Figura 46 – Nivelamento da Mesa	58
Figura 47 – Exemplo de Torre de Temperatura em PLA	59
Figura 48 – Configuração do Núcleo PLA no CURA	60
Figura 49 – Configuração do Núcleo PETG no CURA	60
Figura 50 – Núcleo <i>Honeycomb</i> PETG na Impressora 3D	61
Figura 51 – Núcleos <i>Honeycomb</i> PLA (Amarelo) e PETG (Vermelho)	61
Figura 52 – Moldes Colados na Face Inferior	62
Figura 53 – Faces Inferiores com Resina	63
Figura 54 – Núcleos após colagem na face Inferior	63
Figura 55 – Colagem da face Superior	64
Figura 56 – Pesagem dos Painéis Sanduíche	64

Figura 57 – Máquina de Ensaio de Flexão	65
Figura 58 – Problema de Sub-Extrusão: (a) Núcleo com Sub-Extrusão; (b) Núcleo Sem Sub-Extrusão	66
Figura 59 – Núcleo Empenado	67
Figura 60 – Bico Entupido	67
Figura 61 – Face Reforçada, com Bolhas	68
Figura 62 – Placa com Espessura Menor que 2mm	68
Figura 63 – CP #1: Teste de Flexão	69
Figura 64 – CP #2: Teste de Flexão	70
Figura 65 – CP #3: Teste de Flexão	71
Figura 66 – CP #4: Teste de Flexão	71
Figura 67 – CP #5: Teste de Flexão	71
Figura 68 – Corpos de Prova (2-5) após testes de flexão	72
Figura 69 – Desenho Técnico do Núcleo <i>Honeycomb</i> com 10mm	84
Figura 70 – Desenho Técnico do Núcleo <i>Honeycomb</i> com 15mm	85
Figura 71 – Datasheet da Resina Epóxi 2004	86
Figura 72 – Datasheet do Anti-Bolhas SILADIT-53 FR	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetro dos Núcleos	54
Tabela 2 – Temperaturas de Impressão	59
Tabela 3 – Dados dos Núcleos Impressos	61
Tabela 4 – Peso Final dos painéis sanduíches	64
Tabela 5 – Corpos de Prova	65
Tabela 6 – CP #1: Dados do Teste de Flexão	70
Tabela 7 – CP (2–5): Dados do Teste de Flexão	74
Tabela 8 – Comparação dos resultados	76
Tabela 9 – Relação de Densidade dos Corpos de Prova	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – CP #1: Tensão à Flexão x Deslocamento	70
Gráfico 2 – CP #2: Tensão à Flexão x Deslocamento	72
Gráfico 3 – CP #3: Tensão à Flexão x Deslocamento	73
Gráfico 4 – CP #4: Tensão à Flexão x Deslocamento	73
Gráfico 5 – CP #5: Tensão à Flexão x Deslocamento	74
Gráfico 6 – Carga Máxima PLA x PETG 10mm	75
Gráfico 7 – Carga Máxima PLA x PETG 15mm	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria PET
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)
CAD	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer–Aided Design</i>)
CP	Corpo de Prova
FDM	Modelagem por Deposição Fundida (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
OBJ	Frente de Onda do Arquivo de Objeto (<i>Object File Wavefront</i>)
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol (Polyethylene terephthalate glycol)
PLA	Ácido Poliático (<i>Polylactic Acid</i>)
SLA	Estereolitografia (Stereolithography Apparatus)
STL	Linguagem de Tesselação Padrão (<i>Standard Tessellation Language</i>)
TPU	Poliuretano Termoplástico (<i>Thermoplastic Polyurethane</i>)
UV	Ultravioleta (<i>Ultraviolet</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta_{m\acute{a}x}$	Deflexão máxima
d_f	Diâmetro crítico
l_c	Comprimento crítico
D_{real}	Distancia Real do Filamento
E_{novo}	E-Step novo
$E_{padr\tilde{a}o}$	E-Step padrão
I_y	Momento de Inércia em y
$l_{padr\tilde{a}o}$	Largura Padrão do Cubo
t_c	Espessura do Núcleo
$v_{m\acute{a}x}$	Deformação máxima
$\bar{x}l_{real}$	Média da largura do cubo
σ_f^*	Resistência máxima
σ_f	Tensão normal das faces
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão a Flexão Máxima
τ_c	Ligação fibra-matriz
τ_c	Tensão de cisalhamento no núcleo
h	Espessura total do Corpo de Prova
ε	Deformação específica
D	Variável de Rigidez
E	Módulo de Elasticidade
G	Modulo de Cisalhamento
I	Momento de Inércia
L	Distancia Entre os Apoios
P	Carga máxima
R	Velocidade de Teste
U	Variável de Cisalhamento
Z	Taxa de Deformação
b	Largura do Corpo de Prova
d	Espessura total do Corpo de Prova
f	Fluxo de Impressão
t	Espessura da face
δ	Deformação do Corpo de Prova
σ	Tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Contextualização	18
1.2	Motivação	18
1.3	Justificativa.....	19
1.4	Problematização	20
1.5	Objetivos	20
1.5.1	Objetivo Geral.....	20
1.5.2	Objetivos Específicos.....	20
1.6	Organização do Trabalho	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1	Materiais Compósitos.....	23
2.1.1	Matrizes Poliméricas	23
2.1.2	Resina Epóxi	24
2.1.3	Fibra Vegetal.....	25
2.1.4	Fibra de Sisal.....	26
2.1.5	Compósitos Reforçados Com Fibras	28
2.1.6	Compósito Estrutural.....	30
2.2	Estrutura <i>honeycomb</i> (Hexagonal)	31
2.3	Manufatura Aditiva	34
2.3.1	Impressão 3D FDM.....	35
2.3.2	Etapas da Impressão FDM	36
2.3.3	Filamentos	38
2.4	Método de Caracterização	40
2.4.1	Ensaio de Flexão	40
2.4.2	ASTM C393	41
2.4.3	ASTM D790.....	43
3	METODOLOGIA	44
3.1	Compósitos de Sisal–Epóxi.....	45

3.1.1	Preparação das Fibras.....	45
3.1.2	Preparação do Molde.....	47
3.1.3	Preparação da Resina Epóxi.....	49
3.1.4	Fabricação das Placas.....	50
3.1.5	Acabamento das Placas.....	52
3.2	Impressão 3D.....	53
3.2.1	Modelagem dos Núcleos <i>Honeycomb</i>	53
3.2.2	Configuração da Impressora 3D.....	54
3.2.2.1	E-Step.....	55
3.2.2.2	Fluxo.....	56
3.2.2.3	Nivelamento.....	58
3.2.2.4	Temperaturas.....	58
3.2.3	Configuração do Software de Fatiamento.....	59
3.2.4	Impressão dos Núcleos <i>Honeycomb</i>	60
3.3	Painéis Sanduíche.....	62
3.3.1	Montagem dos Moldes.....	62
3.3.2	Colagem do Núcleos <i>Honeycomb</i>	62
3.4	Ensaio de Flexão.....	65
3.4.1	Teste nos Corpos de Prova.....	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1	Principais problemas.....	66
4.1.1	Problemas de Impressão 3D.....	66
4.1.2	Problemas na Fabricação da Faces.....	67
4.2	Resultados Preliminares.....	69
4.2.1	Resultado do Corpo de Prova Sem Núcleo.....	69
4.2.2	Resultado dos Corpos de Prova Sanduíche.....	70
4.2.3	Análise e Interpretação dos Resultados.....	74
5	CONCLUSÃO.....	77
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	78
6	REFERÊNCIAS.....	79
7	APÊNDICES.....	84
8	ANEXOS.....	86

8.1	ANEXO I – Datasheet Resina Epóxi 2004.....	86
8.2	ANEXO II – Datasheet do Anti-bolhas SILADIT-53 FR.....	86

1 INTRODUÇÃO

Esse trabalho permitiu a utilização dos conhecimentos adquiridos durante o curso de engenharia mecânica. O estudo é focado na modelagem, caracterização e fabricação de materiais compósitos. As atividades deste trabalho foram realizadas nas dependências da Escola Superior de Tecnologia.

1.1 Contextualização

Por conta das grandes vantagens dos polímeros em relação aos demais materiais, como fácil processamento, baixo custo, alta produtividade e versatilidade, os compósitos de matriz polimérica têm encontrado um grande número de aplicações, variando desde as indústrias aeroespacial e automotiva, passando por aplicações militares e construção civil até a confecção de equipamentos esportivos. (GEORGOPOULOS, 2005; THIELEMANS, 2004).

As fibras sintéticas, apesar de possuírem grandes vantagens, apresentam inconvenientes quanto ao manuseio e processamento. Estas fibras podem causar problemas de saúde aos trabalhadores como irritações na pele e problemas respiratórios. Além disso, as fibras sintéticas são abrasivas, produzindo desgastes durante o processamento. (MEGIATTO JR, 2006). As fibras vegetais podem ser obtidas a partir de fontes renováveis, são biodegradáveis, apresentam baixo custo, baixa densidade específica, sendo, portanto, excelentes candidatos a substituir os tradicionais polímeros e fibras sintéticas. (MISHRA, 2004). A fibra de sisal é excepcionalmente durável e de baixa manutenção com desgaste mínimo. Sua fibra é muito resistente para tecidos. (BARBOSA, 2020).

1.2 Motivação

A manufatura aditiva por meio da impressão 3D FDM, nos permite criar peças especificamente para uma determinada aplicação, com um baixo custo ferramental, liberdade de design e ciclos de prototipagem mais rápidos. Na engenharia, esse meio de manufatura é muito difundido e demonstra um forte crescimento nos próximos anos. O mercado de impressão 3D foi avaliado em US\$ 12,6 Bilhões de dólares, em 2020. As previsões para o ano de 2026 indicam que o mercado atingirá US\$ 37,2 Bilhões de dólares. (STATISTA, 2021).

Honeycombs fazem parte da classe dos materiais celulares, formados por “vazios” separados por paredes sólidas, os quais se destacam por possuírem baixa densidade relativa. Um *honeycomb* é formado pela repetição bidimensional de uma estrutura celular. (GIBSON; ASHBY, 1997). A capacidade de absorver energia de um *honeycomb* é fortemente influenciada não só pelas propriedades mecânicas do material que compõem o *honeycomb* e pela espessura de suas paredes, mas também pela configuração da célula. (YAMASHITA; GOTOH, 2005).

Por definição o compósito é a combinação de dois materiais ou mais com propriedades distintas com o objetivo de obter um material que possua propriedades diferentes de seus constituintes individualmente. Visando o baixo custo da manufatura aditiva e as propriedades mecânicas adquiridas das fibras vegetais, é possível estudar um material compósito que combine as propriedades mecânicas.

1.3 Justificativa

O polímero PETG apresenta grandes vantagens mecânicas em relação aos outros tipos de polímeros presentes na manufatura aditiva, como o ABS e PLA. Além disso, o PETG pode ser adquirido de forma reciclável, promovendo a reutilização de materiais que iriam para o lixo, ou até mesmo para a natureza. O PLA, apresenta características biocompatíveis e biodegradáveis, tornando-se uma opção mais barata e ecológica. Por conta disso, o PETG e o PLA foram escolhidos como material a ser estudado nesse trabalho.

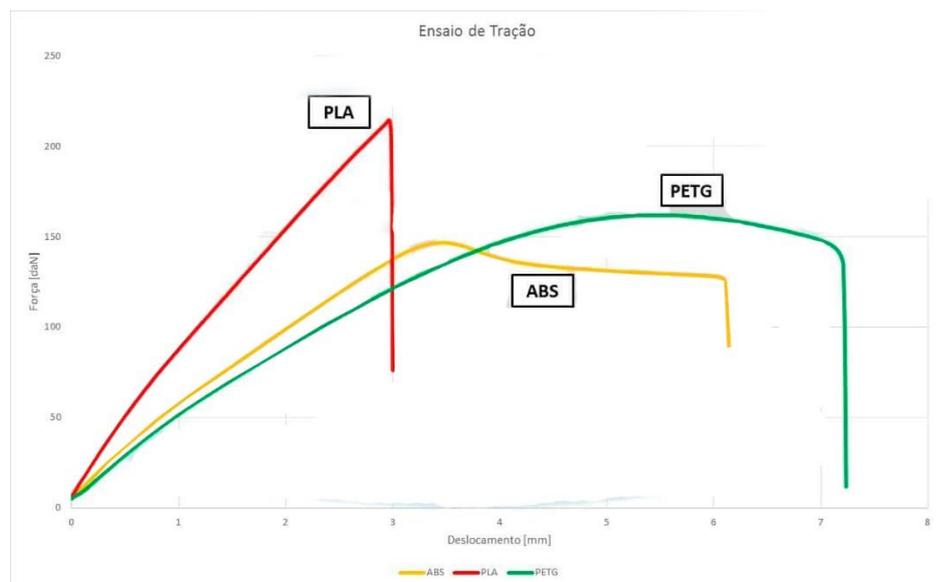


Figura 1 – Propriedades mecânicas dos filamentos de impressão 3D – Fonte: (3D LAB, 2021).

Pensando nas características presentes em materiais compósitos e a facilidade de criação de peças com impressão 3D, adotou-se a possibilidade da criação de materiais compósitos, utilizando fibra vegetal de Sisal de matriz epóxi, com núcleo estrutural de colmeia (*Honeycomb*) em PETG e PLA.

1.4 Problematização

Como se comporta um compósito de sisal com núcleo em PETG *versus* um compósito de sisal com núcleo em PLA? Qual núcleo apresenta melhor desempenho mecânico? Como as dimensões do núcleo influenciam na resistência à flexão do compósito?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

Estudar a fabricação e caracterização de um compósito de estrutura sanduíche usando as fibras de sisal e núcleo estrutural *honeycomb* impresso em PETG e PLA, com ênfase no comportamento mecânico do compósito em relação as dimensões do núcleo e dos materiais utilizados.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Estudar o processo de construção de compósitos reforçados por fibras vegetais;
- Estudar processo de construção de painéis sanduíche;
- Estudar o processo de impressão 3D FDM;
- Modelar os núcleos *honeycomb* por meio de software (Fusion 360);
- Fabricar os núcleos *honeycomb* utilizando PETG e PLA por meio da impressão 3D;
- Fabricar os compósitos reforçados de Fibra de Sisal com resina epóxi;
- Fabricar corpos de prova dos painéis sanduíche para os ensaios mecânicos;
- Caracterização do corpo de prova do compósito reforçado de Sisal–Epóxi, realizando ensaio mecânico de flexão segundo a ASTM D790;

- Caracterização dos corpos de prova dos painéis sanduíche de Sisal–Epóxi com núcleo em PETG e PLA, realizando ensaios mecânicos de flexão segundo a ASTM C393;
- Analisar o comportamento mecânico do compósito reforçado de Sisal–Epóxi;
- Analisar o comportamento mecânico dos painéis sanduíche de Sisal–Epóxi com núcleo em PETG e PLA;
- Analisar a influência das dimensões do núcleo em relação ao comportamento mecânico dos painéis.

1.6 Organização do Trabalho

Esse trabalho está dividido em 6 Capítulos principais:

- Capítulo I – Introdução: Contextualizar o trabalho e apresentar as motivações e problemáticas que serão abordadas no trabalho;
- Capítulo II – Referencial Teórico: Serão apresentados os materiais compósitos, a fibra de Sisal, os Painéis sanduíche, a estrutura de colmeia (*honeycomb*), manufatura aditiva FDM e o Ensaio de Flexão.
- Capítulo III – Metodologia: Essa parte expõe a metodologia utilizada no trabalho, como os corpos de prova foram fabricados e como os testes foram organizados;
- Capítulo IV – Resultados: Apresenta os resultados obtidos nos testes de flexão, análises comparativas;
- Capítulo V – Conclusão: Sumariza os resultados, conclui quais objetivos foram atingidos, resposta à problemática apresentada e sugestões de trabalhos futuros;
- Capítulo VI – Referências: Referências bibliográficas.
- Capítulo VII – Apêndices: Desenhos técnicos dos corpos de prova.
- Capítulo VIII – Anexos: Anexos das especificações do fabricante da resina.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os assuntos principais para o desenvolvimento do trabalho: Materiais compósitos, fibra de sisal, compósitos reforçados, compósitos estruturais, painéis de colmeia, manufatura aditiva e as normas de ensaios de flexão.

2.1 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos podem ser definidos como o conjunto de dois materiais ou mais combinados em uma escala macroscópica, com interface distintas, para que funcionem como uma única unidade, com o objetivo de obter propriedades mecânicas diferentes das apresentadas pelos componentes individualmente.

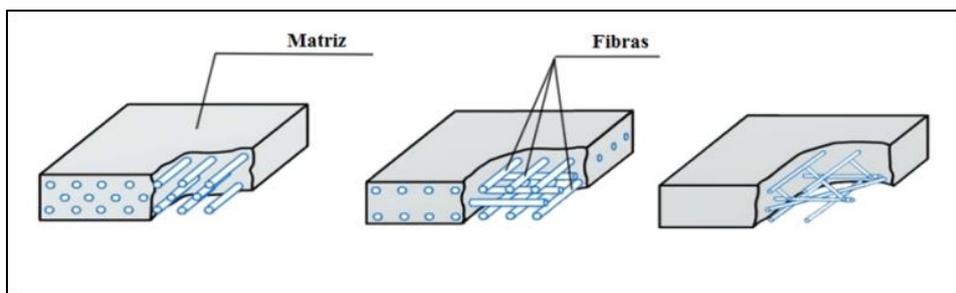


Figura 2 – Material compósito – Fonte: (BETAEP, 2017).

Em resumo, os compósitos são materiais multifásicos, que apresentam propriedades diferentes em relação as dos seus componentes. Essa combinação de propriedades visa aprimorar os resultados obtidos com o compósito. (CALLISTER, 2008).

2.1.1 Matrizes Poliméricas

Nos materiais compósitos, as matrizes são meios de transferência de carga para os esforços. Podemos classificá-las em três tipos: Poliméricas, Metálicas e Cerâmicas. As poliméricas (também conhecidas como orgânicas), são as mais difundidas no mercado devido ao seu baixo custo e versatilidade de processamento. (SILVA, 2017).

As matrizes poliméricas são o resultado da mistura de resina com agente catalizador, formando um material sólido com propriedades mecânicas e resistência química. Desse modo, propicia ao compósito uma forma geométrica, proteção contra agentes externos, mantém

orientação dos esforços no composto e transfere a solicitação de carregamento aos esforços, com as fibras. (CALLISTER, 2002).

As matrizes termoplásticas podem ser moldadas e remoldadas, ou seja, são recicláveis. Sob temperatura e pressão fundem e fluem, porém são endurecidas quando resfriadas. Alguns exemplos são: Poliestireno (PS); Polipropileno (PP); Policloreto de Vinila (PVC); Polietileno (PE); Poliamida (*Nylon*). (MARINUCCI, 2011).

As matrizes em estado líquido a temperatura ambiente, são solidificadas mediante a adição de agentes de cura ou temperatura, são classificadas como termofixos. Caso solidificado se torna insolúvel ou infusível, ou seja, são feitas todas as ligações cruzadas. (LÓPEZ, 2013). Dentre os termofixos os mais conhecidos são as resinas viniléster, poliéster e epóxi.

2.1.2 Resina Epóxi

A resina epóxi é um polímero termofixo no qual precisa de um agente catalisador para endurecer. Os Epóxis são poliésteres construídos a partir de monômeros, nos quais o grupo éter, toma a forma de um anel de três compostos, que é conhecido como anel epóxido, sendo esse anel, que faz parte da epicloridrina, bastante reativo e muito importante na produção da resina epóxi. (ENGIQUIMICASANTOSSP, 2018).

Após a cura da resina, obtém-se vantagens em suas propriedades mecânicas, resistências ao calor e química. No entanto, seu custo é mais elevado se comparado com resinas poliéster e viniléster. (HUANG; YOUNG, 1995).

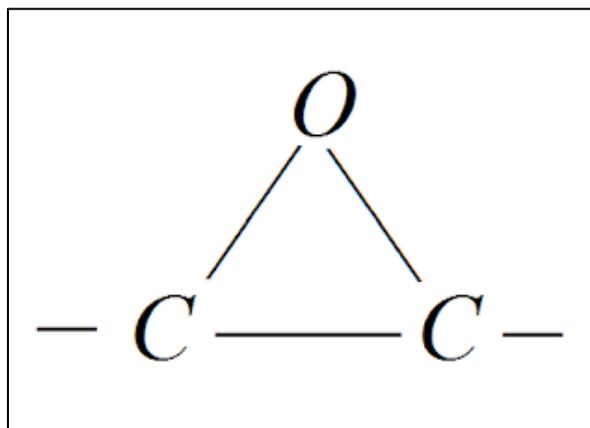


Figura 3 – Estrutura do anel epóxido – Fonte: (ENGIQUIMICASANTOSSP, 2018).

