

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LUIZ GUILHERME MUNIZ TEIXEIRA

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO
FABRICADO COM RESINA POLIÉSTER E FIBRA DE VIDRO

Joinville

2021

LUIZ GUILHERME MUNIZ TEIXEIRA

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO
FABRICADO COM RESINA POLIÉSTER E FIBRA DE VIDRO

Trabalho apresentado como requisito para a obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Claudimir A. Carminatti.

Joinville

2021

LUIZ GUILHERME MUNIZ TEIXEIRA

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO
FABRICADO COM RESINA POLIÉSTER E FIBRA DE VIDRO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 24 de setembro de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Claudimir Antonio Carminatti
Orientador/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Alexandre Mikowski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Esp. Eng. Ronan Michels
Membro
Estaleiro Navship Ltda.

Este trabalho é dedicado aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Claudimar Renato Teixeira e Janaina Muniz Teixeira, que são meus exemplos de força, determinação e superação, e por estarem sempre me apoiando mesmo estando a quilômetros de distância. Sem eles, minha formação não seria possível. Sou incapaz de mensurar tamanha gratidão. Sou e serei eternamente grato a eles.

Aos meus irmãos, Ana Carolina, Jaqueline e Luiz Augusto, que foram os primeiros amigos que o mundo me deu e também estão sempre me apoiando. Aos demais familiares, tios e primos, que sei que estarão sempre disponíveis para me ajudar.

À minha avó, Ivone dos Passos, por ter me dado todo apoio para que eu conquistasse meus objetivos. À minha bisavó e madrinha, Ircia Garritano Muniz (*in memoriam*), por todo amor, carinho e suporte que me deu ao longo de sua vida, e que tive o privilégio de conviver até meu início da graduação.

À minha namorada, Amanda Becker, por todo incentivo, suporte e companheirismo nessa caminhada. Aos meus sogros, Loreni Becker e Tagma Becker, que me acolheram e sempre me apoiaram em qualquer situação.

A todos meus amigos da minha cidade natal, Rio de Janeiro, e de Florianópolis, que, apesar da distância, continuaram demonstrando a mesma parceria.

Aos amigos César Augusto, Diego Rebelo, Fernando Galvan, Gabriela Vieira, Milton Andrey, Natália Morales, Nicolas Almeida e Rafaela Scariot por tornarem a vida universitária mais alegre e prazerosa.

Aos demais amigos feitos na graduação, com os quais compartilhei momentos de dificuldades e alegria por termos passado pela experiência da vida universitária ao mesmo tempo, em especial ao Gustavo Araújo. A caminhada com certeza teria sido mais árdua sem eles.

Aos amigos Arthur Dutra, Felipe Souza, Gabriel Fonseca e Géssica Pedott, os quais tive o privilégio de compartilhar moradia e que me ajudaram em momentos essenciais da graduação.

À família Cascata Futebol Clube, pelos momentos de felicidade dentro e fora de campo. Tenho orgulho em dizer que fiz parte desse time de amigos.

*“É o meu maior prazer vê-lo brilhar
Seja na terra, seja no mar.
Vencer, vencer, vencer!”
(Lamartine Babo)*

RESUMO

Materiais compósitos consistem na combinação das propriedades de dois ou mais materiais e são utilizados em diversas áreas da indústria, como a náutica e a aeroespacial, sendo uma solução para inovações em projetos de engenharia em geral. Esse material se caracteriza pelo baixo custo de produção e pela eficácia de suas propriedades mecânicas e físicas. A combinação é dada por uma matriz, como as resinas, e reforços, geralmente, fibrados. Nessa classe de materiais, o plástico reforçado com fibra possui maior destaque. Na indústria náutica, a fim de se obter um material leve, econômico e com alto desempenho, o reforço normalmente utilizado é a fibra de vidro, formando um material conhecido como Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV), que consiste na união da resina com o reforço de fibra de vidro. Para sua fabricação, pode ser utilizada a técnica de laminação manual por ser considerada a mais simples e de menor custo. O objetivo deste trabalho foi produzir um material composto de matriz poliéster reforçado com fibra de vidro analisando a organização das camadas de tecido/manta e determinando as suas propriedades mecânicas. Foram produzidas nove placas de material compósito utilizando resina poliéster e fibra de vidro com variação das camadas de manta e tecido da fibra de vidro. A partir de cada placa foram obtidos cinco corpos de prova que foram submetidos ao ensaio mecânico de tração, determinando as propriedades mecânicas de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade das nove configurações produzidas. Os resultados demonstram que a utilização da manta teve propriedades mecânicas dos compósitos inferiores ao tecido devido a descontinuidade dos fios. As variações mais espessas, mesmo com tecido, não apresentaram valores elevados das propriedades mecânicas desejáveis para o material, o que pode ter tido grande interferência devido a existência de bolhas nas camadas do laminado. Foi possível determinar que a configuração utilizada como base para o desenvolvimento deste trabalho apresentou propriedades mecânicas elevadas, com um módulo de elasticidade de 23,40 MPa, mostrando que a quantidade de tecido é mais importante do que a colocação de manta na variação das camadas. Portanto, devido ao baixo custo de fabricação e alto desempenho do composto, a configuração base utilizada no trabalho é a mais recomendada para o uso na indústria náutica.

Palavras-Chave: Materiais compósitos. Resina poliéster. Fibra de vidro. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Composite materials consist of the combination of the properties of two or more materials and are used in several areas of industry, such as nautical and aerospace, being a solution for innovations in engineering projects in general. This material is characterized by low production costs and the effectiveness of its mechanical and physical properties. The combination is given by a matrix, such as resins, and reinforcements, usually fibers. In this class of materials, fiber-reinforced plastic is the most prominent. In the nautical industry, in order to obtain a light, economical and high performance material, the reinforcement usually used is fiberglass, forming a material known as Fiberglass Reinforced Plastic (FRP), which consists of the union of resin with fiberglass reinforcement. For its manufacture, the manual lamination technique can be used because it is considered the simplest and least expensive. The objective of this work was to produce a fiberglass reinforced polyester matrix composite material by analyzing the organization of the fabric/blanket layers and determining its mechanical properties. Nine plates of composite material were produced using polyester resin and fiberglass with variation of the blanket and fabric layers of the fiberglass. From each plate five specimens were obtained and submitted to the mechanical tensile test, determining the mechanical properties of maximum stress, maximum strain and modulus of elasticity of the nine configurations produced. The results show that the use of the blanket had lower mechanical properties of the composites than the fabric due to the discontinuity of the threads. The thicker variations, even with fabric, did not present high values of the mechanical properties desirable for the material, which may have had great interference due to the existence of bubbles in the layers of the laminate. It was possible to determine that the configuration used as the basis for the development of this work presented high mechanical properties, with a modulus of elasticity of 23.40 MPa, showing that the amount of fabric is more important than the placement of blanket in the variation of layers. Therefore, due to the low manufacturing cost and high performance of the composite, the base configuration used in this work is the most recommended for use in the nautical industry.

Keywords: Composite materials. Polyester resin. Fiberglass. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Formação de um material compósito usando fibras e resina | 17 |
| Figura 2 - Desempenho de resinas usadas em compósitos de matriz polimérica..... | 18 |
| Figura 3 - Orientação aleatória das fibras em uma manta | 21 |
| Figura 4 - Organização das fibras dos tecidos: a) tipo tela, b) tipo cetim | 22 |
| Figura 5 - Processo de laminação manual (hand lay-up) | 23 |
| Figura 6 - Representação de uma máquina usada para o ensaio mecânico de tração..... | 25 |
| Figura 7 - Fluxograma da metodologia do trabalho | 26 |
| Figura 8 - Preparação do molde..... | 27 |
| Figura 9 - Resina (a) e catalisador (b) utilizados na laminação dos corpos de prova | 27 |
| Figura 10 - Mantas e tecido | 28 |
| Figura 11 - Organização das camadas nas variações..... | 29 |
| Figura 12 - Laminados produzidos e sua identificação | 30 |
| Figura 13 - Desmoldagem dos laminados | 30 |
| Figura 14 - Ferramentas do corte..... | 31 |
| Figura 15 - Marcação dos laminados para o corte..... | 31 |
| Figura 16 - Máquina do ensaio (a) e corpo de prova rompido (b)..... | 32 |
| Figura 17 - Célula de carga de 100 kN..... | 33 |
| Figura 18 - Variação 6 rompida..... | 35 |
| Figura 19 - Variação 3 deformada..... | 35 |
| Figura 20 - Gráfico comparativo da média da tensão máxima..... | 37 |
| Figura 21 - Gráfico comparativo da média da deformação máxima | 38 |
| Figura 22 - Gráfico comparativo da média do módulo de elasticidade..... | 40 |
| Figura 23 - Curva tensão-deformação da configuração original | 53 |
| Figura 24 - Curva tensão-deformação da variação 1 | 53 |
| Figura 25 - Curva tensão-deformação da variação 2 | 54 |
| Figura 26 - Curva tensão-deformação da variação 3 | 54 |
| Figura 27 - Curva tensão-deformação da variação 4 | 55 |
| Figura 28 - Curva tensão-deformação da variação 5 | 55 |
| Figura 29 - Curva tensão-deformação da variação 6 | 56 |
| Figura 30 - Curva tensão-deformação da variação 7 | 56 |
| Figura 31 - Curva tensão-deformação da variação 8..... | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Propriedades das fibras de vidro | 20 |
| Tabela 2 - Variações adotadas | 28 |
| Tabela 3 - Média da tensão máxima das variações | 36 |
| Tabela 4 - Média da deformação máxima das variações | 37 |
| Tabela 5 - Média do módulo de elasticidade das variações | 39 |
| Tabela 6 - Valores das espessuras dos corpos de prova | 45 |
| Tabela 7 - Valores das larguras dos corpos de prova | 47 |
| Tabela 8 - Área da seção transversal | 49 |
| Tabela 9 - Propriedades mecânicas | 51 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CP – Corpo de Prova

CPs – Corpos de Prova

IC – Índice de confiança

NS – Nível de significância

PRF – Plásticos reforçados com fibra

PRFV – Plásticos reforçados com fibra de vidro

LISTA DE SÍMBOLOS

Δl – Deslocamento

l_0 – Comprimento inicial

ε – Deformação

σ – Tensão

A – Área da seção transversal

E – Módulo de Elasticidade

F – Força

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 15 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos..... | 15 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 16 |
| 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS | 16 |
| 2.1.1 Resina Poliéster..... | 17 |
| 2.1.2 Fibra de Vidro..... | 19 |
| 2.1.2.1 Manta..... | 20 |
| 2.1.2.2 Tecido | 21 |
| 2.2 LAMINAÇÃO MANUAL (<i>HAND LAY UP</i>) | 22 |
| 2.3 NOÇÕES SOBRE O ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO..... | 23 |
| 3. METODOLOGIA..... | 26 |
| 3.1 MATERIAIS | 26 |
| 3.2 PROCESSO DE LAMINAÇÃO | 26 |
| 3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 31 |
| 3.4 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO | 32 |
| 4. RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS | 34 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 41 |
| REFERÊNCIAS | 43 |
| APÊNDICE A – MEDIDAS DAS AMOSTRAS..... | 45 |
| APÊNDICE B – PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AMOSTRAS..... | 51 |
| APÊNDICE C – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DAS VARIAÇÕES | 53 |

1. INTRODUÇÃO

Devido à competitividade de mercado, é fundamental que as empresas de diversos ramos da engenharia busquem inovações para seus projetos com melhores índices de qualidade, alto desempenho e preços acessíveis. Dentre essas inovações aparecem os materiais compósitos, que são amplamente utilizados na indústria náutica.

O termo composto, em material composto, consiste no agrupamento de dois ou mais materiais diferentes. Cada material deve apresentar características e propriedades físicas diferentes do outro. O processo de união dos materiais resulta em um material compósito com propriedades superiores às dos componentes iniciais (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 1990).

A escolha da matéria-prima para a criação de um compósito deve ser feita visando obter propriedades adequadas à aplicação e baixo custo de produção, o que demanda um estudo para a escolha de quais elementos serão utilizados durante o processo de laminação a fim de se obter o material. Segundo Marinucci (2011), a escolha da técnica de fabricação a ser utilizada também deve ser feita de forma criteriosa, pois a qualidade e custo do compósito são influenciados pelo processo de fabricação.

A necessidade de realizar estudos relacionados a um material compósito se dá devido à possível aplicação em diversas áreas de engenharia e, através de ensaios, ser plausível obter informações sobre quais métodos de fabricação do composto são eficazes e quais materiais apresentarão propriedades a fim de originar um produto com alta qualidade, alto desempenho e baixo custo de produção.

Para a produção de um material compósito são utilizadas técnicas de laminação e, normalmente, para a fabricação de peças no setor náutico são utilizadas técnicas de laminação manual, laminação por infusão e laminação a vácuo (NASSEH, 2011). Cada técnica possui vantagens e desvantagens, e as características e propriedades do produto dependem, também, de qual técnica será utilizada em sua produção.

Para Nasseh (2011), mesmo sendo considerada uma técnica antiga e inferior às demais quanto à eficiência, resistência e velocidade de produção, a laminação manual pode ser útil na fabricação de pequenos barcos e pequenas peças. Essa técnica de laminação é o método mais fácil de obter materiais compostos reforçados com fibras (AL-QURESHI, 2010).

Segundo Kaw (2006), uma lâmina é uma camada plana de fibra com direção única ou fibra tecida organizada em uma matriz, e laminado é um amontoado de camadas de compósitos, em que cada camada pode possuir diversas orientações e também pode ser

construída por diferentes materiais de reforço. Greene (1999) define que um laminado “[...] consiste em uma série de lâminas ou camadas que são unidas com um material que geralmente é igual à matriz de cada camada.” (p.105).

Os materiais compósitos mais comuns são os compostos de matriz polimérica, que consistem em um polímero como sendo a matriz (por exemplo, poliéster) reforçada por fibras de espessura fina (por exemplo, vidro). Por possuírem baixo custo, elevada resistência e um processo de fabricação simples quando comparado aos demais processos, esses são os compostos geralmente mais usados (KAW, 2006).

