

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA MECÂNICA**

VICTOR WILLIAM FONSECA ARAUJO

**INFLUÊNCIA DOS NÚCLEOS HONEYCOMBS HEXAGONAL, AUXÉTICO E
HÍBRIDO A BASE DE PETG E PLA EM COMPÓSITOS SANDUÍCHE UTILIZANDO
SISAL-EPÓXI.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MANAUS
2023**

VICTOR WILLIAM FONSECA ARAUJO

**INFLUÊNCIA DOS NÚCLEOS HONEYCOMBS HEXAGONAL, AUXÉTICO E
HÍBRIDO A BASE DE PETG E PLA EM COMPÓSITOS SANDUÍCHE UTILIZANDO
SISAL-EPÓXI**

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**

VICTOR WILLIAM FONSECA ARAUJO

**INFLUÊNCIA DOS NÚCLEOS HONEYCOMBS HEXAGONAL, AUXÉTICO E
HÍBRIDO A BASE DE PETG E PLA EM COMPÓSITOS SANDUÍCHE
UTILIZANDO SISAL-EPÓXI**

Honeycombs

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.
Manaus (AM), 31 de Março de 2023

Banca De Avaliação



Prof. Dr. Gilberto Garcia Del Piño

Orientador



Prof. Dr. Antônio Cláudio Kieling

Membro



Prof. Dr. Aristides Rivera Torres

Membro

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.

A663ii Araujo, Victor William
Influência dos núcleos honeycombs hexagonal,
auxético e híbrido a base de PLA e PETG em compósitos
sanduíche utilizando sisal-epóxi : Honeycombs / Victor
William Araujo. Manaus : [s.n], 2023.
70 f.: color.; 31 cm.

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

1. Painel Sanduíche. 2. Núcleos honeycombs. 3.
Sisal. 4. PLA. 5. PETG. I. Pino, Gilberto Garcia Del
(Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III.
Influência dos núcleos honeycombs hexagonal, auxético
e híbrido a base de PLA e PETG em compósitos sanduíche
utilizando sisal-epóxi

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e à minha namorada que sempre me deram apoio, suporte e incentivo durante minha caminhada acadêmica e profissional. E nunca deixam de acreditar nos meus sonhos.

Agradeço também à todos os professores do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Amazonas – UEA; em especial ao meu orientador, professor Gilberto Garcia pelo apoio na confecção deste trabalho. Pelo suporte durante o período de estágio no laboratório de metrologia.

Por fim, agradeço aos amigos que estiveram junto à mim na jornada acadêmica, que de alguma forma me auxiliaram, tanto nos momentos de estudo, quanto no de descontração, para que eu chegasse nesta etapa. Aos amigos, Caio Gabriel, Eber e Willickson pelo apoio na elaboração deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho, foi elaborado a confecção de painéis sanduíches. No total, foram produzidos seis painéis possuindo características diferentes em relação ao núcleo e ao tipo de material utilizado, que futuramente irão vir a se tornar os corpos de provas do experimento realizado.

Em resumo, um painel sanduíche é uma estrutura formado de duas faces e um núcleo ao meio dessas e tem como objetivo principal proporcionar uma estrutura com boas propriedades mecânicas, principalmente em relação a sua rigidez à flexão, possuindo uma densidade baixa. Partindo deste ponto, para as faces, foi utilizado um compósito formado de resina epóxi e sisal. E para os núcleos utilizaram-se honeycombs de diferentes configurações, confeccionados de PETG e PLA na impressora 3D.

O sisal é uma planta cultivada em regiões semiáridas e é utilizado para fins comerciais, sendo os estados da Bahia e Paraíba, no Brasil, os principais produtores. A fibra de sisal é comparada à fibra de vidro em termos de resistência e rigidez, mas é mais barata. Além disso, a fibra de sisal é atóxica e não causa irritabilidade à pele do trabalhador. Todos esses fatores fazem do sisal uma das fibras vegetais mais estudadas.

Foram utilizados 3 tipos de configurações diferentes de honeycombs, sendo eles hexagonal, auxético e híbrido. Os núcleos honeycombs, tem como objetivo darem suporte as faces da estrutura sanduíche, seus arranjos baseados na biomimética, os tornam um material de altas propriedades mecânicas e baixa densidade. Junto a esses núcleos foi testado também os seus comportamentos nos materiais de PETG e PLA.

O material de PETG obteve melhor desempenho quando comparado ao de PLA, com exceção do honeycomb hexagonal de PETG. O honeycomb de melhor desempenho do material PETG teve 8,87% a mais que o de melhor desempenho de PLA. Quanto estruturas dos núcleos, os que se saíram melhor foram os núcleos com configurações estruturais auxético para os de PETG e híbrido para os de PLA.

Palavras-chave: Painéis Sanduíche, núcleos honeycombs, sisal, PLA, PETG, compósitos.

ABSTRACT

In this work, the making of sandwich panels was elaborated. In total, six panels were produced with different characteristics in relation to the core and the type of material used, which in the future will become the test specimens of the experiment carried out.

In summary, a sandwich panel is a structure made up of two faces and a core in the middle of these and its main objective is to provide a structure with good mechanical properties, mainly in relation to its flexural rigidity, having a low density. Starting from this point, for the faces, a composite made of epoxy resin and sisal was used. And for the cores, honeycombs of different configurations were used, made of PETG and PLA in the 3D printer.

Sisal is a plant grown in semi-arid regions and is used for commercial purposes, with the states of Bahia and Paraíba, in Brazil, being the main producers. Sisal fiber is compared to fiberglass in terms of strength and stiffness, but it is cheaper. In addition, sisal fiber is non-toxic and does not irritate the worker's skin. All of these factors make sisal one of the most studied plant fibers.

Three types of different configurations of honeycombs were used, namely hexagonal, auxetic and hybrid. The honeycombs cores, aim to support the faces of the sandwich structure, their arrangements based on biomimetics, make them a material of high mechanical properties and low density. Along with these nuclei, their behavior in PETG and PLA materials was also tested.

The PETG material performed better when compared to PLA, with the exception of the hexagonal PETG honeycomb. The best performing honeycomb of the PETG material had 8.87% more than the best performing PLA. As for the structures of the cores, the ones that fared better were the cores with auxetic structural configurations for PETG and hybrid for PLA.

Keywords: Sandwich panels, honeycomb cores, sisal, PLA, PETG, composites.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Honeycomb hexagonal à esquerda e auxético à direita | 17 |
| Figura 2 - Honeycomb híbrido também chamado de auxetic-honeycomb..... | 17 |
| Figura 3 - As fases de um compósito | 18 |
| Figura 4 - Classificação dos compósitos..... | 19 |
| Figura 5 - Grupo Epóxi..... | 20 |
| Figura 6 - Sisal (Agave sisalana)..... | 22 |
| Figura 7 - Esquema de classificação dos compósitos..... | 23 |
| Figura 8 - Representações esquemáticas dos compósitos reforçados com fibras (a) Partículas aleatórias, (b) descontínuas e unidirecionais, (c) descontínuas e aleatórias, (d) contínuas unidirecionais, (e) contínuas cruzadas, (f) contínuas multidirecionais . | 24 |
| Figura 9 - Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra que está submetida à aplicação de uma carga de tração | 25 |
| Figura 10 - Estrutura esquemática de um painel sanduíche | 25 |
| Figura 11 - -- Representação dos materiais utilizados na construção do Boing 787 .. | 26 |
| Figura 12 -Exemplos de estruturas honeycomb produzidas | 27 |
| Figura 13 - Exemplo de um honeycomb com estrutura hexagonal | 28 |
| Figura 14 - Exemplo de um honeycomb com estrutura Auxética | 29 |
| Figura 15 - Exemplo de um honeycomb híbrido com estrutura Auxética-convencional | 31 |
| Figura 16 - Esquema geral do processo FDM | 32 |
| Figura 17 - Características do PET | 33 |
| Figura 18 - Características do PLA | 34 |
| Figura 19 - a) ensaio de flexão 3 pontos e b) ensaio de flexão 4 pontos..... | 34 |
| Figura 20 - Fluxograma de atividades..... | 37 |
| Figura 21 - Fibras de sisal pré-tratamento químico..... | 38 |
| Figura 22 - Hidróxido de Sódio..... | 39 |
| Figura 23 - (a) Tratamento de 4h e 10% de NaOH; (b) Secagem das fibras já tratadas | 39 |
| Figura 24 - (a) Estufa de secagem; (b) Fibras na estufa..... | 40 |
| Figura 25 - Fibras com massa de 11g após a secagem | 40 |
| Figura 26 - (a) Molde utilizado na confecção do compósito; (b) Molde com papel paraná..... | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 27 - Cera desmoldante | 41 |
| Figura 28 - Resina Epóxi, endurecedor e anti-bolhas. | 42 |
| Figura 29 - Preparação da resina..... | 42 |
| Figura 30 - Primeira aplicação da resina sobre o molde e distribuição das fibras | 43 |
| Figura 31 - Segunda aplicação da resina | 43 |
| Figura 32 - Segunda aplicação da resina | 44 |
| Figura 33 - (a) Retirada do topo do molde; (b) Placa Sisal-Epóxi | 44 |
| Figura 34 - Placas após o corte | 45 |
| Figura 35 - Placa após o lixamento..... | 46 |
| Figura 36 - Dimensões honeycomb hexagonal..... | 47 |
| Figura 37 - Dimensões honeycomb auxético..... | 47 |
| Figura 38 - Dimensões honeycomb híbrido..... | 48 |
| Figura 39 - Impressora 3D ENDER 3 | 49 |
| Figura 40 - Configuração do nucleo hexagonal no Ultimaker | 49 |
| Figura 41 - Configuração do nucleo auxético no Ultimaker | 50 |
| Figura 42 - Configuração do nucleo híbrido no Ultimaker | 50 |
| Figura 43 - Honeycombs impressos em PETG..... | 51 |
| Figura 44 - Honeycombs impressos em PLA..... | 51 |
| Figura 45 - Moldes prontos para o despejo da resina | 52 |
| Figura 46 - Moldes com a resina despejada | 52 |
| Figura 47 - Núcleos de PETG colados na face inferior (b Núcleos de PLA colados na face inferior | 53 |
| Figura 48 - Painéis sanduíches prontos..... | 53 |
| Figura 49 - Painéis sanduíche vista lateral..... | 54 |
| Figura 50 - INSTRON 5984 | 54 |
| Figura 51 - PETG Hexagonal, CP-1. Teste de Flexão..... | 56 |
| Figura 52 - PETG Auxético, CP-2. Teste de Flexão | 57 |
| Figura 53 - PETG Híbrido, CP-3. Teste de Flexão | 58 |
| Figura 54 - PLA Hexagonal, CP-4. Teste de Flexão..... | 59 |
| Figura 55 - PLA Auxético, CP-5. Teste de Flexão..... | 60 |
| Figura 56 - PETG Híbrido, CP-3. Teste de Flexão..... | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Classificação Geral das Fibras Têxteis..... | 21 |
| Tabela 2 - Corpos de provas, tipo, material e massa. | 56 |
| Tabela 3 - Dados obtidos do Ensaio de Flexão..... | 62 |
| Tabela 4- Desempenho de carga maxima em ordem decrescente..... | 65 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Cp-1, Tensão à flexão x deslocamento..... | 57 |
| Gráfico 2 - Cp-2, Tensão à flexão x deslocamento..... | 58 |
| Gráfico 3 - Cp-3, Tensão à flexão x deslocamento..... | 59 |
| Gráfico 4 - Cp-4, Tensão à flexão x deslocamento..... | 60 |
| Gráfico 5 - Cp-5, Tensão à flexão x deslocamento..... | 61 |
| Gráfico 6 - Cp-6, Tensão à flexão x deslocamento..... | 62 |
| Gráfico 7 - Carga máxima PETG - Hexagonal x Auxético x Híbrido..... | 63 |
| Gráfico 8 - Carga Máxima (PLA) - Hexagonal x Auxético x Híbrido..... | 63 |
| Gráfico 9 - Carga Máxima PETG x PLA - Hexagonal, Auxético e Híbrido..... | 64 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------|--|
| ABS | Acrilonitrila Butadieno Estireno (Acrylonitrile Butadiene Styrene) |
| ASTM | ASTM Internacional (American Society for Testing and Materials) |
| CO ₂ | Dióxido de sódio |
| FDM | Modelagem por Deposição Fundida (Fused Deposition Modeling) |
| FE | Elementos Finitos (Finite Element) |
| FEA | Análise de Elementos Finitos (Finite Element Analysis) |
| NaOH | Hidróxido de Sódio |
| NPR | Razão de Poisson Negativa (Negative Poisson's Ratio) |
| PC | Polycarbonato |
| PE | Polietileno |
| PET | Tereftalato de Polietileno |
| PETG | Polietileno Tereftalato Glicol (Polyethylene terephthalate glycol) |
| PLA | Ácido Poliático (Polylactic Acid) |
| PP | Polipropileno |
| PTT | Terpolímero Polipropileno |
| TPE | Elastómeros Termoplásticos |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 1.1 Objetivo Geral..... | 16 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 16 |
| 1.3 Justificativa | 16 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 18 |
| 2.1 Compósitos | 18 |
| 2.1.1 Matriz Polimérica | 19 |
| 2.1.2 Resina Epóxi..... | 20 |
| 2.1.3 Fibra Vegetal | 20 |
| 2.1.4 Fibra de Sisal | 21 |
| 2.1.5 Compósito Reforçado com Fibras Naturais..... | 22 |
| 2.1.6 Estrutura Sanduíche..... | 25 |
| 2.2 Estruturas Honeycombs | 27 |
| 2.2.1 Estrutura Hexagonal | 28 |
| 2.2.2 Estrutura Auxética (<i>Re-entrant</i>) | 28 |
| 2.2.3 Estrutura Híbrida (Auxética-convencional)..... | 29 |
| 2.3 Modelação por extrusão de plástico – FDM..... | 31 |
| 2.3.1 PETG (Polietileno Tereftalato Glicol)..... | 32 |
| 2.3.2 PLA (Ácido Polilático) | 33 |
| 2.4 Ensaio de Flexão | 34 |
| 3 METODOLOGIA..... | 37 |
| 3.1 Confeção do compósito..... | 37 |
| 3.1.1 Preparação das Fibras | 38 |
| 3.1.2 Preparação do Molde | 40 |
| 3.1.3 Preparação da Resina | 41 |
| 3.1.4 Junção da resina e fibras | 42 |
| 3.1.5 Acabamento da placa..... | 45 |
| 3.2 Confeção dos Honeycombs..... | 46 |
| 3.2.1 Desenho do núcleo honeycomb | 46 |
| 3.2.2 Impressão do honeycomb | 48 |
| 3.3 Confeção do painel sanduíche | 51 |
| 3.3.1 Preparação dos moldes das placas | 51 |
| 3.3.2 Junção dos núcleos e das placas | 52 |
| 3.4 Ensaio de Flexão..... | 54 |
| 3.4.1 Ensaio nos corpos de prova | 55 |

| | |
|---|----|
| 4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS..... | 56 |
| 4.1 Resultados dos corpos de prova..... | 56 |
| 4.1.1 Corpo de prova 1 – PETG Hexagonal..... | 56 |
| 4.1.2 Corpo de prova 2 – PETG Auxético..... | 57 |
| 4.1.3 Corpo de prova 3 – PETG Híbrido..... | 58 |
| 4.1.4 Corpo de prova 4 – PLA Hexagonal..... | 59 |
| 4.1.5 Corpo de prova 5 – PLA Auxético..... | 60 |
| 4.1.6 Corpo de prova 6 – PLA Híbrido..... | 61 |
| 4.2 Análise dos Resultados..... | 62 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 66 |
| REFERÊNCIAS..... | 68 |

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos de matriz polimérica têm a vantagem de serem facilmente moldados e fabricados em grandes quantidades, tornando-os uma escolha popular para muitas aplicações em engenharia. (A.R BUNSELL, 2005). O setor brasileiro de materiais compósitos em 2013 faturou R\$ 3,250 bilhões, alta de 9% em comparação ao ano anterior. No período, foram processadas 210.000 toneladas, volume 1,7% superior ao registrado em 2012 (ALMACO, 2014).

Nos últimos anos, observa-se um aumento de estudos que focam na substituição de fibras sintéticas por naturais em compósitos poliméricos. Estudos demonstram que compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais são adequados a um grande número de aplicações e seu uso é vantajoso em termos econômicos e ambientais (SILVA, 2010).

A aplicação industrial de compósitos nas diversas áreas vem crescendo consideravelmente em virtude do aperfeiçoamento nos processos de produção, bem como da concepção de novos agentes de reforço e estruturas sanduíches. Destaca-se, também, a evolução do uso de compósitos à base de fibras naturais em elementos estruturais submetidos a pequenos esforços. Isso porque as fibras naturais, em geral, apresentam propriedades mecânicas inferiores às das fibras manufaturadas, restringindo o seu uso em elementos estruturais de desempenho limitado (CORREIA, 2011).

A manufatura aditiva é uma tecnologia revolucionária que está mudando a forma como as coisas são projetadas, fabricadas e entregues. (Chuck Hull, inventor da impressora 3D).

A impressão 3D FDM oferece aos designers e fabricantes uma maneira mais rápida e econômica de criar protótipos e produtos personalizados com uma precisão excepcional." (Scott Crump, inventor da tecnologia FDM)

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

Neste contexto o uso de estruturas honeycomb para a finalidade de absorção de impacto se mostra adequada. Uma prova disso é que os pés do módulo de pouso da Apollo 11 utilizavam estruturas honeycomb quebráveis de alumínio como absorvedores de impacto (ROGERS, 2006).

As células dos honeycombs podem ter vários tipos de configuração, dentre elas podemos citar como exemplo as mais comuns sendo as células hexagonais, triangulares e quadradas. Todas elas possuem boas propriedades mecânicas com baixas densidades, resistência ao impacto e à fadiga.

Neste trabalho será mostrado um estudo comparativo de uma avaliação experimental em estruturas sanduíches, tendo como núcleos de honeycombs as configurações hexagonal, auxético e híbrido. O material impresso, a base de PETG e PLA, resina epóxi como o revestimento do compósito e matriz de fibra de sisal.

1.1 Objetivo Geral

Analisar os resultados comparativos dos núcleos honeycombs hexagonal, auxético e híbrido, feitos a base de PETG e PLA, usados em estruturas sanduíches com compósito sisal-epóxi e discorrer sobre qual desses tiveram melhor desempenho.

1.2 Objetivos Específicos

- Confeccionar compósitos reforçados com fibra de sisal e resina epóxi;
- Desenhar e confeccionar núcleos honeycombs hexagonais, auxéticos e híbridos a base de PETG e PLA através de uma impressora 3D;
- Confeccionar painéis sanduíches com os compósitos e núcleos fabricados para usá-los como corpo de prova;
- Realizar o ensaio de flexão nos corpos de prova de acordo com a norma ASTM C393;
- Analisar a influência das diferentes disposições dos núcleos honeycombs fabricados quanto ao ensaio de flexão neles realizados.