No processo de cura dessa resina, há uma reação exotérmica, a qual pode acontecer em temperaturas elevadas ou ambiente, sem emitir subprodutos voláteis. Após as resinas poliéster, as resinas epóxis são as resinas termofixas mais utilizadas no mundo. (HERTER, 2010).

2.1.3 Fibra Vegetal

As fibras, de um modo geral, podem ser classificadas como naturais e sintéticas. As fibras sintéticas são mais difundidas no mercado por conta da sua versatilidade e propriedades mecânicas. Por outro lado, as fibras naturais têm se tornado uma necessidade para o homem, a partir do momento em que buscamos encontrar soluções para reduzir prejuízos causados por intempéries que comprometem safras e, conseqüentemente, reduzindo lucros.

As desvantagens iniciais em relação às fibras naturais (aparência, toque e conforto) foram sanadas com o passar do tempo, através do aperfeiçoamento de novas técnicas de produção, tornando-as bastante competitivas. (LEÃO, 2008).

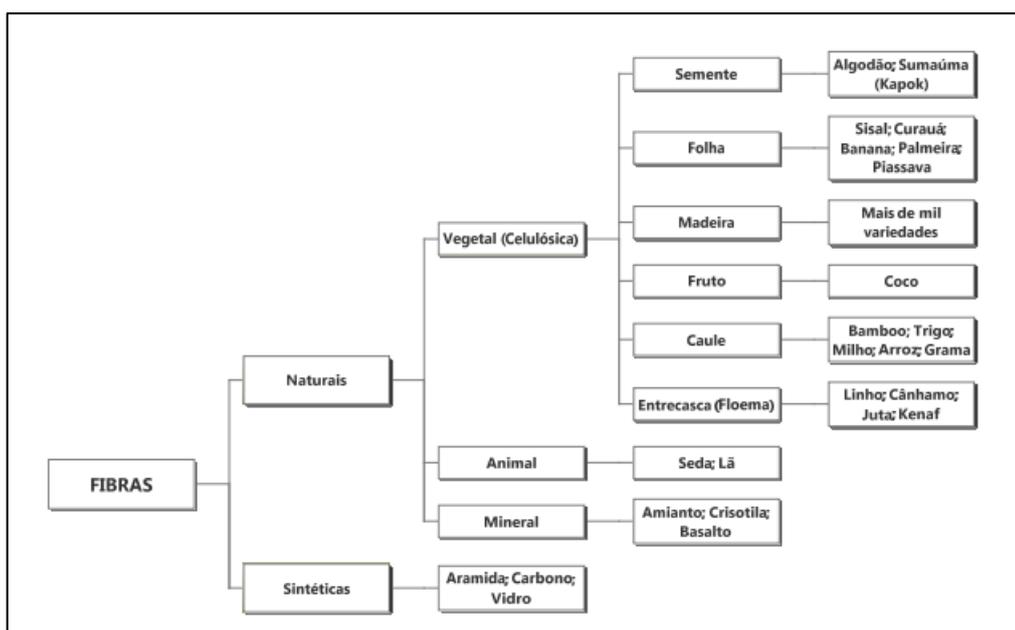


Figura 4 – Classificação das fibras – Fonte: (CALLISTER, 2008).

Na última década, porém, o interesse pelas fibras vegetais aumentou novamente, devido ao fato de serem provenientes de fontes renováveis, biodegradáveis, recicláveis e representar em uma nova fonte de renda para população rural, além de trazerem economia de energia por meio da redução de peso dos componentes. A substituição das fibras sintéticas por fibras vegetais é uma possibilidade bastante interessante por se tratar da substituição de um recurso não renovável por um recurso renovável. (SATYANARAYANA, 2007).

As fibras vegetais possuem estruturas celulares compostas por celulose, lignina e hemicelulose. A fibra técnica, é constituída por feixes de fibras celulares ou fibro-células alinhadas ao longo do eixo principal da fibra técnica. (OLIVEIRA, 2010).

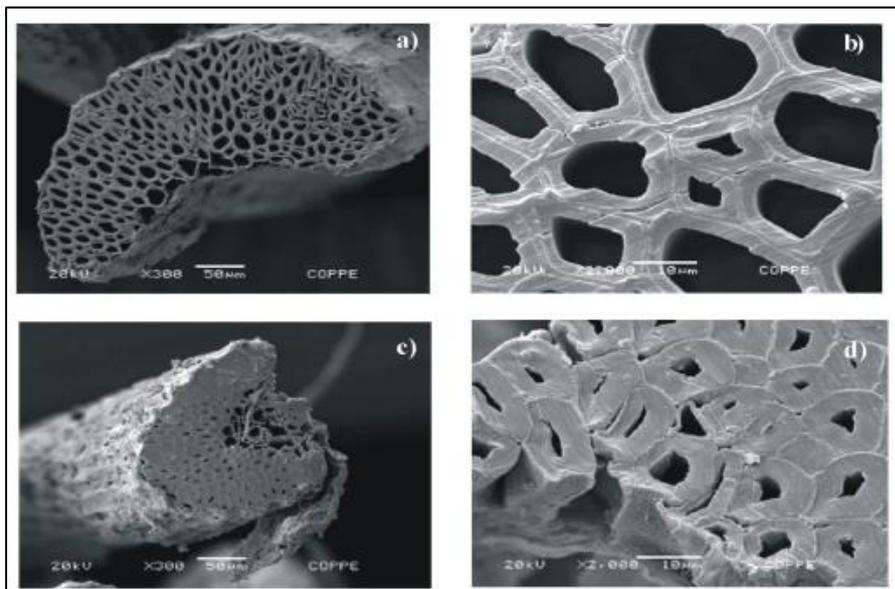


Figura 5 – Estrutura fibrocelular do sisal – Fonte: (FERREIRA 2011).

A incompatibilidade entre as fibras vegetais e a matriz é oriunda do fato das fibras serem de natureza hidrofílica, pois são derivadas de lignocelulose, que contém grupos hidroxila fortemente polarizados, e da matriz polimérica ser hidrofóbica. Como consequências diretas deste fato encontram-se uma fraca adesão interfacial entre a fibra polar e hidrofílica e a matriz não polar e hidrofóbica e dificuldades de mistura devidas à baixa molhabilidade da fibra pela matriz o que leva a uma fraca interface destes compósitos (JOHN e ANANDJIWALA, 2008; SREENIVASAN et al., 2012).

Devido à baixa compatibilidade entre as fibras naturais e a matriz polimérica, as fibras devem ser adequadamente modificadas por meio de tratamentos físicos ou químicos com o objetivo de melhorar a adesão entre ambas (PANDEY et al., 2010).

2.1.4 Fibra de Sisal

O sisal (*Agave sisalana pierre*) foi introduzido na Bahia, mais especificamente, no município de Santaluz, localizado na região sisaleira, por volta de 1910. Porém, só passou a ser explorado comercialmente a partir do final da década de 30. Sua adaptação às condições edafoclimáticas da região semiárida do Nordeste, onde as opções de cultivo são limitadas,

confere ao sisal uma grande importância socioeconômica, gerando emprego (estima-se que, aproximadamente, 700 mil agricultores familiares cultivam o sisal em suas propriedades) e renda em uma das regiões possuidoras do IDH (0,589) mais baixo do Estado da Bahia. Ademais, uma série de postos de trabalho são gerados nas outras etapas da cadeia, geralmente nos centros urbanos. (EMBRAPA, 2021).

O sisal é a principal fibra produzida no mundo, correspondendo a 70% da produção comercial de fibras de mesma linhagem. A planta do sisal produz folhas semelhantes a espadas com dentes e perde esses dentes na maturidade. A acetilação da fibra de sisal aumenta a resistência à tração e o módulo dos compósitos resultantes, exceto em alguns casos. Quando a fibra acetilada é misturada com poliolefinas, ocorrem maiores interações com poliolefina e fibra. Essas interações aumentam a estabilidade dos compósitos. As propriedades térmicas indicam temperaturas de mistura e moldagem entre 160°C e 230°C. (MARTIN; MARTINS; MATTOSO; SILVA, 2009).



Figura 6 – Sisal (Agave sisalana) – Fonte: (PORTAL GOV, 2018).

A fibra de sisal é uma fibra vegetal com resistência e rigidez específicas que se comparam bem com as da fibra de vidro. A maioria das resinas sintéticas é, no entanto, mais cara que a fibra de sisal, tornando esses compósitos menos atraentes para aplicações de baixa tecnologia. Portanto, para as fibras de sisal que ocorrem naturalmente em resinas do tipo resol, o líquido da casca da castanha de caju é uma alternativa atraente. (PEREIRA; OLIVEIRA; MACHADO; MONTEIRO, 2016).



Figura 7 – Fibras de Sisal – Fonte: (PORTAL GOV, 2018).

2.1.5 Compósitos Reforçados Com Fibras

A divisão dos materiais compósitos é feita em três grandes grupos, os compósitos reforçados com partículas, os compósitos estruturais e os compósitos reforçados com fibras. (CALLISTER, 2012).

Dentre os grupos mencionados, os mais importantes são os reforçados com fibras. São responsáveis por transmitir e distribuir, entre as fibras, cerca de 70% a 90% das tensões e deformações de carga aplicadas sobre o compósito. (MAZUMDAR, 2001).



Figura 8 – Esquema de classificação dos compósitos – Fonte: (CALLISTER, 2012).

As características mecânicas não dependem da fibra e suas propriedades, mas também de um certo comprimento crítico da mesma. A maioria destas combinações de matriz-fibra dos compósitos, tem este comprimento crítico próximo a 1 mm, ou seja, 20 a 150 vezes maior que

o diâmetro da fibra. As fibras que possuem comprimento acima de 15 vezes ao comprimento crítico, são chamadas de fibras contínuas. (CALLISTER, 2012).

Além do comprimento das fibras, outro fator importante é o arranjo da fibra em relação às outras dentro do compósito, podendo ser alinhadas, ou seja, paralelas em um único sentido de direção entre si, ou então distribuídas de forma aleatória. As fibras contínuas normalmente se encontram alinhadas, já as fibras descontínuas podem também estar alinhadas ou orientadas aleatoriamente. (CALLISTER, 2012).

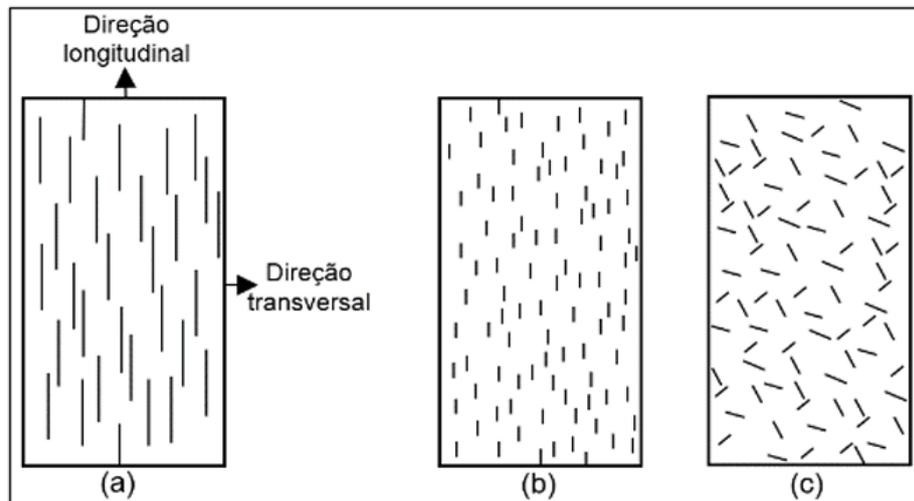


Figura 9 – Representações esquemáticas dos compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, (c) descontínuas e aleatórias – Fonte: (CALLISTER, 2012).

As características mecânicas gerais de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, mas também do grau segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. O grau de transferência de carga depende da magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz. Essa ligação fibra–matriz não ocorre nas extremidades da fibra e produz um padrão de deformação da matriz, em outras palavras, não existe qualquer transmissão de carga pela matriz nas extremidades de cada fibra. As fibras possuem comprimento crítico, tal comprimento é necessário para que haja aumento efetivo na resistência e na rigidez do material compósito. Esse comprimento crítico l_c depende do diâmetro d_f da fibra da sua resistência máxima σ_f^* e da resistência da ligação fibra–matriz τ_c . Essa relação pode ser escrita da seguinte forma:

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d_f}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

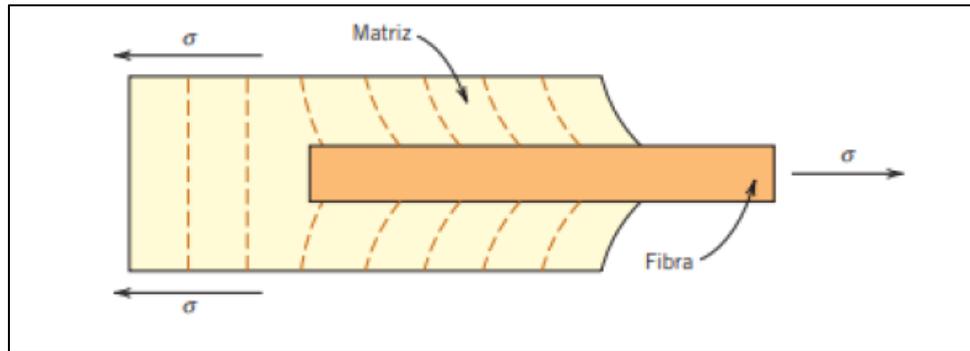


Figura 10 – Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra que está submetida à aplicação de uma carga de tração. Fonte: (CALLISTER, 2008).

2.1.6 Compósito Estrutural

Um compósito estrutural é um compósito multicamada e em geral de baixa massa específica, usado em aplicações que exigem integridade estrutural, resistências à tração, compressão e torção e rigidez normalmente elevadas. As propriedades desses compósitos dependem não somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos estruturais. Os compósitos laminados e os painéis-sanduiche são dois dos mais comuns compósitos estruturais (CALLISTER, 2008).

Os painéis sanduíches são tipos de compósitos estruturais cujo núcleo é feito de um material menos denso que as faces. São projetados para serem vigas de baixo peso, com alta rigidez. Consiste em 2 faces unidas a um núcleo através de um adesivo. Os modelos mais comuns são utilizando as lâminas de fibras com matriz de resina, existem os mais variados núcleos estruturais, o objeto de estudo deste trabalho são os *Honeycombs* (que serão mais aprofundados neste trabalho no capítulo seguinte 2.2).

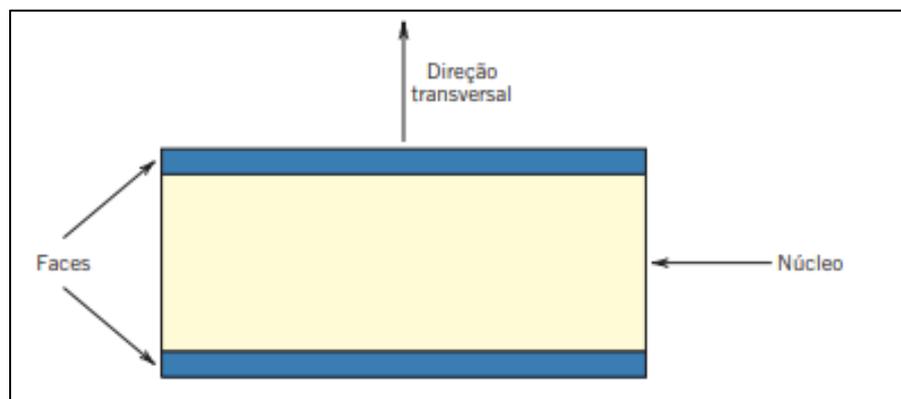


Figura 11 – Diagrama de sessão transversal de um painel sanduíche – Fonte: (Callister, 2008).

Os painéis sanduíches são utilizados em larga escala na indústria aeronáutica, por conta da baixa densidade e alta resistência do painel. Os núcleos estruturais mais utilizados são: Espumas Poliméricas (PCV – Divynycell); Madeira e Colmeias (Aramida).

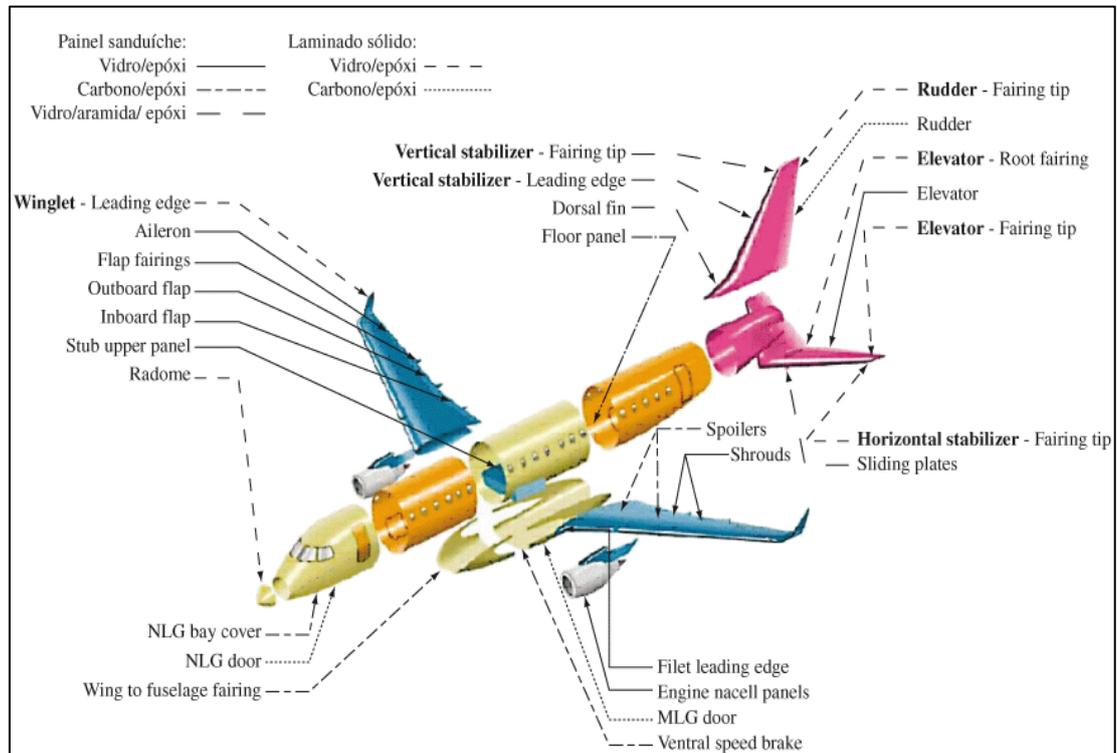


Figura 12 – Materiais compósitos no EMB170 – Fonte: (EMBRAER, 2007).

2.2 Estrutura *honeycomb* (Hexagonal)

O favo hexagonal da abelha melífera é admirado e questionado desde os tempos antigos. Diz-se que o primeiro favo de mel artificial, de acordo com a mitologia grega, foi fabricado por Dédalo a partir de ouro fundido com cera perdida, há mais de 3.000 anos. (DIODORUS SICULUS). Marcus Varro relata que os gregos Euclides e Zenodorus descobriram que a forma hexagonal torna o uso mais eficiente do espaço e dos materiais de construção. As nervuras internas e as câmaras ocultas na cúpula do Panteão de Roma são um dos primeiros exemplos de estrutura em favo de mel. (MACDONALD, 1976).



Figura 13 – Estrutura de colmeia na natureza – Fonte: (WIKIPEDIA, 2022).

Os núcleos *honeycombs* são do tipo de geometria mais convencional utilizada na fabricação de painéis sanduíches. São núcleos não homogêneos, possuem células abertas na direção transversal das lâminas, fornecendo um suporte bidirecional. (ALMEIDA, 2009).

As faces do painel sanduíche possuem a função de suportar as tensões normais de tração, compressão e cisalhamento associados à flexão, além disso, são diretamente dependentes do número e da orientação de camadas sobrepostas para formá-las. Enquanto o núcleo, mantém essas faces afastadas, é rígido perpendicularmente a elas, e sua rigidez ao cisalhamento transversal deve ser grande para que todo o conjunto sanduíche funcione (TITA, 2007).

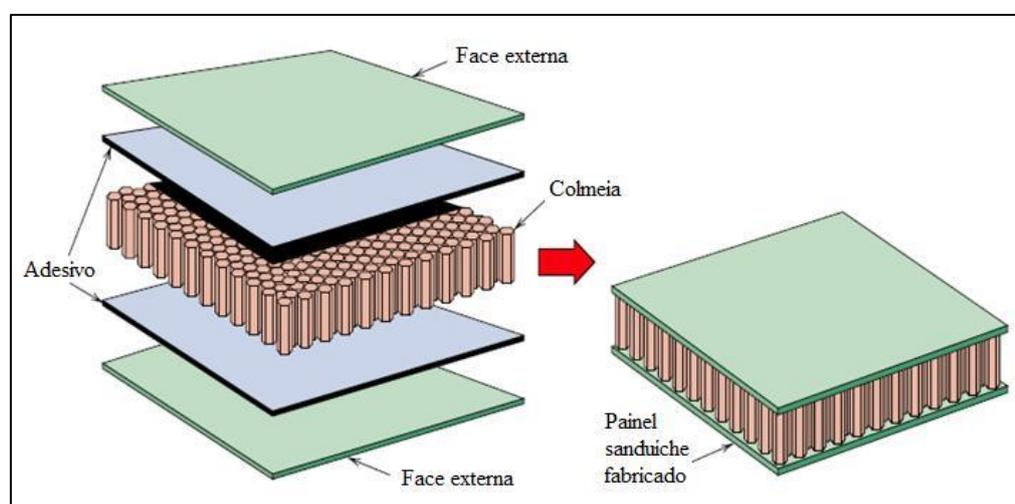


Figura 14 – Diagrama esquemático da construção de um painel sanduíche com núcleo honeycomb – Fonte: (CALLISTER, 2010).