Os elementos de reforço são capazes de fornecer rigidez e resistência ao compósito. Os materiais que normalmente são utilizados na produção de plásticos reforçados com fibra (PRF) são o vidro, carbono, boro e aramida. As fibras de vidro são encontradas em larga escala e, devido a sua fácil obtenção, são os reforços que possuem menores custos entre todos os outros tipos de fibra normalmente utilizados (MAZUMDAR, 2002). O plástico reforçado com fibra de vidro é conhecido comumente como PRFV.

Pela capacidade de combinar dois ou mais materiais em sua estrutura, os compósitos oferecem produtos com algumas vantagens quando comparados com outros tipos de materiais. Entre as vantagens obtidas estão a elevada resistência à corrosão, baixo custo de fabricação e alto desempenho do composto. Diante desta conjuntura, esse tipo de material é amplamente utilizado na indústria náutica (NASSEH, 2007).

O plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) é amplamente utilizado no setor náutico por ser mais leve, sendo que existem poucas opções que superem embarcações fabricadas em fibra de vidro em termos econômicos, pois essas embarcações possuem menor custo de produção (NASSEH, 2011). Diante do exposto, será realizada uma pesquisa experimental de laminados produzidos com resina poliéster e fibra de vidro através do processo de laminação manual.

Para a realização da experimentação, os laminados serão confeccionados com variações da gramatura da fibra de vidro utilizando o processo de laminação manual (*hand lay-up*) seguindo um padrão de dimensão para que sejam obtidas amostras padronizadas. Depois de serem produzidos, serão determinadas as propriedades mecânicas dos laminados utilizando ensaios de tração atendendo as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção, serão apresentados os objetivos propostos para a realização e resolução deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Considerando a problemática da resistência de materiais na indústria náutica, tem-se como objetivo produzir um material composto de matriz poliéster reforçado com fibra de vidro analisando a organização das camadas de tecido/manta e determinando as suas propriedades mecânicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Produzir compósitos resina poliéster/fibra de vidro utilizando o método de laminação manual (*hand lay-up*) com variação na organização das camadas de tecido/manta;
- Obter as propriedades mecânicas de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade dos compósitos produzidos;
- Determinar a melhor organização das camadas de tecido/manta do laminado produzido.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abrange a teoria aplicada à problemática do trabalho, apresentando as características dos materiais, processos e métodos utilizados para o desenvolvimento do compósito em questão. Assim, serão mostrados os conceitos de materiais compósitos, de resina poliéster, da fibra de vidro, da laminação manual e do método utilizado para a realização do ensaio.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Em materiais compósitos, o termo compósitos remete a um ou mais materiais, que são os reforços, imersos numa resina, que é a matriz. A combinação é feita para se obter um novo material com propriedades e características desejadas, as quais não são obtidas individualmente nos materiais usados no processo de união. Os reforços são mais duros e resistentes que a matriz. O reforço é feito com fibras e a matriz consiste numa resina (AL-QURESHI, 2010).

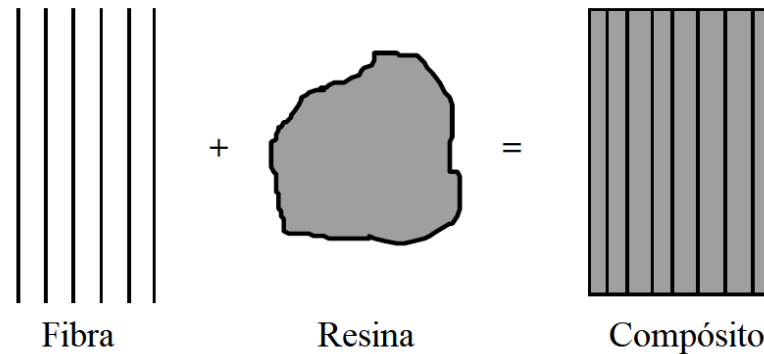
Segundo Greene (1999), um material compósito abrange reforços suportados por uma matriz, que tem sua fase inicial líquida e, através de uma reação química, se transforma num sólido. A função do reforço é suportar as cargas primárias que atuam no laminado, enquanto a resina transmite a carga pelas camadas, normalmente, através de cisalhamento. A matriz é capaz de segurar as fibras no plano e transmitir as cargas umas para as outras, e, geralmente, possui densidade, elasticidade e resistência inferiores à fibra (AL-QURESHI, 2010).

Em materiais compósitos, os reforços podem ser feitos de polímeros, cerâmicas e metais, e as fibras podem ser contínuas, longas ou curtas. Os compostos a base de matriz polimérica (termofixa ou termoplástica) são os mais utilizados em diversas áreas por apresentarem boas propriedades e menor custo de fabricação. A fibra tem a função de oferecer resistência e rigidez ao composto. Já a matriz oferece rigidez e resistência do material ao ambiente (MAZUMDAR, 2002).

O uso da fibra de vidro como reforço no processo de construção de embarcações, formando um PRFV, tem sido destaque desde meados da década de 1960 pelas características benéficas que a mesma fornece, como material mais leve, resistência à corrosão, resistência ao impacto, menor custo de produção quando comparado a outros reforços e facilidade de fabricação, manutenção e reparo (GREENE, 1999).

A Figura 1 apresenta a configuração de um material compósito.

Figura 1 - Formação de um material compósito usando fibras e resina



Fonte: Mazumdar (2002, p. 24).

A resina pode ser considerada um polímero ou uma matriz polimérica, que consiste num material formado pela combinação de resinas e agentes de cura, criando um material maciço com propriedades mecânicas e resistência química. As resinas poliésteres são as mais utilizadas no processo de produção de compósitos devido suas características desejáveis em um laminado (MARINUCCI, 2011).

2.1.1 Resina Poliéster

Resinas de poliéster insaturadas são produzidas através da reação de ácidos insaturados e ácidos saturados, sendo os insaturados constituídos normalmente pelos ácidos maleico e fumárico, em junção com um ácido saturado, do tipo ortoftálico ou isoftálico, ligados a um glicol, como o propileno-glicol ou etileno-glicol, e são dissolvidos em um monômero reativo, como o estireno, que é adicionado ao processo de cura visando a interligação das moléculas de poliéster e a formação de copolímeros de poliéster e estireno (NASSEH, 2011).

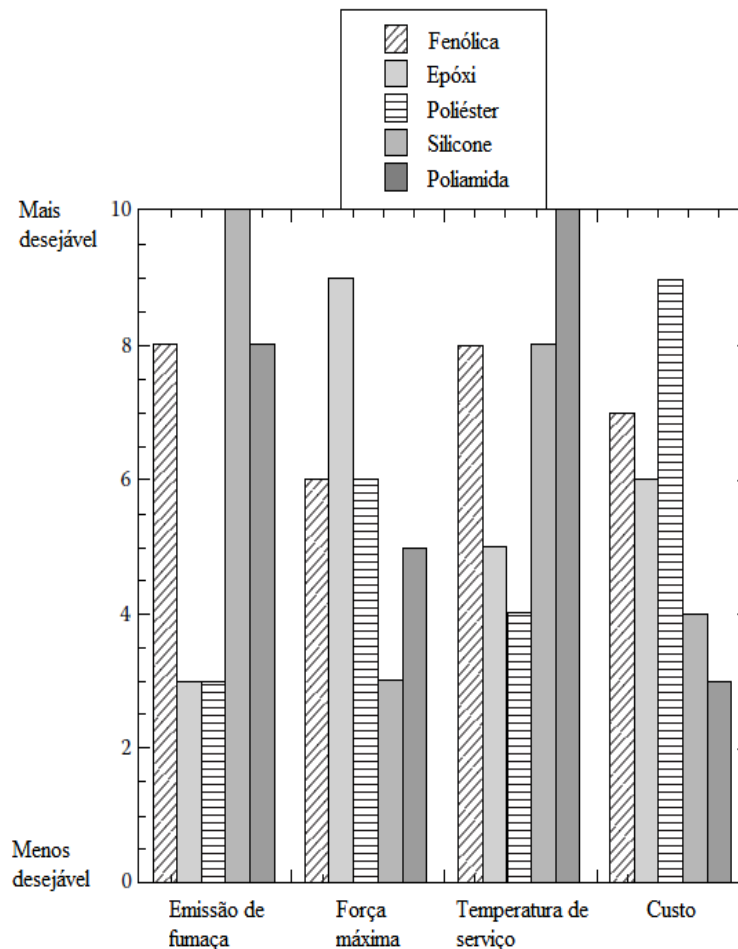
Em embarcações, são utilizadas resinas poliésteres ortoftálicas e isoftálicas. Resinas ortoftálicas são as mais antigas no mercado e ainda são utilizadas, mas são limitadas em termos de estabilidade térmica, resistência química e processabilidade. As isoftálicas possuem propriedades mecânicas mais elevadas e maior resistência química, o que levou a ser altamente empregada na construção de embarcações por sua maior resistência à corrosão quando está em contato com a água (GREENE, 1999).

Segundo Mazumdar (2002), as resinas poliésteres são resinas de menor custo no mercado e oferecem propriedades desejáveis por um projetista e armador na indústria náutica, como a resistência à corrosão, possuindo temperatura de serviço inferior à temperatura de operação da resina epóxi. Essas resinas são consideradas as mais simples para qualquer tipo de laminação (NASSEH, 2011).

Para Kaw (2006), cada resina possui vantagens e desvantagens em seu uso. No caso do poliéster, as vantagens consistem em seu baixo custo e possibilidade de confecção transparente, mas, em contrapartida, possui temperaturas de operação abaixo de 77 °C e fragilidade e encolhimento de até 8% durante a cura. O alto desempenho aliado ao menor valor de investimento é atraente nesse tipo de resina (MARINUCCI, 2011).

A Figura 2 apresenta alguns tipos de resinas e suas vantagens e desvantagens através de uma pontuação do que é desejável em uma matriz. O uso de cada uma dessas resinas depende da sua aplicação, pois diversos fatores são levados em consideração (KAW, 2006).

Figura 2 - Desempenho de resinas usadas em compósitos de matriz polimérica



Fonte: Kaw (2006, p. 27).

Existe uma variedade de fibras que podem ser utilizadas como reforço na produção dos materiais compósitos e elas podem possuir arranjo geométrico como fibras contínuas, fibras descontínuas e particuladas. As fibras de vidro possuem propriedades elásticas e custo de produção que as tornam atrativas quando comparadas aos metais não ferrosos, como o alumínio, o cobre e o chumbo (MARINUCCI, 2011).

2.1.2 Fibra de Vidro

As fibras de vidro apresentam propriedades que proporcionam maior eficácia ao produto, como elevada resistência química. O baixo investimento para sua produção faz com que esse tipo de fibra seja usado como reforço em mais de 90% dos plásticos reforçados, sendo utilizado tanto na indústria civil quanto na indústria náutica (GREENE, 1999).

Embora possua propriedades atraentes, como baixo custo e alta resistência química, e seja amplamente utilizada na indústria náutica, a fibra de vidro, em contrapartida, possui má adesão a algumas resinas, baixa resistência à abrasão e baixa resistência à fadiga (KAW, 2006). O seu módulo de elasticidade também é considerado inferior quando comparado ao valor do módulo de elasticidade de outros reforços, como Kevlar, carbono e boro (AGARWAL et al., 1990).

Segundo Nasseh (2011), não há como ter um material apenas com propriedades benéficas, pois cada material possuirá algumas características indesejáveis. Isso faz com que a escolha da matéria-prima seja feita de forma criteriosa na produção de uma embarcação, visando obter propriedades eficazes e melhor desempenho.

O baixo custo da fibra de vidro se destaca entre os demais reforços devido a sua fácil obtenção e a abundância da matéria-prima utilizada para a produção do material, como o silício contido na areia (MARINUCCI, 2011). As propriedades das fibras de vidro variam de acordo com como elas são produzidas.

As fibras de vidro possuem diferentes propriedades mecânicas e químicas e são classificadas por letras do alfabeto, como fibras de vidro do tipo A, E, C, R, S. Para barcos de alta performance ou de regata, é viável a utilização das fibras de vidro tipo R e S, pois são fibras mais resistentes e podem oferecer um aumento de 20% a 40% nas propriedades mecânicas em comparação ao vidro tipo E (NASSEH, 2011). A Tabela 1 apresenta informações das principais propriedades das fibras de vidro tipo A, C, E e S.

Tabela 1 - Propriedades das fibras de vidro

| Propriedades | A | C | E | S |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Densidade (g.cm ⁻³) | 2,54 | 2,49 | 2,54 | 2,48 |
| Resistência à tração (MPa) 25°C | 3033 | 3033 | 3448 | 4585 |
| Resistência à tração (MPa) 370°C | - | - | 2620 | 3758 |
| Módulo de elasticidade (GPa) 25°C | - | 69,0 | 72,4 | 85,5 |
| Alongamento (%) a 25°C | - | 4,8 | 4,8 | 5,7 |

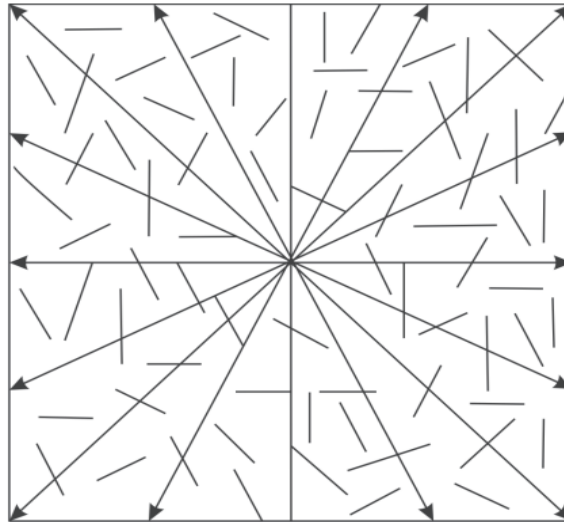
Fonte: Marinucci (2011, p. 67)

Os materiais usados para a produção da fibra de vidro tipo E são os silícios das areias, calcário, carvão, ácido bórico e argila (MAZUMDAR, 2002). O vidro tipo E possui baixo teor alcalino, boa resistência à tração e considerável rigidez à flexão, e é o mais utilizado na construção de barcos, sendo aplicado em cerca de 95% das embarcações (NASSEH, 2011).