1.3 Justificativa

A biomimética é a aplicação do conhecimento obtido pela observação da natureza e sua adaptação em projetos humanos. (Otto Schmitt). A biônica é uma fonte inesgotável de inspiração para a engenharia, pois a natureza já encontrou soluções para muitos dos problemas que os engenheiros estão tentando resolver. (Michael Graetzl).

Estruturas honeycombs, inspiradas em favos de abelhas, cuja aplicações podem ser encontradas amplamente difundidas em vários campos, incluindo arquitetura, transporte, engenharia mecânica, engenharia química, nanofabricação e, recentemente, biomedicina. Um grande desafio neste campo é entender as propriedades únicas das estruturas honeycomb, que dependem de suas configurações, escalas e materiais utilizados.

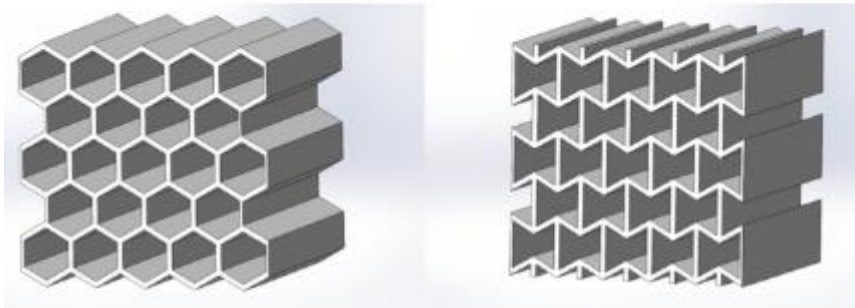


Figura 1 - Honeycomb hexagonal a esquerda e auxético a direita - Fonte: (Materials and Design, 2017)

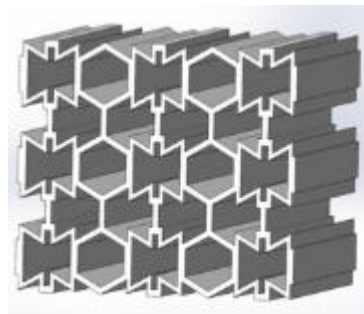


Figura 2 - Honeycomb híbrido também chamado de auxetic-honeycomb - Fonte: (Materials and Design, 2017)

Dessa forma, o estudo elaborado neste trabalho, entre as estruturas honeycombs mostradas nas (Figura 1) e (Figura 2) acima, permitirá obter dados mecânicos e comparação de suas propriedades mecânicas. Como também, analisar em qual material, PETG e PLA, os resultados dos compósitos sanduíche obtiveram melhores desempenhos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O uso de matérias-primas de fontes renováveis tem sido objetivo de diversos estudos e pesquisas, pois tais materiais apresentam um grande potencial em diversas aplicações, tais como, por exemplo, a indústria têxtil, na indústria automobilística, na área de revestimento interno de automóveis, ônibus e caminhões e construção civil. Além disso, nos últimos anos, o uso de fibras naturais como curauá, coco, sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar, juta e abacaxi como reforço em materiais poliméricos teve um acelerado crescimento. (GOMES, 2003)

2.1 Compósitos

Materiais compósitos são materiais resultantes da combinação de dois ou mais componentes, que diferem nas propriedades físicas e químicas de cada um e são imiscíveis. A finalidade da combinação é prover características específicas para o material resultante, para cada tipo de aplicação desejada (CARVALHO, 2005).

A formação de um compósito é dada pelas fases denominadas de matriz, que é o material que confere a estrutura do compósito, e reforço, ou fase dispersa, que tem como função elevar determinadas propriedades, sendo que a matriz preenche as lacunas estabelecidas entre os materiais de reforço, mantendo-os em suas posições relativas, enquanto estes garantem as propriedades químicas e físicas do compósito (CALLISTER, 2016).

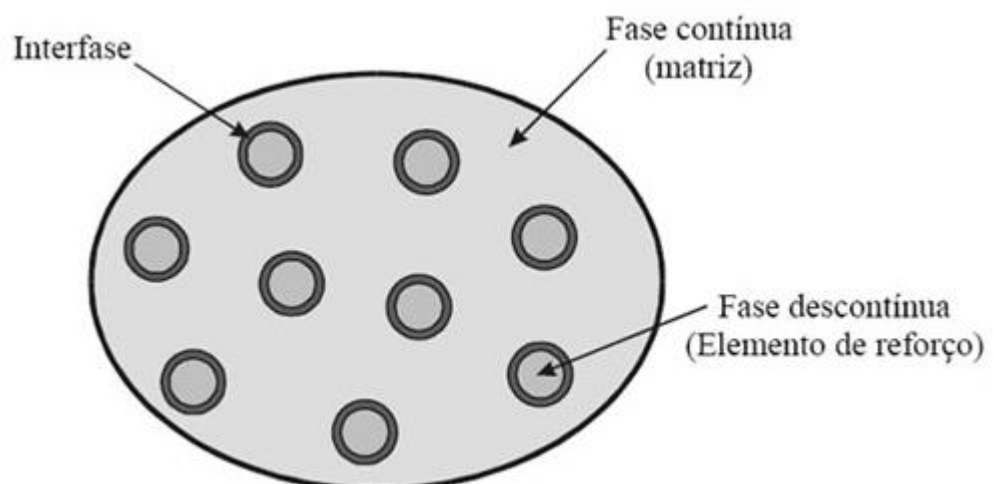


Figura 3 - As fases de um compósito – Fonte: (Daniel e Ishai, 2006)

Um esquema simples para a classificação dos materiais compósitos pode ser visto na Figura 4, que apresenta quatro divisões principais:

- Compósitos reforçados com partículas,
- Compósitos reforçados com fibras,
- Compósitos estruturais,
- Nanocompósitos.



Figura 4 - Classificação dos compósitos - Fonte: (Ciência dos Materiais, 2014)

2.1.1 Matriz Polimérica

Os materiais compósitos de matriz polimérica surgiram, na sua vertente estrutural, em meados do século XX. Este tipo de materiais combina fibras resistentes e rígidas (de vidro, carbono e aramida) com uma matriz plástica adesiva macia e relativamente dúctil (que pode ser poliéster ou epóxi).

Os polímeros permitem grande variedade na fabricação de matrizes, sendo por isso, o material mais utilizado na confecção de compósitos, com destaque para as resinas. As resinas que são usadas como matrizes em compósitos reforçados com fibras podem ser classificadas em dois tipos, termorrígidas e termoplásticas, de acordo com a influência da temperatura nas suas características (PILATO & MICHNO, 1994).

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).

2.1.2 Resina Epóxi

Embora existam vários tipos de resinas usadas em compósitos para indústria, a maioria das partes estruturais é feita principalmente com resina termofixo, ou seja, que necessitam de uma reação de cura. Dentre essas resinas a poliéster, vinil éster e epóxi são as mais utilizadas (Sobrinho, 2005).

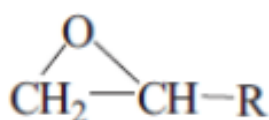


Figura 5 - Grupo Epóxi – Fonte: (JIN et al., 2015).

Também conhecidos por termofixos, termoendurecidos, polímero em rede ou em retículo, são plásticos que, quando sujeitos a um aumento substancial da temperatura e marginal da pressão, amolecem e fluem, adquirindo a forma do molde, reagem quimicamente, formando ligações cruzadas entre cadeias e se solidificam. Subseqüentes aumentos de temperatura e pressão não têm mais influência, tornando-os materiais insolúveis, infusíveis e não-recicláveis (GOMES, 2020).

2.1.3 Fibra Vegetal

As fibras podem ser classificadas em fibras naturais e fibras manufaturadas, possível dividir as últimas em artificiais e sintéticas. As fibras naturais podem ser classificadas em vegetais (compostas por celulose, hemicelulose e lignina), animais (originárias dos pelos ou da seleção animal, que são compostas por proteína) e minerais (retiradas de certos tipos de rochas). Na tabela 1 é possível observar a classificação das fibras têxteis.

| | | |
|---------------|-------------|---|
| Naturais | Animal | Seda, Lã, Pêlo. |
| | Vegetal | Semente (Algodão, Kapok, Coco, etc.). Caule (linho, Juta, Rami, etc.). Folha (Abacaxi, Tenax, Sisal, Curauá, etc.). |
| | Mineral | Amianto |
| Manufaturadas | Sintéticas | PP, PE, aramida, poliéster, náilon, acrílico, etc. |
| | Artificiais | Alginato, borracha, viscose, acetato, tênsel, etc. |
| | Outras | Carbono, Vidro, metálica, cerâmica |

Tabela 1 - Classificação Geral das Fibras Têxteis Fonte: LADCHUMANANANDASIVAM, 2002.

O emprego de fibras vegetais para o reforço de resinas poliméricas não é novo; contudo, as fibras de vidro e cargas minerais ainda são bastante utilizadas como materiais de reforço com alto desempenho, devido às fibras vegetais possuírem grande volume (baixa densidade aparente), pouca estabilidade térmica e alta absorção de umidade (LEÃO, 2008).

Entender as características de degradação de fibras vegetais durante o aumento temperatura é essencial para a seleção adequada dos materiais com propriedades aprimoradas em aplicações específicas, tais como na incorporação em matrizes termoplásticas que geralmente envolvem temperaturas de processamento bastante elevadas. A estabilidade térmica pode ser considerada como a habilidade de um material manter suas propriedades físicas e mecânicas como resistência, dureza e elasticidade numa determinada temperatura (DEEPA et al. 2011).

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*), família Agavaceae é uma planta utilizada para fins comerciais. O *Agave sisalana* é cultivado em regiões semiáridas. No Brasil, os principais produtores são os estados da Bahia e Paraíba, especialmente a Bahia, onde está localizado o 6 maior polo produtor e industrial do sisal no mundo, que são as cidades de Valente e Conceição do Coité (CORREIA, 2011).



Figura 6 - Sisal (Agave sisalana) – Fonte: (COSIBRA, 2021).

O sisal é um exemplo perfeito de como uma fibra natural pode ser transformada em um material de alta tecnologia para atender às demandas do mundo moderno. (John Mitchell, pesquisador de materiais da Universidade de Cambridge).

O sisal é uma fibra ligno-celulósica de baixa densidade comparada à fibra de vidro, atóxica, não causa irritabilidade à pele do trabalhador (KIM e SEO, 2006). 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).

Estes fatores, aliados à alta tenacidade, à resistência à abrasão e ao baixo custo, fazem do sisal uma das fibras vegetais mais estudadas (CARVALHO e CAVALCANTI, 2006).

2.1.5 Compósito Reforçado com Fibras Naturais

Os reforços apresentam-se, em geral, sob a forma de partículas, fibras curtas (ou descontínua) e fibras longas (ou contínuas). O compósito de fibras descontínuas

contém pequenas fibras (por exemplo, fibras picadas ou whiskers) como reforçadoras ao passo que os compósitos de fibras contínuas são elementos reforçados por longas fibras contínuas, sendo os mais eficientes do ponto de vista de rigidez e resistência. Nesses últimos as fibras podem ser orientadas paralelamente (unidirecional), formando ângulos entre si (crossply) ou distribuídas em várias direções (multidirecional). Por sua vez, os compósitos particulados consistem de partículas de várias formas e tamanhos e formas dispersas aleatoriamente dentro da matriz (DANIEL & ISHAI, 2006).

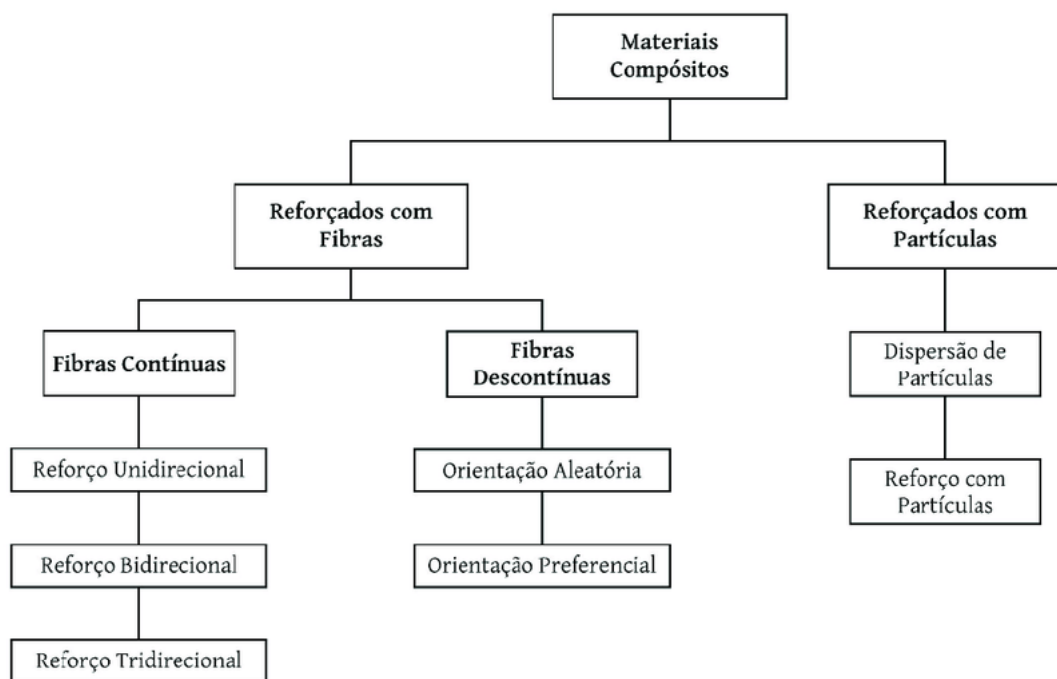


Figura 7 - Esquema de classificação dos compósitos – Fonte: (CALLISTER, 2008).

O desenvolvimento de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais naturais tem sido objeto de crescente interesse. Eles são pretendidos por oferecer vantagens ambientais como: reduzir a dependência de fontes de energia/materiais não renováveis, menor emissão de poluentes, menor emissão de gases de efeito estufa, maior recuperação de energia e a maior biodegradabilidade de seus resíduos (JOSHI et al., 2004). Além disso, têm sido indicados como alternativa econômica potencialmente viável para a fixação de carbono na natureza, redução da emissão de CO₂ para a atmosfera durante o seu ciclo de produção, processamento e utilização, incluindo a possibilidade de comércio de créditos de carbono para a produção em cadeia (PANDEY et al., 2010).

As fibras vegetais apresentam algumas características desfavoráveis como a absorção de umidade, que provoca um inchaço das mesmas, baixa resistência térmica e a forte dependência da safra e influência do clima, localização, características do solo, circunstâncias climáticas e etc., nas propriedades mecânicas, físicas e químicas, que também são afetadas pelos processamentos que as fibras são submetidas e a forma como são incorporadas ao compósito (AMORIM, 2021). As propriedades mecânicas com reforço fibroso em compósito polimérico dependem, principalmente, de três fatores: módulo de resistência da fibra, estabilidade química da matriz polimérica e ligação efetiva entre matriz e reforço na transferência de forças através da interface (KURUVILLA et al., 1996).

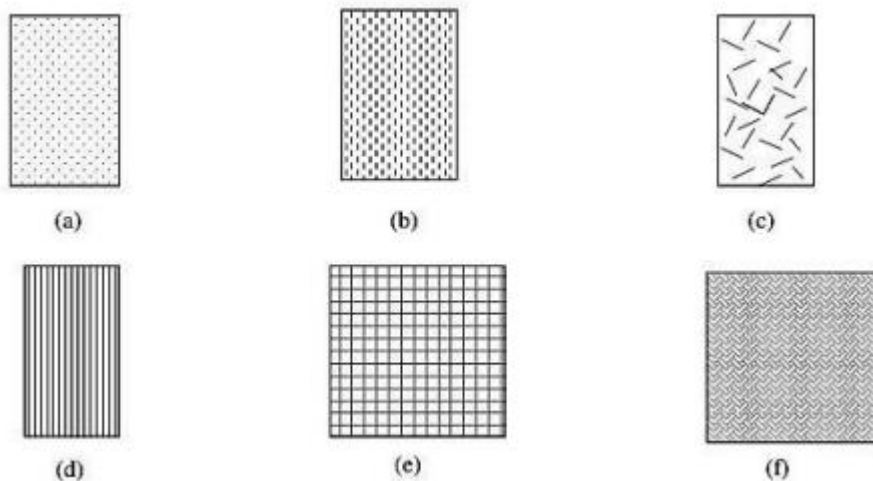


Figura 8 - Representações esquemáticas dos compósitos reforçados com fibras (a) Partículas aleatórias, (b) descontínuas e unidirecionais, (c) descontínuas e aleatórias, (d) contínuas unidirecionais, (e) contínuas cruzadas, (f) contínuas multidirecionais – Fonte: (DA SILVA, 2014)

Em função do diâmetro da fibra d , da sua resistência à tração, $\sigma * f$, e da força de ligação entre fibra e matriz (ou da tensão limite de escoamento cisalhante da matriz, o que for menor), Fl , é possível ser calculado um chamado comprimento crítico, l_c , que passa a ser um tamanho mínimo para que a fibra possa desempenhar com maior efetividade o reforço em um compósito. (CALLISTER, 2002). É obtido através da seguinte equação:

$$l_c = \frac{\sigma * f.d}{2Fl} \quad (1)$$

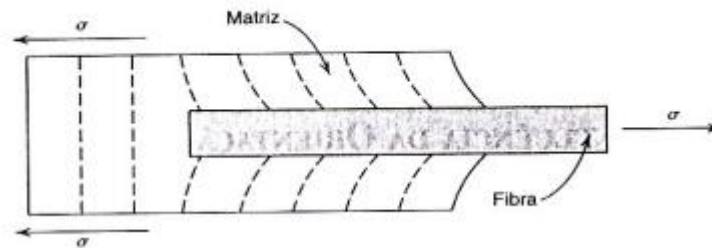


Figura 9 - Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra que está submetida à aplicação de uma carga de tração. - Fonte:(CALLISTER, 2002).

2.1.6 Estrutura Sanduíche

Dentre todos os possíveis conceitos de compósitos estruturais, a ideia da construção sanduíche tem se tornado bastante popular devido ao desenvolvimento de materiais celulares produzidos pelo homem como material do núcleo. Por definição, uma estrutura sanduíche é um composto em que um material de núcleo é cercado por duas ou mais camadas (FIEDLER e OCHSNER, 2008).