Uma grande vantagem do *honeycomb* são suas propriedades de alta resistência à compressão e cisalhamento que nenhum outro material com densidade semelhante possui. Estes materiais possuem boa resistência ao impacto e à fadiga, e os que são compostos por alumínio e aramida são resistentes ao fogo, possuindo uma boa operação até 150°C. A colmeia do tipo

Nomex® PN-1/8-3.0 possui densidade de 48 kg/m³, resistência à compressão de 1,93MPa, resistência à cisalhamento “L” de 1,34 MPa e respectivo módulo de 44,13 MPa, resistência ao cisalhamento “W” de 0,66 MPa e respectivo módulo de 22,75 MPa. Esse tipo de Nomex® de aramida possui a melhor combinação de propriedades, pois é produzido a partir de um papel produzido a partir dessas fibras e revestido com resina fenólica que possui alta resistência a temperaturas. (MAYLA, 2018).

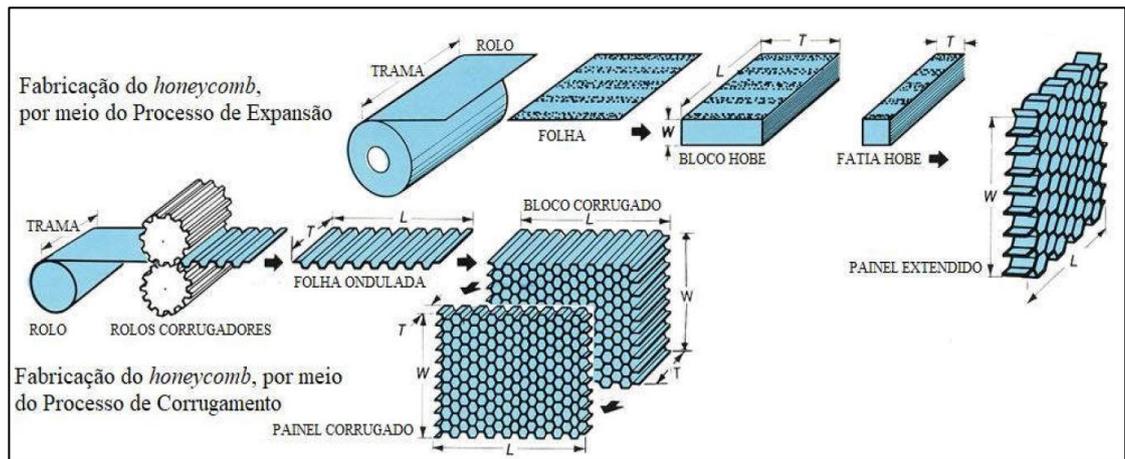


Figura 15 – Diagrama de fabricação de núcleo honeycomb – Fonte: (MARSHALL, 1982).

O uso de polímeros termoplásticos para a fabricação de núcleo de painéis sanduíche tem se mostrado promissor, tanto no desempenho mecânico, quanto no ponto de vista ecológico. Além disso, o uso de manufatura aditiva nos permite uma liberdade de arranjos estruturais diferentes com baixo custo de fabricação. Segundo Bitzer (1997) para esse tipo de núcleo é possível a fusão por temperatura no local da união entre as diversas células, eliminando a necessidade de adesivos na produção do *honeycomb*. Assim, esse mecanismo permite a produção econômica dos núcleos. Uma alternativa para sua produção é a utilização de Deposição de Material Fundido (do inglês *Fused Deposition Modeling* – FDM), que será abordado no capítulo seguinte deste trabalho.



Figura 16 – Estrutura de absorção de impacto em honeycomb feita de polímero termoplástico moldado por injeção em um BMW i3 – Fonte: (FLICKR, 2013).

2.3 Manufatura Aditiva

De acordo com Volpato e Carvalho (2018), a Manufatura Aditiva, traduzida do inglês *Additive Manufacturing* (AM) ou ainda Impressão 3D (termo usado popularmente) é um processo de fabricação caracterizado por meio da adição em camadas sucessivas de material a partir de um modelo geométrico 3D originado por um sistema de desenho assistido por computador (abreviação CAD em inglês), que permite a fabricação de componentes físicos utilizando uma infinidade de materiais, diferentes técnicas, formas e princípios.

No final dos anos 80 começaram a surgir vários equipamentos de prototipagem rápida, popularmente conhecidas como impressoras 3D, cuja finalidade era produzir protótipos de produtos em três dimensões de forma rápida e generalizada. Dentro dessa proposta, a Estereolitografia foi a pioneira, tendo a sua primeira patente emitida em 1986 para Charles W. Hull (popularmente conhecido como Chuck Hull) sócio e fundador da 3D Systems, a primeira empresa a lançar essa tecnologia no mercado no ano de 1988. (GIORDANO; ZANCUL; RODRIGUES, 2016).



Figura 17 – Impressora 3D – Fonte: (REVISTA FERRAMENTAL, 2020).

2.3.1 Impressão 3D FDM

A tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (*do inglês Fused Deposition Modeling – FDM*) foi desenvolvida e patenteada por S. Scott Crump em 1988, o qual criou a empresa Stratasys, pioneira na produção de impressora de FDM. (CRUMP, 1992).

O processo de impressão 3D FDM funciona quando for introduzido um filamento, geralmente um polímero termofixo, em uma extrusora. A extrusora, por sua vez, é composta por um bloco aquecido e um bico de impressão com orifício menor que o diâmetro do filamento, essa parte pode ser denominada de *hot end*. O material é empurrado em direção ao *hot end* através de um motor de passo. O filamento passa pelo bico e é depositado sobre a mesa de impressão. Dependendo do material utilizado, a mesa pode ser aquecida para manter a camada inicial fixa.

Na maioria das impressoras, a extrusora move-se em dois eixos, X e Z, e a mesa no eixo Y. Por meio de motores de passo, a extrusora e a mesa são movimentados, depositando o material em camadas no eixo Z.

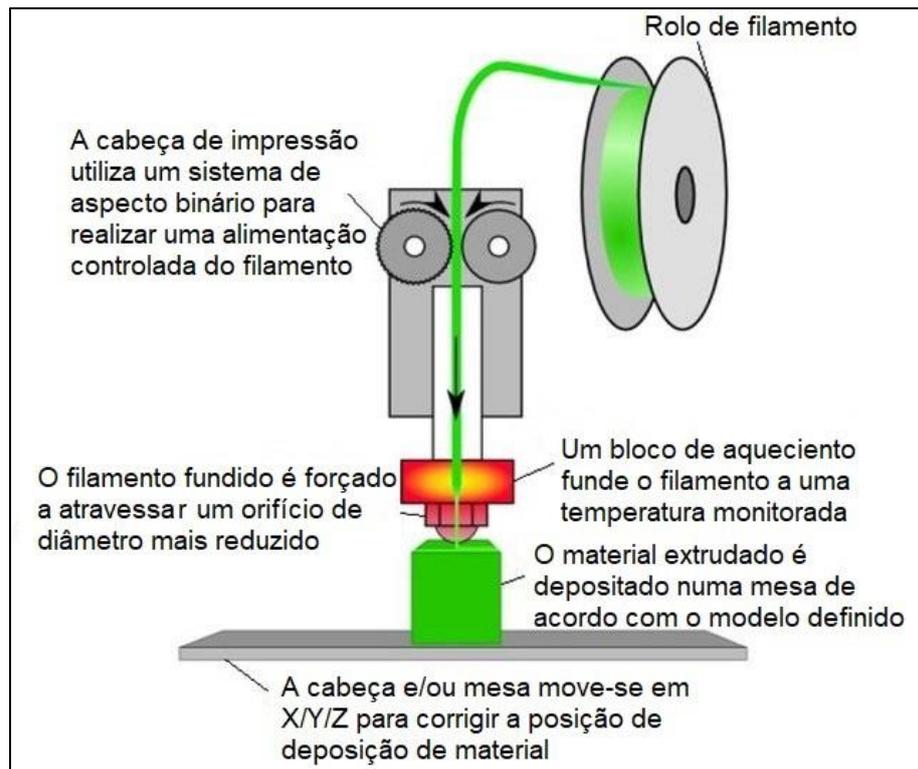


Figura 18 – Esquema de impressão 3D – Fonte: (MOREIRA, 2016).

2.3.2 Etapas da Impressão FDM

Para conseguirmos chegar na manufatura de uma peça por FDM, é necessário passar por algumas etapas. É importante ressaltar que nenhum processo de manufatura é bem executado sem um planejamento previamente estipulado. Segundo autores como Mueller (2012) e Gibson (2009), o processo de manufatura aditiva genérico, aplicável a qualquer um dos métodos, é composto por pelo menos 8 passos. Hoje em dia, com modelos mais avançados de impressoras, variedade de materiais e softwares, podemos incluir mais uma etapa, o fatiamento do desenho. O foco deste trabalho é na impressão FDM, porém essas etapas servem tanto para este método quanto para SLA (*Stereolithography Apparatus*), também conhecido como estereolitografia.



Figura 19 – Etapas da manufatura aditiva – Fonte: (GIBSON, 2009)

1. **Desenho CAD:** O processo de manufatura se inicia com o desenho CAD, este pode ser modelado em um software especializado em desenho computacional, ou até mesmo obtido através de scanner a laser.
2. **Conversão do Arquivo:** O desenho 3D precisa ser convertido para um arquivo de formato STL (*Standard Tessellation Language*) ou OBJ (*Object File Wavefront*), que são os dois formatos mais utilizados em softwares de fatiamento. Esses arquivos descrevem dados do layout do objeto tridimensional (coordenadas, texturas, pontos, linhas poligonais etc).
3. **Fatiamento:** Essa etapa nos permite configurar os parâmetros de máquina, como: Temperatura do bico de impressão e mesa; Orientação da peça sobre a mesa; Espessura de paredes; Tipos de preenchimentos; Densidade do desenho; Velocidade de impressão dentre muitos outros parâmetros. Essa etapa é executada por um software de fatiamento, converte o arquivo em formato G-CODE, que é interpretado pela máquina.
4. **Transferência do Arquivo:** O arquivo em formato G-CODE pode ser transferido para máquina por cartão de memória, cabo ou até mesmo via *wireless*.
5. **Setup da Máquina:** Antes de iniciar a impressão é necessário verificar se a mesa de impressão da máquina está nivelada, bico de impressão limpo e se há material suficiente para aquela impressão. Do contrário, podem haver perdas na impressão, falhas, ou até mesmo danificar a máquina. Também é importante ressaltar as etapas de calibração dos parâmetros de impressão que devem ser previamente definidos

6. **Construir:** A impressora executa o arquivo inserido e inicia a deposição do material. É importante monitorar o processo de construção, pois podem haver problemas como: Descolamento da peça da mesa de impressão; Falta de material; Quedas de energia dentre outros.
7. **Remoção:** Ao finalizar a impressão é preciso remove-la da mesa. Em algumas impressoras a mesa pode ser removida e a peça destacada de forma simples. Porém, no caso de mesas fixas, o ideal é aguardar a mesa esfriar e depor, com o auxílio de uma espátula, retirar a peça cuidadosamente.
8. **Pós-Tratamento:** Algumas tecnologias precisam de um pós-tratamento, como uso químicos como o álcool isopropílico e acetona ou até mesmo câmaras de cura com luz UV.
9. **Aplicação:** Esta etapa consiste em dar o acabamento na peça, em alguns casos realizar a montagem ou pintura.

2.3.3 Filamentos

Para a impressão FDM é necessária a utilização de materiais termoplásticos, ou seja, tornam-se maleáveis durante a fase de extrusão e depois retornam suas propriedades mecânicas.

Existem diversos tipos de filamento para impressão 3D, dentre eles os mais comuns são ABS, PLA e PETG. Estes, possuem características semelhantes, porém, cada um com sua singularidade. Ainda existem outros materiais com características flexíveis, como o caso do TPU. Para este trabalho foram escolhidos o PLA e o PETG devida a sua facilidade de trabalho, não exigem altas temperaturas de impressão.

O PLA (poliácido láctico) consiste em um poliéster alifático linear, termoplástico, semicristalino ou amorfo. Trata-se de um polímero sintetizado a partir de fontes renováveis como o açúcar de milho, batata, e cana de açúcar, através de bioconversão e polimerização. O PLA dispõe de características interessantes, tais como biocompatibilidade, biodegradabilidade, e absorção biológica, além de boas propriedades mecânicas e de processabilidade, estabilidade térmica e baixo impacto ambiental. (SANTANA, 2018).

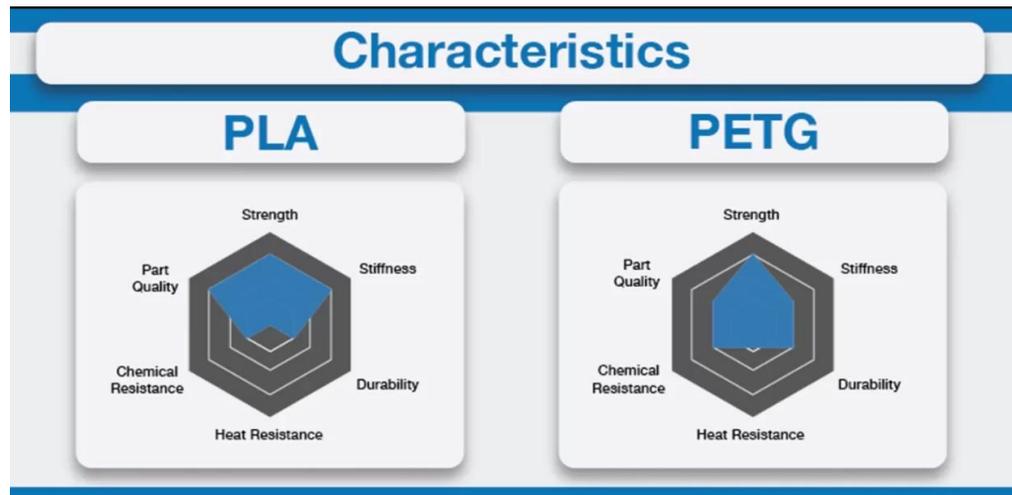


Figura 20 – PLA versus PETG – Fonte:(PICK3DPRINTER, 2022).

A resistência à tração do PLA encontra-se em aproximadamente (50 a 70) MPa e o módulo de elasticidade entre (3,0 e 4,0) GPa, dependendo da massa molar e da composição estereoquímica. Termicamente o PLA apresenta uma temperatura de transição vítrea próxima a (55 a 65) °C, e quando semicristalino um ponto de fusão no intervalo de (170 a 180) °C. O material é utilizado em muitas indústrias, sobretudo em setores como a fabricação de implantes médicos biodegradáveis e embalagens para alimentos. Entretanto, algumas deficiências do PLA, como a fragilidade inerente, um limitado alongamento até a ruptura, e uma baixa resistência ao impacto, constituem alguns desafios para a ampla aplicação do material. (SANTANA, 2018).

O PETG (quimicamente descrito como *polyethylene terephthalate-co-1, 4-cyclohexylenedimethylene terephthalate*) é um filamento que reúne as melhores qualidades do ABS (resistente e dúctil) com a facilidade de impressão que o PLA oferece. Caracteriza-se por ser uma versão modificada do PET, na qual o —G significa —glicol modificado, sendo adicionado à composição do material durante a polimerização. O resultado deste processo é um filamento mais transparente, menos rígido, e mais fácil de ser utilizado do que a sua forma base, o PET. Em um aspecto geral, possui temperatura de transição vítrea próxima a 80°C, com propriedades mecânicas semelhantes às do PET, tendo como vantagens uma notável tenacidade, flexibilidade, e alta capacidade de processamento. Estudos como os de LAM et al. encontraram valores de resistências à tração, alongamento até a ruptura e módulo de elasticidade para o PETG próximos a 25 MPa, 93%, e 1,6 GPa, respectivamente. Já no trabalho de FOCKE, para as mesmas propriedades, os resultados foram seguindo a ordem, 50,4 MPa, 73%, e 2,02 GPa. (SANTANA, 2018).

2.4 Método de Caracterização

2.4.1 Ensaio de Flexão

Para realização dos cálculos, considerou-se que o corpo de prova sob flexão, era uma viga biapoiada de comprimento L , sujeita a uma carga central P .

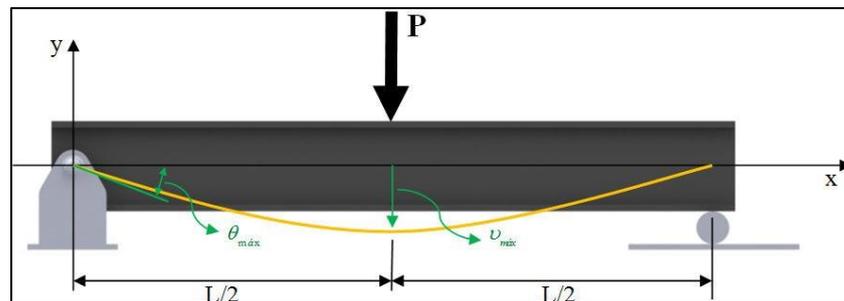


Figura 21 – Vigas biapoiada com carregamento pontual aplicada no centro da viga – Fonte: (HIBBELER, 2010).

É importante destacar que a equação de deslocamento vertical (2.4) desconsidera os esforços cortantes (cisalhamento) e preserva apenas a parcela dos esforços fletores. Essa hipótese é adotada para a flexão de barras longas (cujo comprimento é maior que a altura da seção transversal). (HIBBELER, 2010).

(2.4)

$$v_{m\acute{a}x} = -\frac{PL^3}{48EI}$$

Onde EI pode ser encontrado isolando a variável, dessa forma teremos que:

(2.5)

$$EI = -\frac{PL^3}{48v_{m\acute{a}x}}$$

Segundo HIBBELER (2010), sabendo que I é o momento de inércia, no eixo y , em uma viga de seção retangular, pode ser encontrada através de:

(2.6)

$$I_y = \frac{bh^3}{12}$$

Por fim, aplicando a Lei de Hooke aplicada em flexão de vigas, podemos comparar os resultados, onde ϵ é a deformação específica (adimensional):

(2.7)

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

2.4.2 ASTM C393

A norma ASTM C393 é uma norma específica de ensaio de flexão para painéis sanduíche com seção transversal retangular. Este ensaio pode ser realizado com 3 ou 4 pontos. O ensaio de 3 pontos permite uma aplicação de carga na metade da distância entre os dois apoios, já o de 4 pontos, a carga é aplicada a 1/4 ou a 1/3 da distância dos pontos de apoio.

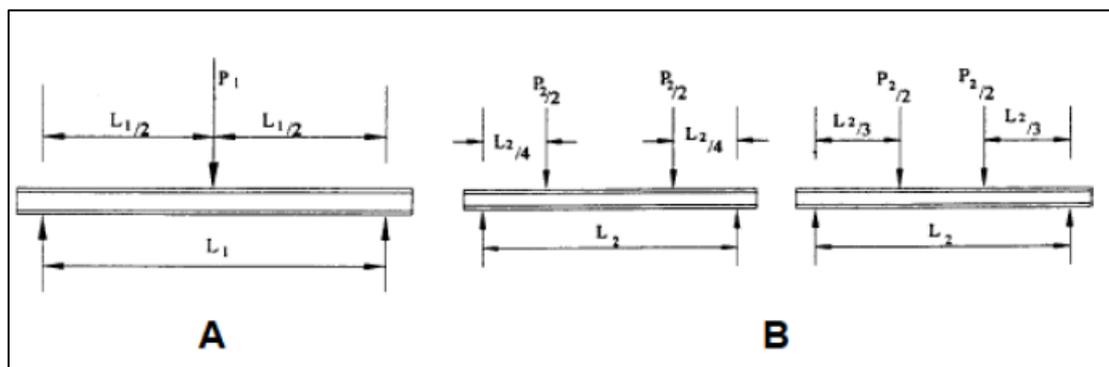


Figura 22 – (A) Ensaio de flexão de 3 pontos e (B) Ensaio de flexão de 4 pontos para os painéis sanduíche – Fonte:(ASTM INTERNACIONAL, 2016 b).