2.1.2.1 Manta

As fibras curtas são obtidas pela distribuição de fibras contínuas com variação de comprimento entre 0,6 e 5,0 cm, podendo ser utilizadas em variadas técnicas de laminação, como a manual. Esse tipo de material possui distribuição relativamente constante da resistência em qualquer direção devido à distribuição aleatória das fibras (MARINUCCI, 2011), como na Figura 3, e é capaz de devolver a mesma tensão em qualquer direção (NASSEH, 2008). Pode-se assumir que o material apresenta isotropia, desde que as fibras sejam curtas e distribuídas aleatoriamente e sem a formação de aglomerados.

Figura 3 - Orientação aleatória das fibras em uma manta



Fonte: Marinucci (2011, p. 76)

As mantas são fabricadas com variações de gramatura, o que faz com que cada uma seja capaz de fornecer determinada espessura à camada do laminado. Seu uso se faz vantajoso por ser de fácil aplicação, possuir notável molhabilidade e moldabilidade, e produzir laminados mais homogêneos e de espessura controlada em comparação à fibra picada. Como revés estão sua baixa propriedade mecânica e elástica em relação às fibras contínuas (MARINUCCI, 2011).

2.1.2.2 Tecido

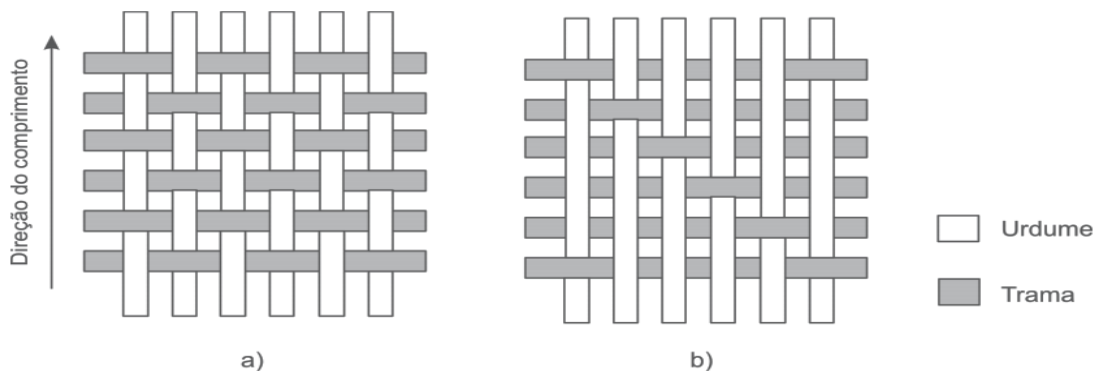
Os tecidos são fabricados com uma ampla variedade de entrelaçamentos e sua formação ocorre a partir da montagem das fibras na direção do comprimento do fio (urdume) e na direção transversal (trama) e, embora possuam um maior custo de produção em relação às mantas, eles detêm vantagens sobre essas quando se trata de resistência, rigidez e maior estabilidade dimensional do compósito (MARINUCCI, 2011).

Os tecidos de fibra de vidro, ao contrário do que acontece nas mantas, possuem orientação definida das fibras e cada direção possui a mesma quantidade de fios, o que é capaz de proporcionar resistências equilibradas às propriedades mecânicas em qualquer direção (NASSEH, 2007). Essa diferença de orientação é perceptível ao comparar um material com o outro, sendo o tecido o reforço que possui melhor organização dos fios.

Esse material pode ser dividido em dois grupos: os planos, padrão tela ou cetim, e os de padrão sarja. Normalmente, para a produção de compósitos os tecidos padrão tela são

intercalados entre camadas de mantas a fim de obter uma maior compactação do laminado, além de se obter a combinação das propriedades de ambos os materiais (MARINUCCI, 2011). A organização dos fios da fibra no tipo tela e tipo cetim pode ser vista na Figura 4. Neste caso, num arranjo bidimensional, com fibras longas, o material é anisotrópico.

Figura 4 - Organização das fibras dos tecidos: a) tipo tela, b) tipo cetim



Fonte: Marinucci (2011, p. 77).

Segundo Marinucci (2011), em termos de maleabilidade, o padrão cetim é o mais maleável e flexível quando comparado ao padrão tela e ao padrão sarja, o que proporciona uma melhor acomodação sobre moldes de geometria complexa e também possibilita uma melhor impregnação e retirada do ar retido no tecido durante o processo de laminação.

2.2 LAMINAÇÃO MANUAL (*HAND LAY UP*)

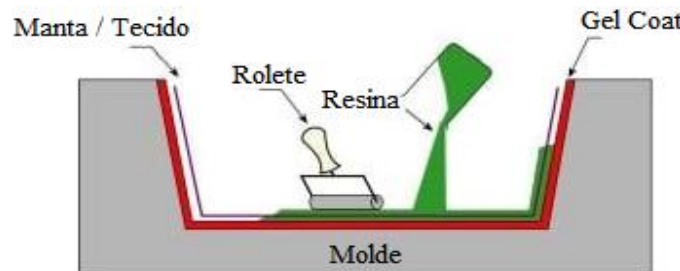
O processo de laminação manual (*hand lay up*) consiste no ato de combinar reforços fibrados sobre um molde com a aplicação de resina sobre eles. É uma técnica que depende da habilidade do operador para distribuir as resinas sobre as fibras e realizar a laminação até sua fase final (NASSEH, 2008). Essa é a mais antiga e mais simples técnica de laminação, podendo ser utilizada na fabricação de pequenas e grandes peças (AGARWAL et al., 1990).

Mesmo sendo um processo consideravelmente simples, barato e atraente por sua facilidade de realização, esta técnica exige experiência ou conhecimento profissional do responsável pela laminação, pois a qualidade final do laminado depende de quem estiver executando a tarefa, sendo mais fácil a aparição de bolhas de ar na camada, o que pode provocar um material com propriedades mecânicas não desejáveis (MARINUCCI, 2011).

A laminação manual é uma técnica de molde aberto capaz de combinar resinas termofixas, como poliéster e epóxi, com reforços, como tecido e fibra de vidro. Ao adicionar um catalisador à resina, ela sofre uma reação química capaz de promover o endurecimento da peça. Esse processo é mais usado em produções de menor escala e pode ser aplicada na construção de embarcações (AGARWAL et al., 1990).

Inicialmente é aplicado um desmoldante sobre o molde e, em seguida, é possível dar início à primeira camada aplicando *rovings*, tecidos ou mantas sobre o molde. As resinas são aplicadas com o auxílio de pincéis. Para remover o ar presente na camada e evitar bolhas de ar, utiliza-se um rolete, que também é capaz de assegurar a distribuição da resina na superfície (AL-QURESHI, 2010). A Figura 5 apresenta o processo de laminação manual (*hand lay-up*).

Figura 5 - Processo de laminação manual (*hand lay-up*)



Fonte: NetComposites (2021).

Para Marinucci (2011), as vantagens do processo estão ligadas à simplicidade, à flexibilidade, ao baixo custo de investimento, a nenhuma restrição de tamanho de peça e à possibilidade de laminação no campo de trabalho. Em contrapartida, sua produção limitada é considerada sua maior desvantagem, pois demanda maior tempo para a fabricação de mais de um projeto (AL-QURESHI, 2010).

2.3 NOÇÕES SOBRE O ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

Qualquer projeto de engenharia necessita de informações das propriedades e características dos materiais utilizados na construção da peça. Para a determinação das propriedades mecânicas, a escolha do material pressupõe a utilização de métodos padronizados que buscam conhecer o comportamento e as propriedades do material mediante condições de esforços estabelecidas (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Com o intuito de projetar uma embarcação de alto desempenho, o projetista deve obter propriedades mecânicas eficazes nos laminados, como a resistência à tração e resistência

à flexão (GREENE, 1999). Nos Estados Unidos, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) é a sociedade classificadora mais ativa e seu anuário de normas é anualmente atualizado, sendo que grande parte dessas normas correspondem a ensaios mecânicos (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2008).

Os ensaios mecânicos utilizados para analisar as propriedades dos materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a integridade geométrica e dimensional da peça ao final do método, sendo dividido em ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos, e também conforme a velocidade de aplicação da carga, sendo ensaios estáticos, dinâmicos e de carga constante (GARCIA et al., 2012).

No ensaio mecânico de tração, quase-estático, a carga é empregada com menor velocidade de aplicação. O dinâmico consiste na aplicação de carga de maneira rápida ou cíclica. Ensaio mecânico de carga constante é quando a carga é aplicada durante um longo período (LIMA, 2011).

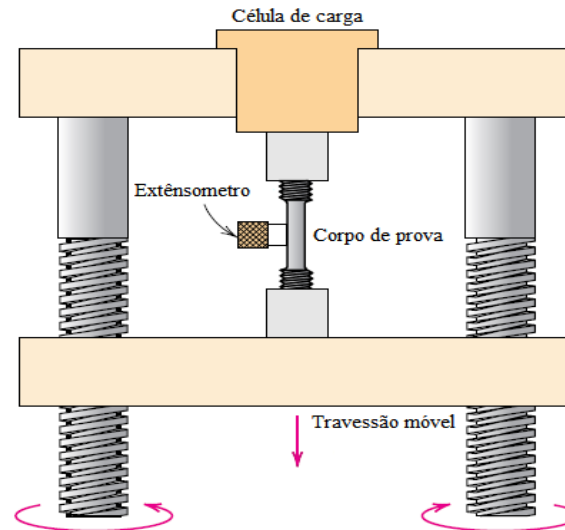
Ensaio destrutivos provocam a inutilização parcial ou total da peça, como tração, flexão e dureza, enquanto os não destrutivos não comprometem a integridade da peça, como raios X e líquidos penetrantes (GARCIA et al., 2012).

O ensaio mecânico de tração se constitui da aplicação de uma carga de tração uniaxial progressiva em um corpo de prova padronizado por determinada sociedade classificadora que sofre um alongamento até o seu ponto de ruptura e é amplamente utilizado pelo fato de ser considerado um ensaio simples, de rápida realização e pela reprodutibilidade dos resultados (GARCIA et al., 2012).

Esse ensaio determina a relação entre a tensão normal média e a deformação total média, sendo utilizado para a determinação da resistência do material, que depende da capacidade do mesmo em suportar a aplicação de uma carga sem sofrer deformação ou rompimento (HIBBELER, 2004). Neste ensaio é possível obter as propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, tensão final de tração, módulo de elasticidade, razão de Poisson e deformação (ASTM, 2014).

Normalmente, é registrado por um computador a carga em função do alongamento final, sendo essas características de carga e deformação dependentes das dimensões do corpo de prova (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2008). A quantidade de amostras deve ser de, no mínimo, cinco corpos de prova com dimensionamento estabelecido de acordo com alguns parâmetros e direção da fibra (ASTM, 2014). Na Figura 6 é possível observar a representação da máquina de ensaio de tração.

Figura 6 - Representação de uma máquina usada para o ensaio mecânico de tração



Fonte: Callister Júnior e Rethwisch (2008, p. 154).

As vantagens para o uso desse tipo de ensaio mecânico consistem na sua grande facilidade de aplicação, na extensa flexibilidade do processo e na quantidade de informações que são fornecidas quanto à caracterização dos materiais, o que o torna utilizável na maior parte dos materiais de aplicação em engenharia, como polímeros, compósitos, cerâmicas, entre outros (GARCIA et al., 2012).

No ensaio mecânico de tração, uma carga é aplicada no CP provocando um alongamento do mesmo até seu ponto de ruptura. Essa deformação da amostra apresenta informações como a força aplicada e o deslocamento, e esses valores são utilizados na obtenção das propriedades mecânicas do material, como mostram as Equações 1, 2 e 3.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Através da Equação 1 é possível obter o valor da tensão (σ), que relaciona a força (F) e o valor instantâneo da área da seção transversal (A). A Equação 2 consiste na deformação do material (ε), que é obtida pela relação entre o deslocamento (Δl) e o comprimento inicial da amostra (l_0). A proporcionalidade entre σ e ε resulta no Módulo de Elasticidade (E), que é obtido pela Lei de Hooke, como apresentado na Equação 3.

3. METODOLOGIA

Com o objetivo de obter um material compósito e determinar propriedades mecânicas, esse capítulo aborda os materiais e o processo de produção do laminado, a confecção dos corpos de prova e o ensaio mecânico de tração, sendo os resultados descritos oportunamente. A Figura 7 apresenta a abordagem metodológica utilizada neste trabalho.

Figura 7 - Fluxograma da metodologia do trabalho



Fonte: O Autor (2021).

3.1 MATERIAIS

Para o processo de laminação foi utilizada fibra de vidro como manta 300 g/m², manta 450 g/m² e tecido biaxial 1808 da empresa Central Fibras, juntamente com resina poliéster cristal da marca Sulfibra. O *gel coat* não foi utilizado para o auxílio do processo de laminação, pois não foi necessário um bom acabamento superficial das amostras para que fosse realizado o ensaio mecânico. Foi utilizado um agente desmoldante em forma de cera da marca TecGlaze-N.

Além dos materiais necessários para a laminação, outros itens e equipamentos foram utilizados para auxiliar na confecção do laminado, como tesoura, balança, calculadora, trena, pincel, rolete, espátula de metal, fita isolante, diluente, recipiente plástico e palito de madeira.

3.2 PROCESSO DE LAMINAÇÃO

O processo de laminação manual foi realizado no Laboratório de Modelagem e Construção Naval da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville. A temperatura ambiente média foi 23 °C e o tempo total de cura de 72 horas. As lâminas foram produzidas nas dimensões de 18 cm de comprimento por 9 cm de largura.

Primeiramente, foi realizada a limpeza da chapa de vidro - que foi utilizada como molde - com diluente para eliminar qualquer agente que pudesse contaminar e influenciar na laminação. Posteriormente, foi aplicada cera desmoldante em três camadas, com intervalo de

10 minutos em cada aplicação. A Figura 8 apresenta os materiais utilizados no processo de preparação do molde com o agente desmoldante.