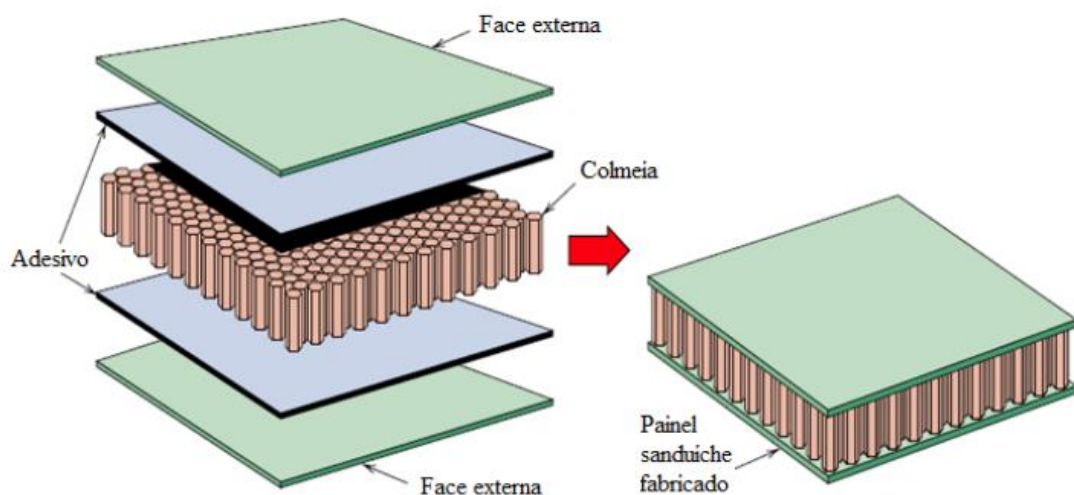


Figura 10 - Estrutura esquemática de um painel sanduíche Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2010.

A função da face é resistir a tensões de tração e compressão, por isso devem ser espessas o suficiente e feita de materiais rígidos, como ligas de alumínio, plásticos

reforçados com fibras, titânio, aços ou madeiras compensadas. Enquanto isso, o núcleo deve ser leve e possuir módulo de elasticidade baixo, deve possuir boa resistência ao cisalhamento e flambagem, ele pode ser de três tipos: espumas rígidas, madeira ou colmeias.

A figura 10 apresenta um exemplo de painel-sanduíche tipo colmeia. A utilização desses painéis possui um amplo campo como telhados, pisos, paredes prediais e na indústria aeroespacial e aeronáutica em asas e fuselagens.

De que é feito o novo Boeing 787

Avião utiliza materiais compostos que o tornam mais leve, econômico e seguro

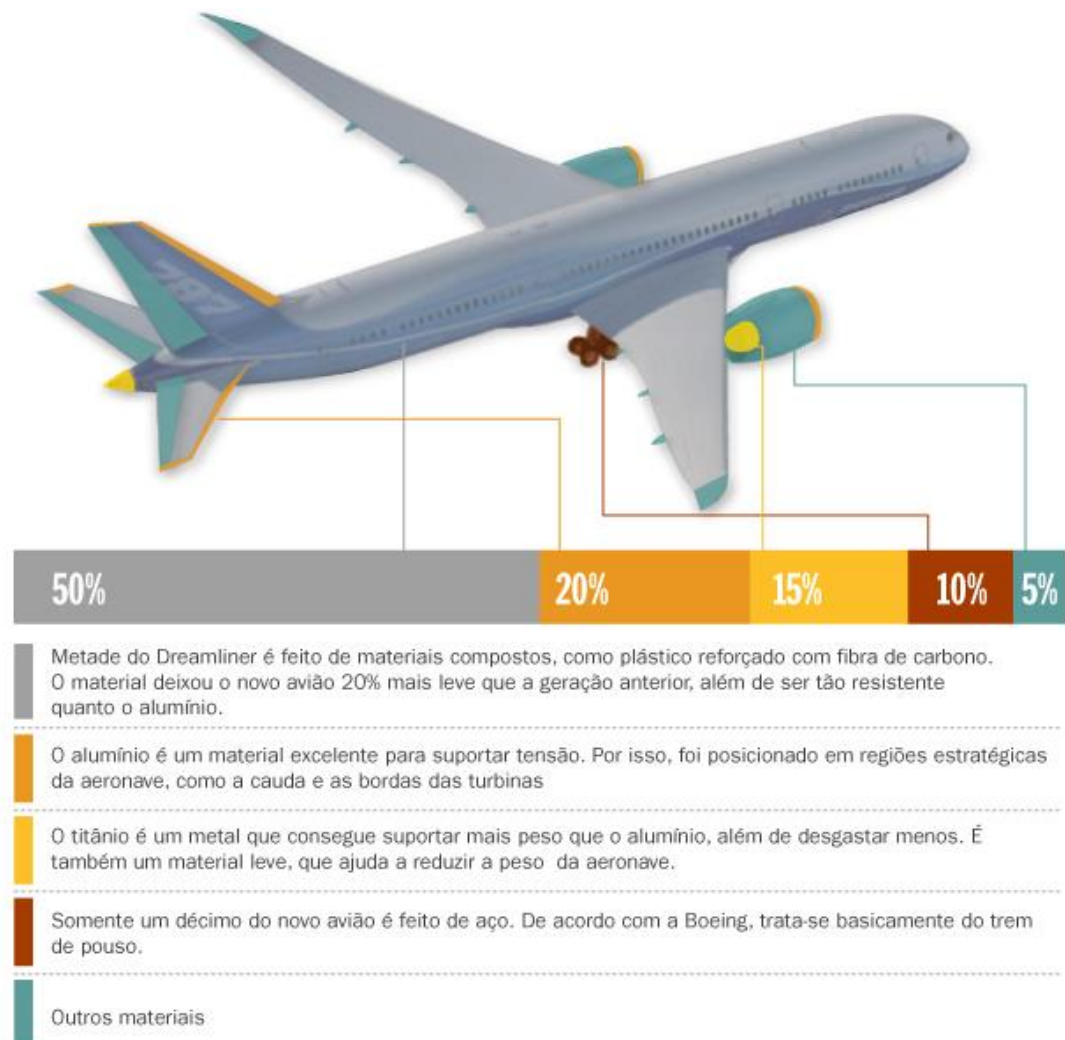


Figura 11 -- Representação dos materiais utilizados na construção do Boeing 787. - Fonte: (PIRES, 2016).

2.2 Estruturas Honeycombs

As estruturas do tipo favo de abelha ou honeycomb hexagonal, estão presentes na composição celular de muitos materiais existentes na natureza (Wu et al. 2017). No entanto, para ir ao encontro das diferentes necessidades práticas, desenvolveram-se outras formas de estrutura honeycomb sendo as mais comuns as triangulares, as quadradas, as hexagonais e as auxéticas. As auxéticas ou formas reentrantes, têm a particularidade de possuírem um coeficiente de Poisson negativo (Hou et al. 2014). O desempenho das estruturas depende, não só da forma, mas também do material que as constitui, e quanto à dimensão do favo podem classificar-se em nano, micro ou macro (Zhang et al. 2015).

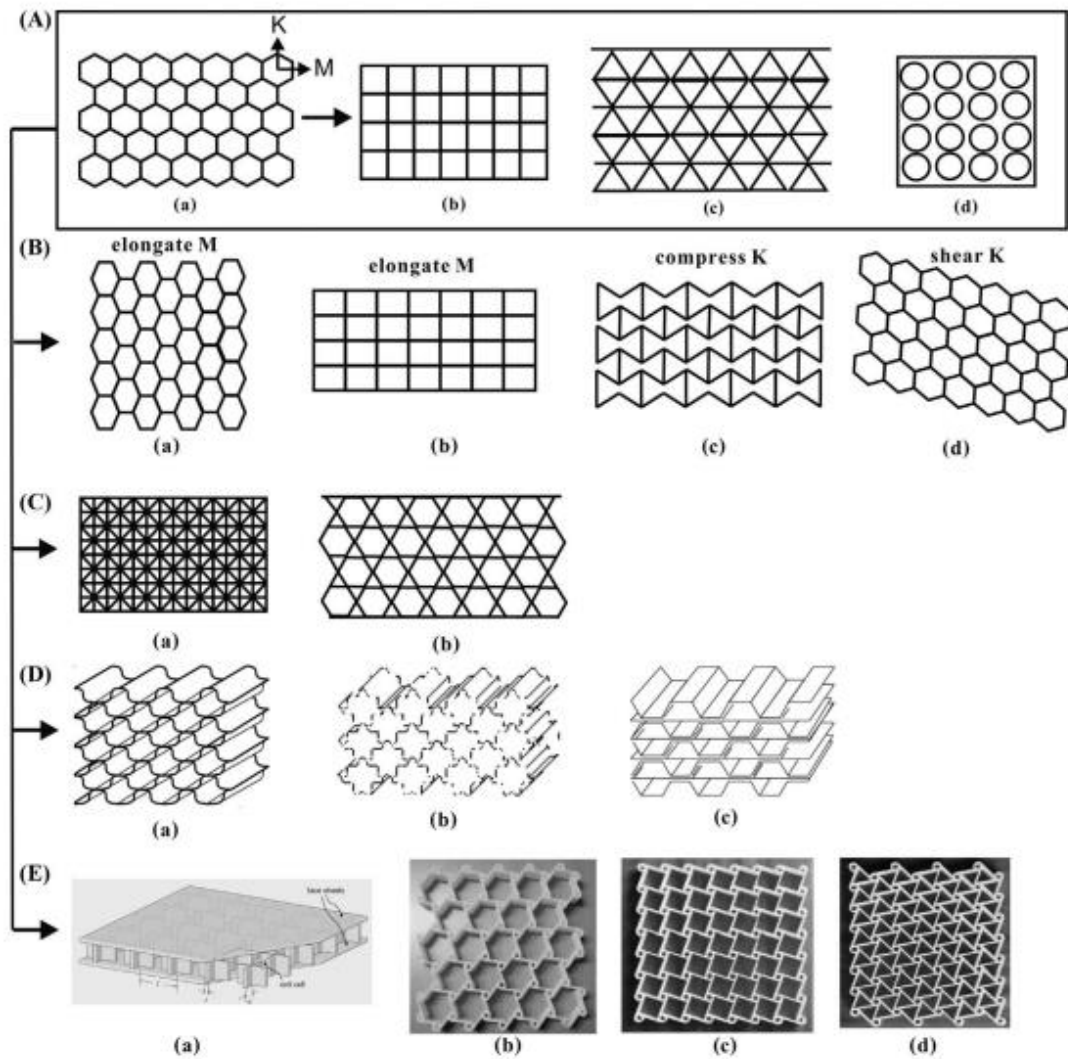


Figura 12 -Exemplos de estruturas honeycomb produzidas (Zhang et al., 2015).

2.2.1 Estrutura Hexagonal

A estrutura em forma de favo de mel hexagonal é chamada de estrutura honeycomb. Essa estrutura é composta por uma série de células hexagonais interconectadas, formando um padrão em forma de grade. É comumente usada em diversas aplicações industriais, como em painéis de revestimento de aeronaves, em sistemas de refrigeração, em filtros, em materiais de embalagem e até mesmo em alguns instrumentos musicais.

A estrutura honeycomb é escolhida por sua capacidade de combinar alta resistência e rigidez com baixo peso, o que a torna uma escolha popular em muitas aplicações. A sua forma hexagonal é particularmente útil, uma vez que é possível cobrir grandes áreas com uma quantidade relativamente pequena de material, além de permitir que o material seja flexionado em várias direções sem comprometer a sua resistência estrutural.

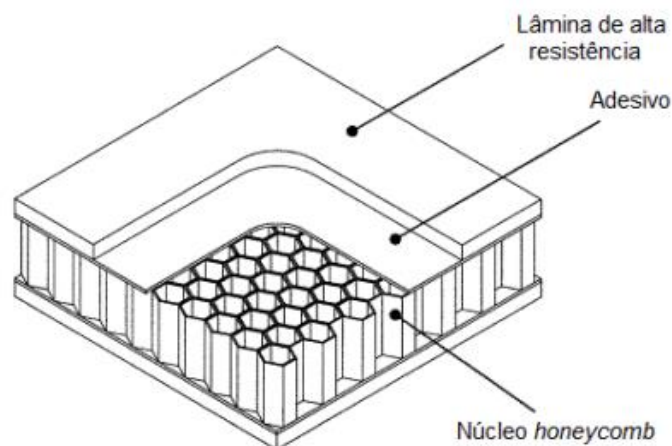


Figura 13 - Exemplo de um honeycomb com estrutura hexagonal - Fonte: (Adaptado de Kryden, 2017)

2.2.2 Estrutura Auxética (*Re-entrant*)

A razão de Poisson é definida como uma razão negativa de deformação transversal em deformação longitudinal no teste de tensão ou de compressão. Geralmente é obtido calculando-se a razão entre a contração lateral e a extensão longitudinal em teste de tração. É assim nomeado após Simeon Poisson (Arago,

1854). Para a maioria dos metais, seu valor está entre 0,25 e 0,3. (Greaves, 2011; Callister, 2006).

Do ponto de vista da mecânica dos sólidos, todos os materiais usados no projeto e fabricação podem ser classificados em dois tipos: materiais regulares com Razão de Poisson positivas e irregulares com razão de Poisson negativas ou zero, conhecidos como materiais auxéticos. Eles têm sido conhecidos conceitualmente desde 1944, embora a amostra experimental só esteve disponível quando Lakes (1993, 1991, 2001) apresentou um material com razão de Poisson negativa em 1987.

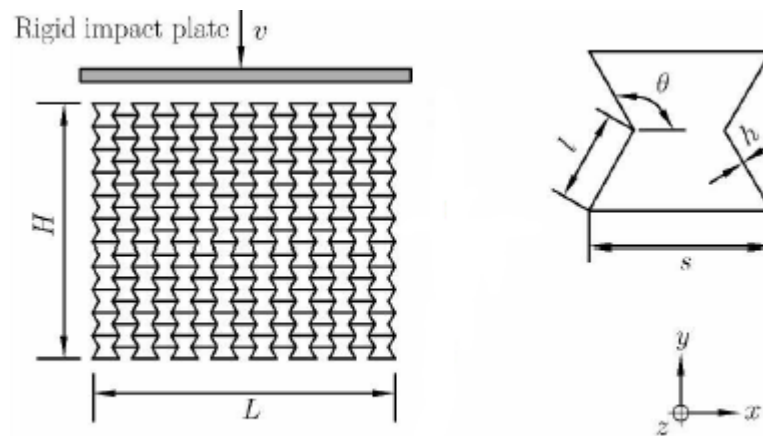


Figura 14 - Exemplo de um honeycomb com estrutura Auxética - Fonte: (Adaptado de Xiuhui Hou, 2015)

Muitas propriedades mecânicas importantes como resistência à recuo, absorção de energia, tenacidade, tenacidade à fadiga e módulo de cisalhamento são dependentes principalmente do coeficiente de Poisson (Prawoto, 2012).

Devido a razão de Poisson negativa resultar em melhorias dessas propriedades, os materiais auxéticos têm grande potencial para muitas aplicações. Por exemplo, eles podem ser adotados para várias necessidades médicas, militares, automotivas e indústrias têxteis onde a resistência à recuo e alta absorção de energia são desejados.

2.2.3 Estrutura Híbrida (Auxética-convencional)

Com base no coeficiente de Poisson sob tração ou compressão, estruturas honeycombs metálicas podem ser divididas em honeycombs convencionais hexagonais e honeycombs hexagonais auxéticos. Quando os honeycombs hexagonais convencionais são submetidos à compressão vertical, eles têm uma razão de Poisson positiva em direção ortogonal. Por outro lado, honeycombs hexagonais auxéticos exibem uma deformação de retração horizontal sob compressão vertical e resultam em uma razão de Poisson negativa.

As estruturas honeycombs hexagonais auxéticas ganharam atenção após a pesquisa significativa na introdução de materiais auxéticos NPR (Negative Poisson's Ratio) e na síntese da espuma de poliuretano com valor NPR de $-0,7$. As características únicas de deformação dessas estruturas podem ser usadas para melhorar as propriedades mecânicas macroscópicas dos honeycombs, como resistência ao impacto, módulo de cisalhamento e absorção de energia. Huang et al. Designou um novo honeycomb consistindo em um hexágono auxético e uma placa fina e estudou as propriedades mecânicas por análise teórica e simulações de elementos finitos (FE). Yang et al. Obtiveram previsões teóricas do módulo da razão de Poisson e força de escoamento de um honeycomb auxético de estrutura 3D. Além disso, eles compararam os resultados teóricos usando testes para medir compressão e FEA (Finite Element Analysis). No entanto, o desempenho mecânico superior do honeycomb auxético hexagonal acaba custando sua rigidez, que muito limita sua aplicação. Por isso, alguns estudos tem proposto uma abordagem de design híbrido para aumentar a rigidez do honeycomb auxético hexagonal.

A tecnologia da manufatura aditiva permitiu a fabricação rápida e estruturas complexas e ofereceu mais flexibilidade para desenhar novas metaestruturas, como estruturas aeroespaciais com expansão térmica zero antenas finas de satélites e estruturas de formatos complexos. Chen et al. Processaram uma nova estrutura celular utilizando impressão 3D, onde as paredes celulares em estruturas honeycombs convencionais foram substituídas por uma subestrutura. A estrutura produzida rendeu melhor resistência à pressão e nas propriedades de absorção de energia. Broccolo et al. Obtiveram uma nova metaestrutura híbrida (AUXHEX) misturando honeycombs convencionais e auxéticos, que podem atingir ajustáveis razões de Poisson (positivo, zero e negativo) alterando os parâmetros da geometria.

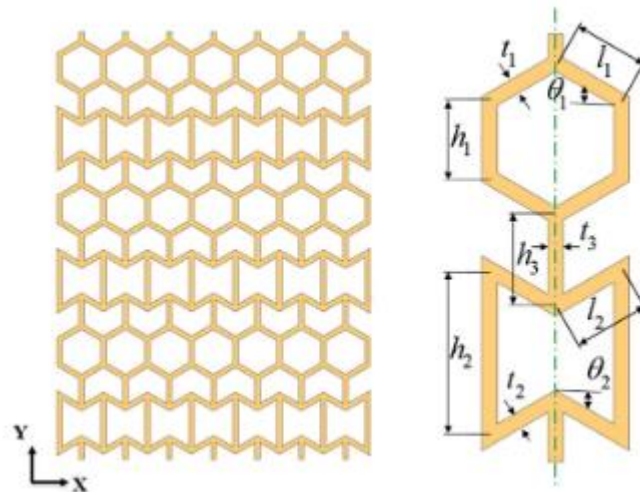


Figura 15 - Exemplo de um honeycomb híbrido com estrutura Auxética-convencional – Fonte: (Adaptado de Mengchuan Xue et al, 2020)

2.3 Modelação por extrusão de plástico – FDM

A impressão 3D FDM é uma tecnologia revolucionária que está mudando a forma como fabricamos produtos, permitindo uma produção mais ágil e personalizada. (Chuck Hull, inventor da tecnologia de impressão 3D estereolitografia.).