Segundo a ASTM International (2016 b), existem condições importantes para que o ensaio prossiga conforme a norma, tais como os momentos produzidos na falha do núcleo não podem provocar a falha das faces por tração ou compressão. O que requer faces de espessura maior e menor distância entre apoios, assim, é possível determinar as propriedades do núcleo. A carga deve ser aplicada de forma que o carregamento máximo ocorra entre 3 a 6 minuto. Foi utilizada a velocidade para os painéis sanduíches foi de 2 mm/min.

Dependendo do tipo de ensaio de flexão realizado os cálculos mudam, será mostrado a seguir o referente a 3 pontos, o qual se utilizou para testar os painéis sanduíches *honeycomb* hexagonal desse trabalho, os cálculos referentes à tensão de cisalhamento no núcleo (τ_c) e de tensão normal das faces (σ_f), representadas abaixo nas equações 2.8 e 2.9:

$$\tau_c = \frac{P}{(d + t_c)b} \quad (2.8)$$

$$\sigma_f = \frac{PL}{2t(d + t_c)b} \quad (2.9)$$

Aqui temos que o P é o valor máximo de carga aplicada no corpo de prova, d a espessura do painel, t a espessura das faces, t_c a espessura do núcleo, b a largura do painel e L o comprimento entre os apoios. Na equação (2.10) utilizaremos a deflexão máxima ($\Delta_{m\acute{a}x}$) que é adquirida pelos dados do teste de flexão.

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{PL}{48D} + \frac{PL}{4U} \quad (2.10)$$

$$D = \frac{E_1 t_1 E_2 t_2 (d + t_c)^2 b}{4(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \quad (2.11)$$

$$U = \frac{G(d + t_c)^2 b}{4t_c} \quad (2.12)$$

Temos que D e U são variáveis de rigidez a flexão e ao cisalhamento do painel, respectivamente. G é o módulo de cisalhamento do núcleo e E é o módulo de elasticidade das faces do painel. Dada a condição da estrutura, foi considerado o equacionamento para uma viga biapoiada com um carregamento pontual em $L/2$. Assim, utilizou-se essa formulação para comparar com os dados encontrados no ensaio de flexão, segundo a ASTM C393.

2.4.3 ASTM D790

Caso as amostras não sigam o padrão das geometrias recomendadas (largura = 13mm e espessura = 4mm), recomenda-se o uso das normas ASTM D790 para flexão de 3 pontos, e ASTM D6272 para o de 4 pontos. Caso o corpo de prova esteja nas medidas recomendadas, deve-se utilizar a velocidade de teste de 1mm/min. (ASTM D790; ASTM D6272).

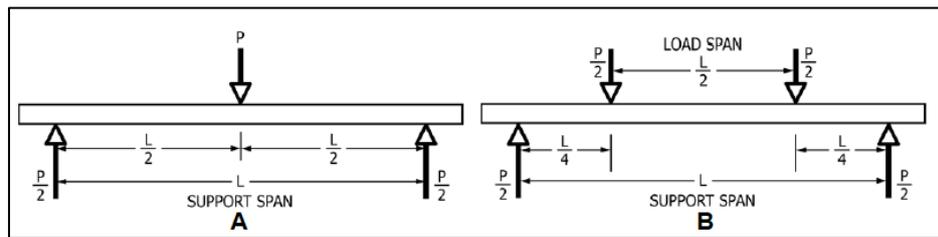


Figura 23 – (A) Ensaio de flexão de 3 pontos e (B) Ensaio de flexão de 4 pontos para compósitos de matrizes poliméricas – Fonte:(ASTM INTERNACIONAL, 2016 a).

De acordo com a ASTM D790, a velocidade de flexão para três pontos de amostras que não seguem os tamanhos padrões da norma, pode ser descrita como R , medido por mm/min. Ela depende de L , que é a distância ente apoios em mm, de b , largura do corpo de prova em mm, e por último de Z que é a taxa de deformação da fibra externa (mm/mm) estipulada pela norma igual a 0,01, Eq. 2.13:

(2.13)

$$R = \frac{ZL^2}{6d}$$

Os demais cálculos de flexão de 3 pontos são mostrados a seguir. A tensão máxima de flexão ($\sigma_{m\acute{a}x}$) em MPa, é encontrada por meio da Eq. 2.14:

(2.14)

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Onde P é a força aplicada em Newton, nesse caso a carga máxima, e h é a espessura do corpo de prova em mm. A tensão aplicada em cada instante, varia com a força nesse instante. Para calcular a deformação (ϵ) máxima em mm/mm, é preciso utilizar a Eq. 2.15:

(2.15)

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2}$$

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão abordados os métodos aplicados no trabalho e será dividido em 4 partes: Compósitos de Sisal–Epóxi, Impressão 3D, Painéis Sanduíche e Ensaio de Flexão.



Figura 24 – Fluxograma de atividades – Fonte: (Autor).

3.1 Compósitos de Sisal–Epóxi

Neste tópico, será abordado os métodos de tratamento químico das fibras e a fabricação das faces de sisal com resina epóxi. As faces possuem dimensão de 250mm x 155mm com espessura variando entre 2mm e 3mm. Todo o processo foi realizado nas dependências da Escola Superior de Tecnologia.

3.1.1 Preparação das Fibras

As Fibras de Sisal, fornecidas pela universidade, foram selecionadas de acordo com comprimento, qualidade e peso (cerca de 20g por amostra). As fibras, por serem hidrófilas, ou seja, absorvem água, precisam passar por um tratamento químico utilizando NaOH (Hidróxido de Sódio) para que tenham melhor adesão da matriz epóxi e, conseqüentemente, melhorar as propriedades mecânicas dos painéis sanduíche. Tratamento também conhecido como mercerização.



Figura 25 – Amostras de fibras de sisal antes do tratamento químico – Fonte: (Autor).

Foram separadas as amostras para fabricação das placas de sisal com matriz epóxi. Inicialmente foi preparado as quantidades necessárias de soda cáustica, para solução de 10% de concentração. Para este tratamento, foi utilizado 80g de soda para 800ml de água destilada. A soda cáustica 98% em escamas foi usada nesse processo.



Figura 26 – (a) NaOH 98% em escamas; (b) Preparação de 80g de NaOH – Fonte: (Autor).

As amostras foram mergulhadas na solução de 800ml a 10% de concentração de NaOH, por 4 horas. Em seguida, as fibras são secas em temperatura ambiente, por 24 horas. Todas as fibras passaram pelo mesmo tratamento.

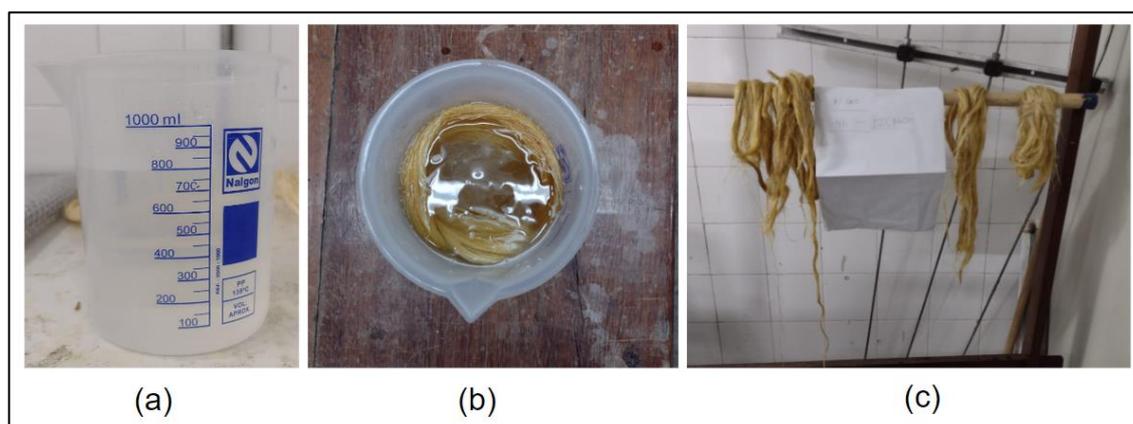


Figura 27 – (a) Solução com 10% de NaOH; (b) Fibras de sisal imersas na solução; (c) Secagem das fibras de sisal – Fonte: (Autor).

Após a secagem, as fibras são levadas até uma estufa para retirar a umidade. A estufa utilizada é do modelo QUIMIS 0317M-72, a qual fica localizada na universidade. O processo de secagem na estufa é de 1 hora, a uma temperatura de 100°C, após este processo as fibras devem ir imediatamente para o molde das placas, já preparado com a resina, do contrário, podem absorver umidade do ambiente novamente. Este processo faz com que as fibras percam massa, cada amostra fica com cerca de 12g ($\pm 1g$), aproximadamente 40% de perda.

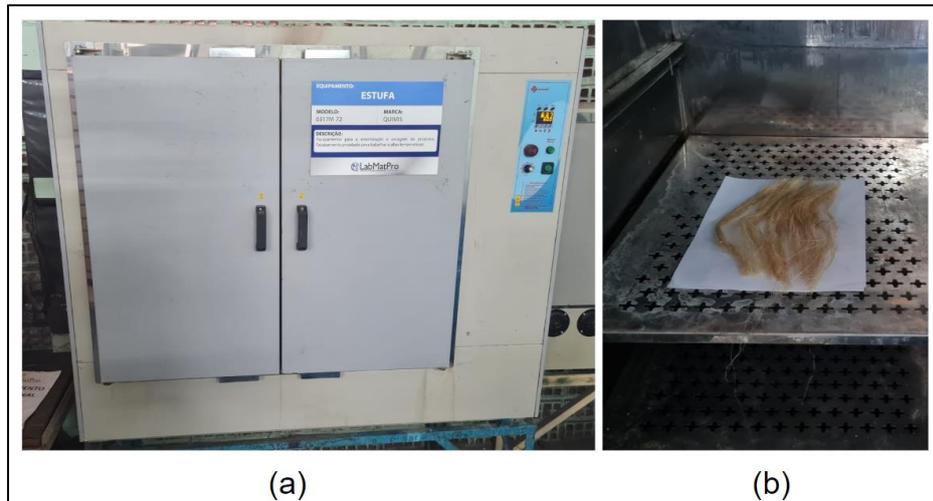


Figura 28 – Estufa: (a) Estufa de secagem; (b) Fibras de sisal na estufa de secagem – Fonte: (Autor).

3.1.2 Preparação do Molde

Para preparar 1 placa, foi utilizado um molde metálico, com as dimensões internas de 225mm x 155mm x 3mm. O Molde é dividido em 3 partes: Base, Topo e Placa Metálica. Este último possui espessura de 1 mm, e foi colocado para facilitar o desmolde, acabamento e tornar a espessuras das placas próximas de 2mm.

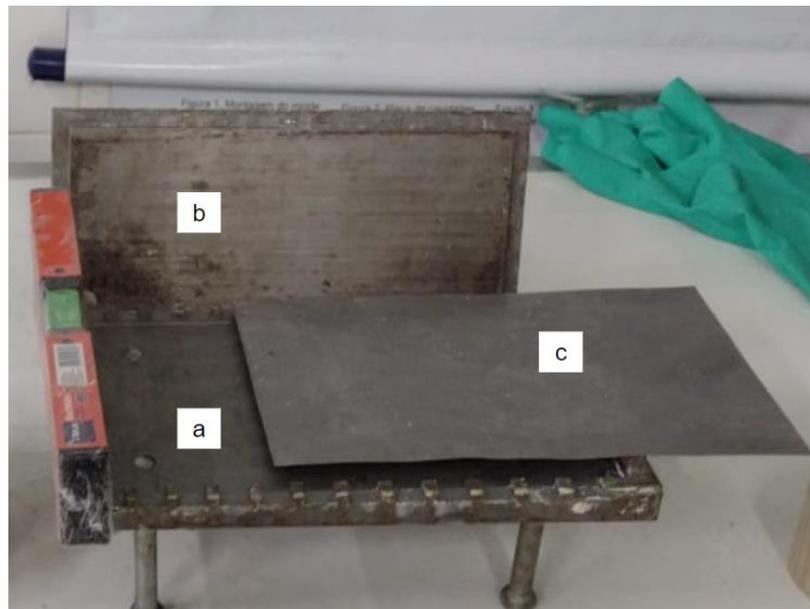


Figura 29 – Partes do Molde: (a) Base; (b) Topo; (c) Placa Metálica – Fonte: (Autor).

Durante o processo de preparação, foi observado que a placa metálica apresentava um empenamento, isso prejudicou a fabricação das primeiras placas, portanto, ela foi substituída por uma folha de mesma espessura de papel paraná.



Figura 30 – Folha de Papel Paraná – Fonte: (Autor).

Foi aplicada a cera desmoldante na superfície interna do molde e no papel. A cera ajuda na remoção da placa após a cura e ajuda no acabamento. Após a aplicação da cera é necessário aguardar de 1 a 2 horas para aplicar uma segunda demão.



Figura 31 – Cera desmoldante Tec Glaze-N – Fonte: (Autor).

É de extrema importância que o molde esteja nivelado, para que a placa fique uniforme, sem grandes variações de espessura. Portanto, a etapa seguinte é nivelar a base do molde. Para isso foi utilizado um nível de bolha.



Figura 32 – Nível de bolha – Fonte: (Autor).

3.1.3 Preparação da Resina Epóxi

A resina epóxi utilizada foi do modelo Redelease 2004 com endurecedor 3154, tem uma proporção de 100:50, ou seja, 100g de resina para 50g de endurecedor. Segundo os dados do fornecedor, deve-se utilizar de 0,2% a 0,5% de anti-bolhas em relação ao peso total da mistura (conforme especificado pelo fabricante – ANEXO II).



Figura 33 – Resina Epóxi: (a) Resina Epóxi 2004; (b) Endurecedor Epóxi 3154; (c) Anti-bolhas para resina epóxi SILADIT-53 FR – Fonte: (Autor).

Para a preparação das resinas, foi utilizado: 1 Becker de 400ml; 1 espátula; equipamentos de proteção como luvas, máscaras e óculos; e 1 balança. Inicialmente foi

preparado o Becker e adicionado 140g de resina, 70g de endurecedor, 1g de anti-bolhas. Totalizando uma mistura de aproximadamente 210,2g.



Figura 34 – Preparação da Resina – Fonte: (Autor).

3.1.4 Fabricação das Placas

Com todas as partes separadas, iniciamos o processo de fabricação das faces. Como mencionado nos tópicos anteriores, o molde deve estar com a cera desmoldante e as fibras desumidificadas. A mistura da resina foi mexida com a espátula por 10 minutos, no Becker, antes da primeira aplicação no molde, depois mais 10 minutos para o restante da aplicação sobre as fibras. Na primeira aplicação foi usado cerca de 30% da resina no molde, em seguida as fibras foram espalhadas sobre o molde de forma uniforme, buscando preencher toda a área disponível da base. Com as fibras já posicionadas, o restante da resina foi aplicado e distribuído uniformemente (figura 35).



Figura 35 – Aplicação da resina no molde – Fonte: (Autor).

Com a resina totalmente distribuída, o topo do molde é encaixado e o peso é colocado sobre o topo, para fazer pressão sobre o molde (figura 36). O molde deve permanecer imóvel até o desmolde, por no mínimo 48 horas, para que a resina seque totalmente. A cura final da resina se dá em 7 dias (conforme especificado pelo fabricante – ANEXO I), porém é possível desmoldar após 48 horas e finalizar a cura em temperatura ambiente por mais 5 dias.



Figura 36 – Aplicação da resina no molde – Fonte: (Autor).



Figura 37 – Placa de Sisal-Epóxi – Fonte: (Autor).

3.1.5 Acabamento das Placas

O processo de acabamento foi realizado após 7 dias da fabricação a última placa., para que a resina realizasse o processo de cura completo.

Nesta etapa, utilizou-se lixas d'água, com a gramatura 180, 400 e 1000. Para o corte das placas, utilizou-se uma esmerilhadeira com disco de corte para materiais compósitos. O objetivo dessa etapa é cortar 9 faces com dimensão de 200mm x 70mm, com espessura entre 2mm e 3mm.



Figura 38 – Placa de Sisal–Epóxi após lixamento – Fonte: (Autor).

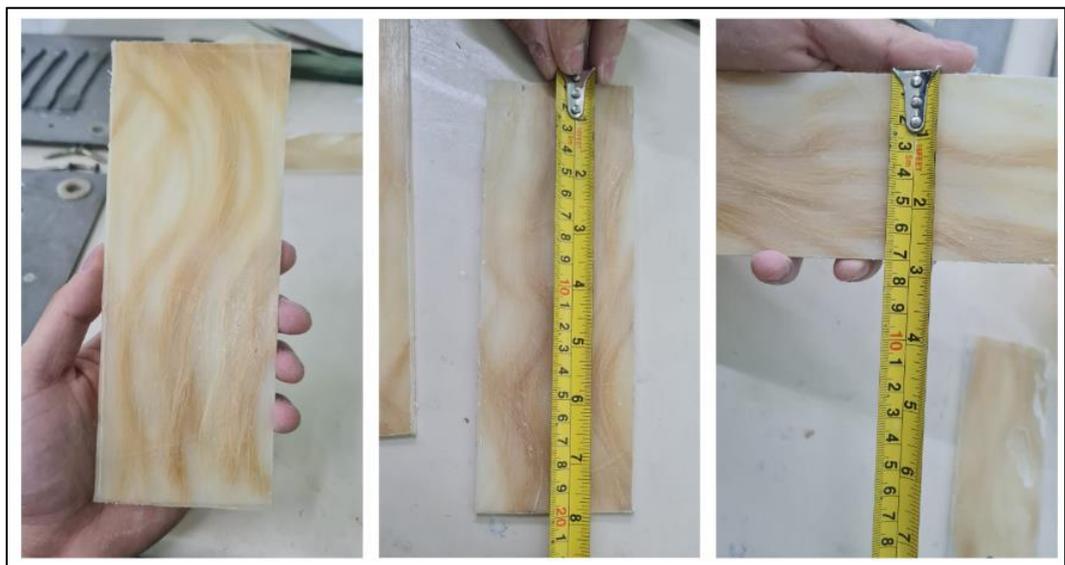


Figura 39 – Faces de Sisal–Epóxi 200mm x 70mm – Fonte: (Autor).

3.2 Impressão 3D

O processo de impressão 3D dos núcleos passa por algumas etapas como: Modelagem dos núcleos, configuração da impressora e do software de fatiamento e por fim, a impressão dos núcleos.

3.2.1 Modelagem dos Núcleos *Honeycomb*

Para o processo de modelagem 3D foi utilizado o software Fusion 360, produto licenciado pela Autodesk de forma gratuita. Para definir as dimensões dos núcleos foi utilizado 3 critérios como: Menor espessura de camada possível, 2 tipos de espessura nos núcleos, mesmo tamanho dos hexágonos para todos os núcleos.

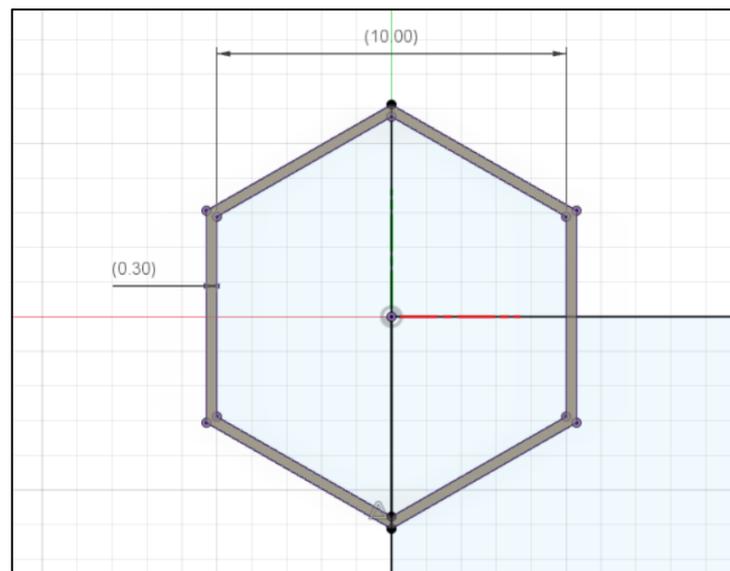


Figura 40 – Dimensões do Hexágono – Fonte: (Autor).