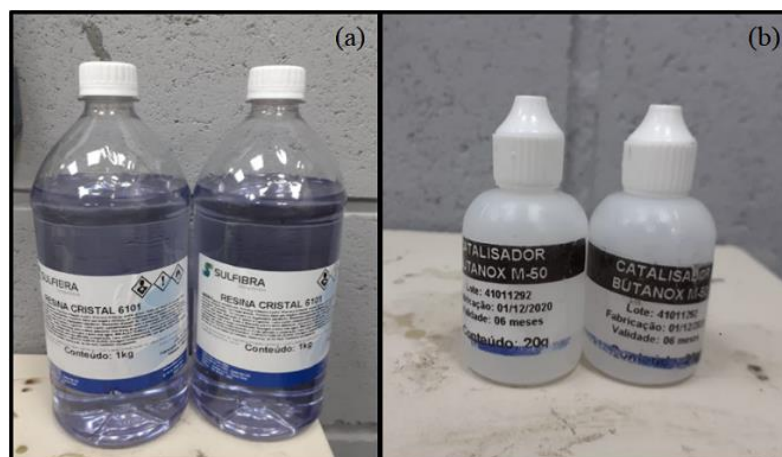
Figura 8 - Preparação do molde



Fonte: O Autor (2021).

A proporção de resina foi verificada com o auxílio de uma balança e a quantidade do catalisador utilizada foi de 1% em peso, que, segundo informações do fabricante, consiste em 35 gotas para cada 100 g de resina. A Figura 9 ilustra a resina (a) e o catalisador (b) utilizado para auxiliar no processo de cura da matriz.

Figura 9 - Resina (a) e catalisador (b) utilizados na laminação dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2021).

Após a preparação do molde, deu-se início a produção do laminado com a aplicação da resina com o auxílio de um pincel e sobrepondo cada camada de resina com fibra de vidro

em forma de manta ou tecido, de acordo com a variação proposta para o trabalho. Em cada lâmina, foi utilizado um rolete para remover o excesso de bolhas entre as camadas de laminação, que interferem diretamente na resistência do laminado. A Figura 10 mostra o tecido e as mantas já cortadas.

Figura 10 - Mantas e tecido



Fonte: O Autor (2021).

O processo consistiu em realizar a laminação de uma placa com a configuração base utilizada por um estaleiro da região em suas embarcações, nomeada de configuração original, e na produção de laminados com variações das quantidades de mantas e tecidos com o objetivo de verificar qual configuração possui melhores propriedades mecânicas. Assim, foram realizadas oito variações em relação a configuração original (de base), como ilustrado na Tabela 2. A Figura 11 apresenta a configuração das camadas de manta e tecido em cada variação.

Tabela 2 - Variações adotadas

| DESCRIÇÃO | TECIDO 1808 | MANTA 300 | MANTA 450 |
|---|----------------|--------------|--------------|
| 0 - Configuração original | 4 | 1 | 2 |
| 1 - Adicionar uma manta 300 | 4 | 2 | 2 |
| 2 - Adicionar duas mantas 300 | 4 | 3 | 2 |
| 3 - Adicionar duas mantas 450 | 4 | 1 | 4 |
| 4 - Adicionar duas mantas 450 e uma manta 300 | 4 | 2 | 4 |
| 5 - Retirar uma manta 300 | 4 | 0 | 2 |
| 6 - Retirar 4 tecidos 1808 | 0 | 1 | 2 |
| 7 - Retirar 2 tecidos 1808 | 2 | 1 | 2 |
| 8 - Adicionar uma manta 300 e tirar 4 tecidos 1808 | 0 | 2 | 2 |

Fonte: O Autor (2021).

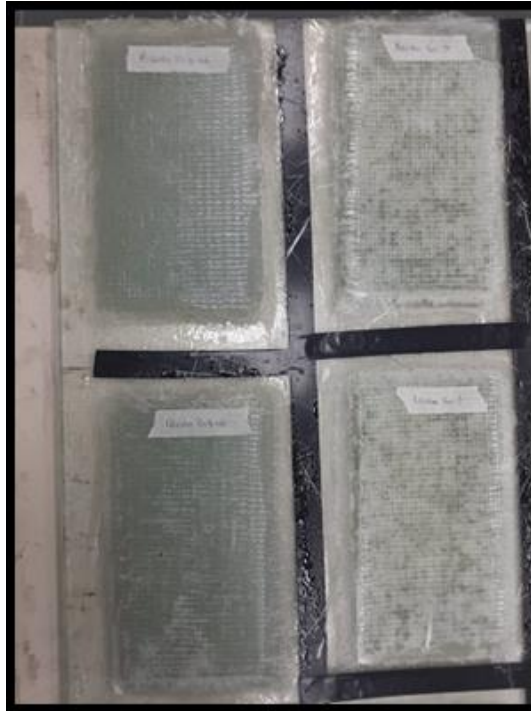
Figura 11 - Organização das camadas nas variações

| Original | Variação 1 | Variação 2 |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| Tecido biaxial 1808 | Tecido biaxial 1808 | Tecido biaxial 1808 |
| Tecido biaxial 1808 | Tecido biaxial 1808 | Tecido biaxial 1808 |
| Manta 450 | Manta 450 | Manta 300 |
| Manta 300 | Manta 300 | Manta 450 |
| Manta 450 | Manta 300 | Manta 300 |
| Tecido biaxial 1808 | Manta 450 | Manta 450 |
| Tecido biaxial 1808 | Tecido biaxial 1808 | Manta 300 |
| Variação 3 | Tecido biaxial 1808 | Tecido biaxial 1808 |
| Tecido biaxial 1808 | Variação 4 | Tecido biaxial 1808 |
| Tecido biaxial 1808 | Tecido biaxial 1808 | Variação 5 |
| Manta 450 | Tecido biaxial 1808 | Tecido biaxial 1808 |
| Manta 450 | Manta 450 | Tecido biaxial 1808 |
| Manta 300 | Manta 450 | Manta 450 |
| Manta 450 | Manta 300 | Manta 450 |
| Manta 450 | Manta 300 | Tecido biaxial 1808 |
| Tecido biaxial 1808 | Manta 450 | Tecido biaxial 1808 |
| Tecido biaxial 1808 | Manta 450 | Variação 8 |
| Variação 6 | Tecido biaxial 1808 | Manta 450 |
| Manta 450 | Tecido biaxial 1808 | Manta 300 |
| Manta 300 | Variação 7 | Manta 300 |
| Manta 450 | Tecido biaxial 1808 | Manta 450 |
| | Manta 450 | |
| | Manta 300 | |
| | Manta 450 | |
| | Tecido biaxial 1808 | |

Fonte: O Autor (2021).

A demarcação do espaço para laminação das placas foi feita com o uso de uma fita isolante. Após o tempo completo de cura da resina as placas laminadas foram etiquetadas para maior controle das variações, como está ilustrado na Figura 12, e, depois dessa etapa de identificação, utilizando uma espátula de alumínio, foi feita a remoção dos laminados que estavam sobre o molde de vidro, o que pode ser observado na Figura 13.

Figura 12 - Laminados produzidos e sua identificação



Fonte: O Autor (2021).

Figura 13 - Desmoldagem dos laminados



Fonte: O Autor (2021).

3.3 CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A confecção dos corpos de prova (CPs) do laminado foi feita seguindo normas de dimensionamento da ASTM D 3039 para que, posteriormente, os mesmos fossem sujeitos ao ensaio mecânico de tração a fim de determinar as propriedades mecânicas do material compósito fabricado.

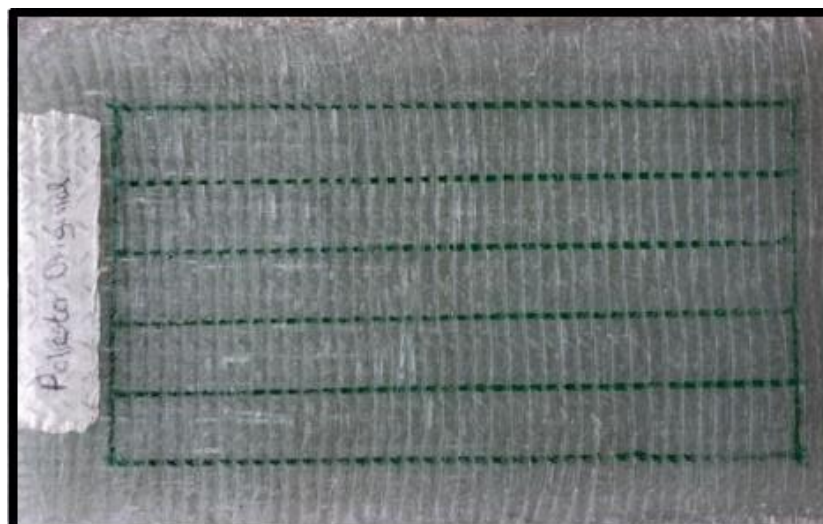
Os corpos de prova foram cortados nas dimensões de 15 cm de comprimento por 1,5 cm de largura, sendo seu corte realizado com o auxílio de uma máquina de serra com o disco de corte diamantado, como ilustrado na Figura 14. As marcações na peça foram feitas usando uma fita métrica para a medição e uma caneta para traçar a linha de corte, que está representado na Figura 15.

Figura 14 - Ferramentas do corte



Fonte: O Autor (2021).

Figura 15 - Marcação dos laminados para o corte



Fonte: O Autor (2021).

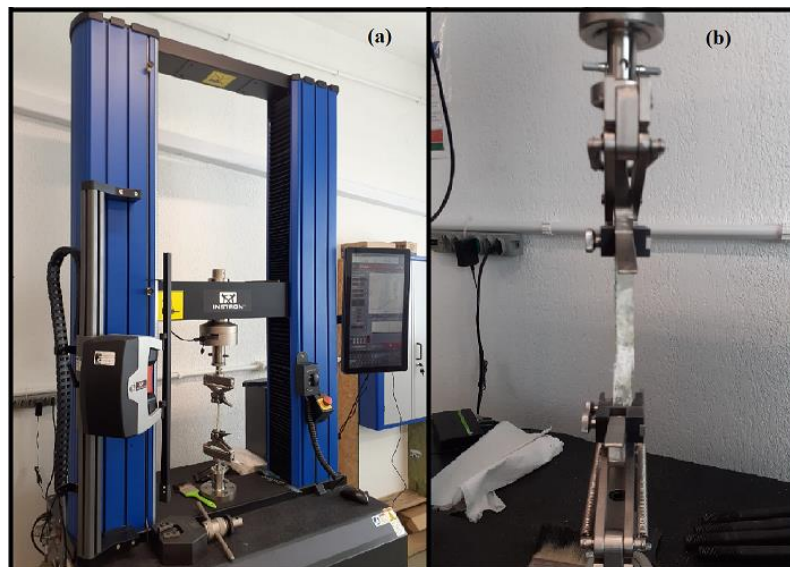
3.4 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

O ensaio mecânico de tração foi realizado seguindo as normas da ASTM D 3039, que é um padrão de ensaio utilizado para determinar a resistência à tração em materiais compósitos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Campus Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina utilizando uma máquina Universal de Ensaios Instron, modelo EMIC 23-100. A temperatura média ambiente foi de 18 °C com umidade relativa do ar de 83%. A máquina foi ajustada inicialmente com uma célula de carga de 5 kN, que foi aplicada para a ruptura das amostras da primeira variação a ser testada por ser uma das menos espessas e, posteriormente com uma célula de carga de 100 kN, que foi necessária para o rompimento dos corpos de prova mais espessos. A velocidade de operação foi de 4 mm/min. Foi necessário utilizar pedaços de lixa d'água 3M P240 para que os CPs ficassem mais ajustados e firmes no contato com as garras da máquina do ensaio.

As larguras e espessuras dos corpos de prova foram determinadas utilizando um paquímetro da marca Vonder, PA 152. A norma sugere a medição em três pontos do CP para dimensionar sua largura e espessura média, e também exige uma tolerância de 1% na dimensão da amostra.

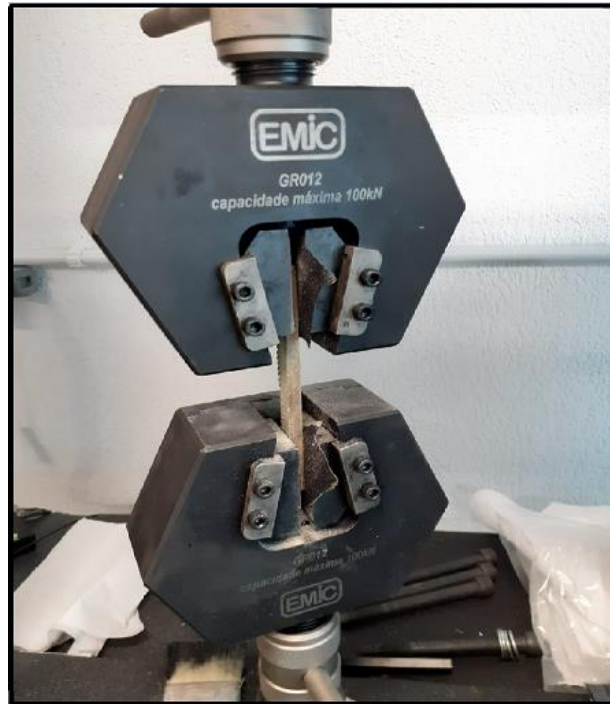
Na Figura 16 é possível observar a máquina utilizada no ensaio com a célula de carga de 5 kN (a) e um corpo de prova rompido ao fim do seu teste de tração (b). Já a Figura 17 ilustra o CP com o auxílio da lixa d'água 3M P240 sob a célula de carga de 100 kN.

Figura 16 - Máquina do ensaio (a) e corpo de prova rompido (b)



Fonte: O Autor (2021).

Figura 17 - Célula de carga de 100 kN



Fonte: O Autor (2021).

4. RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

Após a abordagem teórica dos principais tópicos deste trabalho e toda a metodologia utilizada, este capítulo apresenta os resultados obtidos no ensaio mecânico de tração feito nas amostras, e também as discussões ligadas às análises dos dados obtidos feitas com o intuito de comparar o comportamento de cada variação de camadas.