Nesse processo, um determinado material em estado plástico, é seletivamente depositado em uma plataforma através do bico extrusor. Com objetivo de depositar a camada este bico vai depositando o material em todo o contorno da seção e, após terminado, passa a preencher o conteúdo do contorno, utilizando movimentos de vai e vem.

Após o término da primeira camada, o bico levanta alguns décimos de milímetro e inicia a fabricação da segunda camada, e assim sucessivamente até que a peça se complete.

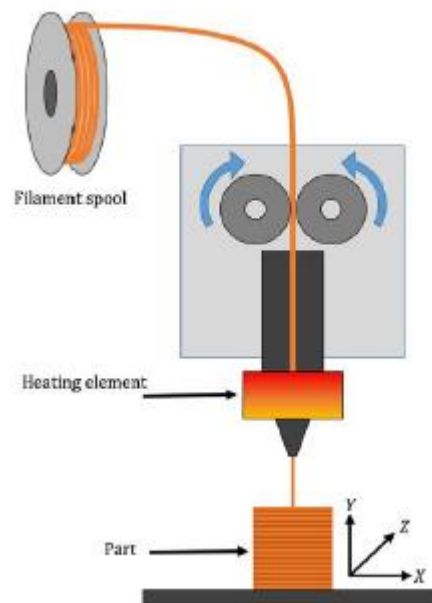


Figura 16 - Esquema geral do processo FDM – Fonte: (Stansbury et al., 2016)

Quando se trata de filamentos para impressoras 3D, os materiais mais utilizados são PLA, ABS, PETG (PET, PTT), Nylon, os flexíveis TPE, TPN e TPC e o PC, as características técnicas difundidas se resumem sobre resistências, durabilidade e custos.

2.3.1 PETG (Polietileno Tereftalato Glicol)

O PETG (polietileno tereftalato glicol) é um polímero derivado do PET modificado com glicol sendo considerado um bom meio termo entre o PLA e o ABS onde é mais durável e flexível que o PLA, e mais fácil de imprimir em impressora 3D que o ABS (BESKO et al., 2017). A modificação na composição do PET com o glicol adicionado durante a polimerização teve como resultado um filamento mais claro, menos frágil, menos rígido e com maior facilidade de uso com relação a forma inicial (ALLTHAT3D, 2017).

De forma geral, o PETG é um polímero com temperatura de transição vítrea próxima a 80°C. Conta com propriedades semelhantes às do PET, tendo como vantagem uma tenacidade, flexibilidade e alta capacidade de processamento (WANG et al., 2013).



Figura 17 - Características do PETG – Fonte: (MARKFOGED, 2023)

O PETG ultimamente vem ganhado notoriedade quando se trata de impressão 3D por manufatura aditiva. A razão para tanto é que o PETG, que é uma forma modificada do PET pela adição do glicol durante o processo de polimerização, reúne as melhores características dos já bem conhecidos ABS (boa resistência e ductilidade) e PLA (facilidade de impressão e processabilidade). Além disso, por ser um polímero amorfo de cadeia linear, que se mantém no estado semissólido ao ser aquecido, é um material muito propício para extrusão, logo aplicável à impressão 3D (CHEN et al., 2015; LATKODURAŁEK et al., 2019; SANTANA et al., 2019).

2.3.2 PLA (Ácido Polilático)

O Ácido Polilático é da família dos poliésteres alifáticos, termoplástico e resistentes, produzidos por síntese química do ácido lático por meio de fermentação bacteriana do amido ou de glicose extraído do milho, cana de açúcar, batata ou trigo. (PRADELLA, 2006)

Para Rodrigues (2012), a produção de polilactato (PLA) se destaca por este polímero, uma opção a ser considerada na substituição de plásticos derivados de petróleo. O PLA é um polímero versátil e possui várias características desejáveis: transparência, brilho, resistência mecânica, resistência térmica e biodegradabilidade.

O Ácido Polilático é considerado o material mais fácil de se trabalhar, por isso é bastante indicado aos iniciantes de impressão 3D. Pode ser usado em louças descartáveis, produtos de higiene, embalagens de alimentos e tem menor propensão

a deformação quando comparado com o ABS. O PLA é quebradiço, portanto, deve-se evitar de usá-lo em peças que requer resistência mecânica, e também em peças com exposições a temperaturas em torno de 60°C ou mais. Têm maior facilidade para entupir o bico do extrusor e seu armazenamento requer um cuidado maior devido ao fato do PLA absorver facilmente umidade do ar, caso isto aconteça, será necessária uma maior temperatura de extrusão.

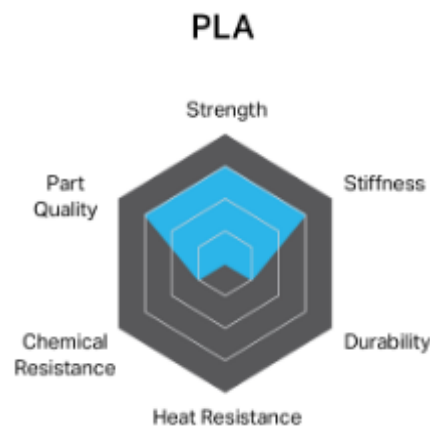


Figura 18 - Características do PLA – Fonte: (MARKFOGED, 2023)

2.4 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra. Mede-se o valor da carga versus a deformação máxima. Existem dois tipos principais de ensaios, os quais, ensaio de flexão em três pontos e ensaio de flexão em quatro pontos. A figura 18 mostra um exemplo desses dois tipos de ensaios.

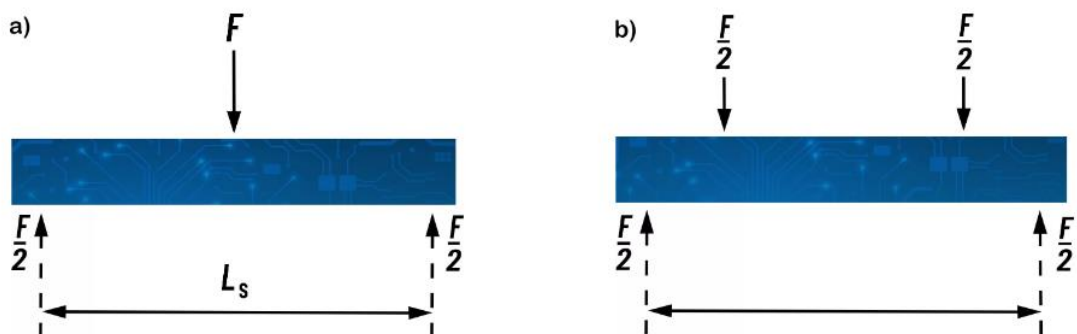


Figura 19 - a) ensaio de flexão 3 pontos e b) ensaio de flexão 4 pontos – Fonte: (BIOPDI, 2023)

Seguiu-se o método da norma de ensaio ASTM C393. É necessário seguir duas condições para que o ensaio obedeça a norma, o primeiro é que os momentos produzidos na falha do núcleo não podem provocar a falha das faces por tração e compressão. O que exige faces de espessura maior e menor distância entre os apoios, sendo assim, possível determinar as propriedades do núcleo.

Outro ponto é que, a carga deve ser aplicada de forma que o carregamento máximo ocorra entre 3 a 6 minutos. Foi utilizado a velocidade de 2mm/min. A curva da força-deflexão ajuda a obter a rigidez do painel e módulo de cisalhamento do núcleo.

Para calcular a tensão de cisalhamento no núcleo (τ_c) podemos utilizar a equação (2) mostrada abaixo:

$$\tau_c = \frac{P}{(d + t_c)b} \quad (2)$$

Em seguida podemos calcular a tensão normal da face (σ_f) com a equação (3):

$$\sigma_f = \frac{PL}{2_t(d + t_c)b} \quad (3)$$

Onde P representa o valor máximo de carga aplicada no corpo de prova utilizado, d a espessura do painel, t_c a espessura do núcleo, t a espessura das faces, b a largura do painel e L o comprimento entre os apoios. O cálculo da deflexão máxima ($\Delta_{m\acute{a}x}$) é obtido através da equação (4).

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

$$D = \frac{E_1 t_1 E_2 t_2 (d + c)^2 b}{4(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \quad (5)$$

$$U = \frac{G(d+c)^2 b}{4t_c} \quad (6)$$

Nas equações (5) e (6) temos a variável D sendo a rigidez a flexão e U o cisalhamento do painel. E é o módulo de elasticidade das faces do painel e G o módulo de cisalhamento do núcleo.

A deflexão máxima é definida pela equação (7). As constantes K_b e K_s são, respectivamente, deflexão por flexão e deflexão por cisalhamento, as quais dependem das condições de contorno e do carregamento da estrutura. Assim como, G_0 é o valor do módulo de cisalhamento do núcleo do compósito, D a constante de rigidez das faces (BITZER, 1997).

$$\Delta_{m\acute{a}x} = K_b \frac{PL^3}{D} + K_s \frac{PL}{hG_0} \quad (7)$$

$$D = \frac{E_1 t_1 E_2 t_2 h^2}{E_1 t_1 \lambda_1 + E_2 t_2 \lambda_2} \quad (8)$$

Através da equação (8) encontramos a constante de rigidez das faces D e assim, é possível comparar os dados encontrados no teste de flexão.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são mostradas as atividades desenvolvidas, como também os métodos e materiais utilizados. Com objetivo de auxiliar no entendimento, o mesmo foi dividido em partes, sendo elas: confecção dos compósitos, confecção dos núcleos honeycombs, confecção da estrutura sanduíche e por fim o ensaio de flexão.

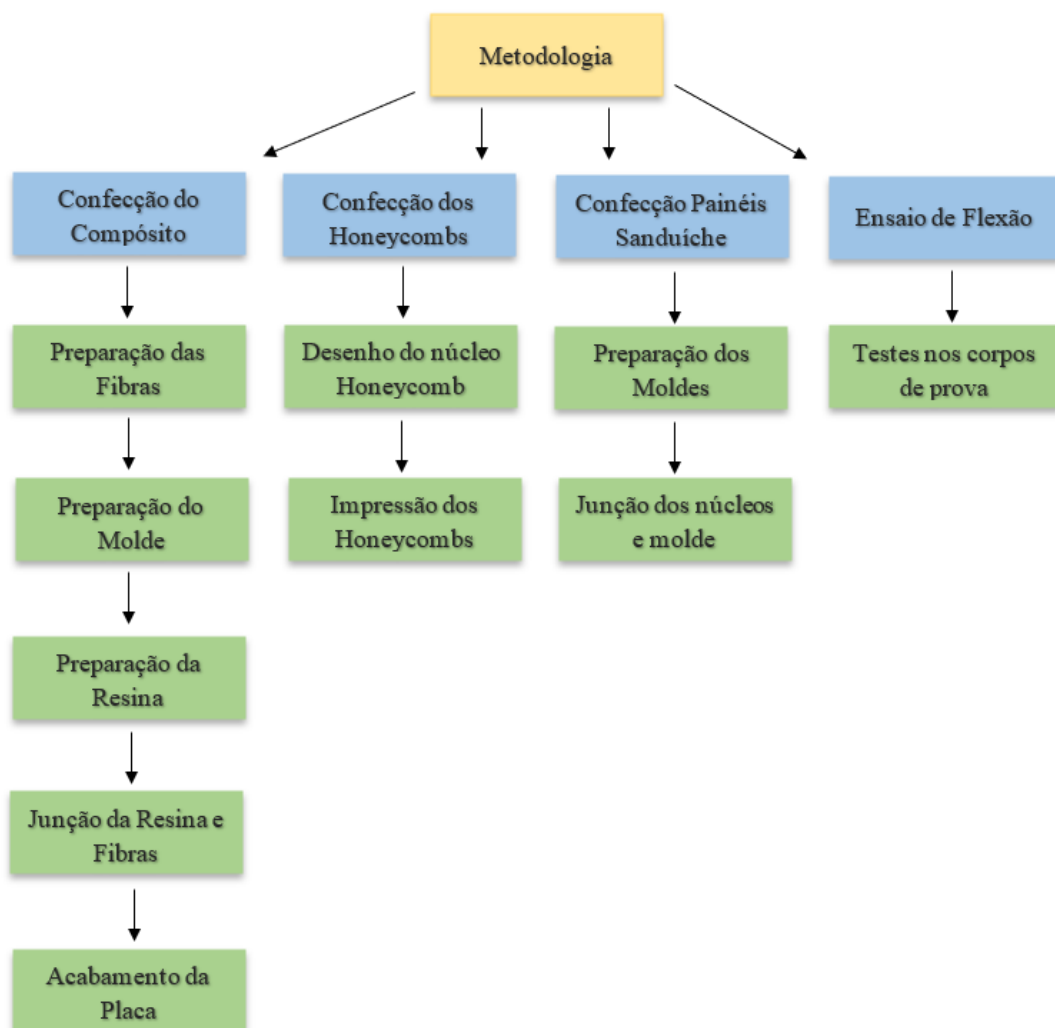


Figura 20 - Fluxograma de atividades – Fonte: Autor

3.1 Confecção do compósito

Para a confecção do compósito é necessário começar com o tratamento das fibras de sisal e em seguida, a fabricação das lâminas de sisal-epóxi. As fibras, tais

como os materiais para a fabricação da resina, foram fornecidos pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Amazonas. Os processos foram realizados nas dependências do mesmo.

3.1.1 Preparação das Fibras

A fibra de sisal, devido ser hidrófila, é necessário ser realizado um tratamento químico utilizando Hidróxido e Sódio (NaOH) com objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do compósito.



Figura 21 - Fibras de sisal pré-tratamento químico – Fonte: (Autor).

A proporção escolhida para este tratamento foi a de 10% de concentração. Portanto, foi utilizado 80g de hidróxido de sódio para 800ml de água destilada.

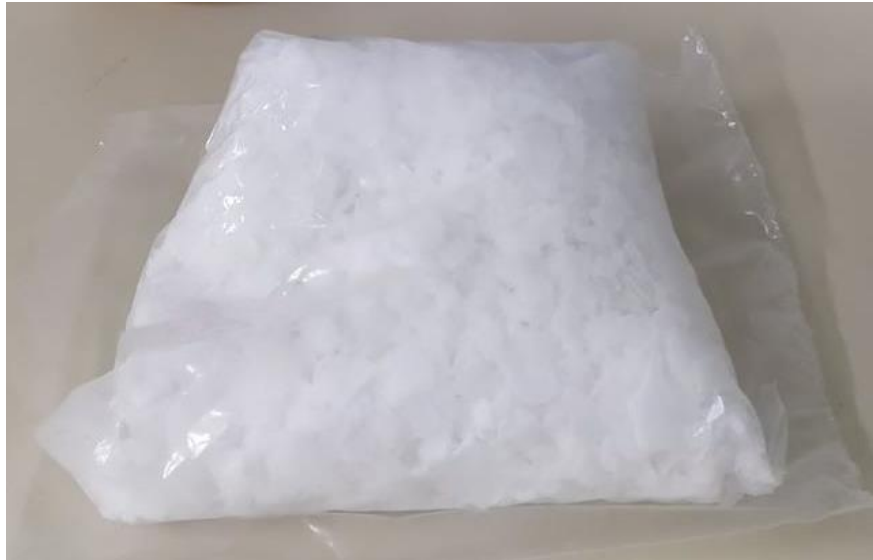


Figura 22 - Hidróxido de Sódio – Fonte: (Autor).

O tratamento é realizado da seguinte forma, as fibras são mergulhadas na solução de 800ml de água destilada e 80g de NaOH durante o período de 4h. Em seguida, realizada a lavagem das fibras, retirada do excesso da solução das mesmas e colocadas para secar à temperatura ambiente num período de 24h.



Figura 23 - (a) Tratamento de 4h e 10% de NaOH; (b) Secagem das fibras já tratadas – Fonte: (Autor).

Após o processo de secagem, as fibras são levadas para estufa para retirar a umidade. O processo consiste em deixar as fibras durante 50 minutos a 100° Celsius. Após essa etapa, as fibras perdem massa, ficando cada amostra com aproximadamente 11g. A estufa utilizada foi a QUIMIS do modelo 0317M-72 como mostrado na (Figura 24a).



(a)



(b)

Figura 24 - (a) Estufa de secagem; (b) Fibras na estufa - Fonte: (Autor).



Figura 25 - Fibras com massa de 11g após a secagem – Fonte: (Autor).

3.1.2 Preparação do Molde

Para a confecção de uma das faces do painel, foi utilizado um molde com as seguintes dimensões: 250mm x 155mm x 3,2mm. O molde é dividido em base e tampa. Foi utilizado entre a tampa e a base, uma folha de papel paraná com espessura de 0,5mm, com finalidade de facilitar a remoção da placa após o tempo de cura.



Figura 26 - (a) Molde utilizado na confecção do compósito; (b) Molde com papel paraná – Fonte: (Autor).

Foi utilizada a cera desmoldante na parte inferior da tampa, superior da base e no papel paraná para facilitar a remoção da placa.



Figura 27 - Cera desmoldante – Fonte: (Autor).

3.1.3 Preparação da Resina

Foi utilizado o modelo Redelease 2004 da resina epóxi e endurecedor 3154, com uma proporção mássica de 100% para 50% respectivamente de acordo com as recomendações do fabricante. Também foi utilizado o anti-bolhas SILADIT-53 FR.

A preparação da resina foi da seguinte forma, em um Becker, foi adicionado 130g de resina, 65g de endurecedor e aproximadamente 5,2g de anti-bolhas. Totalizando uma mistura de aproximadamente 200,2g.