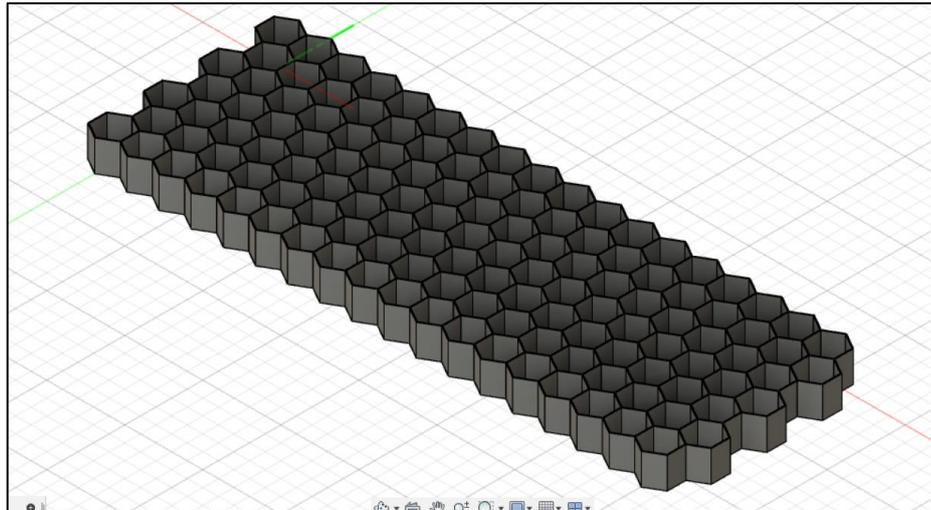


Figura 41 – Modelo 3D de Núcleo Estrutural – Fonte: (Autor).

As dimensões do núcleo foram definidas de forma arbitrária, de modo que o núcleo tenha uma densidade menor que as faces do painel sanduíche. Desse modo, também foi modelado a espessura de parede de $0,3\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$, considerando a expansão horizontal do filamento. A espessura dos núcleos foi definida em dois tipos 10mm e 15mm, baseados nos núcleos de *honeycomb* que são comercializados atualmente (segundo site E-COMPOSITES, 2023). Após modelar todos os núcleos, eles foram ordenados da seguinte forma:

Tipo	Material	Espessura de parede	Altura do Núcleo	Largura Interna do Hexágono
1	PLA	$0,3\text{mm} \pm 0,05$	$10\text{mm} \pm 0,05$	$10\text{mm} \pm 0,05$
2	PETG	$0,3\text{mm} \pm 0,05$	$10\text{mm} \pm 0,05$	$10\text{mm} \pm 0,05$
3	PLA	$0,3\text{mm} \pm 0,05$	$15\text{mm} \pm 0,05$	$10\text{mm} \pm 0,05$
4	PETG	$0,3\text{mm} \pm 0,05$	$15\text{mm} \pm 0,05$	$10\text{mm} \pm 0,05$

Tabela 1 – Parâmetro dos Núcleos – Fonte: (Autor).

3.2.2 Configuração da Impressora 3D

A impressora utilizada foi do modelo CREALITY ENDER 3 V2 (figura 42), na qual possui uma área de impressão de 220mm x 220mm e altura máxima de 250mm.



Figura 42 – Impressora 3D ENDER 3 V2 – Fonte: (Autor).

Para configurar a impressora é necessário calibrar alguns pontos:

- E-STEP – Configuração do motor de passo da extrusora, responsável por movimentar o filamento (do inglês *steps/mm* ou passos/mm).
- Fluxo – Quantidade de material infundida pela extrusora.
- Nivelamento – A mesa deve estar uma superfície plana e deve ser nivelada nos 4 cantos.
- Temperaturas – Temperatura do bico de impressão e da mesa.

Todos os pontos abordados foram calibrados utilizando o PETG e depois o PLA, visto que, cada material terá uma configuração diferente.

3.2.2.1 E-Step

Para calibrar é necessário medir 100mm de filamento antes da extrusora e depois solicitar que a impressora deposite os 100mm. Se o motor de passo estiver calibrado, ele irá consumir os 100mm de filamento, do contrário é necessário realizar um cálculo baseado na diferença entre o real x máquina.

(3.1)

$$E_{novo} = \frac{100 [mm] \cdot E_{Padr\tilde{a}o}}{D_{real}[mm]}$$

Onde D_{real} é a distância real do filamento que foi consumida, $E_{Padr\tilde{a}o}$ é o valor do E-Step padrão da máquina ($97steps/mm$) e E_{novo} o novo valor de E-Step calculado. Durante a calibração, a extrusora consumiu 98,24mm de filamento, aplicando a fórmula teremos que o novo E-Step será de $98,73steps/mm$.

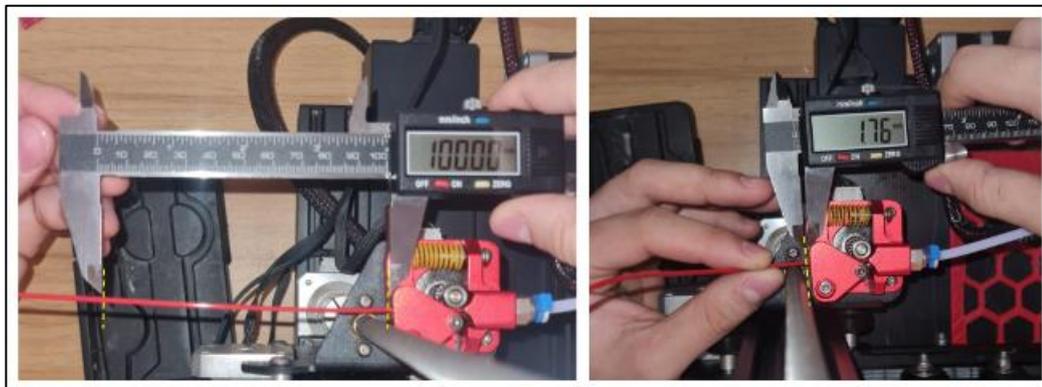


Figura 43 – Calibração do E-STEP – Fonte: (Autor).

$$D_{real} = 100 - 1,76 = 98,24mm$$

$$E_{novo} = \frac{100 \cdot 97}{98,24}$$

$$E_{novo} = 98,73 \text{ steps/mm}$$

3.2.2.2 Fluxo

Para calibrar o fluxo é necessário imprimir um cubo com 20mm de comprimento, altura e largura. Ele deve ser oco (sem preenchimento) e sem camadas superiores e inferiores.

O objetivo dessa calibração é verificar se a espessura de parede está de acordo com o valor desenhado. Para isso, foi usado o software de fatiamento Ultimaker CURA (as configurações do software serão abordadas no tópico 3.2.3).

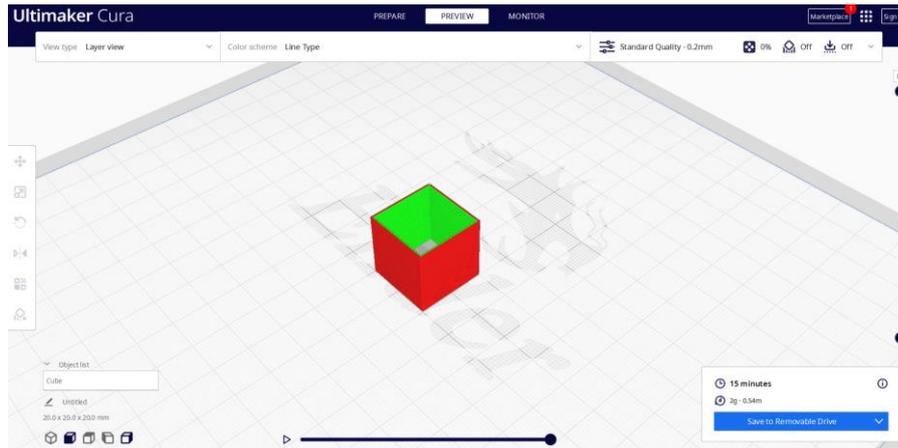


Figura 44 – Cubo de Calibração no Ultimaker CURA – Fonte: (Autor).

Após a impressão, o cubo foi medido e os valores foram comparados com os configurados pelo software. O fluxo padrão do software é de 100%, para calcular um novo fluxo usa-se a seguinte fórmula.

(3.2)

$$f = \frac{\bar{x}l_{real}}{l_{padrão}}$$

Onde o $\bar{x}l_{real}$ é a média dos lados do cubo, $l_{padrão}$ o lado definido pelo software (20mm) e f o fluxo.



Figura 45 – Impressão e medição do cubo de calibração – Fonte: (Autor).

Aplicando os valores a fórmula temos que:

$$\bar{x}l_{real} = \frac{20,06 + 20,29}{2}$$

$$\bar{x}l_{real} = 20,175 \text{ mm}$$

$$f = \frac{20,175}{20} = 100,9\%$$

3.2.2.3 Nivelamento

Para nivelar a mesa, foi necessário direcionar o bico de impressão com altura $Z=0$, nos quatro cantos da mesa. Deve-se passar uma folha de papel entre o bico e a mesa até que o bico tenha um leve atrito no papel, realizando os ajustes de altura necessários com o auxílio da porca de nivelamento.

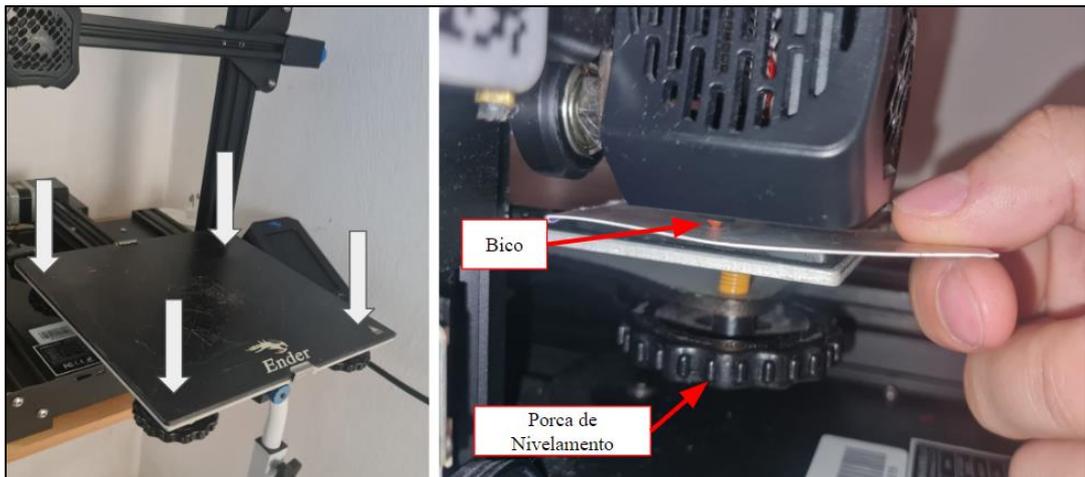


Figura 46 – Nivelamento da Mesa – Fonte: (Autor).

3.2.2.4 Temperaturas

Pra calibrar a temperatura do bico, foi utilizado o modelo de torre de temperatura, na qual consiste em imprimir uma torre com vários tipos de temperatura, até conseguir uma temperatura que a peça obtenha uma boa qualidade. Para a temperatura da mesa foi usado valores baseados na configuração padrão da máquina.

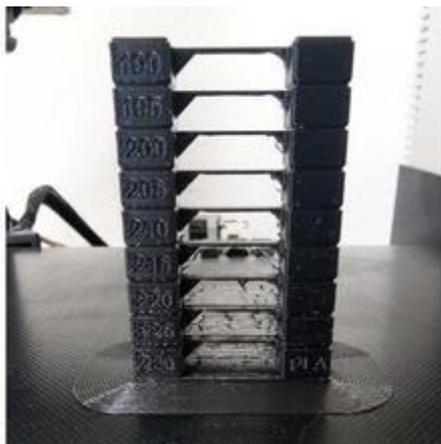


Figura 47 – Exemplo de Torre de Temperatura em PLA – Fonte: (Autor).

Esse processo foi realizado para ambos os filamentos, PETG e PLA. Ao final da calibração, foi definida as seguintes temperaturas.

Material	Temperatura Bico	Temperatura da Mesa
PLA	205°C	65°C
PETG	240°C	70°C

Tabela 2 – Temperaturas de Impressão – Fonte: (Autor).

3.2.3 Configuração do Software de Fatiamento

O software de fatiamento escolhido foi o Ultimaker CURA® o qual é disponibilizado de forma gratuita pela empresa Ultimaker. Dentro deste software foi inserido todos os parâmetros de impressão, calibrados (demonstrados anteriormente) e então os modelos foram impressos.

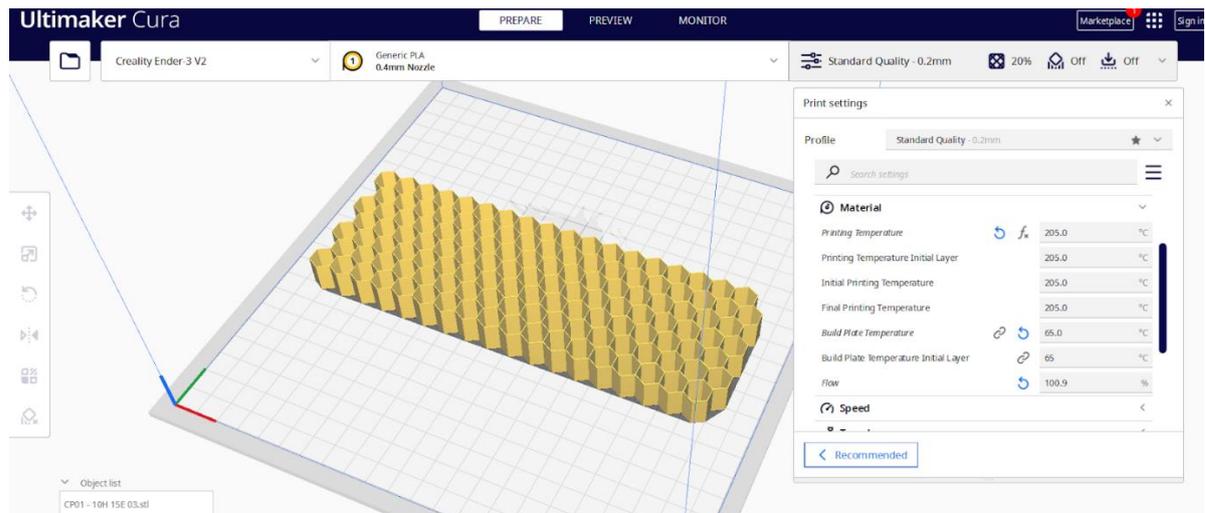


Figura 48 – Configuração do Núcleo PLA no CURA – Fonte: (Autor).

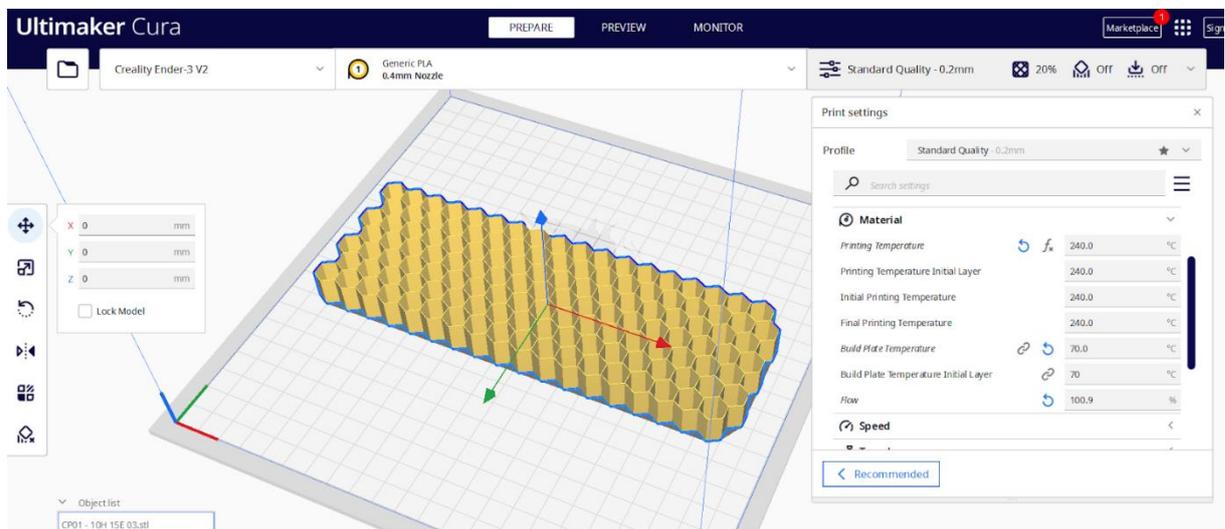


Figura 49 – Configuração do Núcleo PETG no CURA – Fonte: (Autor).

3.2.4 Impressão dos Núcleos *Honeycomb*

Foram impressos quatro núcleos para fabricação dos corpos de prova. Todos os núcleos obedeceram às dimensões dos modelos 3D.

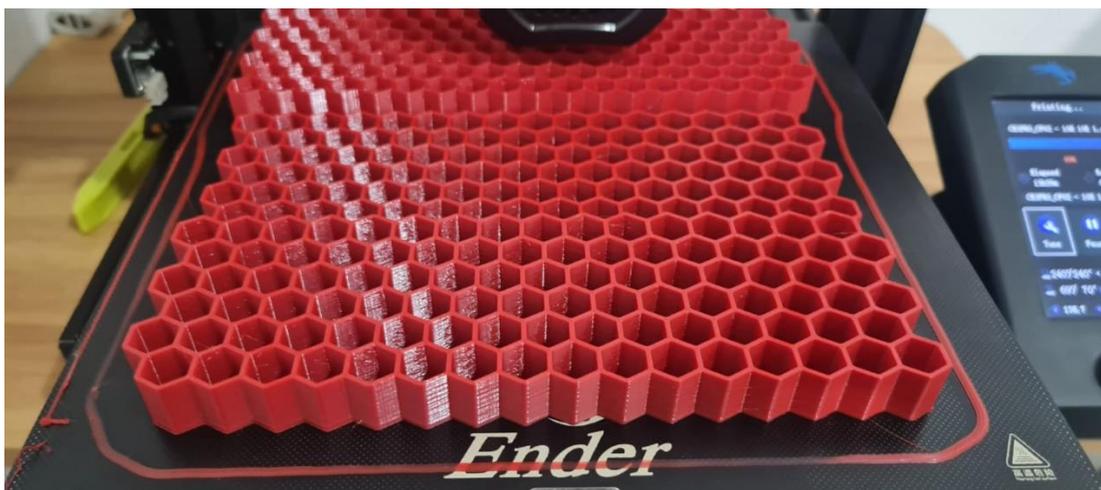


Figura 50 – Núcleo Honeycomb PETG na Impressora 3D – Fonte: (Autor).

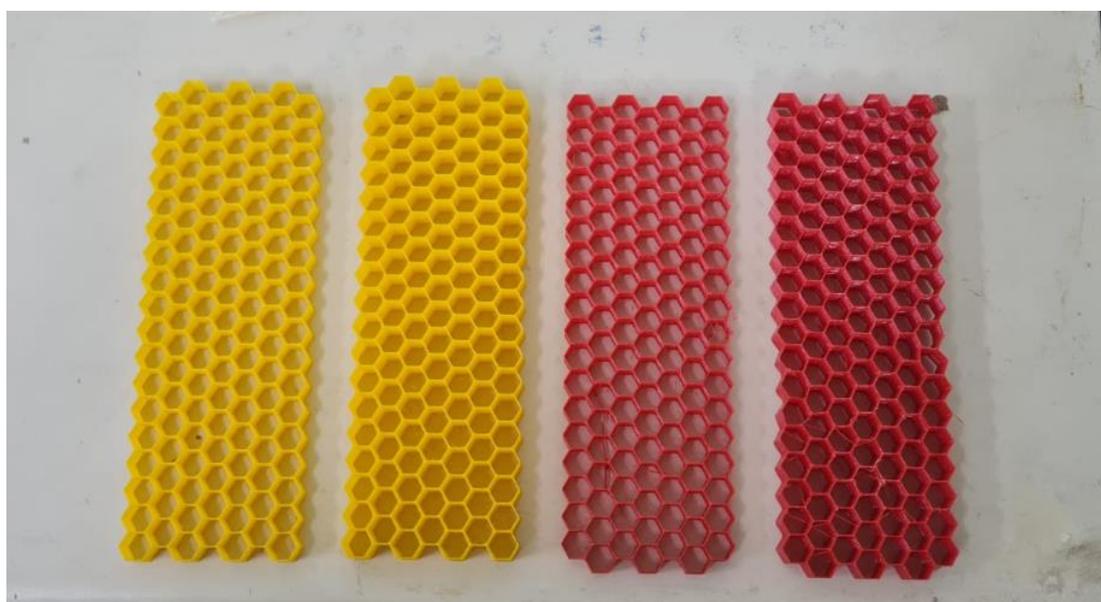


Figura 51 – Núcleos Honeycomb PLA (Amarelo) e PETG (Vermelho) – Fonte: (Autor).

Abaixo (tabela 3) temos a relação com as médias das dimensões de cada núcleo impresso, tempo e peso:

Tipo	Material	Espessura de parede	Altura do Núcleo	Largura Interna do Hexágono	Tempo de Impressão	Peso
1	PLA	0,39mm	9,88mm	10,02mm	124min	10,4g
2	PETG	0,38mm	9,87mm	10,03mm	126min	11,3g
3	PLA	0,38mm	14,93mm	10,02mm	189min	16,2g
4	PETG	0,39mm	14,87mm	10,03mm	193min	17,3g

Tabela 3 – Dados dos Núcleos Impressos – Fonte: (Autor).