O uso da máquina de ensaio universal possui a vantagem de ser um teste que exige poucos parâmetros de entrada e os resultados podem ser obtidos através de um computador. Mas, em contrapartida, ele pode ocasionar respostas imprecisas, visto que os CPs de algumas variações podem se romper na região em que as amostras se prendem às garras da máquina, gerando uma concentração de tensão.

O ensaio de tração foi realizado seguindo a norma ASTM D 3039 utilizando uma célula de carga de 5 kN na variação 8, que foi a primeira a ser testada, e uma célula de carga de 100 kN nas demais variações porque o restante das amostras, com exceção da variação 6, eram mais espessas.

Por se tratar de um material de matriz polimérica, foi utilizado um pedaço de lixa d'água 3M P240 a partir da segunda variação testada (variação 6) para que a garra da máquina não deslizesse na superfície lisa da amostra, fornecesse dados incertos e provocasse algum dano ao equipamento.

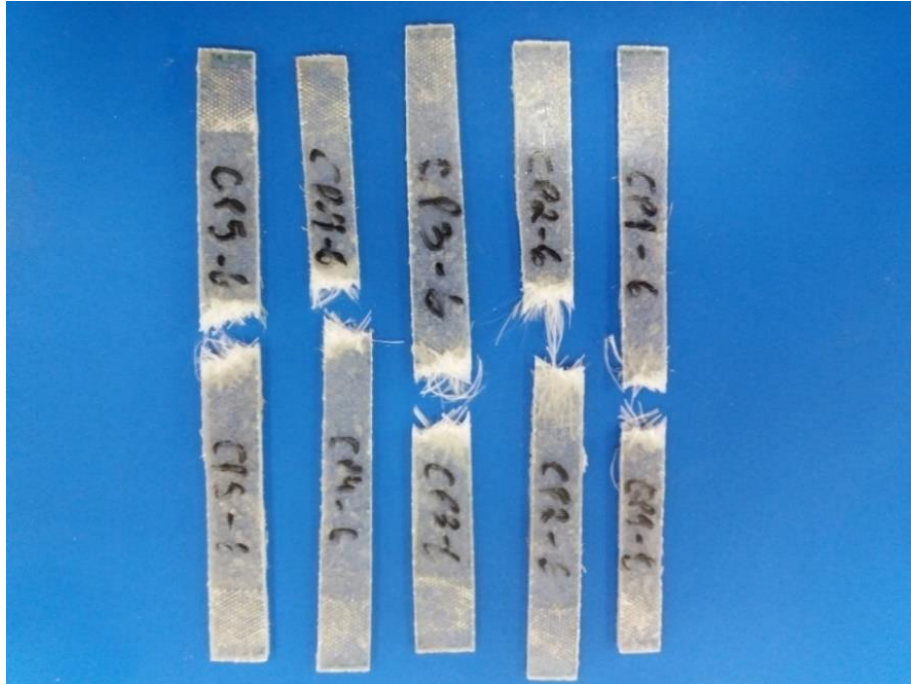
Com os valores de largura e espessura das amostras aferidos em três pontos dos corpos de prova (CPs), foi possível obter a largura média e a espessura média de cada CP para ser calculada a área da seção transversal média de cada amostra em análise, conforme descreve a norma ASTM D 3039. As dimensões aferidas podem ser observadas no Apêndice A, onde a Tabela 6 disponibiliza os valores da espessura, a Tabela 7 apresenta os valores de largura e a Tabela 8 traz o valor da área de seção transversal média obtida para cada CP.

O ensaio foi realizado nos 45 corpos de provas das nove variações de organização das mantas e tecidos com o propósito de obter os valores para tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade. O CP1 da variação 8 foi retirado das análises por ter rompido em um valor de tensão fora do intervalo escolhido para o cálculo do módulo de elasticidade (35 MPa até 50 MPa), que foi feito desconsiderando o valor do início do teste por ser uma faixa de escorregamento da garra da máquina do ensaio. As propriedades mecânicas estão disponibilizadas no Apêndice B, na Tabela 9.

A variação 6, que é a configuração menos espessa e uma das que não possuem tecido em sua estrutura, foi a única que teve suas amostras com rompimento por completo, como

pode ser visto na Figura 18. Os CPs das outras variações não romperam inteiramente, como a variação 3 ilustrada na Figura 19, que possui quatro camadas de tecido em sua configuração, ficando mais espessa.

Figura 18 - Variação 6 rompida



Fonte: O Autor (2021).

Figura 19 - Variação 3 deformada



Fonte: O Autor (2021).

Com o ensaio mecânico de tração foi possível calcular as propriedades desejadas em cada corpo de prova, assim como possibilitou realizar o cálculo da média, desvio padrão e Índice de Confiança (*IC*) da tensão máxima, da deformação máxima e do módulo de elasticidade dos corpos de prova das variações, utilizando a distribuição *t* de *Student* com nível de confiança 95% e Nível de Significância (NS) 5%. O cálculo do Intervalo de Confiança é representado pela Equação 4 (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2009).

$$IC = x_m \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

A variável x_m representa a média, n é o número de amostras, s é o desvio padrão de amostragem e t é o valor obtido (2,776) através da tabela de *Student* embasado no nível de confiança desejado e em n .

A Tabela 3 apresenta os dados obtidos através da média da tensão máxima admissível pelos corpos de prova de cada variação, sendo quatro amostras para a variação 8 e cinco amostras para as demais variações.

Tabela 3 - Média da tensão máxima das variações

| Variação | Tensão Máxima (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Nº de Amostras | Coefficiente t | IC [95%] (MPa) | Limite Superior (MPa) | Limite Inferior (Mpa) |
|-----------------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| Original | 200,9 | 28,19 | 5 | 2,776 | 34,99 | 235,09 | 165,10 |
| 1 | 177,54 | 16,52 | 5 | 2,776 | 20,51 | 198,05 | 157,04 |
| 2 | 168,97 | 13,96 | 5 | 2,776 | 17,33 | 186,31 | 151,64 |
| 3 | 128,10 | 17,56 | 5 | 2,776 | 21,80 | 149,90 | 106,30 |
| 4 | 143,98 | 18,29 | 5 | 2,776 | 22,71 | 166,69 | 121,27 |
| 5 | 159,55 | 12,46 | 5 | 2,776 | 15,47 | 175,01 | 144,08 |
| 6 | 127,14 | 23,98 | 5 | 2,776 | 29,77 | 156,91 | 97,37 |
| 7 | 145,87 | 12,68 | 5 | 2,776 | 15,74 | 161,61 | 130,12 |
| 8 | 71,52 | 14,61 | 4 | 2,776 | 20,28 | 91,80 | 51,24 |

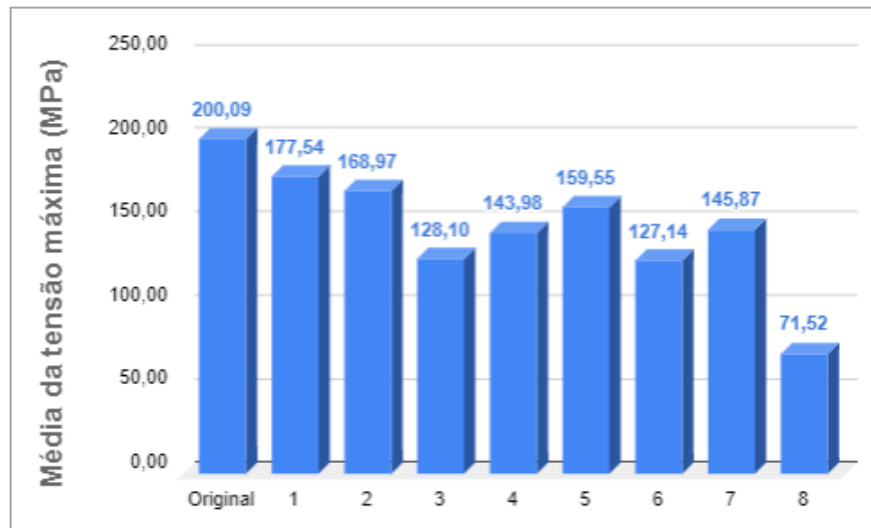
Fonte: O Autor (2021).

Os dados apresentados na Tabela 3 mostram que a variação original é a que suporta uma maior tensão (em MPa), enquanto a variação 8 se mostrou menos resistente quando comparada às demais, e também foi a única variação que foi testada com a célula de carga de 5 kN e sem o uso da lixa d'água 3M P240 para auxiliar no contato do corpo de prova com as garras do equipamento. Embora a configuração da variação 6 seja menos espessa que a

variação 8 e possua menor área de seção transversal, a mesma apresentou um valor de tensão máxima elevado mesmo sem possuir camadas de tecido na sua estrutura.

A Figura 20 traz um comparativo da média dos valores da tensão máxima de acordo com as variações.

Figura 20 - Gráfico comparativo da média da tensão máxima



Fonte: O Autor (2021).

A Tabela 4 expõe a média dos valores de deformação máxima que as variações sofreram durante o ensaio mecânico de tração.

Tabela 4 - Média da deformação máxima das variações

| Varição | Deformação máxima (mm/mm) | Desvio Padrão (mm/mm) | Nº de Amostras | Coefficiente t | IC [95%] (mm/mm) | Limite Superior (mm/mm) | Limite Inferior (mm/mm) |
|-----------------|---------------------------|-----------------------|----------------|----------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| Original | 6,76 | 0,43 | 5 | 2,776 | 0,54 | 7,30 | 6,22 |
| 1 | 8,26 | 1,73 | 5 | 2,776 | 2,15 | 10,41 | 6,12 |
| 2 | 7,29 | 0,44 | 5 | 2,776 | 0,54 | 7,83 | 6,75 |
| 3 | 9,41 | 0,60 | 5 | 2,776 | 0,74 | 10,15 | 8,67 |
| 4 | 8,28 | 0,90 | 5 | 2,776 | 1,12 | 9,39 | 7,16 |
| 5 | 8,05 | 0,64 | 5 | 2,776 | 0,79 | 8,84 | 7,26 |
| 6 | 7,32 | 0,85 | 5 | 2,776 | 1,05 | 8,37 | 6,27 |
| 7 | 5,74 | 0,33 | 5 | 2,776 | 0,40 | 6,14 | 5,33 |
| 8 | 6,64 | 0,45 | 4 | 2,776 | 0,62 | 7,26 | 6,02 |

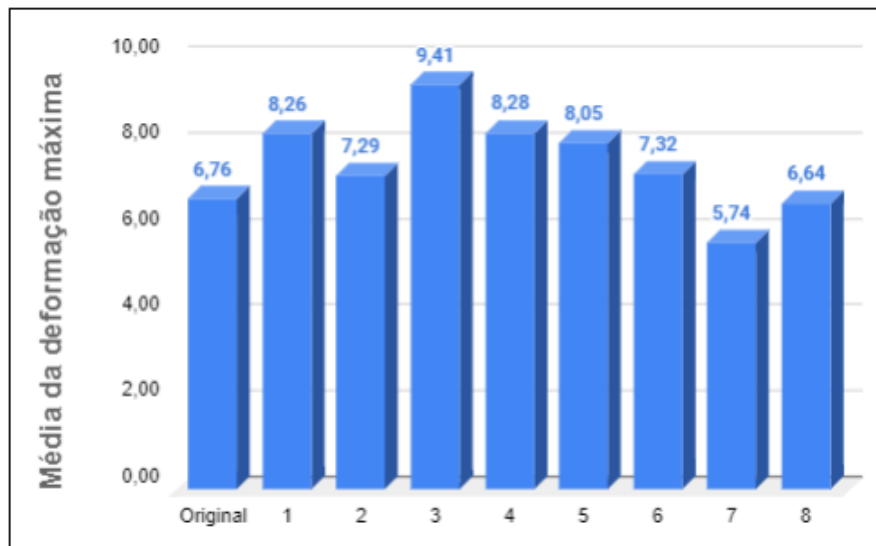
Fonte: O Autor (2021).

Os dados mostram uma deformação maior nas variações de maior espessura e nas que possuem tecido, pois a deformação dos tecidos é maior que a da manta, visto que a organização das fibras contínuas suporta maiores níveis de tensão antes do rompimento e fazem com que o corpo de prova tenha maior alongamento.

Embora não tenham tecido na configuração, as variações 6 e 8 tiveram um elevado alongamento médio dos CPs, com valores superiores as variações com tecido. A variação 7, que possui duas camadas de tecido que a diferem da variação 6, foi a que mostrou menor taxa de deformação.

A Figura 21 ilustra uma comparação da média de deformação máxima conforme as variações.

Figura 21 - Gráfico comparativo da média da deformação máxima



Fonte: O Autor (2021).

Até mesmo as configurações mais espessas apresentaram um alongamento médio que não foi tão superior quanto ao das menos espessas. Além da interferência das bolhas presentes nos laminados resultantes do processo de laminação, os resultados podem ter sofrido as dispersões de valores porque o ensaio de tração foi realizado sem um extensômetro - que é um equipamento utilizado para a medição de deformação mecânica em corpos de prova -, pois não estava disponível no laboratório onde foi realizado o ensaio.

A máquina do ensaio de tração é capaz de medir o deslocamento das garras, o que não traz o valor correto da deformação do corpo de prova, pois não é considerado o escorregamento da amostra nas garras e nem a deformação da máquina. Portanto, é possível que esses fatores tenham interferido nos resultados obtidos das amostras.

Observando a existência desse possível erro dos valores de deformação, o módulo de elasticidade não foi calculado ao longo de toda a deformação informada pela máquina do ensaio, pois foi considerado que o resultado obtido contou com o escorregamento dos corpos de prova nas garras da máquina. Assim, foi realizada uma análise entre um intervalo de tensão de 35 MPa e 50 MPa, que foi a porção linear em comum da curva de tensão-deformação dos corpos de prova.

A Tabela 5 apresenta a média dos valores obtidos para o módulo de elasticidade de cada variação testada.