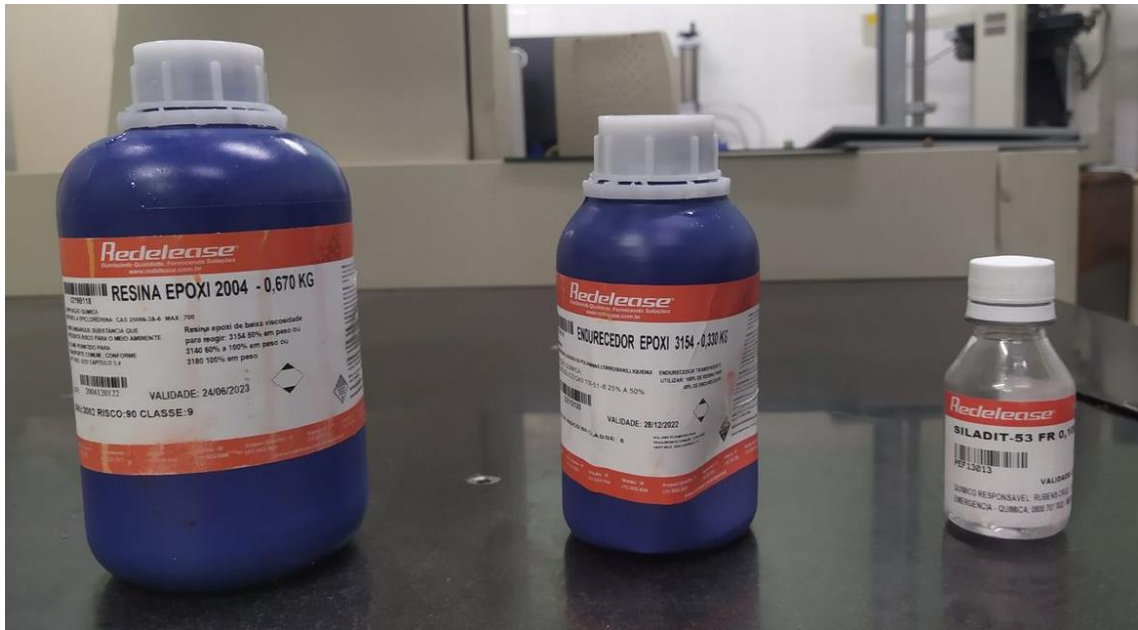


Figura 28 - Resina Epóxi, endurecedor e anti-bolhas– Fonte: (Autor).

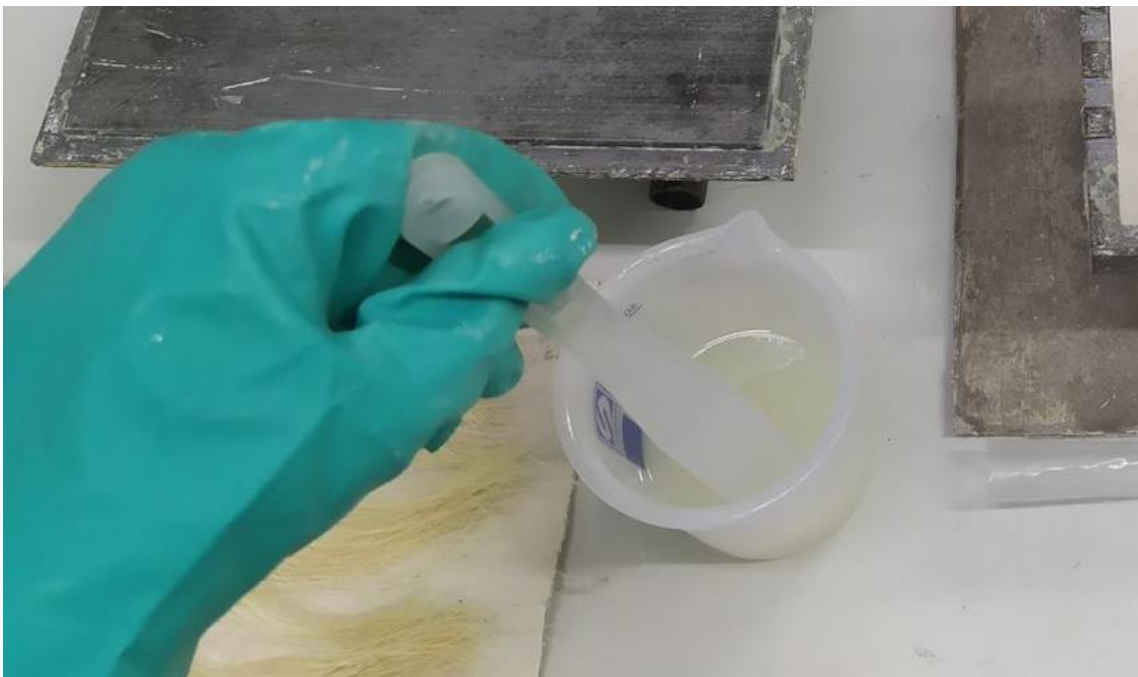


Figura 29 - Preparação da resina– Fonte: (Autor).

3.1.4 Junção da resina e fibras

Agora com as fibras e o molde preparados, podemos dar início a fabricação das placas. A mistura da resina foi mexida até um estado bem homogêneo e atingir uma densidade mais pastosa durante 10 minutos, na qual foi feita a primeira aplicação

sobre a superfície do molde, despejando cerca de 30% da solução. Realizou-se então a distribuição das fibras sobre o molde de forma uniforme e longitudinal.



Figura 30 - Primeira aplicação da resina sobre o molde e distribuição das fibras – Fonte: (Autor).

Após esse processo, o restante da resina foi espalhado sobre as fibras, após um intervalo de 10 minutos sendo mexidas depois da primeira aplicação.



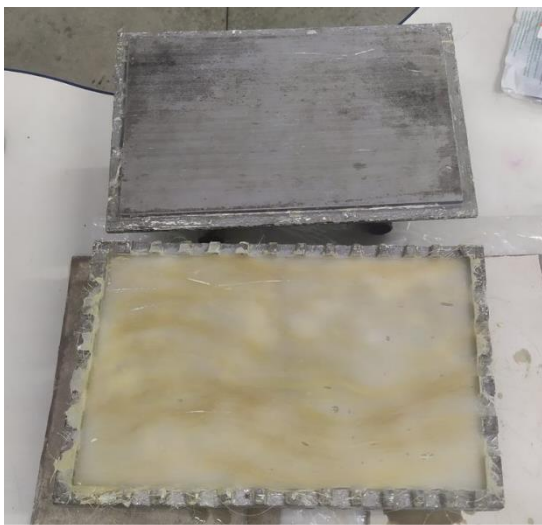
Figura 31 - Segunda aplicação da resina– Fonte: (Autor).

A seguir, com a resina toda distribuída, a parte superior do molde é encaixada e um sobre peso é utilizado para que se distribua bem a resina por todo o molde. O molde é então deixado em descanso para que a cura da resina possa atuar.



Figura 32 - Segunda aplicação da resina– Fonte: (Autor).

Passados 48h de cura da resina, tempo ideal para que a placa possa ser desmoldada sem risco de quebra, é realizado o desmolde da mesma. Abaixo a (figura 33 a) momento em que a tampa do molde é retirada e na (figura 33 b) a placa de sisal-epóxi em seu estado pronto.



(a)



(b)

Figura 33 - (a) Retirada do topo do molde; (b) Placa Sisal-Epóxi – Fonte: (Autor).

3.1.5 Acabamento da placa

É necessário ser feito o acabamento da placa para que a mesma entre nos padrões da norma de teste. Primeiramente, foi realizado cortes na placa, com auxílio de uma esmerilhadeira, para que elas ficassem com suas dimensões de 200mm x 70 mm e espessura variando de 2 a 3 milímetros.



Figura 34 - Placas após o corte – Fonte: (Autor).

Após este processo, com o auxílio de uma lixadeira, foi feito o acabamento final. A média mássica das placas ficaram em torno das 45g.



Figura 35 - Placa após o lixamento– Fonte: (Autor).

3.2 Confeção dos Honeycombs

Para a confecção dos honeycombs é necessário primeiramente passar pela etapa do desenho dos mesmos, para então ser realizado a impressão na impressora 3D.

3.2.1 Desenho do núcleo honeycomb

A fabricação dos núcleos começou com a elaboração do projeto do honeycomb através do software Fusion 360. As dimensões dos núcleos foram escolhidas de forma que obedecessem aos critérios da norma de teste (ASTM C393) que visa que o núcleo deve possuir densidade menor que as faces do compósito sanduíche. As dimensões utilizadas foram as mesmas para o material PETG e PLA. As (figuras 36, 37 e 38) abaixo, ilustram as dimensões utilizadas nos desenhos realizados no software, do honeycomb hexagonal, auxético e híbrido, respectivamente.

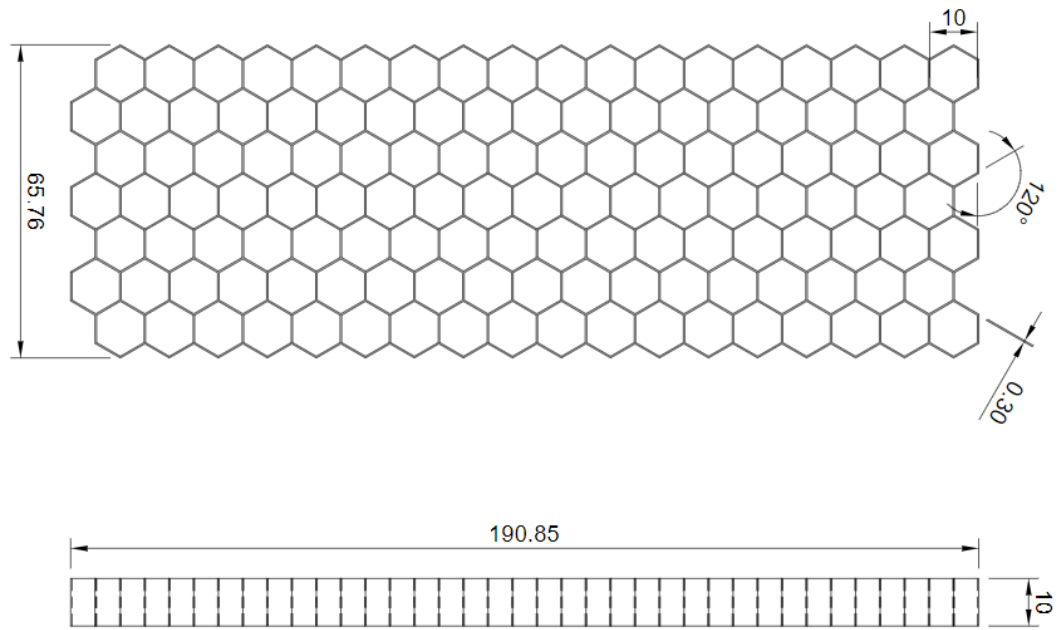


Figura 36 - Dimensões honeycomb hexagonal – Fonte: (Autor)

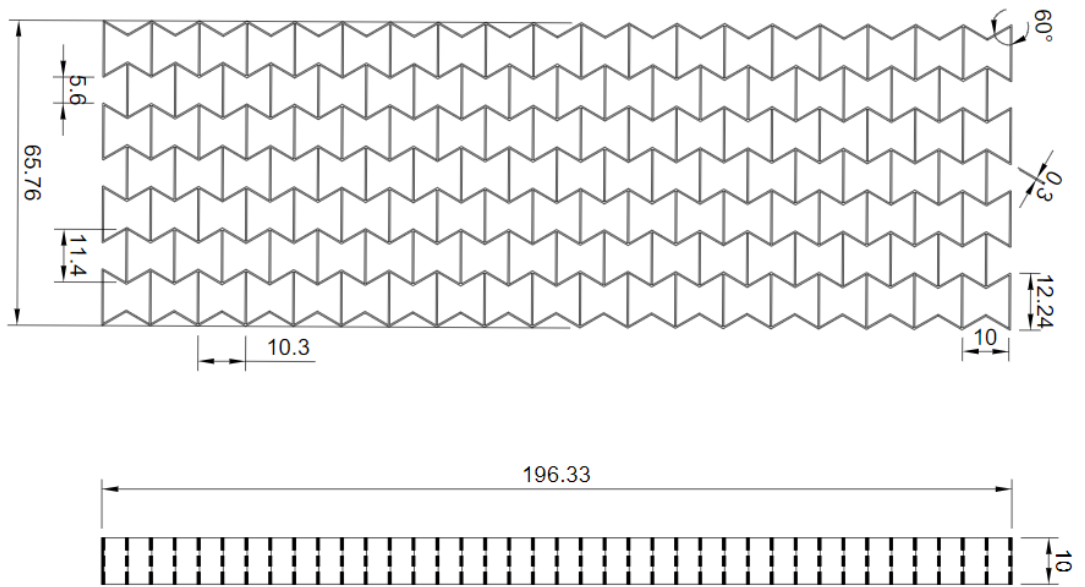


Figura 37 - Dimensões honeycomb auxético – Fonte: (Autor)

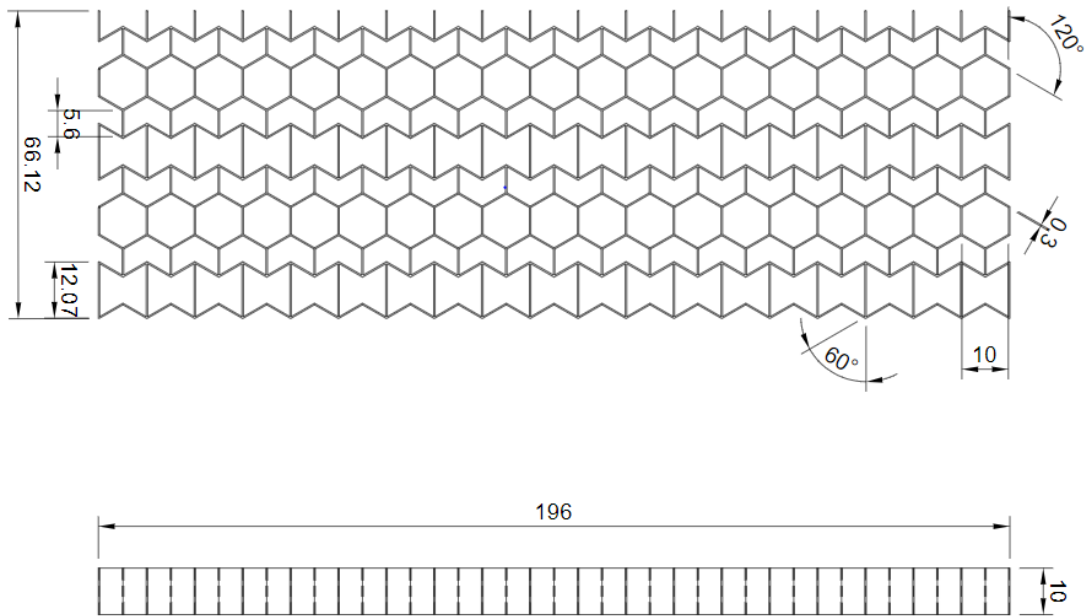


Figura 38 - Dimensões honeycomb híbrido - Fonte: (Autor)

3.2.2 Impressão do honeycomb

Para a impressão dos honeycombs, ambos materiais, PLA e PETG, foi utilizada a impressora do modelo CREALITY ENDER 3. O software de fatiamento foi o Ultimaker CURA.

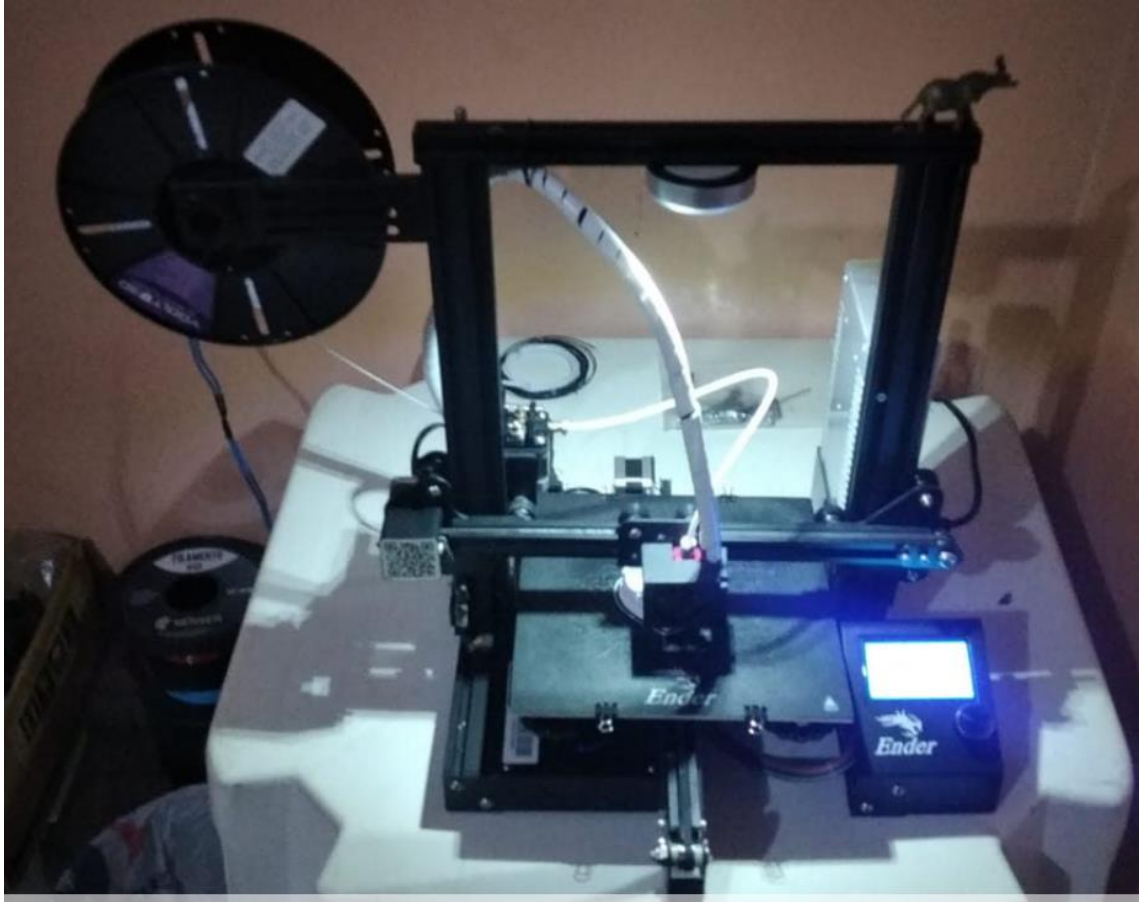


Figura 39 - Impressora 3D ENDER 3 - Fonte: (Autor)

As (imagens 40,41 e 42) abaixo mostram as configurações utilizadas no Ultimaker CURA para que fossem realizadas as impressões dos honeycombs.