3.3 Painéis Sanduíche

Após os processos de fabricação dos compósitos de sisal–epóxi e impressão dos núcleos, a etapa seguinte é a colagem das partes para montar os corpos de prova de painéis sanduíche.

3.3.1 Montagem dos Moldes

Para que não houvesse desperdício de resina e baixa aderência dos núcleos nas faces, foi necessário montar moldes nas laterais das faces. O processo foi bem simples, utilizando papel paraná, os moldes foram cortados e colados nas laterais das faces inferior e superior.

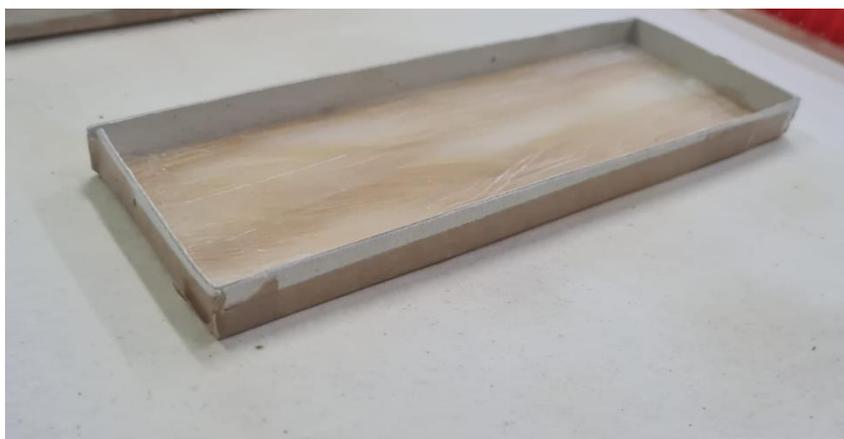


Figura 52 – Moldes Colados na Face Inferior – Fonte: (Autor).

O processo foi dividido em duas partes, primeiramente a colagem do núcleo com a face inferior, e depois a colagem na face superior.

3.3.2 Colagem do Núcleos *Honeycomb*

Para a colagem foi utilizada a mesma resina epóxi 2004 com endurecedor 3154, porém em uma quantidade menor, cerca de 100g de resina para 50g de endurecedor e 0,75g de anti-bolhas. Foi utilizado aproximadamente 55g para cada face em cada etapa de colagem.



Figura 53 – Faces Inferiores com Resina – Fonte: (Autor).

Após despejar a resina sobre as faces, o núcleo foi colocado de forma centralizada e então o peso foi posto sobre os núcleos. O processo foi repedido após 48 horas, para a colagem da face superior.

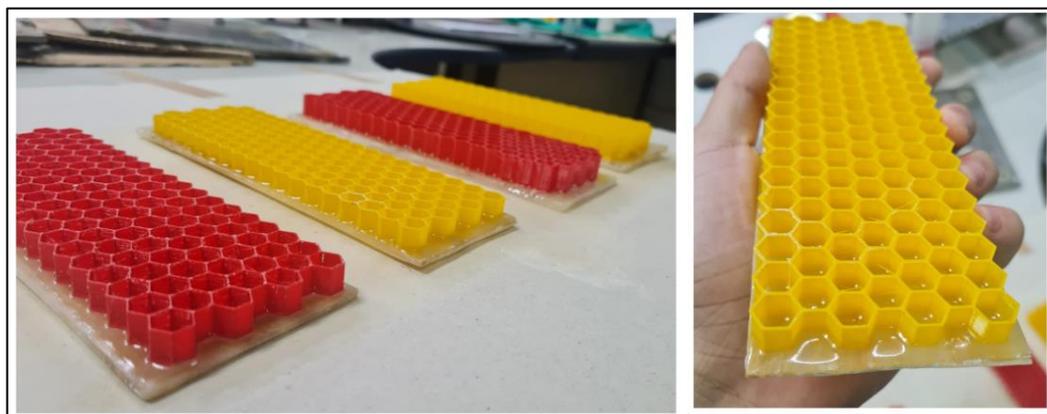


Figura 54 – Núcleos após colagem na face Inferior – Fonte: (Autor).



Figura 55 – Colagem da face Superior – Fonte: (Autor).

Os corpos de prova foram desmoldados e separados para os testes de flexão. Ao final do processo cada núcleo obteve os seguintes pesos:

TIPO	Material	Peso Final
1	PLA	138,3g
2	PETG	139,8g
3	PLA	186,0g
4	PETG	190,8g

Tabela 4 – Peso Final dos painéis sanduíches – Fonte: (Autor).

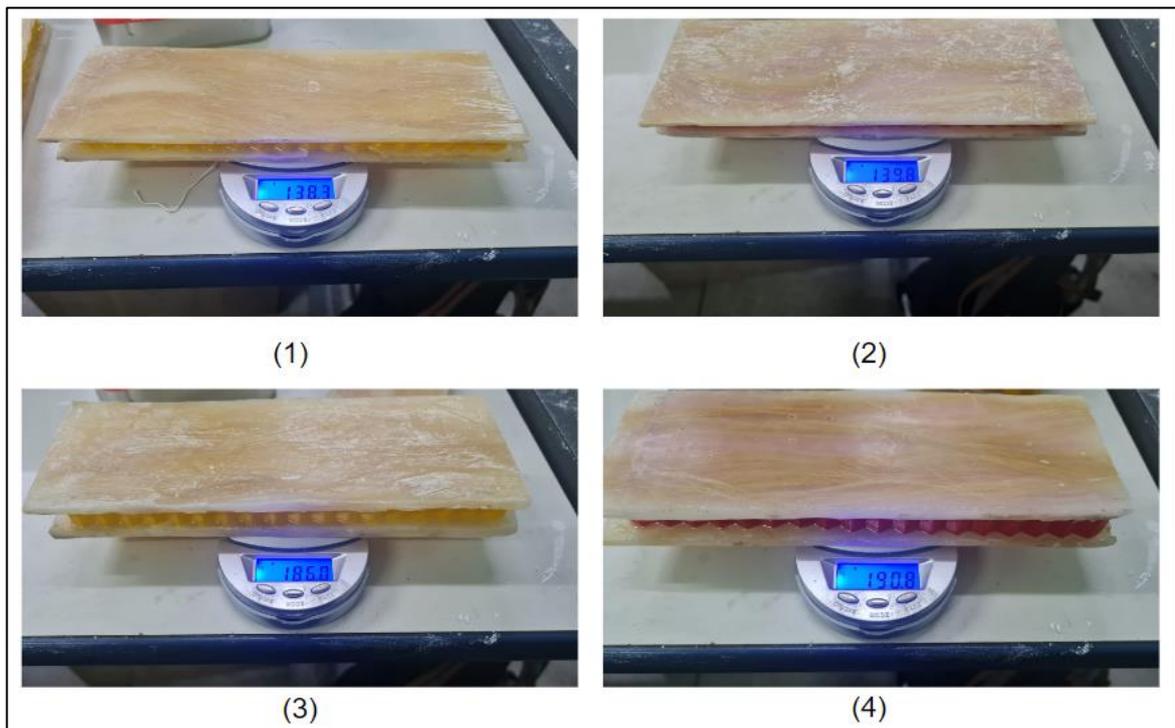


Figura 56 – Pesagem dos Painéis Sanduíche – Fonte: (Autor).

3.4 Ensaios de Flexão

Os ensaios foram realizados na Escola Superior de Tecnologia, no laboratório de P&D, no qual foi disponibilizado o espaço e a máquina para realização dos testes. A máquina utilizada foi do modelo INSTRON 5984.



Figura 57 – Máquina de Ensaio de Flexão – Fonte: (Autor).

3.4.1 Teste nos Corpos de Prova

Para critério de comparação, foi definido cinco corpos de prova, 4 deles com os núcleos, já mencionados, e uma face reforçada com Sisal sem o núcleo. Todos os corpos de prova possuem dimensões de 200mm x 70mm, com duas faces de espessura entre 2mm e 3mm. Os testes nos painéis sanduíche seguiram a norma ASTM C393 de teste de flexão 3 pontos e os testes na face reforçada seguiram a norma ASTM D790, a velocidade de teste foi de 2mm/min e 1mm/min, respectivamente. A distância entre pontos inferiores foi de 100mm.

Corpo de Prova	Tipo	Material do Núcleo	Espessura do Núcleo
1	Face Reforçada	–	–
2	Sanduíche	PLA	10mm
3	Sanduíche	PETG	10mm
4	Sanduíche	PLA	15mm
5	Sanduíche	PETG	15mm

Tabela 5 – Corpos de Prova – Fonte: (Autor).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Principais problemas

4.1.1 Problemas de Impressão 3D

Os problemas mais comuns decorrentes da impressão, são os relacionados a deposição de material. Por conta disso, que as etapas de calibração são necessárias.

Os principais problemas encontrados foram:

- Sub-Extrusão – Quando há falta de deposição de material na peça, ocasionando em fissuras, podendo comprometer a integridade física do material.
- Empenamento – Comumente ligado a alta temperatura da mesa de impressão, esse problema pode causar descolamento da peça na mesa.
- Entupimento do Bico – Ocorre por diversos fatores, mas os principais são falta de limpeza do bico e fluxo de impressão alto.

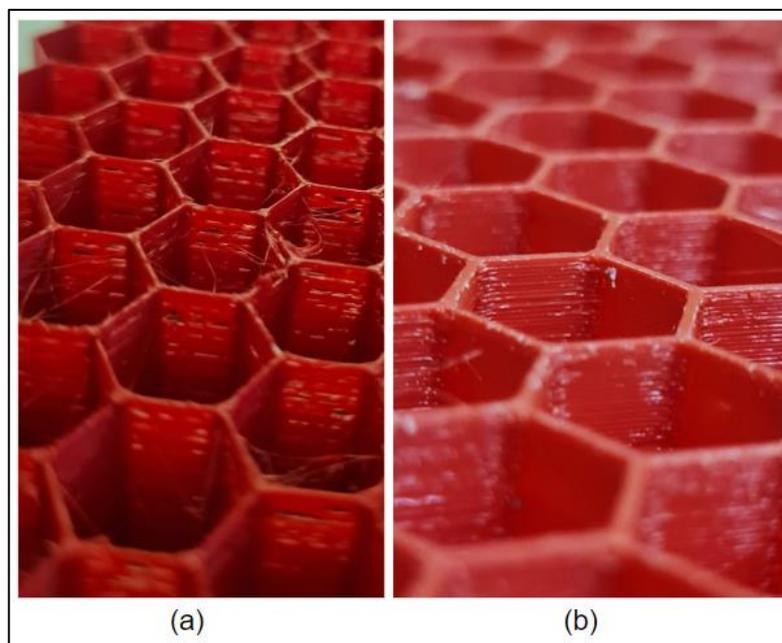


Figura 58 – Problema de Sub-Extrusão: (a) Núcleo com Sub-Extrusão; (b) Núcleo Sem Sub-Extrusão
– Fonte: (Autor).

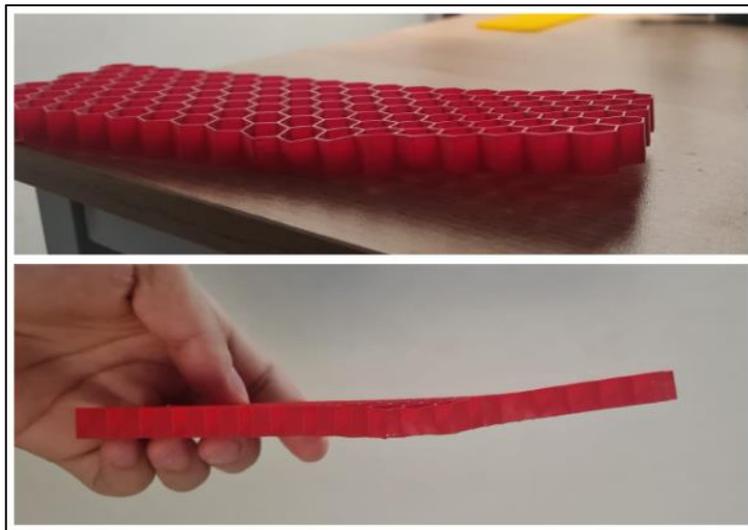


Figura 59 – Núcleo Empenado – Fonte: (Autor).



Figura 60 – Bico Entupido – Fonte: (Autor).

Para evitar os problemas é necessário seguir as etapas de calibração e manter os bicos e mesas sempre limpos.

4.1.2 Problemas na Fabricação das Faces

O processo de fabricação das faces é um processo lento e demanda atenção nas etapas. Os principais problemas encontrados durante o processo foram:

- Bolhas – Causadas pela falta ou pouca adição do anti-bolhas na mistura. Também podem estar ligadas ao desnível na base do molde.

- Variação de espessura das placas – Causado principalmente pelo mal nivelamento do molde e também pela má distribuição da resina.



Figura 61 – Face Reforçada, com Bolhas – Fonte: (Autor).



Figura 62 – Placa com Espessura Menor que 2mm – Fonte: (Autor).

O aspecto inacabado das placas prejudica diretamente o comportamento do compósito sanduíche, pois a distribuição de carga deve ser uniforme ao longo das faces.

4.2 Resultados Preliminares

Os resultados preliminares foram decorrentes dos corpos de prova 1,2,3,4 e 5. Todos nas mesmas condições de teste e mesmo tratamento nas fibras. Tais parâmetros foram importantes para definir e analisar os melhores comportamentos mecânicos entre os dois tipos de materiais utilizados. Neste tópico será abordado os resultados disponibilizados pela máquina de testes de flexão.

4.2.1 Resultado do Corpo de Prova Sem Núcleo

Ao realizar o ensaio de flexão de 3 pontos na face, obteve-se os seguintes resultados:

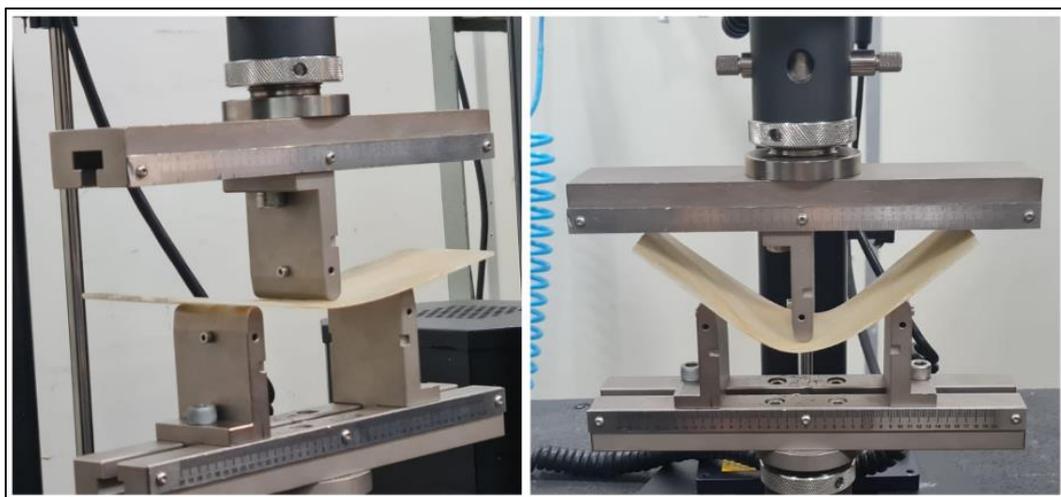


Figura 63 – CP #1: Teste de Flexão – Fonte: (Autor).

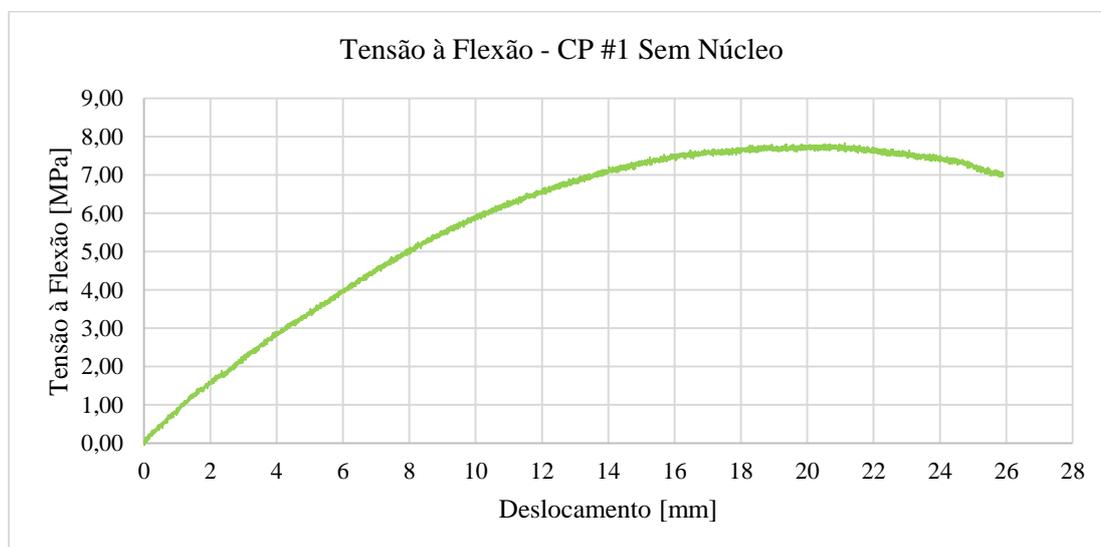


Gráfico 1 – CP #1: Tensão à Flexão x Deslocamento – Fonte: (Autor).

Corpo de Prova	Carga Máxima [N]	Tensão a Flexão em Carga Máxima [MPa]	Deformação à Flexão [%]	Módulo de Elasticidade [Gpa]
1	35,22	7,83	18,25	0,08

Tabela 6 – CP #1: Dados do Teste de Flexão – Fonte: (Autor).

4.2.2 Resultado dos Corpos de Prova Sanduíche

Ao realizar o ensaio de flexão de 3 pontos nos painéis sanduíches (Corpos de prova 2, 3, 4 e 5), obteve-se os seguintes resultados:



Figura 64 – CP #2: Teste de Flexão – Fonte: (Autor).



Figura 65 – CP #3: Teste de Flexão – Fonte: (Autor).



Figura 66 – CP #4: Teste de Flexão – Fonte: (Autor).

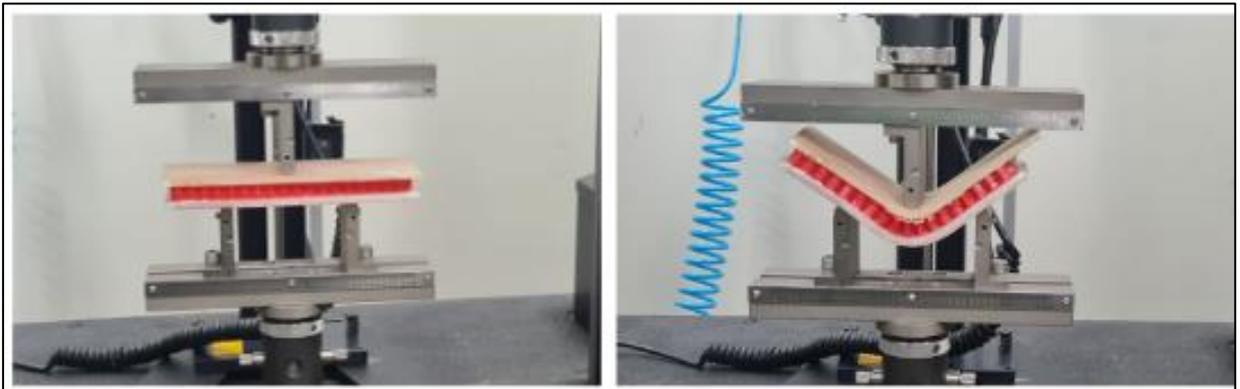


Figura 67 – CP #5: Teste de Flexão – Fonte: (Autor).

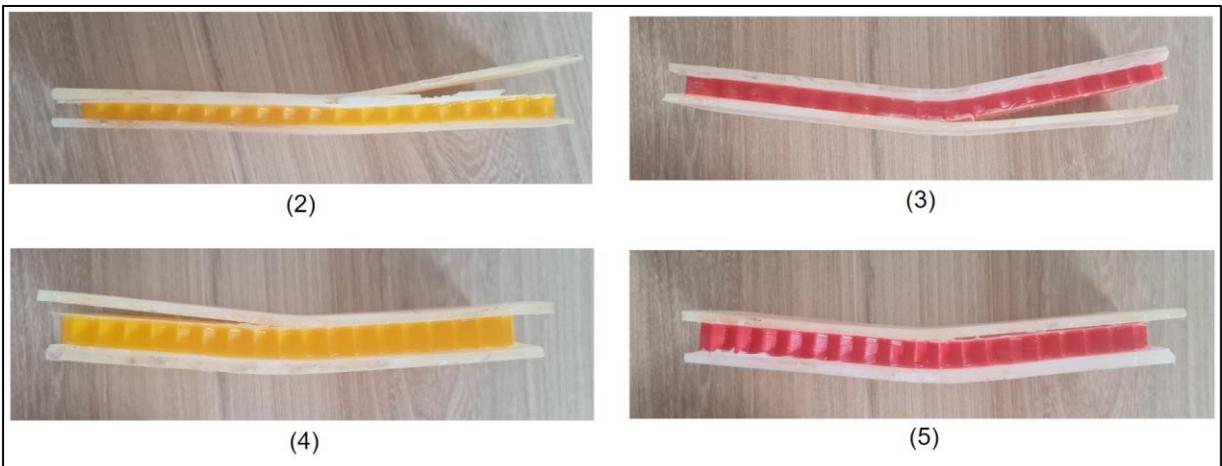


Figura 68 – Corpos de Prova (2-5) Após Testes de Flexão – Fonte: (Autor).