Tabela 5 - Média do módulo de elasticidade das variações

| Variação | Módulo de Elasticidade (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Nº de Amostras | Coefficiente t | IC [95%] (MPa) | Limite Superior (MPa) | Limite Inferior (MPa) |
|-----------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| Original | 23,40 | 4,37 | 5 | 2,776 | 5,43 | 28,82 | 17,97 |
| 1 | 19,80 | 2,47 | 5 | 2,776 | 3,07 | 22,87 | 16,73 |
| 2 | 19,25 | 1,22 | 5 | 2,776 | 1,52 | 20,77 | 17,73 |
| 3 | 11,69 | 0,80 | 5 | 2,776 | 1,00 | 12,69 | 10,69 |
| 4 | 14,97 | 2,71 | 5 | 2,776 | 3,37 | 18,34 | 11,60 |
| 5 | 16,53 | 0,95 | 5 | 2,776 | 1,18 | 17,71 | 15,35 |
| 6 | 22,59 | 1,50 | 5 | 2,776 | 1,86 | 24,45 | 20,73 |
| 7 | 20,71 | 2,52 | 5 | 2,776 | 3,13 | 23,84 | 17,58 |
| 8 | 15,37 | 1,88 | 4 | 2,776 | 2,62 | 17,98 | 12,75 |

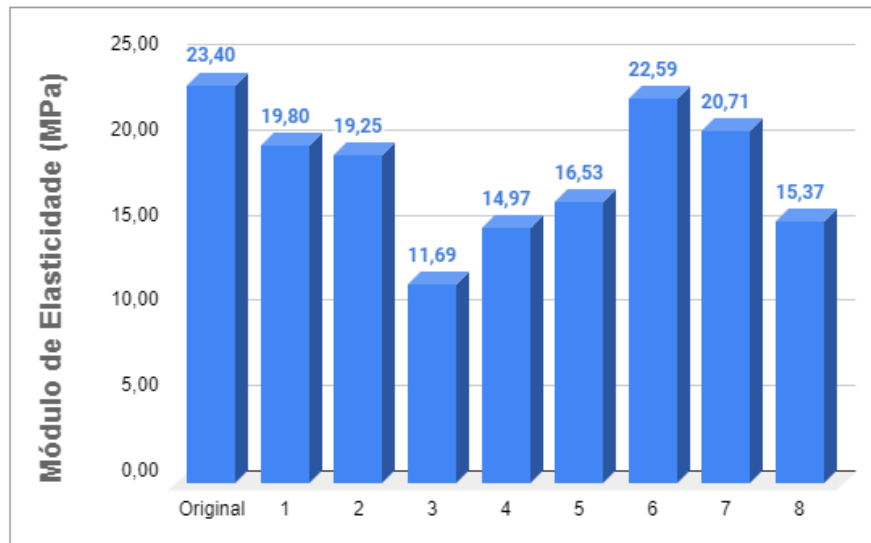
Fonte: O Autor (2021).

O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica capaz de determinar o comportamento do material na fase elástica, indicando a rigidez do material. Assim, quanto maior for o módulo de elasticidade, menor vai ser a deformação elástica da aplicação de uma tensão e mais rígido será o material.

De acordo com Nasseh (2007), a fibra de vidro em forma de manta possui uma desvantagem na resistência mecânica, pois ela possui baixo teor de fibra de vidro além da descontinuidade das fibras. Já os tecidos, que possuem melhor organização dos fios, apresentam uma resistência mecânica mais elevada.

A Figura 22 relata a comparação da média do módulo de elasticidade de cada variação.

Figura 22 - Gráfico comparativo da média do módulo de elasticidade



Fonte: O Autor (2021).

É possível observar que os valores expostos na Figura 22 indicam a variação 3 como aquela com a menor média do módulo de elasticidade, que também é a com maior valor médio de deformação e a torna a variação menos rígida dentre as que foram analisadas. Com exceção da variação 3, os resultados do módulo de elasticidade dos grupos com tecido nas camadas de laminação estão dentro do esperado, visto que eles fornecem mais resistência ao laminado.

Entretanto, a variação 6 apresentou um módulo de elasticidade médio de 22,59 MPa e 7,32 (mm/mm) de deformação, o que é considerado alto devido sua configuração e organização das mantas na laminação. Por ser a menos espessa, pode ter sido a com menos bolhas na estrutura da chapa, visto que foram apenas três camadas de manta.

A variação 4, que é a mais espessa, não obteve um módulo de elasticidade tão alto mesmo com uma maior quantidade de mantas entre as camadas, o que mostra a desvantagem da resistência mecânica das mantas.

No Apêndice C encontram-se as curvas tensão-deformação resultantes dos ensaios de tração, onde é possível observar o comportamento dos corpos de prova de cada variação testada, bem como a deformação, a tensão máxima de engenharia e o ponto de tensão de ruptura. Na Figura 23 é possível observar as curvas da configuração original, que foi a de melhor resultado apresentado quando determinadas as propriedades mecânicas da organização das camadas através dos dados fornecidos pelo ensaio mecânico de tração.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma caracterização mecânica de material compósito utilizado na indústria náutica por meio de comparação de propriedades mecânicas das amostras submetidas a ensaios de tração, onde foi possível obter valores de propriedades como tensão, deformação e módulo de elasticidade.

Inicialmente, foram fabricadas nove chapas de material compósito utilizando o processo de laminação manual, sendo uma chapa para cada configuração de organização das camadas, as quais foram divididas em variações. O corte das cinco amostras de cada variação foi realizado respeitando o limite proposto pela norma para as dimensões de comprimento e largura, que exige uma tolerância de 1% tanto para mais quanto para menos.

A única variação que teve seu rompimento completo foi a amostra 6, que foi o grupo menos espesso e que não possuía tecido em sua estrutura, porém teve um valor alto de deformação, módulo de elasticidade e tensão quando comparada às variações com tecido na composição, o que reforça a ideia de respostas imprecisas devido ao escorregamento das garras ao longo do corpo de prova mesmo com a lixa d'água auxiliando na fixação. A variação 8, que também não possuía tecido na sua composição, apresentou o menor valor de tensão admissível.

Quanto maior a deformação, menor é o módulo de elasticidade do material, como ocorreu na variação 3. A variação 4, que foi a mais espessa e que possuía mais camadas de manta na composição, comprova que as mantas são menos resistentes que o tecido devido a descontinuidade dos fios, pois teve elevada deformação, baixo módulo de elasticidade e tensão de engenharia não superior às variações menos espessas. Por ter mais camadas, o excesso de bolhas provocado na laminação pode ter interferido nas propriedades da variação, assim como nas de outros grupos.

A variação 5 e a variação 7, que, das que possuem tecido, são as mais finas, tiveram tensão máxima e módulo de elasticidade superiores à da variação 4, a mais espessa e que obteve tensão máxima de 143,98 MPa e módulo de elasticidade de 14,97 MPa. A variação 2 e variação 3 se assemelham na quantidade de camadas e espessura, mas a variação 2 apresentou melhores propriedades, tanto de tensão admissível quanto de deformação e módulo de elasticidade.

A variação 1, que foi a que mais se assemelhou na distribuição de tecido e mantas a configuração original, apresentou boas propriedades mecânicas, mas não o suficiente para superar a qualidade da configuração original, que mostrou um maior valor para a tensão

admissível (200,9 MPa), maior módulo de elasticidade (23,40 MPa) e terceira menor deformação (6,76 mm/mm).

Os resultados obtidos possuem dados incertos para algumas variações e a manta se mostrou um material de baixa resistência mecânica pela descontinuidade dos fios, conforme apresentado por Nasseh (2008). As variações mais espessas, mesmo com tecido, não apresentaram valores elevados das propriedades mecânicas desejáveis para o material, o que pode ter tido grande interferência das bolhas nas camadas do laminado.

Portanto, é possível determinar a organização de camadas da configuração original como a mais eficiente por apresentar as melhores propriedades mecânicas dentre as variações testadas neste trabalho. A variação 7 obteve a menor deformação (5,74 mm/mm), elevado módulo de elasticidade (20,71 MPa) e tensão não tão elevada (145,87 MPa) quanto a configuração original, mostrando que a quantidade de tecido é mais importante do que a manta na variação das camadas.

Assim, as limitações deste trabalho consistem nas bolhas geradas nas camadas do laminado durante o processo de laminação manual que influenciam na resistência do material; na falta de extensômetro e deslizamento das garras da máquina do ensaio mecânico de tração, que proporcionou dados imprecisos quanto ao alongamento; e na temperatura ambiente por também influenciar na fratura do material, pois quanto maior for a temperatura maior é a tendência de o módulo de elasticidade diminuir.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

✓ Realizar uma comparação das propriedades mecânicas das amostras obtidas pela laminação manual com outros processos de laminação;

✓ Realizar outros ensaios mecânicos nos materiais para comparar o resultado com o obtido no ensaio mecânico de tração;

✓ Produzir corpos de prova com outro tipo de reforço ao laminado e realizar a comparação dos resultados;

✓ Produzir as amostras com outras gramaturas de mantas e tecidos, e com outro tipo de resina.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J. **Analysis and performance of fiber composites**. New York: Wiley Interscience 1990.
- AL-QURESHI, H. A. **Materiais compostos: análises e fabricação**. Apostila, Centro de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2010. Disponível em: http://www.bu.ufsc.br/design/Materiais_Compostos.pdf. Acesso em: 19 mar. 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken: Astm International, 2014. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/D3039>. Acesso em: 24 set. 2021.
- BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- CALLISTER JÚNIOR. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- GREENE, E. **Marine composites**. 2. ed. Annapolis: Eric Greene Associates, 1999.
- HIBBELER, R.C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2004
- KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. 2. ed. Florida: CLC Press LLC, 2006.
- LIMA, S. D. C. **Propriedades mecânicas I: fundamentos**. Apostila (Programa de Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Departamento de Ciência e Tecnologia, Exército Brasileiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://docplayer.com.br/33091530-Propriedades-mecanicas-i-fundamentos.html>. Acesso em: 19 mar. 2021.
- MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Artliber, 2011.
- MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. Florida: Crc Press Llc, 2002.
- NASSEH, J. **Barcos: métodos avançados de construção em composites**. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2007.
- NASSEH, J. **Manual de construção de barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2011.
- NASSEH, J. **Técnica e prática de laminação em composites**. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2008.

NET COMPOSITES. **Wet/Hand Lay-up**. Disponível em:
<https://netcomposites.com/guide/manufacturing/wet-hand-lay-up/>. Acesso em: 15 jun. 2021.

APÊNDICE A – MEDIDAS DAS AMOSTRAS

Tabela 6 - Valores das espessuras dos corpos de prova

| Variações | Amostras | Espessura 1 (mm) | Espessura 2 (mm) | Espessura 3 (mm) | Espessura Média (mm) |
|------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| ORIGINAL | CP1-ORI | 6,00 | 6,04 | 5,98 | 6,01 |
| | CP2-ORI | 6,02 | 6,01 | 5,99 | 6,01 |
| | CP3-ORI | 5,96 | 6,02 | 6,01 | 6,00 |
| | CP4-ORI | 6,00 | 5,97 | 6,09 | 6,02 |
| | CP5-ORI | 6,03 | 6,04 | 6,08 | 6,05 |
| 1 | CP1-1 | 6,02 | 6,05 | 6,03 | 6,03 |
| | CP2-1 | 5,99 | 6,03 | 6,07 | 6,03 |
| | CP3-1 | 6,10 | 6,07 | 6,05 | 6,07 |
| | CP4-1 | 6,08 | 6,03 | 6,04 | 6,05 |
| | CP5-1 | 6,12 | 6,06 | 6,08 | 6,09 |
| 2 | CP1-2 | 7,51 | 7,43 | 7,46 | 7,47 |
| | CP2-2 | 7,52 | 7,53 | 7,58 | 7,54 |
| | CP3-2 | 7,39 | 7,48 | 7,56 | 7,48 |
| | CP4-2 | 7,54 | 7,47 | 7,41 | 7,47 |
| | CP5-2 | 7,49 | 7,38 | 7,43 | 7,43 |
| 3 | CP1-3 | 7,32 | 7,51 | 7,36 | 7,40 |
| | CP2-3 | 7,36 | 7,48 | 7,4 | 7,41 |
| | CP3-3 | 7,41 | 7,52 | 7,42 | 7,45 |
| | CP4-3 | 7,38 | 7,49 | 7,39 | 7,42 |
| | CP5-3 | 7,37 | 7,46 | 7,38 | 7,40 |
| 4 | CP1-4 | 8,63 | 8,51 | 8,27 | 8,47 |
| | CP2-4 | 8,18 | 8,22 | 8,16 | 8,19 |
| | CP3-4 | 8,33 | 8,25 | 8,29 | 8,29 |
| | CP4-4 | 8,15 | 8,34 | 8,21 | 8,23 |
| | CP5-4 | 8,28 | 8,12 | 8,31 | 8,24 |
| 5 | CP1-5 | 5,53 | 5,48 | 5,41 | 5,47 |
| | CP2-5 | 5,32 | 5,43 | 5,37 | 5,37 |
| | CP3-5 | 5,29 | 5,39 | 5,32 | 5,33 |
| | CP4-5 | 5,22 | 5,42 | 5,48 | 5,37 |
| | CP5-5 | 5,39 | 5,49 | 5,52 | 5,47 |

| | | | | | |
|---|-------|------|------|------|------|
| 6 | CP1-6 | 2,13 | 2,06 | 2,09 | 2,09 |
| | CP2-6 | 1,98 | 2,03 | 1,97 | 1,99 |
| | CP3-6 | 2,08 | 2,02 | 1,96 | 2,02 |
| | CP4-6 | 2,04 | 2,11 | 2,07 | 2,07 |
| | CP5-6 | 1,96 | 1,98 | 2,01 | 1,98 |
| 7 | CP1-7 | 4,81 | 4,52 | 4,63 | 4,65 |
| | CP2-7 | 4,73 | 4,61 | 4,38 | 4,57 |
| | CP3-7 | 4,68 | 4,63 | 4,56 | 4,62 |
| | CP4-7 | 4,71 | 4,66 | 4,62 | 4,66 |
| | CP5-7 | 4,75 | 4,59 | 4,67 | 4,67 |
| 8 | CP2-8 | 3,12 | 3,08 | 3,21 | 3,14 |
| | CP3-8 | 2,97 | 3,1 | 3,02 | 3,03 |
| | CP4-8 | 2,86 | 2,99 | 2,91 | 2,92 |
| | CP5-8 | 2,95 | 3,03 | 3,02 | 3,00 |