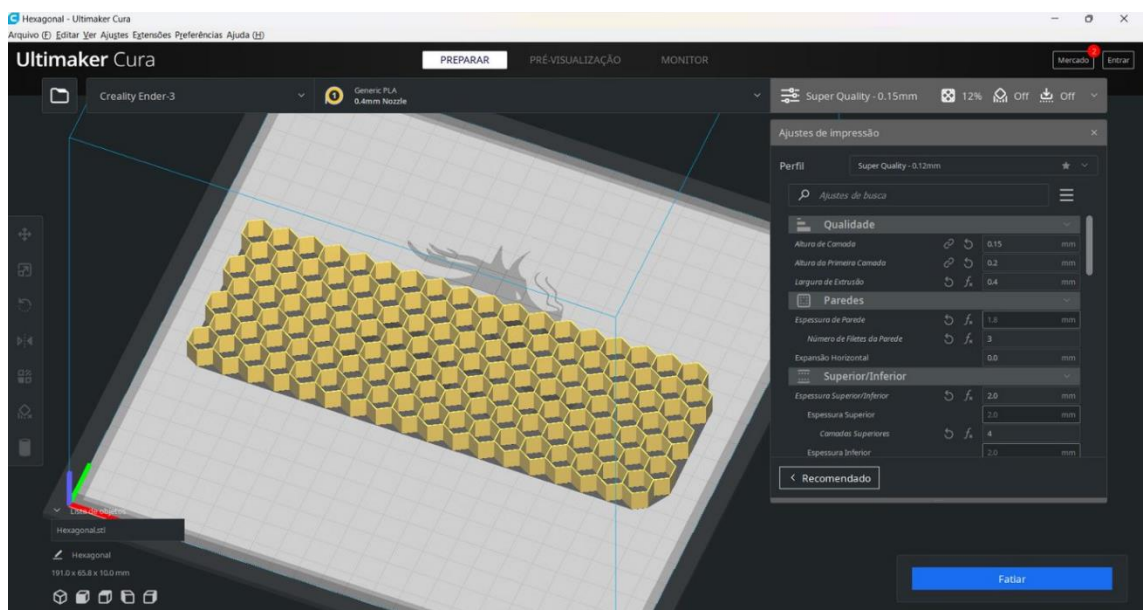


Figura 40 - Configuração do núcleo hexagonal no Ultimaker - Fonte: (Autor)

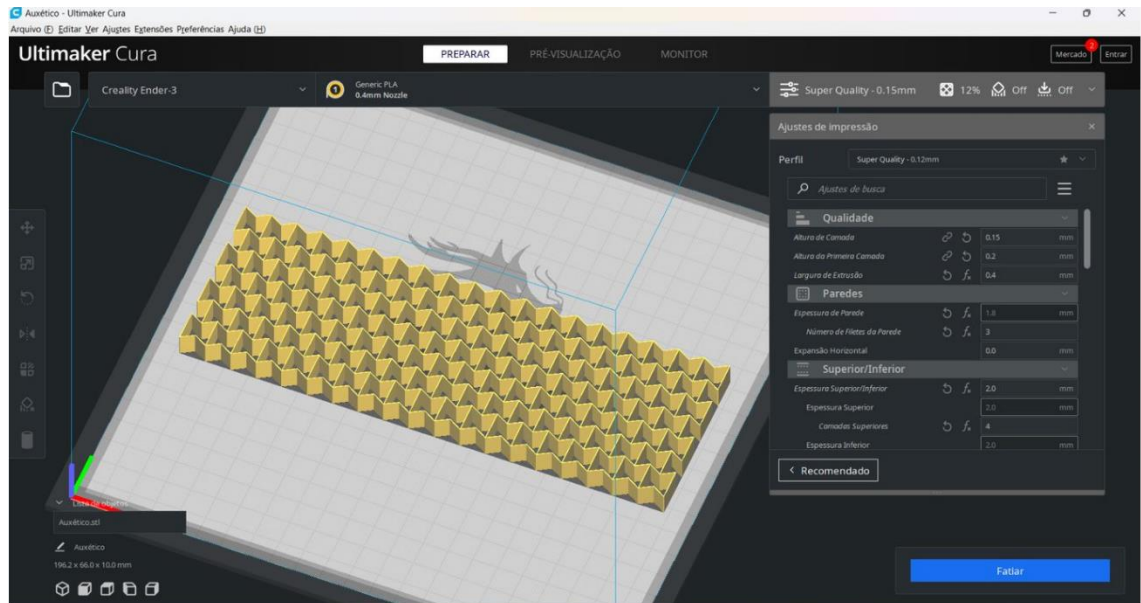


Figura 41 - Configuração do núcleo auxético no Ultimaker - Fonte: (Autor)

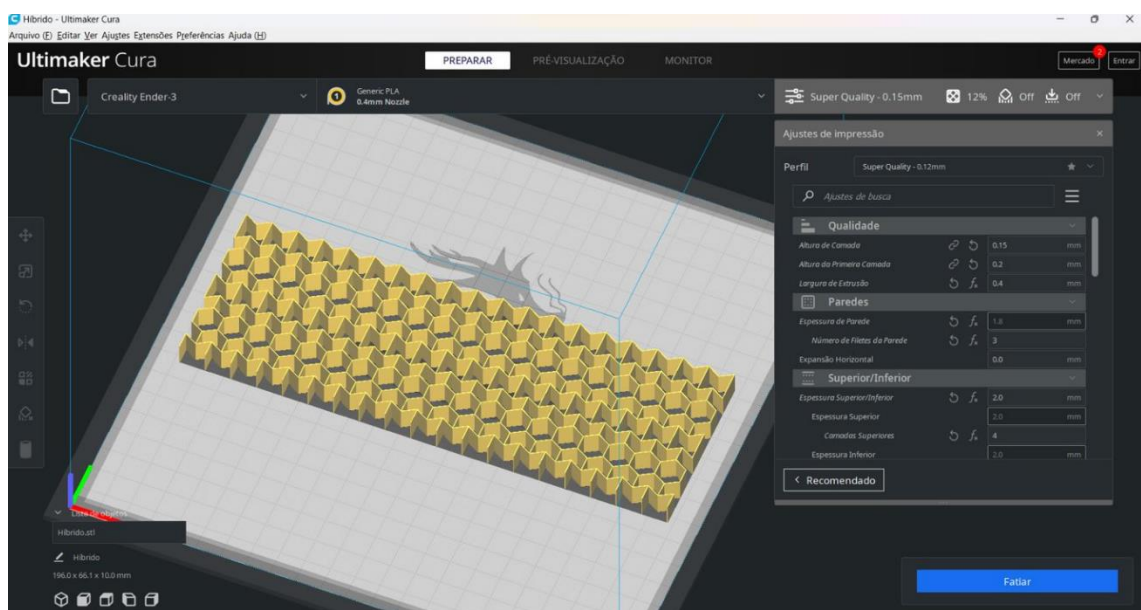


Figura 42 - Configuração do núcleo híbrido no Ultimaker - Fonte: (Autor)

Após as configurações realizadas no Ultimaker, a impressão se inicia, foram impressos primeiro os núcleos do material PETG e em seguida os de PLA. Cada núcleo teve um tempo médio de impressão de 240 minutos.

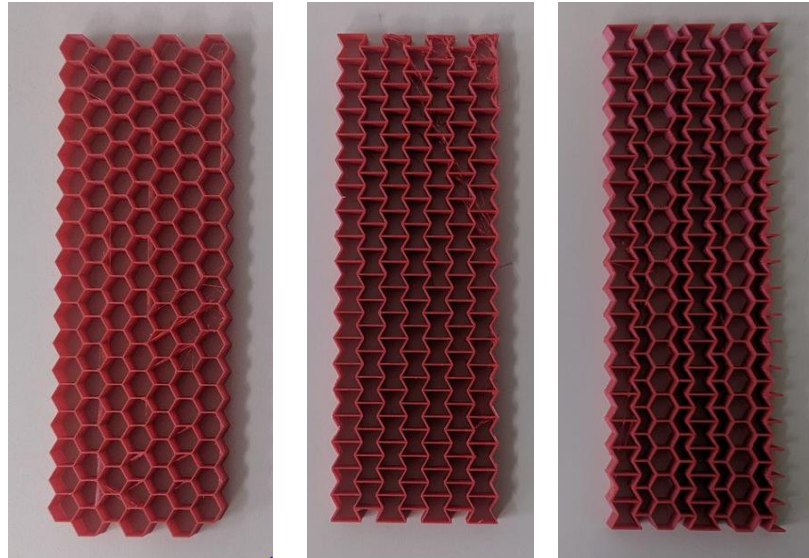


Figura 43 - Honeycombs impressos em PETG - Fonte: (Autor)

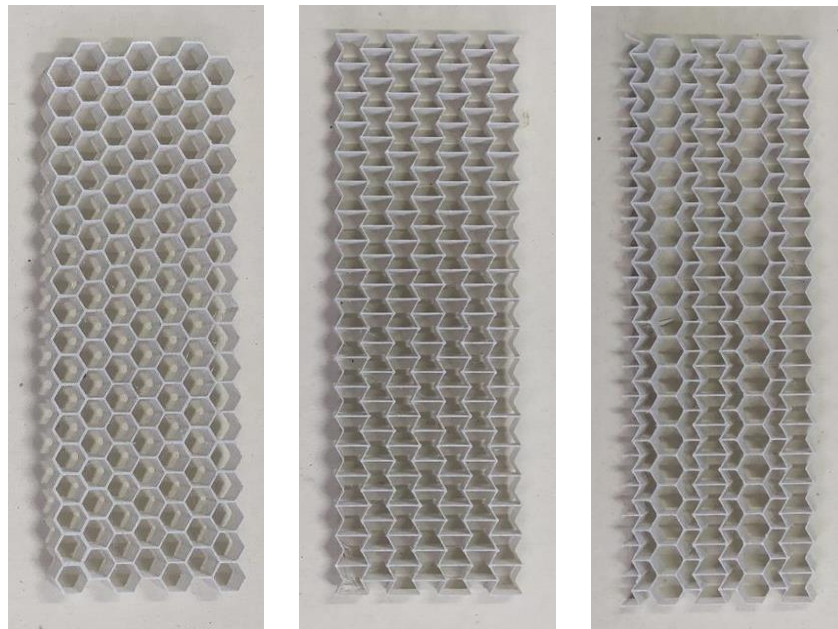


Figura 44 - Honeycombs impressos em PLA - Fonte: (Autor)

3.3 Confeção do painel sanduíche

Com as faces dos painéis todas prontas e com os honeycombs impressos, se inicia a montagem do painel sanduíche pela colagem do núcleo nas placas.

3.3.1 Preparação dos moldes das placas

Foi utilizado novamente a resina epóxi para realizar a colagem das placas com o núcleo. A ideia era fazer uma pequena camada de resina suficiente para prender o núcleo. Foi necessário fazer um pequeno molde em volta da placa, de modo que ao despejar a resina na superfície da placa, a mesma não caísse.



Figura 45 - Moldes prontos para o despejo da resina – Fonte: (Autor)

3.3.2 Junção dos núcleos e das placas

A primeira etapa da junção das placas e do núcleo foi o despejo da resina no molde. O preparo da resina seguiu o mesmo processo visto no tópico (3.1.3) com a exceção das quantidades usadas. Foi preparada uma mistura com 308g de resina para 154g de endurecedore 3g de anti-bolhas, totalizando uma solução de 465g. Para cada placa ficou aproximadamente 39g da mistura.

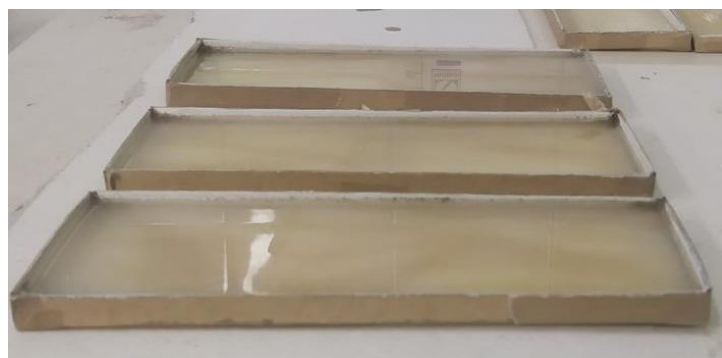


Figura 46 - Moldes com a resina despejada – Fonte: (Autor)

Ao total foram feitos 12 moldes, uma para cada placa. A primeira etapa da colagem consistia em colar o núcleo na face inferior do sanduíche.

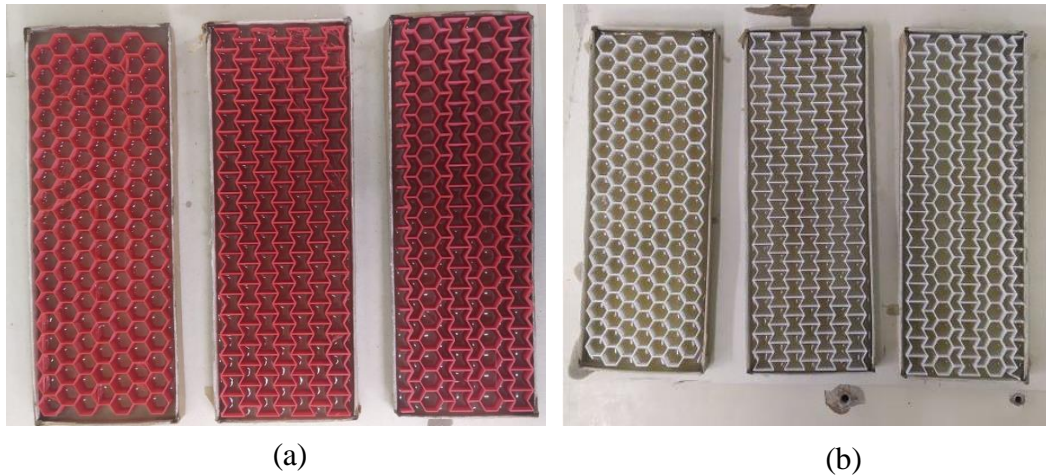


Figura 47 - Núcleos de PETG colados na face inferior (b Núcleos de PLA colados na face inferior – Fonte: (Autor)

Após esse processo, foi deixado o núcleo com as faces inferiores em repouso por um período de 48h para que a resina pudesse secar, e então se iniciou a segunda etapa, de colar a parte superior. Depois de mais 48 horas de espera para que a parte superior também secasse, os painéis sanduíches finalmente estão confeccionados.

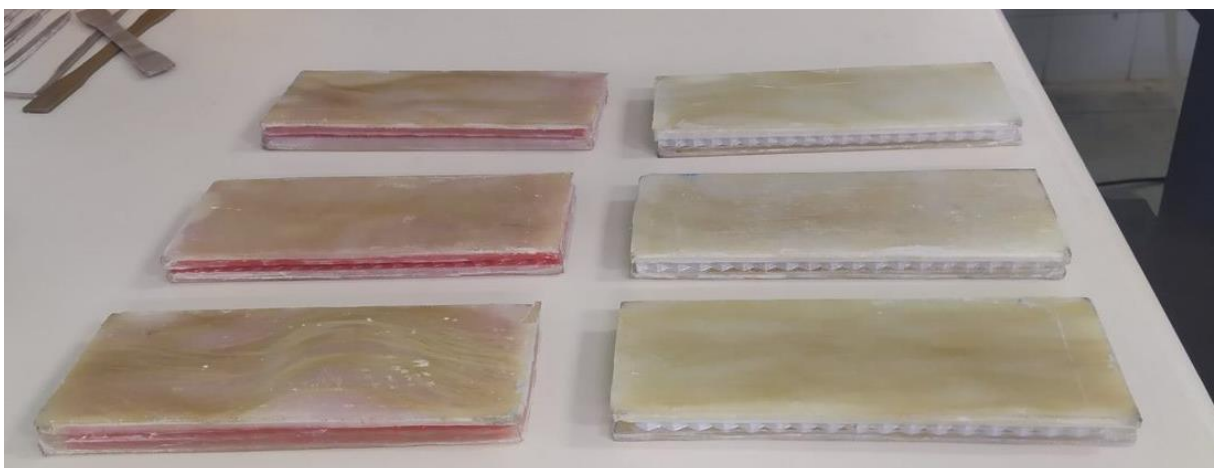


Figura 48 - Painéis sanduíches prontos – Fonte: (Autor)

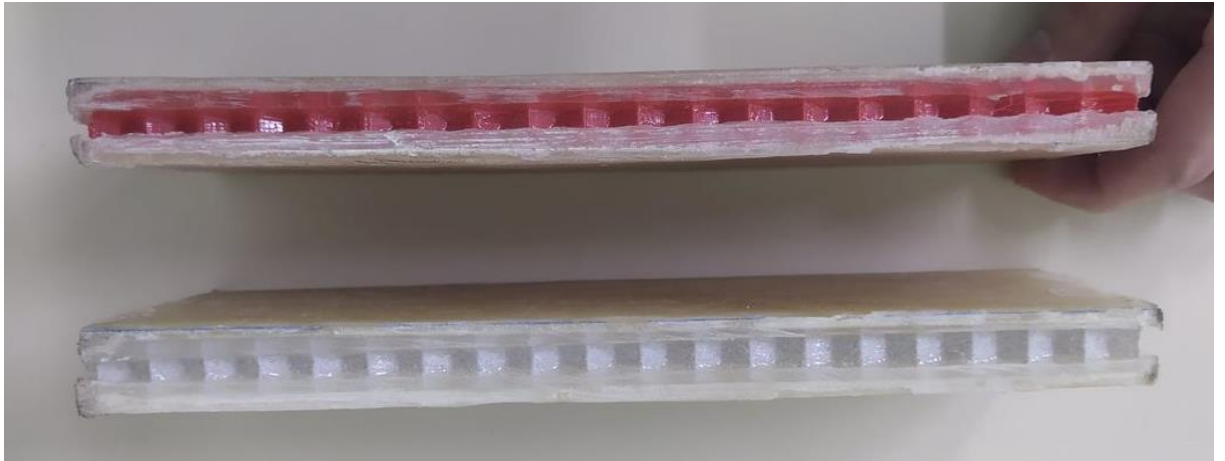


Figura 49 - Painéis sanduíche vista lateral - Fonte: (Autor)

3.4 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão, são de grande importância quando se trata de painéis sanduíche, pois o foco principal desse tipo de estrutura é obter elevada rigidez à flexão com reduzido acréscimo de massa. Os ensaios ocorreram nas dependências da Escola Superior de Tecnologia, no laboratório de ensaios mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais e a máquina utilizada foi um INSTRON 5984.



Figura 50 - INSTRON 5984 – Fonte: (Autor)

3.4.1 Ensaio nos corpos de prova

Para o teste foi utilizado o ensaio de flexão em 3 pontos e seguiu-se o método da norma de ensaio ASTM C393. A distância utilizada entre os pontos inferiores foi de 100mm com velocidade de teste de 2mm/min. Os 6 corpos de provas possuíam dimensões de 200mm x 70mm com espessura total (laminados + núcleo) variando entre 14mm e 16mm.