Não houve ruptura nas faces, porém houve descolamento do núcleo, o que pode ter influenciado nos resultados. Com os resultados obtidos dos testes, foi possível analisar e comparar a tensão a deformação dos corpos de prova.

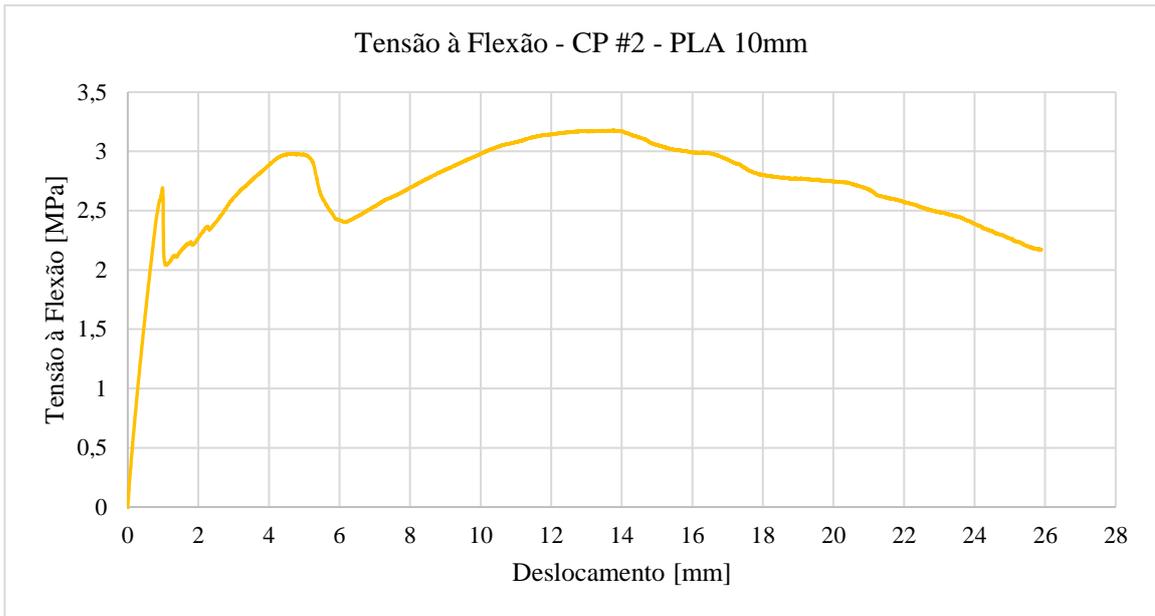


Gráfico 2 – CP #2: Tensão à Flexão x Deslocamento – Fonte: (Autor).

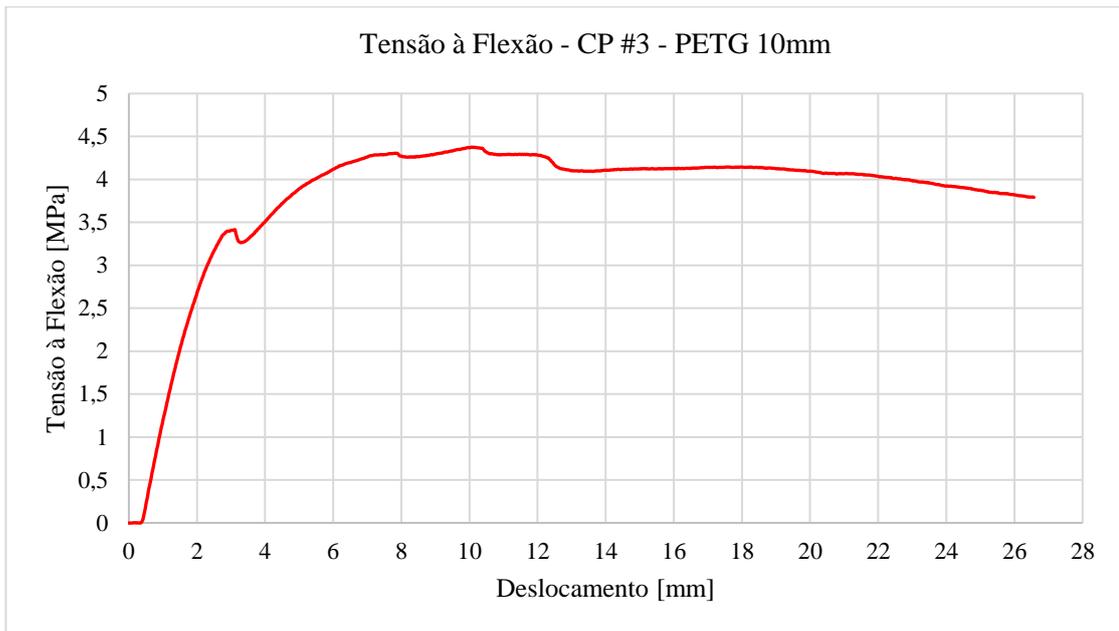


Gráfico 3 – CP #3: Tensão à Flexão x Deslocamento – Fonte: (Autor).

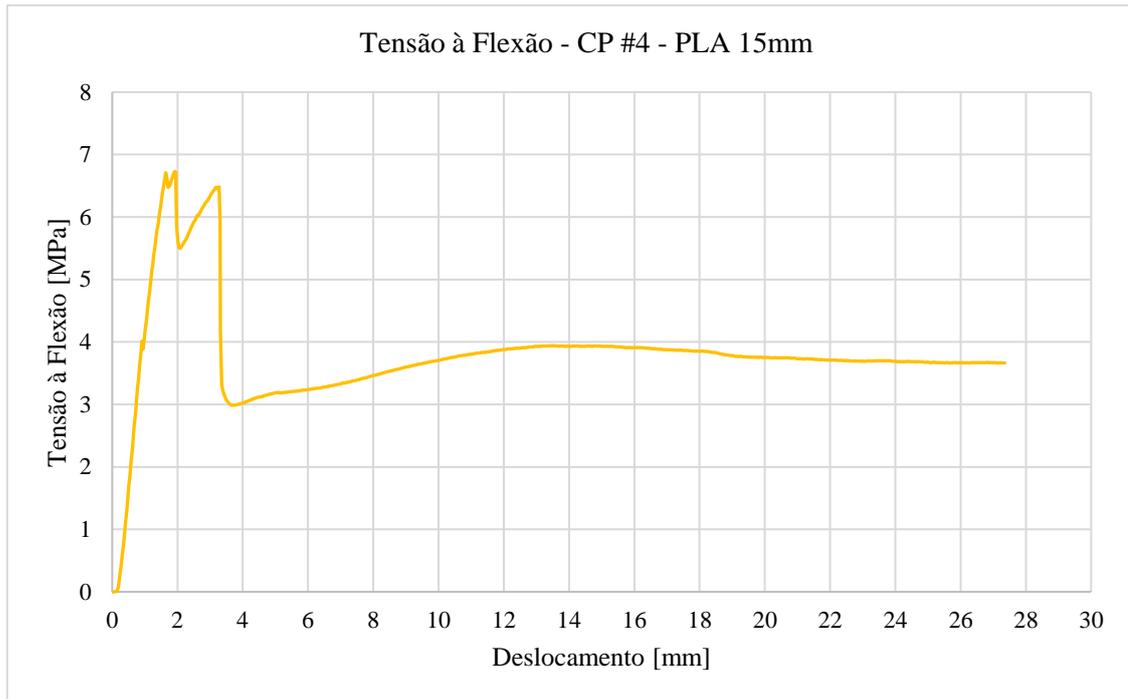


Gráfico 4 – CP #4: Tensão à Flexão x Deslocamento – Fonte: (Autor).

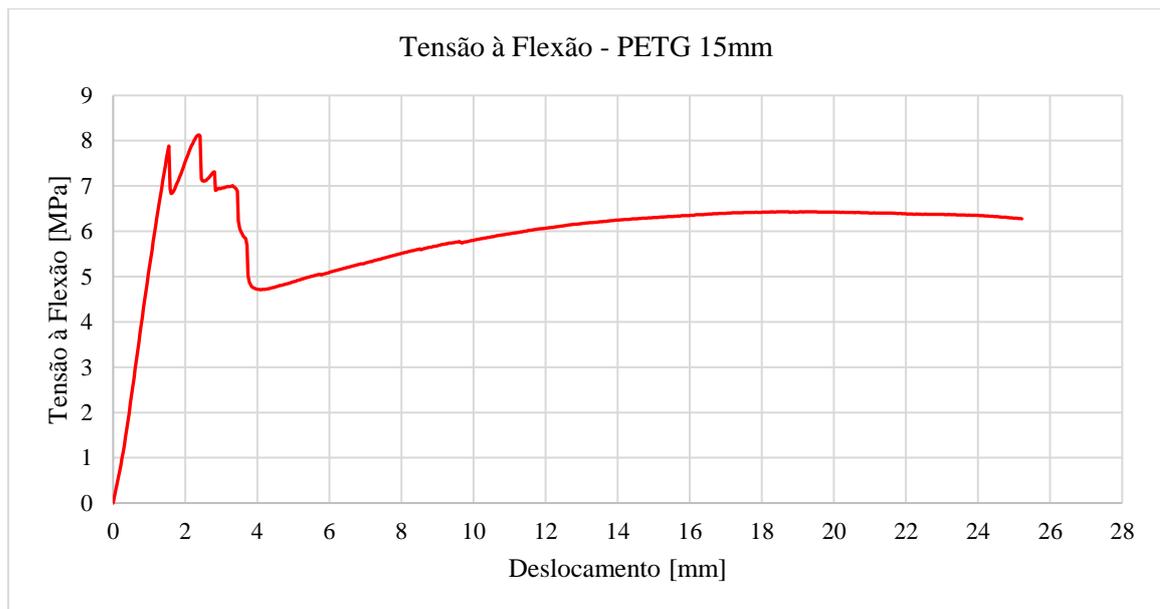


Gráfico 5 – CP #5: Tensão à Flexão x Deslocamento – Fonte: (Autor).

Corpo de Prova	Material do Núcleo	Espessura do Núcleo [mm]	Carga Máxima [N]	Tensão a Flexão em Carga Máxima [MPa]	Deformação à Flexão [%]	Módulo de Elasticidade [Gpa]
2	PLA	10	396,13	3,18	13,32	0,023
3	PETG	10	525,1	4,38	9,68	0,043
4	PLA	15	1443,91	6,73	2,41	0,280
5	PETG	15	1744,62	8,13	3,00	0,342

Tabela 7 – CP (2–5): Dados do Teste de Flexão – Fonte: (Autor).

4.2.3 Análise e Interpretação dos Resultados

Foi disponibilizado os dados brutos dos testes, no qual possibilitou a análise mais detalhada. Realizando a sobreposição dos resultados temos:

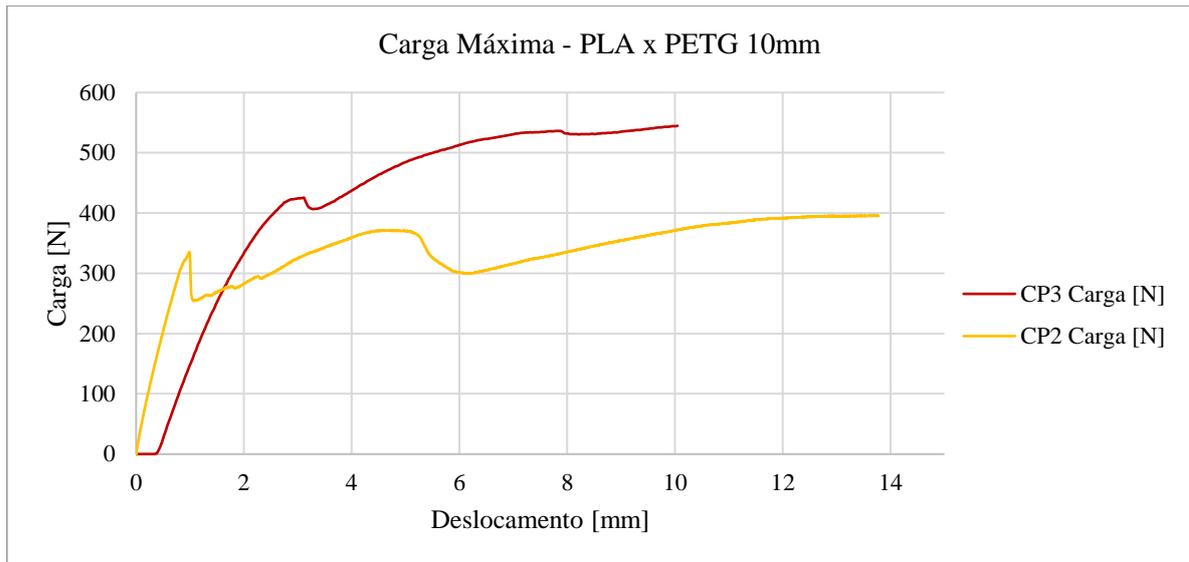


Gráfico 6 – Carga Máxima PLA x PETG 10mm – Fonte: (Autor).

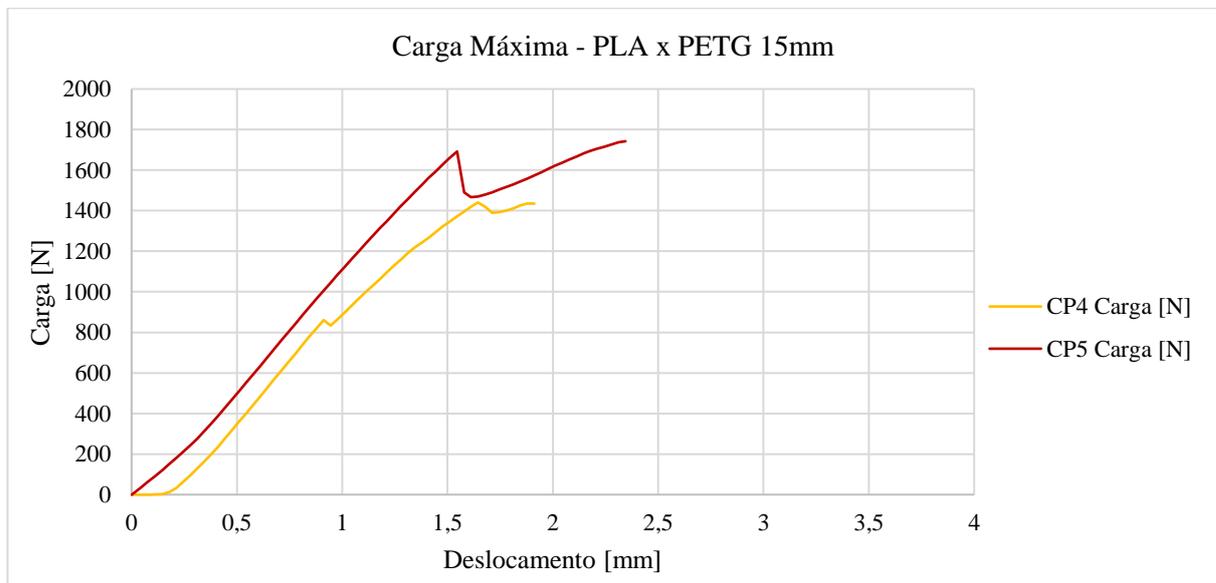


Gráfico 7 – Carga Máxima PLA x PETG 15mm – Fonte: (Autor).

Os dados de Tensão a flexão foram comparados com outros trabalhos realizados e bibliografias. Segundo o trabalho realizado na UEA (AMORIM, 2021), o qual caracterizou

compósitos sanduíches utilizando fibra de sisal e núcleo em PLA, com núcleo de 10mm de espessura, pode-se comprar os resultados:

Referência	Carga Máxima [N]	Tensão a Flexão em Carga Máxima [Mpa]	Deformação à Flexão [%]
Autor	396,13	3,18	13,32
(AMORIM, 2021)	4813	7,81	2,22

Tabela 8 – Comparação dos resultados – Fonte: (Autor /AMORIM, 2021).

Analisando a comparação da tabela 8, podemos observar que são resultados satisfatórios, mesmo levando em consideração que a autora (AMORIM, 2021) utilizou corpos de prova de dimensões 250mm x 155mm x 3mm, e núcleo *honeycomb* com 1mm de espessura de parede, os quais são mais robustos do que os utilizados neste trabalho.

Todos os núcleos tiveram a mesma relação de tamanho dos hexágonos, o que permitiu que todos os corpos de prova tivessem o mesmo preenchimento de núcleo, uma relação entre o volume total disponível e o volume do núcleo. Para calcular a densidade dos núcleos, foi utilizado o auxílio do software Fusion 360, o qual nos oferece o volume total do núcleo. Utilizando a relação de volume e peso temos a densidade dos núcleos.

(4.1)

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(4.2)

$$P = \frac{V_{núcleo}}{V_{CP}}$$

Onde ρ é a densidade, m o peso e V o volume. Para as faces foi considerado o peso e o volume total das faces, e para os núcleos o mesmo critério. O preenchimento P , é uma relação entre o volume total do núcleo ($V_{núcleo}$) e o volume total do compósito (V_{CP}), o qual foi considerado o volume disponível entre as faces, ou seja, caso o núcleo obtivesse 100% de preenchimento, ocuparia todo o volume disponível entre as faces.

Corpo de Prova	Material do Núcleo	Espessura do Núcleo [mm]	Peso Médio das Faces [g]	Peso dos Núcleos [g]	Densidade das Faces [g/cm³]	Densidade dos Núcleos [g/cm³]	Preenchimento do Núcleo [%]
2	PLA	10	44,30	10,40	1,51	1,39	5,4%
3	PETG	10	46,56	11,30	1,58	1,51	5,4%
4	PLA	15	43,12	16,20	1,47	1,44	5,4%
5	PETG	15	48,20	17,30	1,64	1,54	5,4%

Tabela 9 – Relação de Densidade dos Corpos de Prova – Fonte: (Autor).

5 CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo principal criar um compósito sanduíche com núcleo *honeycomb* feito em impressora 3D, utilizando PLA e o PETG. As fibras de sisal contribuem na renda de pequenos produtores, as pesquisas relacionadas às fibras vegetais ajudam ao crescimento tecnológico dos materiais compósitos, viabilizando inclusive, seu uso na indústria.

Os resultados obtidos foram satisfatórios e todos os objetivos propostos foram realizados. Com tudo, analisando os dados obtidos e baseado nas bibliografias destacadas, os painéis sanduíches com núcleos de 10mm de espessura, tiveram a resistência de carga máxima 15 vezes maior que compósito sem núcleo estrutural, já os núcleos com 15mm foram quase 50 vezes mais resistentes. Analisando os resultados em relação as espessuras, temos que os compósitos com 15mm de núcleo suportaram 3,3 a 3,6 vezes mais carga que os núcleos com 10mm.

Os materiais usados nos núcleos foram escolhidos pela da facilidade de impressão e por terem origens ecológicas. O PLA, por ser biodegradável e compostável, pode ser fabricado através do milho, beterraba e mandioca, por serem ricos em amido. Já o PETG pode ser obtido através da reciclagem de garrafas PET, reduzindo os impactos causados pela poluição. Segundo a ABIPET (Associação Brasileira da Indústria PET), as garrafas PET demoram cerca de 400 anos para se decompor no meio ambiente. Só no Brasil, cerca de 1000 toneladas de garrafas PET são recicladas anualmente, isso representa que cerca de 56,4% das garrafas PET descartadas, são recicladas.

Em todos os testes o PETG foi mais resistente, de um modo geral de 21% a 32% mais resistente que o PLA. Apesar de não haver ruptura nos corpos de prova, os núcleos em PETG deformaram de 0,5% a 3,6% menos que o PLA. Os compósitos com PLA foram mais leves, por conta da densidade do núcleo ser 13,8% menor que os núcleos em PETG.