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 7 - Valores das larguras dos corpos de prova

| Variações | Amostras | Largura 1 (mm) | Largura 2 (mm) | Largura 3 (mm) | Largura Média (mm) |
|------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| ORIGINAL | CP1-ORI | 15,12 | 15,14 | 15,03 | 15,10 |
| | CP2-ORI | 14,99 | 15,02 | 14,87 | 14,96 |
| | CP3-ORI | 15,06 | 14,98 | 15,01 | 15,02 |
| | CP4-ORI | 15,05 | 15,08 | 14,99 | 15,04 |
| | CP5-ORI | 15,16 | 15,11 | 15,07 | 15,11 |
| 1 | CP1-1 | 15,1 | 15,06 | 15,01 | 15,06 |
| | CP2-1 | 15,11 | 15,09 | 15,06 | 15,09 |
| | CP3-1 | 14,98 | 15,03 | 15,08 | 15,03 |
| | CP4-1 | 14,96 | 14,92 | 14,98 | 14,95 |
| | CP5-1 | 15,03 | 15,09 | 15,04 | 15,05 |
| 2 | CP1-2 | 14,98 | 15,06 | 15,21 | 15,08 |
| | CP2-2 | 15,03 | 15,11 | 15,02 | 15,05 |
| | CP3-2 | 14,96 | 14,88 | 15,02 | 14,95 |
| | CP4-2 | 15,03 | 14,86 | 14,98 | 14,96 |
| | CP5-2 | 14,96 | 15,03 | 15,04 | 15,01 |
| 3 | CP1-3 | 14,97 | 15,07 | 15,01 | 15,02 |
| | CP2-3 | 15,01 | 15,13 | 15,02 | 15,05 |
| | CP3-3 | 14,86 | 15,08 | 15,03 | 14,99 |
| | CP4-3 | 15,07 | 15,12 | 15,06 | 15,08 |
| | CP5-3 | 15,1 | 15,09 | 15,02 | 15,07 |
| 4 | CP1-4 | 14,97 | 15,02 | 15,03 | 15,01 |
| | CP2-4 | 14,92 | 14,96 | 14,93 | 14,94 |
| | CP3-4 | 15,01 | 15,04 | 15,02 | 15,02 |
| | CP4-4 | 15,02 | 14,97 | 14,98 | 14,99 |
| | CP5-4 | 14,96 | 14,92 | 15,04 | 14,97 |
| 5 | CP1-5 | 14,88 | 14,93 | 14,89 | 14,90 |
| | CP2-5 | 15,01 | 15,02 | 14,98 | 15,00 |
| | CP3-5 | 15,03 | 15,1 | 15,11 | 15,08 |
| | CP4-5 | 14,98 | 15,03 | 15,01 | 15,01 |
| | CP5-5 | 15,02 | 14,97 | 14,98 | 14,99 |

| | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6 | CP1-6 | 15,23 | 15,11 | 15,06 | 15,13 |
| | CP2-6 | 15,07 | 15,05 | 15,09 | 15,07 |
| | CP3-6 | 15,04 | 15,06 | 15,08 | 15,06 |
| | CP4-6 | 14,99 | 15,03 | 14,98 | 15,00 |
| | CP5-6 | 15,01 | 14,97 | 15,06 | 15,01 |
| 7 | CP1-7 | 15,01 | 15,02 | 15,1 | 15,04 |
| | CP2-7 | 14,97 | 15,01 | 15 | 14,99 |
| | CP3-7 | 14,95 | 14,98 | 14,97 | 14,97 |
| | CP4-7 | 15,03 | 15,01 | 14,98 | 15,01 |
| | CP5-7 | 15,08 | 14,97 | 15,06 | 15,04 |
| 8 | CP2-8 | 14,99 | 14,96 | 14,89 | 14,95 |
| | CP3-8 | 15,03 | 15,09 | 15,15 | 15,09 |
| | CP4-8 | 14,96 | 14,95 | 15,01 | 14,97 |
| | CP5-8 | 14,98 | 14,97 | 14,98 | 14,98 |

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 8 - Área da seção transversal

| Variações | Amostras | Área da Seção Transversal (mm²) |
|------------------|-----------------|---|
| ORIGINAL | CP1-ORI | 90,68 |
| | CP2-ORI | 89,86 |
| | CP3-ORI | 90,05 |
| | CP4-ORI | 90,54 |
| | CP5-ORI | 91,44 |
| 1 | CP1-1 | 90,84 |
| | CP2-1 | 90,97 |
| | CP3-1 | 91,28 |
| | CP4-1 | 90,47 |
| | CP5-1 | 91,62 |
| 2 | CP1-2 | 112,62 |
| | CP2-2 | 113,55 |
| | CP3-2 | 111,80 |
| | CP4-2 | 111,78 |
| | CP5-2 | 111,57 |
| 3 | CP1-3 | 111,07 |
| | CP2-3 | 111,60 |
| | CP3-3 | 111,68 |
| | CP4-3 | 111,92 |
| | CP5-3 | 111,57 |
| 4 | CP1-4 | 127,11 |
| | CP2-4 | 122,28 |
| | CP3-4 | 124,54 |
| | CP4-4 | 123,42 |
| | CP5-4 | 123,33 |
| 5 | CP1-5 | 81,55 |
| | CP2-5 | 80,62 |
| | CP3-5 | 80,43 |
| | CP4-5 | 80,64 |
| | CP5-5 | 81,95 |

| | | |
|---|-------|-------|
| 6 | CP1-6 | 31,68 |
| | CP2-6 | 30,04 |
| | CP3-6 | 30,42 |
| | CP4-6 | 31,10 |
| | CP5-6 | 29,78 |
| 7 | CP1-7 | 70,00 |
| | CP2-7 | 68,57 |
| | CP3-7 | 69,20 |
| | CP4-7 | 69,98 |
| | CP5-7 | 70,22 |
| 8 | CP2-8 | 46,88 |
| | CP3-8 | 45,72 |
| | CP4-8 | 43,72 |
| | CP5-8 | 44,93 |

Fonte: O Autor (2021).

APÊNDICE B – PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AMOSTRAS

Tabela 9 - Propriedades mecânicas

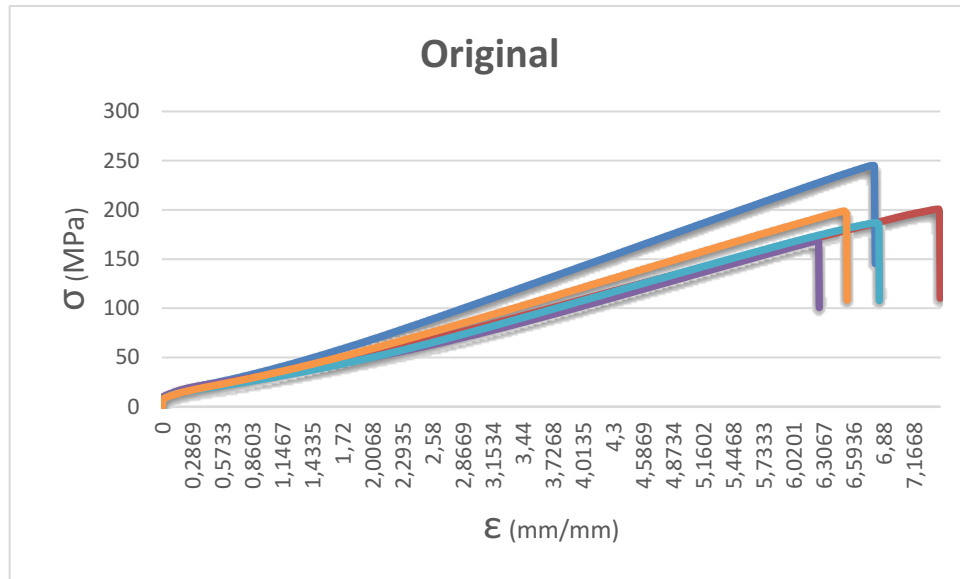
| Variações | Amostras | Força Máxima (N) | Deformação Máxima (mm/mm) | Área Transversal (mm²) | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de Elasticidade (MPa) |
|------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------------|--|----------------------------|-------------------------------------|
| ORIGINAL | CP1-ORI | 18030 | 6,52 | 90,68 | 198,83 | 25,87 |
| | CP2-ORI | 16800 | 6,81 | 89,86 | 186,96 | 22,16 |
| | CP3-ORI | 15200 | 6,25 | 90,05 | 168,80 | 17,93 |
| | CP4-ORI | 22190 | 6,79 | 90,54 | 245,08 | 29,38 |
| | CP5-ORI | 18360 | 7,42 | 91,44 | 200,80 | 21,64 |
| 1 | CP1-1 | 16010 | 9,49 | 90,84 | 176,24 | 16,03 |
| | CP2-1 | 17080 | 8,19 | 90,97 | 187,75 | 19,36 |
| | CP3-1 | 18030 | 7,39 | 91,28 | 197,52 | 22,80 |
| | CP4-1 | 15590 | 10,32 | 90,47 | 172,33 | 20,81 |
| | CP5-1 | 14100 | 5,93 | 91,62 | 153,89 | 20,00 |
| 2 | CP1-2 | 17050 | 6,57 | 112,62 | 151,39 | 18,79 |
| | CP2-2 | 20880 | 7,54 | 113,55 | 183,88 | 20,63 |
| | CP3-2 | 19530 | 7,62 | 111,80 | 174,69 | 18,56 |
| | CP4-2 | 17570 | 7,54 | 111,78 | 157,19 | 17,84 |
| | CP5-2 | 19830 | 7,19 | 111,57 | 177,73 | 20,44 |
| 3 | CP1-3 | 13380 | 9,93 | 111,07 | 120,46 | 11,16 |
| | CP2-3 | 15710 | 10,06 | 111,60 | 140,78 | 11,43 |
| | CP3-3 | 14650 | 9,25 | 111,68 | 131,18 | 12,23 |
| | CP4-3 | 16350 | 9,21 | 111,92 | 146,09 | 12,79 |
| | CP5-3 | 11380 | 8,59 | 111,57 | 102,00 | 10,83 |
| 4 | CP1-4 | 21640 | 8,97 | 127,11 | 170,25 | 16,52 |
| | CP2-4 | 15820 | 7,30 | 122,28 | 129,37 | 15,33 |
| | CP3-4 | 19080 | 8,87 | 124,54 | 153,20 | 15,84 |
| | CP4-4 | 15480 | 8,96 | 123,42 | 125,43 | 10,24 |
| | CP5-4 | 17470 | 7,29 | 123,33 | 141,65 | 16,92 |
| 5 | CP1-5 | 14110 | 8,56 | 81,55 | 173,02 | 15,42 |
| | CP2-5 | 13720 | 8,61 | 80,62 | 170,19 | 17,22 |
| | CP3-5 | 11510 | 8,29 | 80,43 | 143,11 | 15,59 |
| | CP4-5 | 12850 | 7,66 | 80,64 | 159,36 | 16,99 |
| | CP5-5 | 12460 | 7,13 | 81,95 | 152,05 | 17,44 |

| | | | | | | |
|---|-------|-------|------|-------|--------|-------|
| 6 | CP1-6 | 3970 | 7,83 | 31,68 | 125,32 | 20,93 |
| | CP2-6 | 3740 | 6,81 | 30,04 | 124,50 | 24,35 |
| | CP3-6 | 3650 | 7,07 | 30,42 | 119,98 | 23,19 |
| | CP4-6 | 3110 | 6,39 | 31,10 | 100,00 | 21,12 |
| | CP5-6 | 4940 | 8,51 | 29,78 | 165,90 | 23,35 |
| 7 | CP1-7 | 10440 | 5,73 | 70,00 | 149,14 | 20,77 |
| | CP2-7 | 9510 | 5,46 | 68,57 | 138,69 | 20,20 |
| | CP3-7 | 11270 | 5,55 | 69,20 | 162,87 | 24,18 |
| | CP4-7 | 10460 | 5,65 | 69,98 | 149,47 | 21,26 |
| | CP5-7 | 9070 | 6,29 | 70,22 | 129,16 | 17,14 |
| 8 | CP2-8 | 4340 | 6,73 | 46,88 | 92,57 | 18,09 |
| | CP3-8 | 3140 | 6,77 | 45,72 | 68,67 | 14,97 |
| | CP4-8 | 2880 | 7,06 | 43,72 | 65,87 | 13,78 |
| | CP5-8 | 2650 | 6,01 | 44,93 | 58,98 | 14,62 |

Fonte: O Autor (2021).