4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste tópico será abordado os resultados obtidos mediante ao ensaio de flexão realizado nos corpos de provas. Foram submetidos ao ensaio seis painéis sanduíches, sendo 3 de PETG e 3 de PLA nas configurações estruturais dos núcleos em hexagonal, auxético e híbrido, para ambos tipos de materiais.

| Corpo de Prova | Tipo | Material | Massa (g) |
|----------------|-----------|----------|-----------|
| 1 | Hexagonal | PETG | 188,7 |
| 2 | Auxético | PETG | 183,2 |
| 3 | Híbrido | PETG | 210,4 |
| 4 | Hexagonal | PLA | 174,6 |
| 5 | Auxético | PLA | 189,9 |
| 6 | Híbrido | PLA | 168,0 |

Tabela 2 - Corpos de provas, tipo, material e massa - Fonte: (Autor)

4.1 Resultados dos corpos de prova

Através do ensaio de flexão de 3 pontos, foi possível obter os seguintes resultados nos painéis sanduíches:

4.1.1 Corpo de prova 1 – PETG Hexagonal

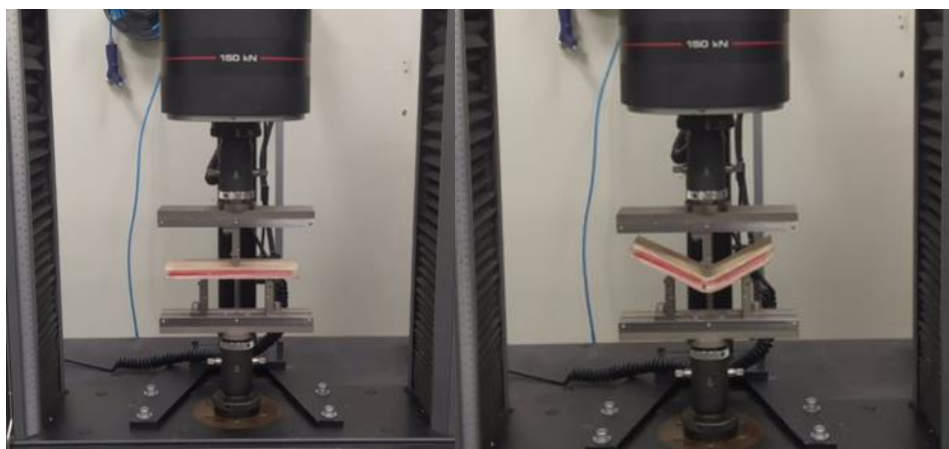


Figura 51 - PETG Hexagonal, CP-1. Teste de Flexão - Fonte: (Autor)

Tensão à flexão PETG Hexagonal

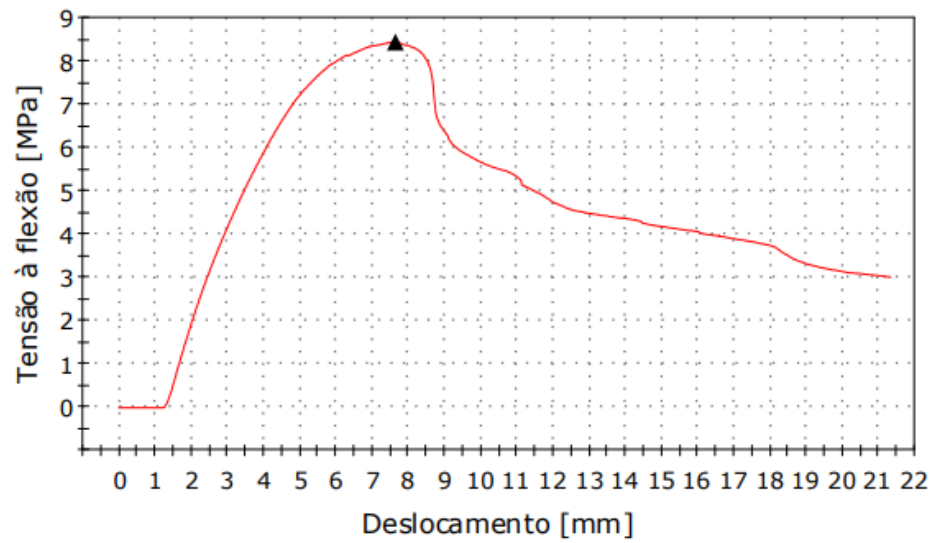


Gráfico 1 - Cp-1, Tensão à flexão x deslocamento - Fonte: (Autor)

4.1.2 Corpo de prova 2 – PETG Auxético

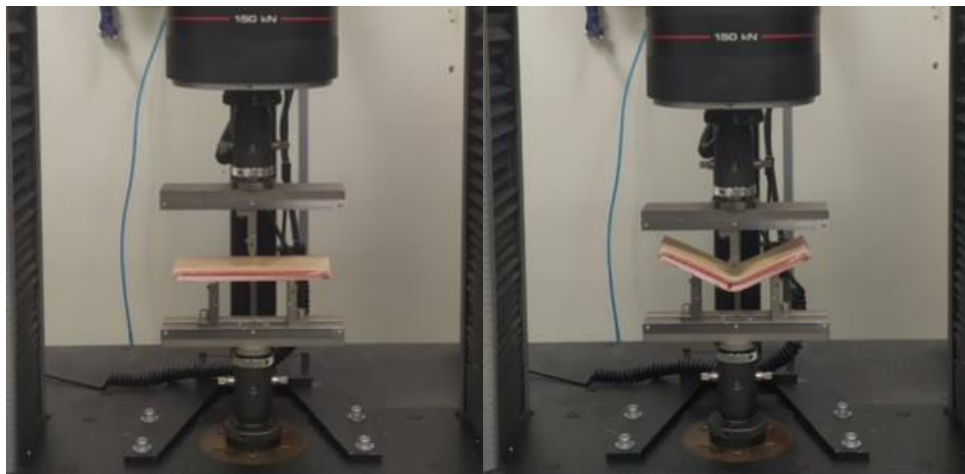


Figura 52 - PETG Auxético, CP-2. Teste de Flexão - Fonte: (Autor)

Tensão à flexão PETG Auxético

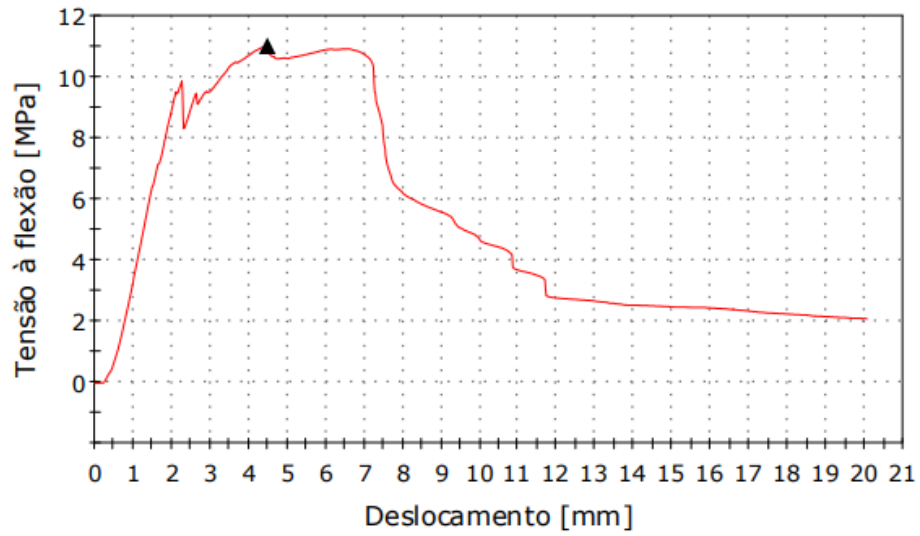


Gráfico 2 - Cp-2, Tensão à flexão x deslocamento - Fonte: (Autor)

4.1.3 Corpo de prova 3 – PETG Híbrido

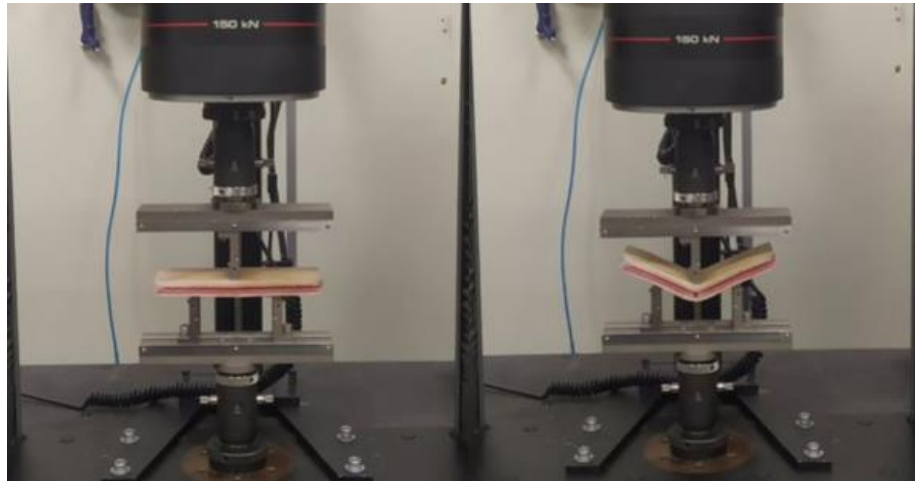


Figura 53 - PETG Híbrido, CP-3. Teste de Flexão - Fonte: (Autor)

Tensão à flexão PETG Híbrido

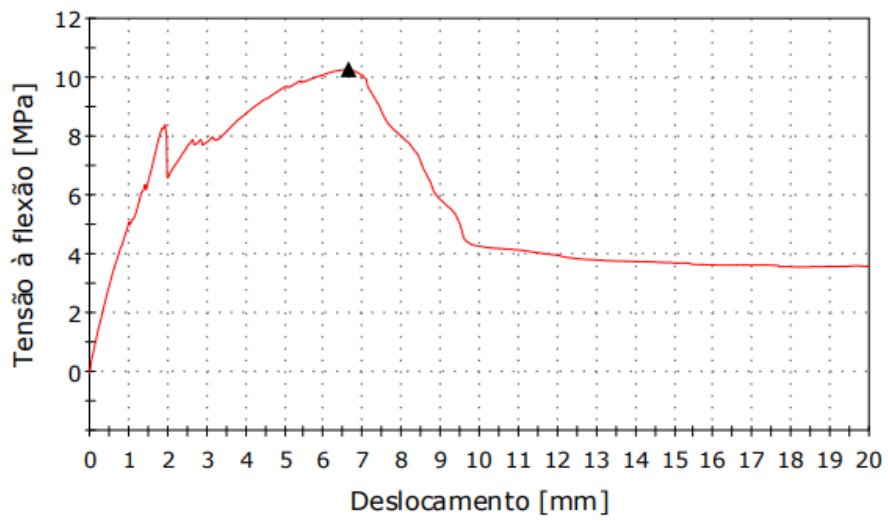


Gráfico 3 - Cp-3, Tensão à flexão x deslocamento - Fonte: (Autor)

4.1.4 Corpo de prova 4 – PLA Hexagonal

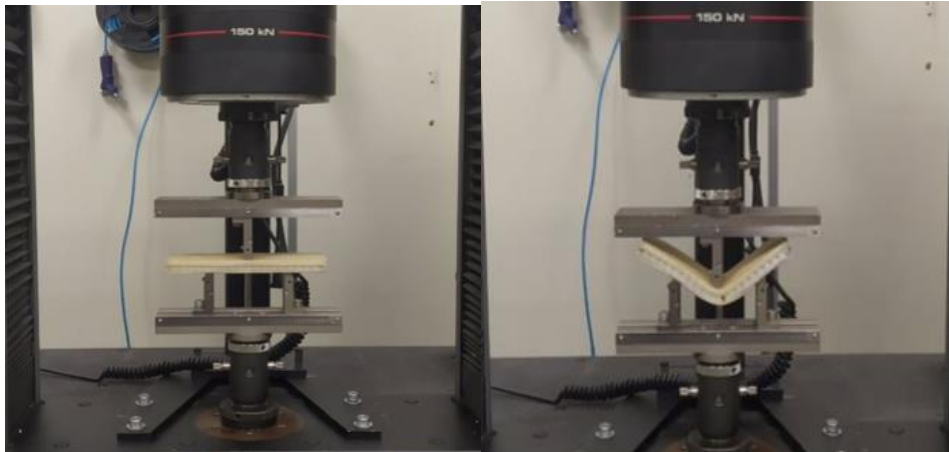
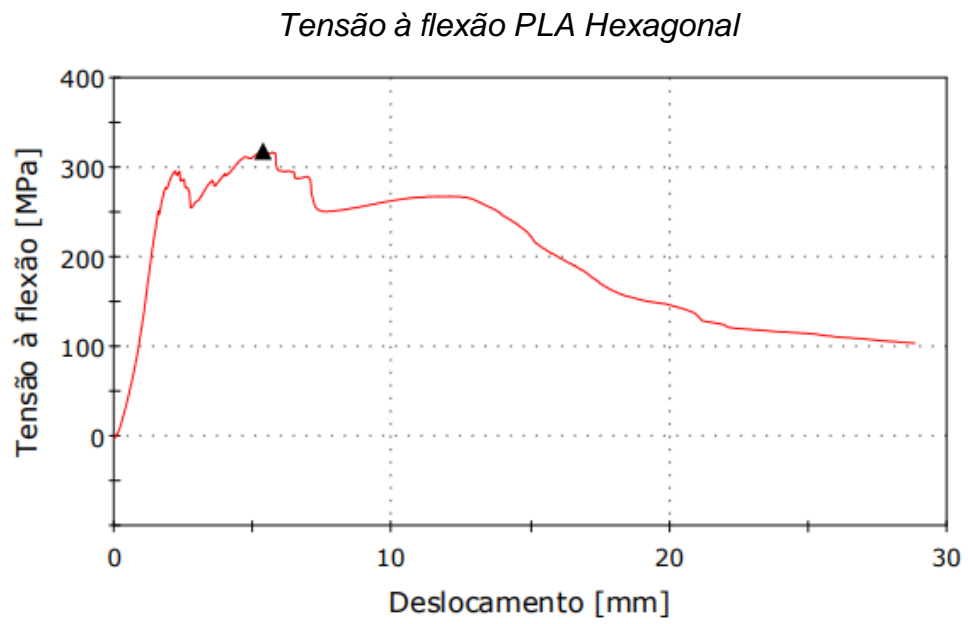


Figura 54 - PLA Hexagonal, CP-4. Teste de Flexão - Fonte: (Autor)



4.1.5 Corpo de prova 5 – PLA Auxético

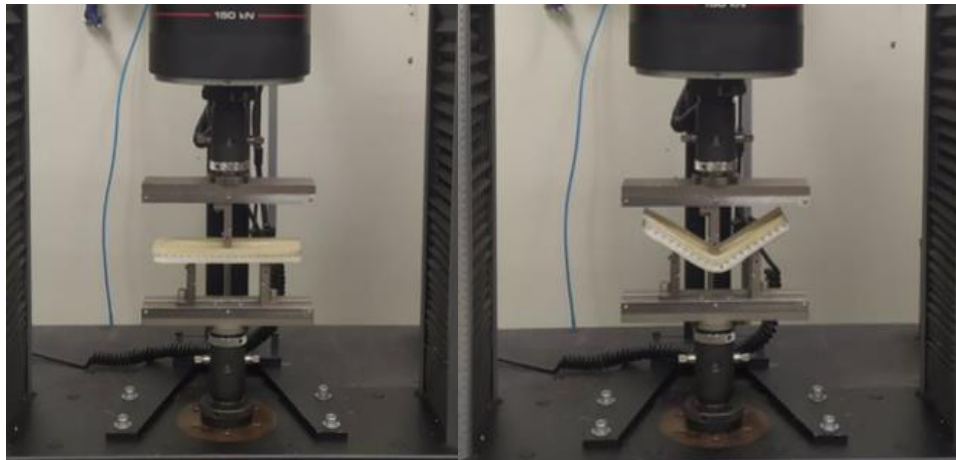


Figura 55 - PLA Auxético, CP-5. Teste de Flexão - Fonte: (Autor)

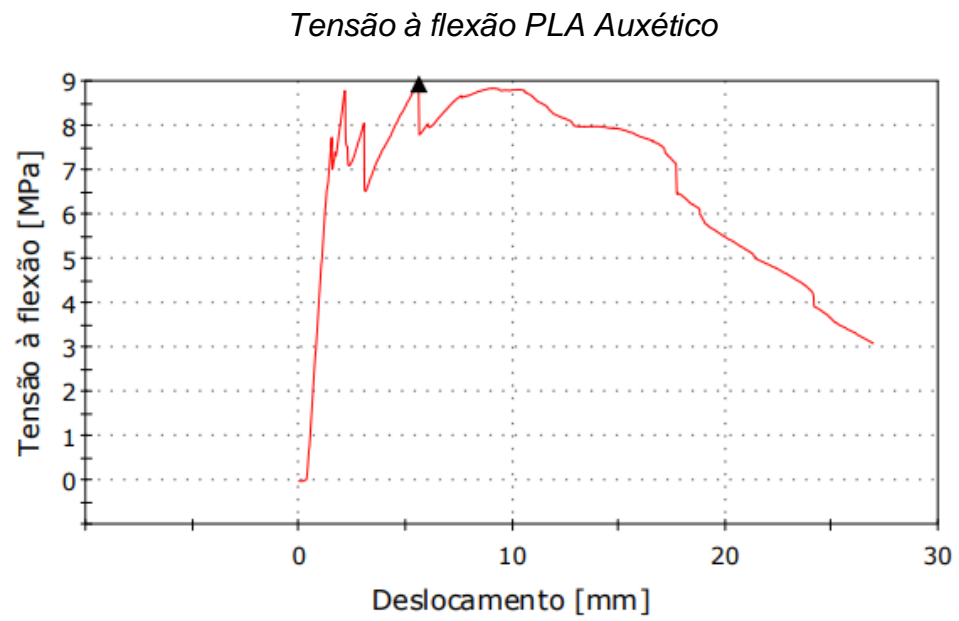


Gráfico 5 - Cp-5, Tensão à flexão x deslocamento - Fonte: (Autor)

4.1.6 Corpo de prova 6 – PLA Híbrido

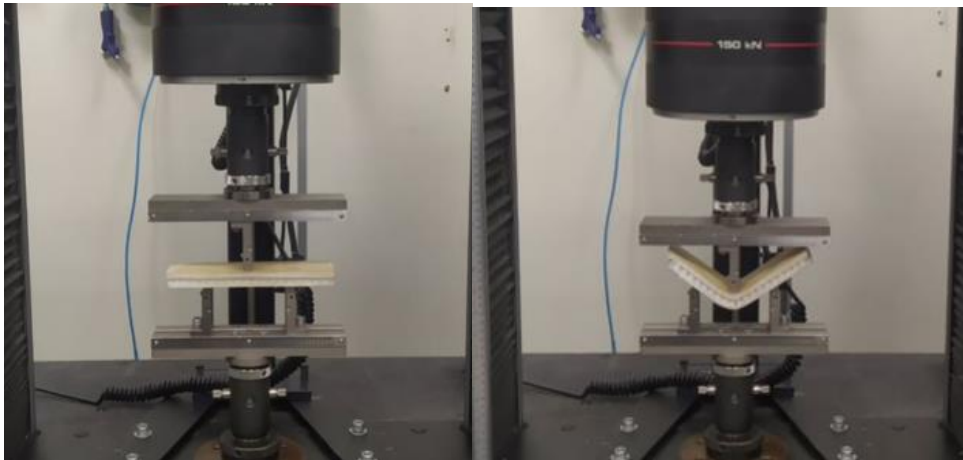


Figura 56 - PETG Híbrido, CP-3. Teste de Flexão - Fonte: (Autor)