De um modo geral, pode-se concluir que os núcleos em PETG foram melhores, preferencialmente os núcleos de 15mm de espessura. O *Honeycomb* mostrou-se ser um arranjo estrutural muito resistente pouco denso, ocupando somente 5,4% do volume disponível entre as faces, isso permite utilizar em aplicações que possam exigir a passagem de outros materiais internos, como tubulações, cabos. Além disso, podem ser utilizados em aplicações que necessitam de uma baixa densidade, como indústria aeronáutica e naval. Dessa forma, o trabalho teve resultado satisfatório e abre possibilidades de se estudar novos materiais e formas estruturais diferentes.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Utilizar outros arranjos estruturais como, piramidal e retangular.
- Testar com aumento da amostragem de corpos de prova e com testes diferentes como de tração e compressão.
- Utilizar novos tipos de fibra como de Curauá e Juta, comparando o resultado entre as fibras e diferentes tempo de tratamento químico.
- Utilizar materiais de núcleo estrutural diferentes, como o Nylon e o TPU.
- Realizar a fabricação das fibras com infusão a vácuo, para reduzir bolhas e garantir a homogeneidade do compósito.

6 REFERÊNCIAS

3D LAB. **Propriedades Dos Materiais Para Impressora 3d**. Disponível em: <https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>. Acesso em: 10 out. 2022.

ABIPET. Associação brasileira da indústria PET. Disponível em: <https://abipet.org.br/>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2023.

ALMEIDA, M. I. Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção. Instituto Superior Técnico, 2009.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. 2016.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions**. 2016.

BARBOSA, Carlos Alberto C.; ALVES, João Vitor. **Utilização Da Fibra De Sisal No Concreto E Sua Contribuição Aos Esforços Submetidos**. Orientadora: Prof. Ma. Cândida Maria Costa Baptista, 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, São Francisco/2020.

BARNATT, C. **3d Printing: The Next Industrial Revolution**. [S.l.]: ExplainingTheFuture.com Nottingham, 2013.

BITZER, T. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1997.

CALLISTER JR., W.D. **Ciência E Engenharia De Materiais: Uma Introdução**, 7ª edição. Rio de Janeiro, 2008.

CALLISTER, W. D. **Ciência E Engenharia De Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CALLISTER, W. D. **Ciência E Engenharia De Materiais: Uma Introdução**, 5ª edição. Rio de Janeiro, 2002.

CARVALHO, Lais Rocha. **Fabricação e caracterização de estruturas sanduíche tipo colmeia com núcleo impresso por fusão e deposição de material termoplástico**. Monografia – UNB, Brasília, DF 2019.

CRUMP, S. S. **Apparatus And Method For Creating Three-Dimensional Objects**. [S.l.]: Google Patents, 1992. US Patent 5,121,329.

DIODORUS SICULUS. **Library of History**, 1st century BC.

E-COMPOSITES. Núcleo Honeycomb de Aramida. 2023. Disponível em: https://www.e-composites.com.br/honeycomb_aramida/p. Acesso em: 15 de fevereiro de 2023.

EMBRAPA. **Território Sisal**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/atividades-economicas/cultivos/sisal>. Acesso em: 15 out. 2022.

ENGQUIMICASANTOSSP. **Resina Epoxi**. Disponível em: <https://www.engquimicasantosp.com.br/2018/08/resina-epoxi-historia-processo-producao-usos.html>. Acesso em: 30 set. 2022.

FLICKR. **2013 IAA BMW I3 Honeycomb Structure**. 2013. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/54817657@N00/9877572716>. Acesso em: 11 Jan. 2023.

G. Mavko, T. Mukerji, J. Dvorkin. **The Rock Physics Handbook**. Cambridge University Press 2003 (paperback).

GEORGOPOULOS, S. T.; TARANTILI, P. A. AVGERINOS, E.; ANDREOPOULOS, A. G. KOUKIOS, E. G. **Thermoplastic Polymers Reinforced With Fibrous Agricultural Residues Polym. Degrad. STAB.**, v. 90, p. 303–312, 2005.

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular Solids: Structure And Properties**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular Solids: Structure And Properties**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

GIORDANO, C. M.; ZANCUL, E. S.; RODRIGUES, V. P. **Análise Dos Custos Da Produção Por Manufatura Aditiva Em Comparação A Métodos Convencionais**. Revista Produção Online. v. 16, n. 2, p. 499–523, 2016.

HIBBELER, R.C. Resistência dos Materiais – 7ª Edição, 2010.

<https://shop13020.tinerahbek.com/category?name=torre%20de%20temperatura%20impresora%203d>

HUANG, Y.; YOUNG, R. Interfacial Behaviour In High Temperature Cured Carbon Fibre/Epoxy Resin Model Composite. Composites, Elsevier, v. 26, n. 8, p. 541–550, 1995.

LAM, K. L., BAKAR, A. A., ISHAK, A. M., et al., — **Amorphous Copolyester/Polyoxymethylene Blends: Thermal, Mechanical And Morphological Properties**, KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, v.57, n.11, pp. 570–578, Nov. 2004.

LEÃO, Mirtânia Antunes. **Fibras De Licuri: Um Reforço Vegetal Alternativo De Compósitos Poliméricos**. 2008, 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2008.

LIMA, E. G. de; OKIMOTO, M. L. L. R. Revisão Da Aplicação De Produtos Biopolímeros Obtidos Pela Reciclagem De Plásticos Em Design. In: . [S.l.: s.n.], 2009.

LIMA, M. d. Modelo De Fatiamento Adaptativo Para Prototipagem Rápida–Implementação No Processo De Modelagem Por Fusão E Deposição (Fdm). Tese (Doutorado) — Tese de M. Sc., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2009.

LÓPEZ, F. A. et al. **Recovery Of Carbon Fibres By The Thermolysis And Gasification Of Waste Prepreg**. Journal of analytical and applied pyrolysis, Elsevier, v. 104, p. 675–683, 2013.

Manual De Construção De Barcos. O Uso De Honeycombs. Disponível em: <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/o-uso-de-honeycombs/>. Acesso em: 30 set. 2022.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos E Tecnologia**. São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MARSHALL, A. **Sandwich construction**. In: **Handbook of composites**. [S.l.]: Springer, 1982. p. 557–601.

MARTIN, Adriana R.; MARTINS, Maria A.; MATTOSO, Luiz H. C.; SILVA, Odilon R. R. F. **Caracterização Química E Estrutural De Fibra De Sisal Da Variedade Agave Sisalana. Polímeros: Ciência E Tecnologia**, São Carlos, vol. 19, nº 1, p. 40–46, 2009. Disponível em: <https://www.revistapolimeros.org.br/article/10.1590/S0104-14282009000100011/pdf/polimeros-19-1-40.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2022.

MAYLA, Alencar M.; LIMA, Ramsés O. C.; PEREIRA, Alison C. D. **Estudo Comparativo Das Propriedades Mecânicas Do Honeycomb E Divinycell® Aplicados Em Compósitos Sanduíches**. Artigo – UFERSA, Mossoró, Rio Grande do Norte, 2018.

MAZUMDAR, Sanjay K. **Composites Manufacturing: Materials, Product, And Process Engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2001

MEGIATTO JR, Jackson. **fibras De Sisal: Estudo De Propriedades E Modificações Químicas Visando Aplicação Em Compósitos De Matriz Fenoilica**. Orientadora: Prof. Dra. Elisabete Frollini, 2006. Tese de doutorado (Doutorado em Ciências Físico–Químicas) – Universidade de São Paulo, São Carlos/2006.

MISHRA, S.; MOHANTY, A.K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. **A Review On Pineapple Leaf Fibers, Sisal Fibers And Theirs Composites**. Macromol. Mater. Eng., 2004.

MOREIRA, R. **Princípio De Funcionamento De Uma Impressora 3d Fdm**. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321011096_Conceiving_a_non-contact_Measurement_System_for_the_Polymer_Temperature_at_the_Nozzle_Exit_of_a_FDM_3D_Printer/figures?lo=1. Acesso em: 15 out. 2022.

MUELLER, B. **Additive Manufacturing Technologies–Rapid Prototyping To Direct Digital Manufacturing**. Assembly Automation, Emerald Group Publishing Limited, v. 32, n. 2, 2012.

PANDEY, J.K.; AHN, S.H.; LEE, C.S.; MOHANTY, A.K.; MISRA, M. **Recent Advances in the Application of Natural Fiber Based Composites**. Macromolecular Materials and Engineering, v.295, n.11, p.975–89, 2010.

PICK 3D PRINTER. **Petg Vs Pla – Which 3d Printing Material Is Better?** 2022. Disponível em: <https://pick3dprinter.com/petg-vs-pla/#>. Acesso em: 16 out. 2022.

PORTAL GOV. **Sisal Ou Agave (Agave Sisalana)**. Disponível em: <https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/plantas-xerofilas/sisal-ou-agave-agave-sisalana-1>. Acesso em: 15 out. 2022.

JOHN, M.J.; ANANDJIWALA, R.D. Recent developments in chemical modifications and characterization of natural fiber reinforced composites. Polymer composites, v.29, n.2, p.187–207, 2008.

REDE, Francisco G. M. **Desenvolvimento E Caracterização De Estruturas Sanduíche Com Núcleo Honeycomb De Cortiça**. Orientadora: Prof. António Torres Marques, 2006. Tese de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Porto – Portugal/2019.

REDELEASE. **Resina Epóxi Transparente com endurecedor 01 kg**. 2023. Disponível em <https://www.redelease.com.br/resina-epoxi-transparente-com-endurecedor-01-kg.html.html>. Acesso em: 20 de janeiro de 2023.

REVISTA FERRAMENTAL. **Um Pouco Da História Da Manufatura Aditiva**. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/historia-da-manufatura-aditiva/>. Acesso em: 15 out. 2022.

REZENDE, M. C. **Fractografia de Compósitos Estruturais**. Artigo – Divisão de Materiais/IAE/CTA, São José dos Campos/SP, 2007.

SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; NETTO, Aurélio da C. S.; MERLINI, Cláudia. **Estudo Comparativo Entre PETG E PLA Para Impressão 3D Através De Caracterização Térmica, Química E Mecânica**. Artigo – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto (FEUP), Porto, Portugal, 2018.

SATYANARAYANA, K. G. **Studies On Lignocellulosic Fibers Of Brazil. Part I: Source, Production, Morphology, Properties And Applications**. Universidade Federal do Paraná – Brasil/2007.

SILVA, F. G. d. **Estudo Da Concentração De Tensão Dos Laminados Compósitos Sanduíches De Resina Epóxi Com Fibra De Vidro E Núcleo De Honeycomb Carregados À Flexão**. Brasil, 2017.

SREENIVASAN, V.S.; RAVINDRAN, D; MANIKANDA, V.; NARAYANASAMY, R. Influence of fiber treatments on mechanical properties of short Sansevieria cylindrica / polyester composites. Materials & Design, v.37, p111–21, 2012.

STATISTA. **Mercado De Impressão 3d.** Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/315386/global-market-for-3d-printers/>. Acesso em: 30 set. 2022.

THIELEMANS, W.; CAN, E.; MORYE, S. S.; WOOL, R. P. **Novel Applications Of Lignin In Composites Materials.** J. Appl. Polym. Sci., v. 83, p. 323–331, 2002.

TITA, V. Projeto e fabricação de estruturas em material compósito polimérico. [S.l.]: EESC/SMM, 2007.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. **Prototipagem Rápida Como Processo De Fabricação.** In: AHRENS, C. H. et al. Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007. p. 6–7.

WIKIPEDIA. Estrutura De Favo, 2022. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Estrutura_de_favo#CITEREFMacDonald1976 Acesso em: 11 Jan. 2023.

YAMASHITA, M.; GOTOH, M. **Impact Behavior Of Honeycomb Structures With Various Cell Specifications—Numerical Simulation And Experiment.** International Journal of Impact Engineering, v. 32, n. 1, p. 618–630, 2005.

7 APÊNDICES

Configuração dos núcleos estruturais impressos.

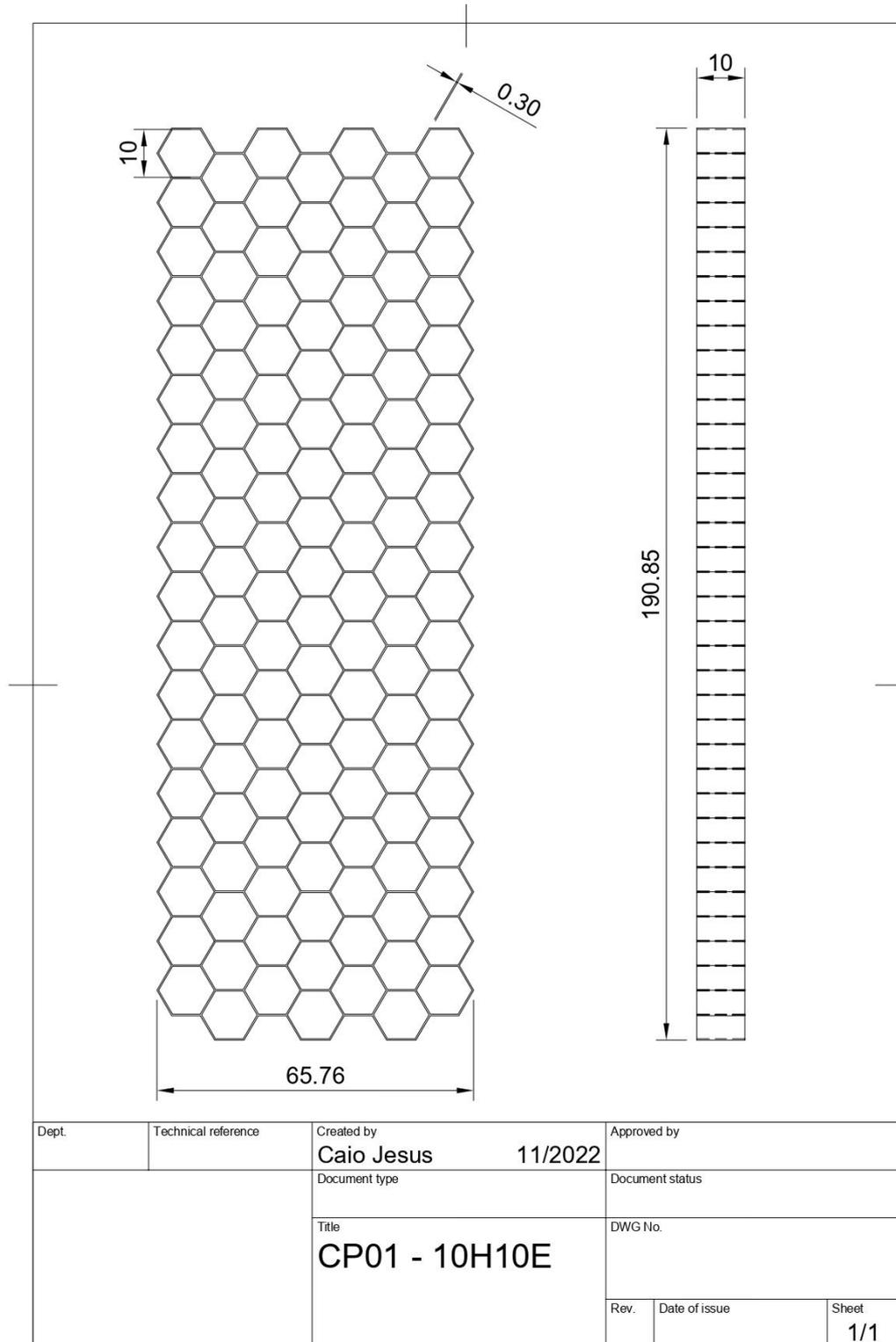


Figura 69 – Desenho Técnico do Núcleo Honeycomb com 10mm – Fonte: (Autor).

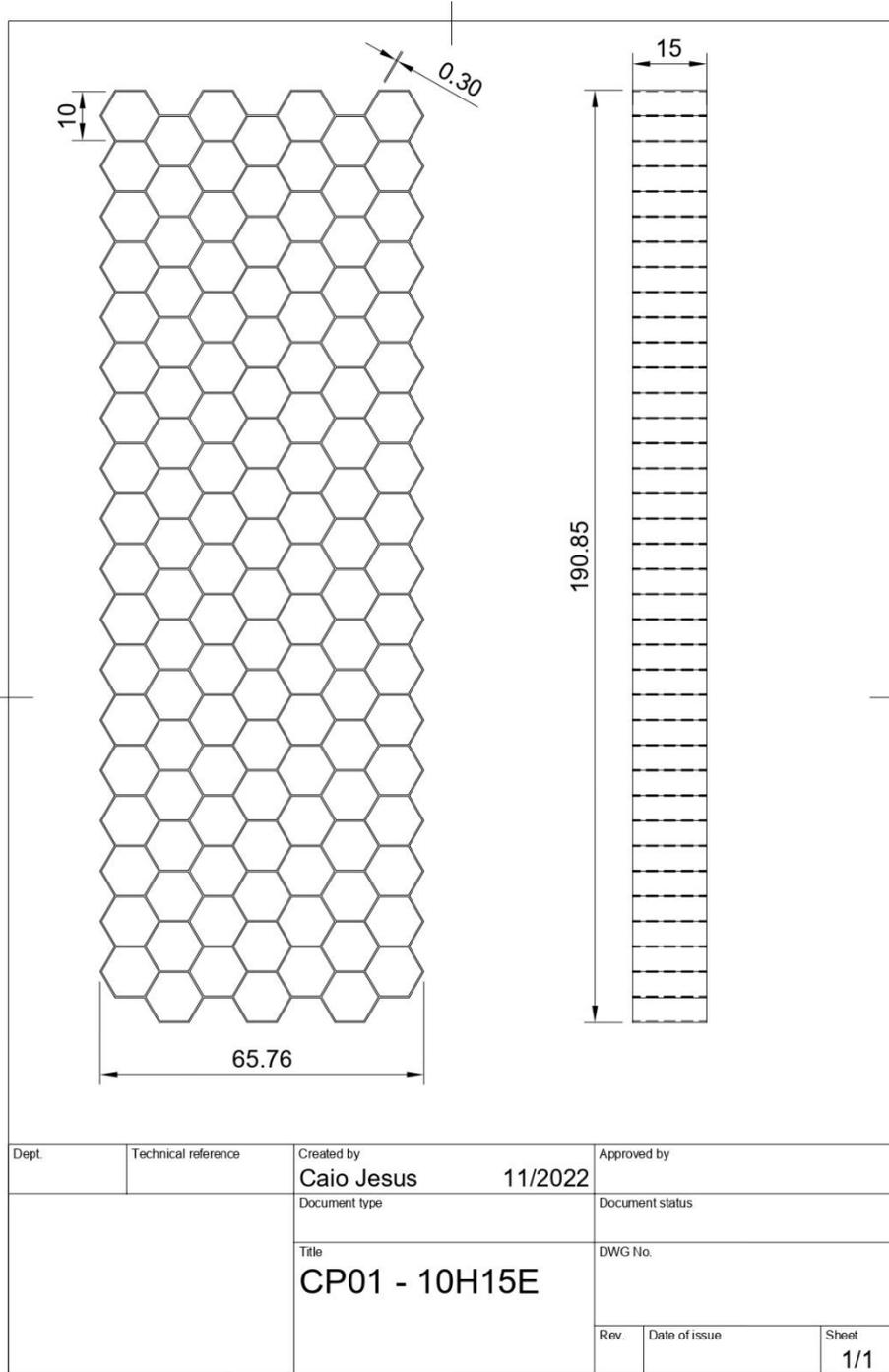


Figura 70 – Desenho Técnico do Núcleo Honeycomb com 15mm – Fonte: (Autor).

8 ANEXOS

8.1 ANEXO I – Datasheet Resina Epóxi 2004

Características dos componentes

	Resina 2004	Endurecedor 3154
Aparência	Líquido incolor viscoso	Líquido levemente amarelado
Viscosidade, 20°C, cPs	600 a 900	200 máx.
Peso Específico, 20°C, g/cm³	1,12 +/- 0,01	1,005 +/- 0,015

Propriedades do sistema não curado

Proporção de mistura (Resina: Endurecedor)	100:50 partes em peso
Temperatura de manipulação (°C)	18 – 30
Tempo de utilização da mistura 100 g (gel time) a 20° C	25 – 35 minutos
Tempo de endurecimento da mistura (100 g em película, 20° C)	4 – 6 horas
Cura total a 20° C	7 dias

Propriedades do sistema curado

Temperatura de Deflexão Térmica(HDT) (°C)	70 – 80
Força de Compressão (psi)	4000
Força de Tensão (psi)	3000 – 6200
Elongação (%)	4,9
Impacto Izod (ft lb/in)	0,3 – 0,6
Dureza Barcol	Mín. 10

Figura 71 – Datasheet da Resina Epóxi 2004 – Fonte: (Redelease).

8.2 ANEXO II – Datasheet do Anti-bolhas SILADIT-53 FR

CARACTERÍSTICAS

Aspecto	líquido incolor
Não voláteis	5 %
Peso específico	0,78 + 0,02 g/l (25°C)
Viscosidade	2,0 a 5,0 cStk (25°C)
Ponto de Fulgor	62 °C
Índice Refrativo	1,450 a 1,460
Solventes Apropriados	hidrocarbonetos

Figura 72 – Datasheet do Anti-Bolhas SILADIT-53 FR – Fonte: (Redelease).