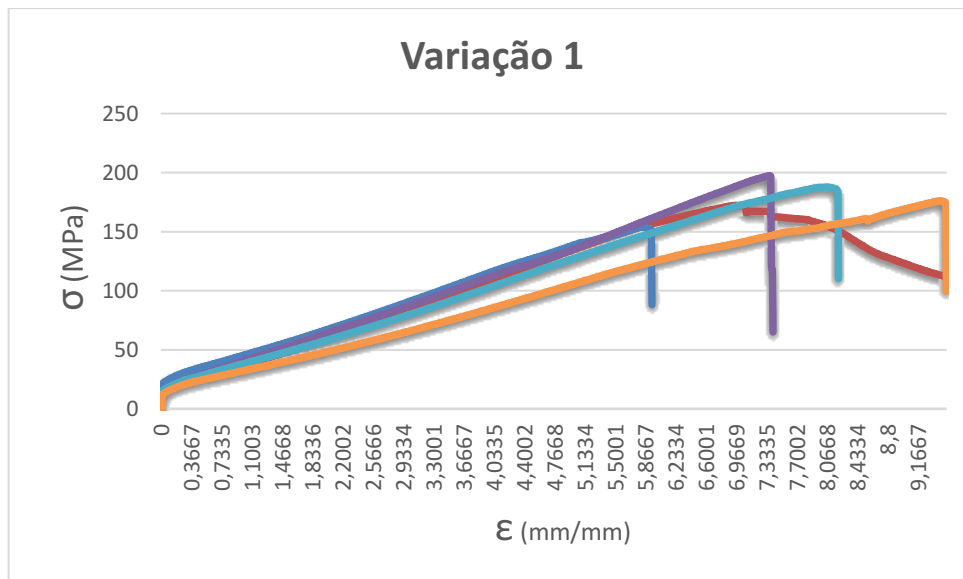
APÊNDICE C – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DAS VARIAÇÕES

Figura 23 - Curva tensão-deformação da configuração original



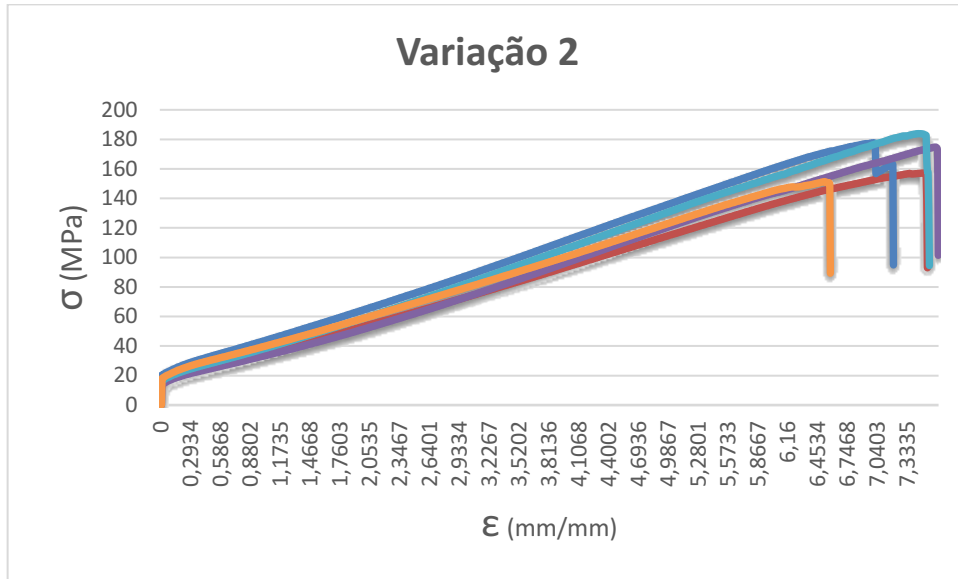
Fonte: O Autor (2021).

Figura 24 - Curva tensão-deformação da variação 1



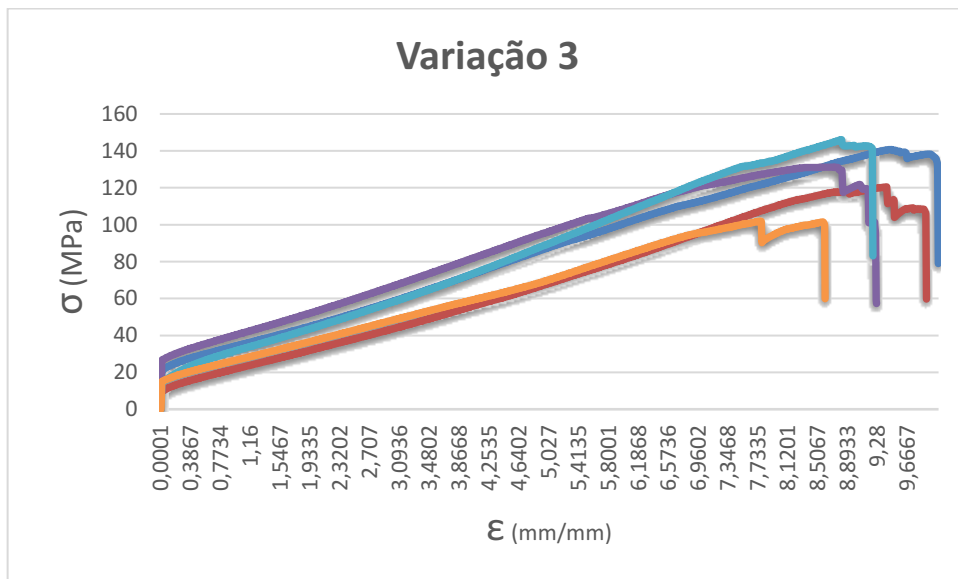
Fonte: O Autor (2021).

Figura 25 - Curva tensão-deformação da variação 2



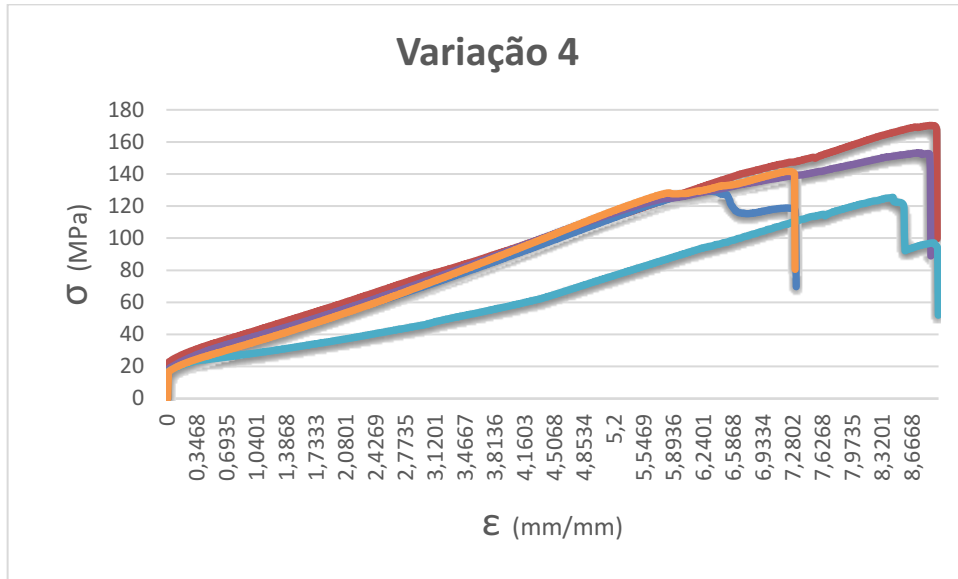
Fonte: O Autor (2021).

Figura 26 - Curva tensão-deformação da variação 3



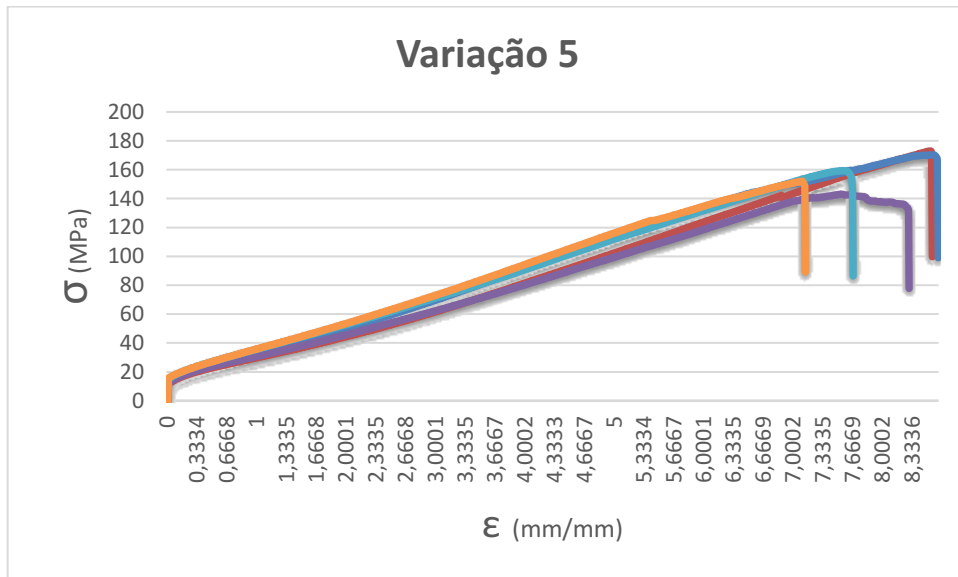
Fonte: O Autor (2021).

Figura 27 - Curva tensão-deformação da variação 4



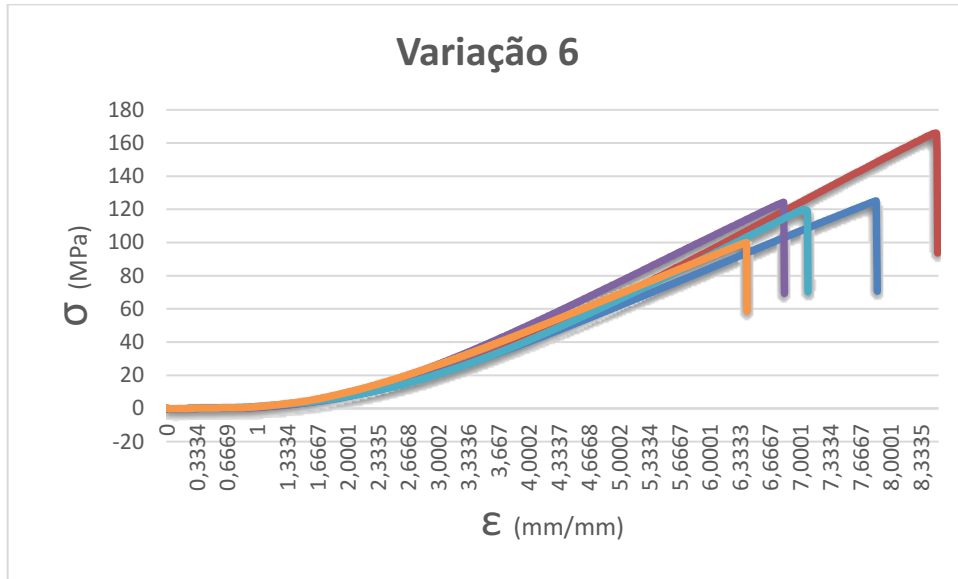
Fonte: O Autor (2021).

Figura 28 - Curva tensão-deformação da variação 5



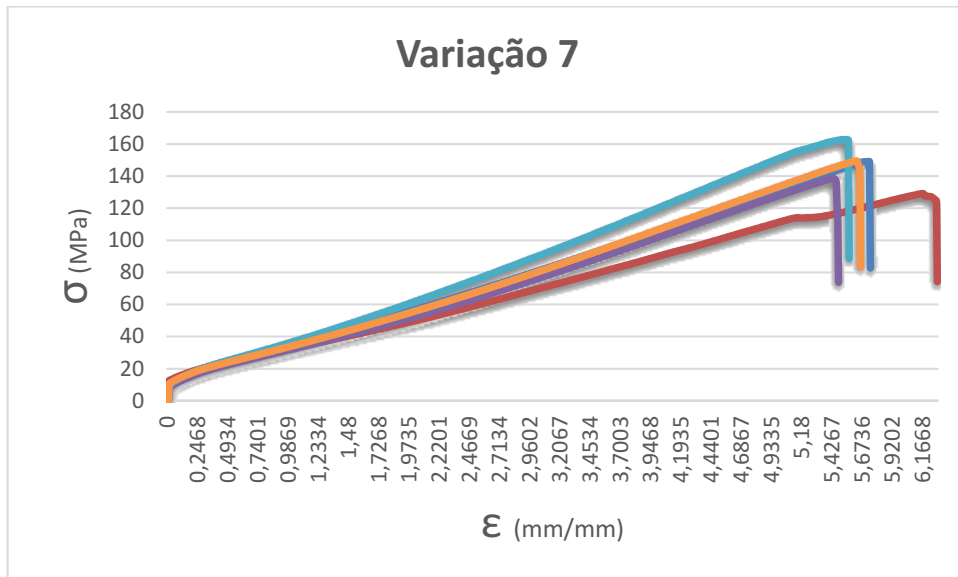
Fonte: O Autor (2021).

Figura 29 - Curva tensão-deformação da variação 6



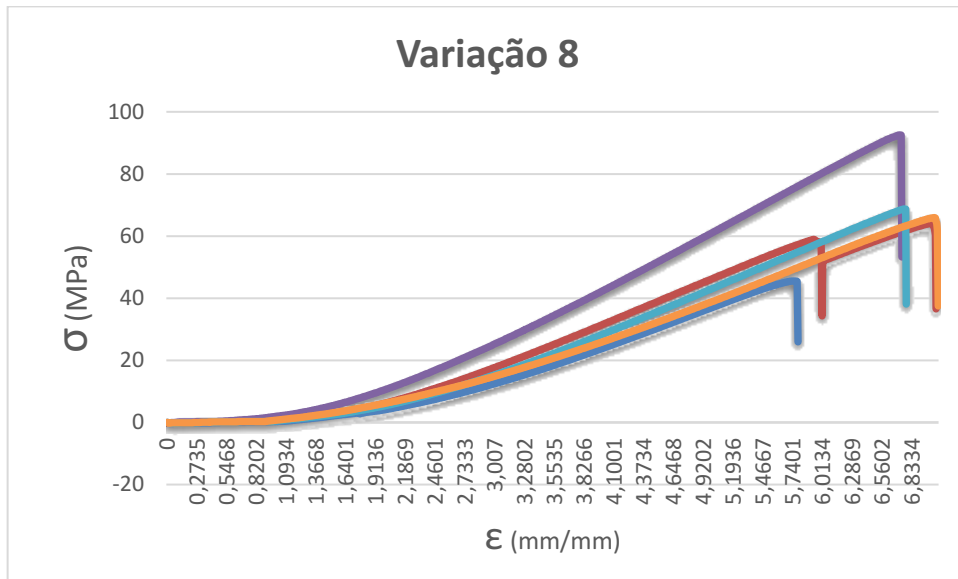
Fonte: O Autor (2021).

Figura 30 - Curva tensão-deformação da variação 7



Fonte: O Autor (2021).

Figura 31 - Curva tensão-deformação da variação 8



Fonte: O Autor (2021).