Tensão à flexão PLA Auxético

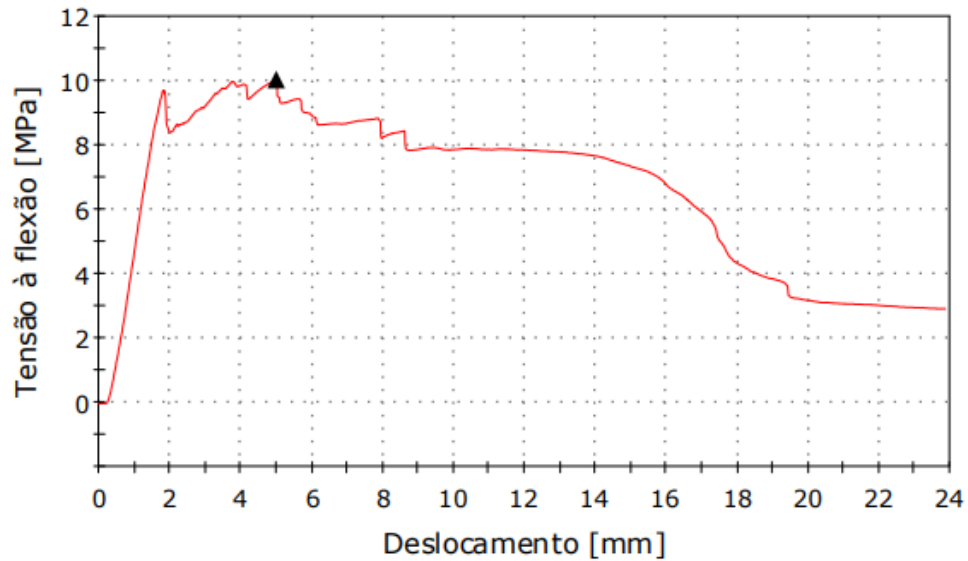


Gráfico 6 - Cp-6, Tensão à flexão x deslocamento - Fonte: (Autor)

4.2 Análise dos Resultados

Com os resultados obtidos através do ensaio de flexão e também com os dados disponibilizados do ensaio, foi possível montar a seguinte tabela. Como também fazer uma análise comparativa entre os corpos de provas.

| Corpo de Prova | Configuração do Núcleo | Material do Núcleo | Carga Máxima (N) | Tensão à Flexão em Carga Máxima (Mpa) | Deformação à Flexão | Módulo de Elasticidade (Mpa) |
|----------------|------------------------|--------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| 1 | Hexagonal | PETG | 815,14 | 8,43 | 111,11 | 317,29 |
| 2 | Auxético | PETG | 1156,31 | 11,01 | 111,11 | 707,28 |
| 3 | Híbrido | PETG | 1079,02 | 10,28 | 111,11 | 653,29 |
| 4 | Hexagonal | PLA | 905,51 | 318,34 | 46,88 | 10988,28 |
| 5 | Auxético | PLA | 937,51 | 8,93 | 111,11 | 803,68 |
| 6 | Híbrido | PLA | 1053,69 | 10,04 | 111,11 | 812,13 |

Tabela 3 - Dados obtidos do Ensaio de Flexão - Fonte: (Autor)

Através também dos dados brutos, é possível fazer uma análise comparativa entre as configurações utilizadas dos núcleos hexagonal, auxético e híbrido para o material PETG. A mesma análise foi repetida para o material PLA.

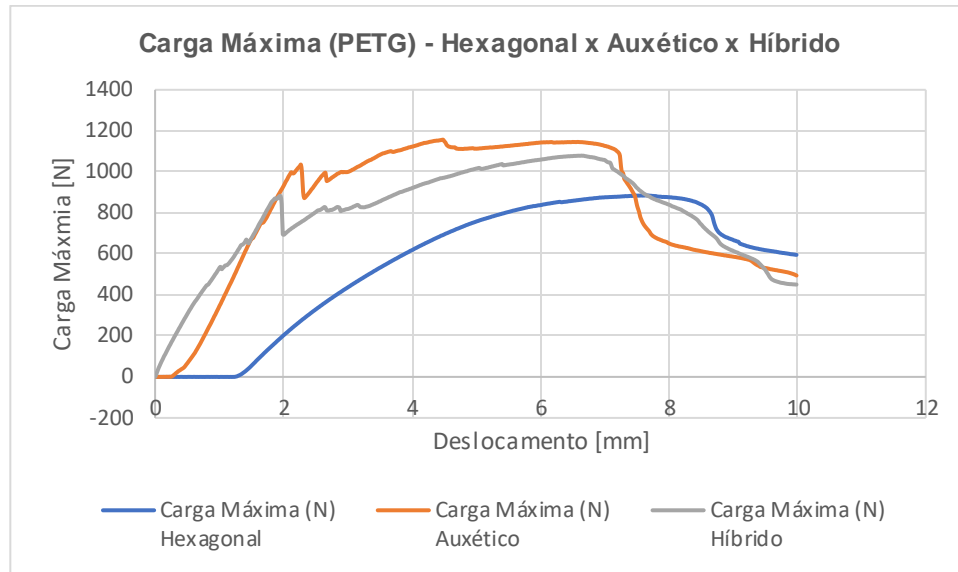


Gráfico 7 - Carga máxima PETG - Hexagonal x Auxético x Híbrido - Fonte: (Autor)

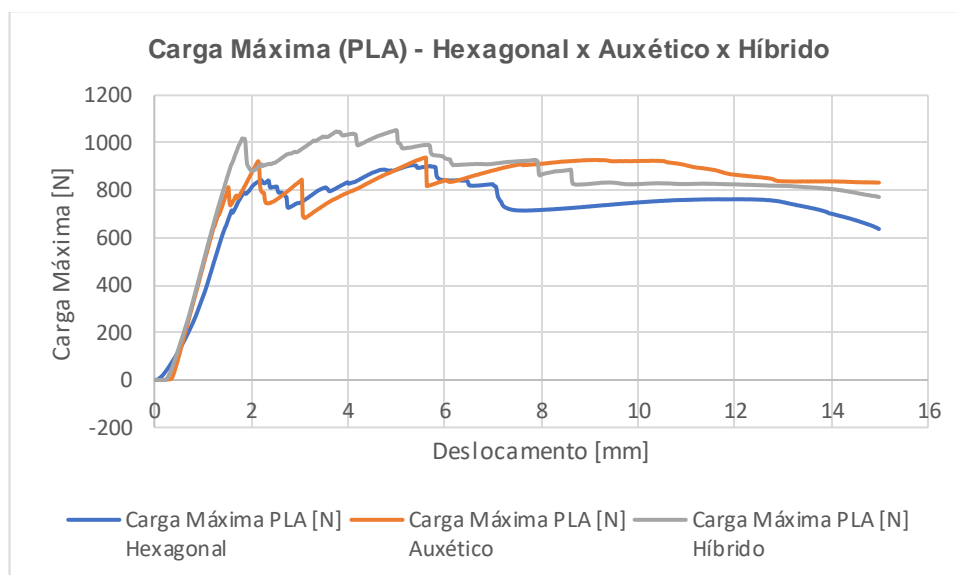


Gráfico 8 - Carga Máxima (PLA) - Hexagonal x Auxético x Híbrido - Fonte: (Autor)

É possível observar através do (Gráfico 7) que o painel sanduíche, com PETG, sendo o material do núcleo, que se comportou melhor diante da carga foi o honeycomb auxético, em seguida do híbrido e por fim, o hexagonal. Já no (Gráfico 8), utilizando PLA como material do núcleo, os painéis se comportam com uma pequena diferença, aqui o honeycomb híbrido levou vantagem sobre o auxético e o honeycomb hexagonal se manteve em último, assim como foi para o PETG.

Importante observar que apesar de o honeycomb híbrido ser o de menor massa, conforme (Tabela 2), não foi o que obteve pior resultado dentre os núcleos de PLA, em relação a carga máxima, na verdade, foi o que obteve melhor desempenho

entre esses, possuindo desempenho de 11,02% a mais que o auxético, e tendo 11,52% a menos de massa do que este.

A mesma analogia pode ser observada para o (Gráfico 7), onde o honeycomb auxético, que possui menor massa dentre os honeycombs feitos de material PETG, conforme (Tabela 2), obteve melhor desempenho, dada a carga máxima como referência, em relação ao honeycomb híbrido. Apesar do honeycomb auxético possuir 12,93% de massa a menos que o honeycomb híbrido, o mesmo obteve desempenho de 6,69% a mais que o híbrido.

É possível também, analisarmos os 6 corpos de prova de um modo geral, comparando-os em relação ao tipo de material utilizado e também à configuração estrutural do núcleo. De acordo com o (Gráfico 9), de um modo geral, o material do tipo PETG possuiu melhor desempenho em relação ao material PLA com exceção do honeycomb hexagonal de PETG.

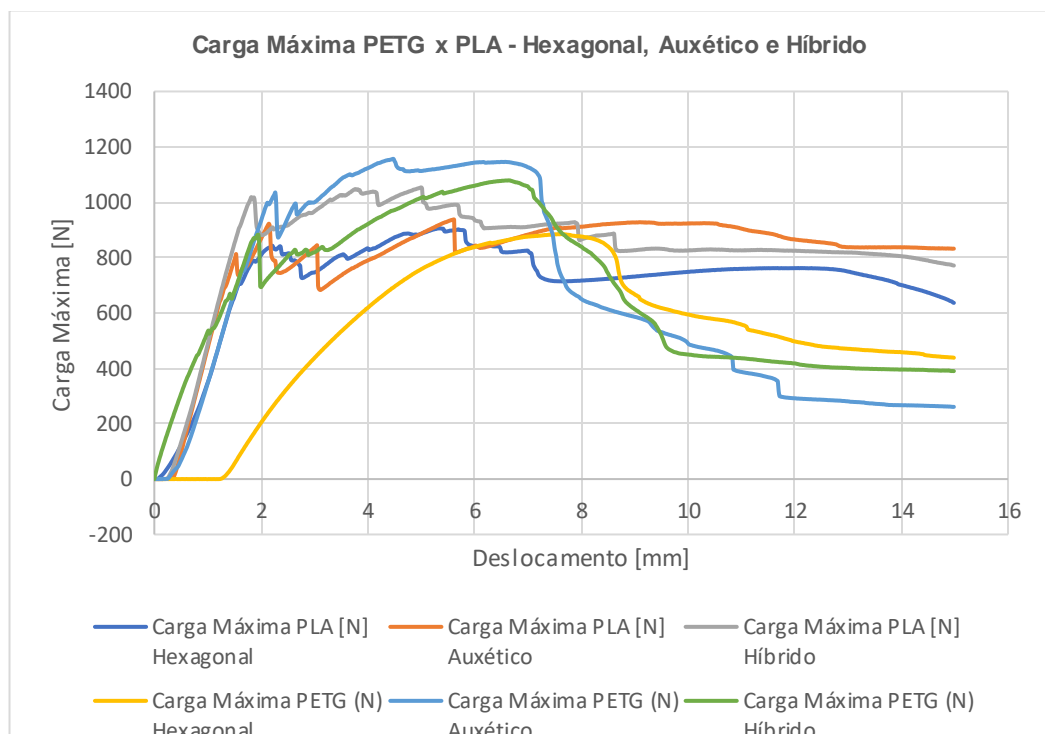


Gráfico 9 - Carga Máxima [N] PETG x PLA - Hexagonal, Auxético e Híbrido - Fonte: (Autor)

Observando o (Gráfico 9) se obteve os resultados da carga máxima de cada um dos painéis sanduíches e partir deles foi possível montar a (Tabela 4) que mostra o desempenho em relação a carga máxima de forma decrescente entre ele.

| Corpo de Prova | Configuração do Núcleo | Material do Núcleo | Carga Máxima (N) |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 2 | Auxético | PETG | 1156,31 |
| 3 | Híbrido | PETG | 1079,02 |
| 6 | Híbrido | PLA | 1053,69 |
| 5 | Auxético | PLA | 937,51 |
| 4 | Hexagonal | PLA | 905,51 |
| 1 | Hexagonal | PETG | 815,14 |

Tabela 4- Desempenho de carga máxima em ordem decrescente - Fonte: (Autor)

Aqui, é importante salientar, que durante o processo do ensaio, a máquina utilizada para o teste teve um leve movimento de correção e exerceu uma força sobre o corpo de prova 1, que era o honeycomb hexagonal de PETG, tal ato pode ter tido alguma influência com o fato de ter tido o pior desempenho entre o demais.

Observando a (Tabela 4) os honeycombs hexagonal foram os que se comportaram como menor desempenho entre os 6 corpos de prova, o honeycomb auxético feito de PETG foi o que obteve melhor desempenho, seguido dos honeycombs híbridos de PETG e PLA, respectivamente. Enquanto o honeycomb auxético de PLA ficou como 4º colocado.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho tinha como objetivo principal analisar as influências das diferentes configurações estruturais dos núcleos honeycombs hexagonal, híbrido e auxético, utilizando dois tipos de materiais diferentes, sendo eles PETG e PLA. Analisar como estes, se comportariam em uma estrutura sanduíche composta com resina epóxi e fibra de sisal, que são de grande importância para o desenvolvimento tecnológico junto ao sustentável. Os resultados obtidos foram em grande maioria esperados e todos os objetivos foram alcançados.

A fibra de sisal, fibra utilizada como matriz do compósito, é um material leve, elástico e fornece grandes resistências mecânicas quando aliada a resina epóxi, material de reforço utilizado. Essas características foram de grande relevância na hora da escolha do material, pois o foco principal do trabalho era analisar os honeycombs em um painel sanduíche, estrutura que tem como ponto principal a sua baixa densidade e altas propriedades mecânicas.

Os honeycombs utilizados foram as estruturas hexagonal, auxéticas e híbridas, por possuírem geometria diferentes, proporcionam um desempenho final também diferente. Entre o material de PETG, o núcleo honeycomb que possuiu melhor desempenho foi o honeycombs auxético, seguido do híbrido e por último hexagonal. O auxético possuiu um desempenho de carga máxima 29,50% melhor que o hexagonal.

Para o material PLA, o melhor desempenho foi diferente, o honeycomb híbrido se comportou melhor diante a carga máxima, o honeycomb auxético veio em seguida e por último o hexagonal. O híbrido possuiu um desempenho de 14,06% maior em relação ao hexagonal.

De modo geral, o material do tipo PETG obteve melhores resultados, com exceção do honeycomb hexagonal, como já dito anteriormente no trabalho, devido ao movimento de correção de erro da máquina, pode ter tido alguma influência no processo do ensaio no mesmo. O PLA se comportou como o esperado, se compararmos os melhores desempenhos dentre seus grupos PETG e PLA temos que o honeycomb auxético de PETG obteve desempenho de 8,87% maior que o honeycomb híbrido de PLA. Dentre os segundos colocados dos seus grupos, temos que o honeycomb híbrido de PETG ficou com 13,11% maior desempenho em relação

ao honeycomb auxético PLA. E por fim, para os honeycombs hexagonais, o PLA teve melhor desempenho frente ao de PETG com diferença de 9,98%.

Frente aos resultados observados ficou claro que o PETG possuiu melhor desempenho, mas como mostrado no parágrafo anterior, onde foi possível comparar as porcentagens de desempenho, é válido levarmos em consideração o uso do PLA para um possível projeto, visto que a diferença de desempenho entre os mesmos não foi tão alta.

Por fim, como mostrado nos resultados dos testes realizados, os honeycombs que possuíram melhores desempenhos quanto a carga máxima, por coincidência eram também os que possuíam menor massa dentro de seus grupos PETG e PLA. Resultado que se prova interessante quando o tema do trabalho é sobre painéis sanduíches. Também é possível tirar dessa informação, que é válida as influências das configurações dos núcleos honeycombs no desempenho do painel, pois os corpos de prova 2 e 6 possuíram bom desempenho mesmo com menor massa.

REFERÊNCIA

- CALLISTER, Willian. D. RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008;
- CALLISTER, W. D. **Ciência E Engenharia De Materiais: Uma Introdução**, 5ª edição. Rio de Janeiro, 2002.
- CALLISTER, Willian. D. RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016;
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos comuns**. 4. ed. Revista e atualizada. São Paulo: Editora Blucher, 2008;
- CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008;
- ASKELAND, DONALD R. WRIGHT, WENDELIN J. **Ciência e engenharia dos materiais** 3.ed. 2014.
- SHUBBAK, MAHMOO. Materials Science: Academic Laboratory Experiments (Janeiro 1, 2018). Disponível em SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3599940>
- BITZER, T. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. [S.I.]: Springer Science & Business Media, 1997.
- 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.
- 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.

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, v295, n.11, p.975–89, 2010.

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

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.

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.

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.

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, v295, n.11, p.975–89, 2010.

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

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.

DOS SANTOS, Lucas Ferreira Lima. **O Efeito da Umidade, Temperatura e Ultravioleta no Comportamento Mecânico de Estruturas Sanduiche com Miolo de Espuma e Honeycombde Papelão. 2019.** Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, URJ, 2019.

ARAUJO, Hugo Alexandre da Costa. **Desenvolvimento de novos conceitos no projeto de honeycombs usados em painéis compósitos. 2018.** Dissertação para obtenção de mestrado. Técnico Lisboa, 2018.

HOU, Xiuhui; DENG, Zichen; ZHANG, Kai. **Dynamic Crushing Strength Analysis of AuxeticHoneycombs. 2016.** Publicado por AMSS Press, China. 2016.

RAD, Mozafar; PRAWOTO, Yunan; AHMAD, Zaini. **Analytical solution and finite element approach to the 3D re-entrant structures of auxetic materials. 2014.** Artigo publicado na Surya University Scientia Boulevard Blok, 2016

BOLDRIN, L.; HUMMEL, S.; SCARPA, F. MAIO; Di D.; RUZZENE, M.; REMILLAT. **Dynamic behaviour of auxetic gradient composite hexagonal honeycombs. 2016** Artigo publicado no jornal Elsevier, 2016

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

RAMIRES, Elaine Cristina. **Biocompósitos a partir de matrizes poliméricas baseadas em lignina, tanino e glioxal reforçadas com fibras naturais. 2010, 277p.** Tese (Doutorado em Ciências (Físico-química)) Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2010.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos e estruturas sanduíche: Projeto e análise.** Barueri: Manole, 2005.