

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

JOÃO LUCAS NAKANO PONTES

INFLUÊNCIA DAS MANTAS NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE UM PRFV:
UM ESTUDO DE CASO

Joinville

2022

JOÃO LUCAS NAKANO PONTES

INFLUÊNCIA DAS MANTAS NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE UM PRFV:
UM ESTUDO DE CASO

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

2022

JOÃO LUCAS NAKANO PONTES

INFLUÊNCIA DAS MANTAS NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE UM PRFV:
UM ESTUDO DE CASO

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), 14 de julho de 2022.

Banca Examinadora:

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

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

Prof. Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Os materiais compósitos são materiais de engenharia de alto desempenho, projetados e fabricados para diversas aplicações no mercado aeronáutico, automobilístico e naval, aliando excelentes propriedades mecânicas com baixo peso. Os compósitos são formados por uma combinação de dois ou mais materiais, sendo um deles o reforço, que proporciona a resistência e a elasticidade do composto, e a matriz, que proporciona o meio pelo qual as cargas serão transferidas para as fibras. O objetivo deste trabalho foi produzir um material compósito de matriz de resina epóxi reforçado por fibra de vidro, determinando suas propriedades mecânicas e analisando a influência da configuração das camadas de fibra de vidro nas propriedades mecânicas do material. Foi utilizada como referência a configuração do costado de uma embarcação produzida em um estaleiro da cidade de Itajaí/SC e, a partir dessa configuração, foram definidas oito variações da configuração original, alterando a quantidade de tecidos e/ou mantas de fibra de vidro. Para cada configuração foi produzida uma placa de material compósito por meio de laminação manual (*Hand Lay Up*) e foram confeccionados cinco corpos de prova com dimensões de 15x1,5 cm. Cinco corpos de prova de cada variação foram submetidos ao ensaio mecânico de tração, sendo obtidos os valores de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade para cada laminado. Dentre as variações analisadas, destacam-se com melhores propriedades mecânicas as variações CO, V1, V2 e V5, todas elas com quatro camadas de tecido, em relação as demais configurações que possuem duas ou nenhuma camada de tecido. Os resultados obtidos evidenciam as melhores propriedades mecânicas dos tecidos em relação às mantas devido as suas fibras contínuas. Foi possível observar que entre as variações com quatro tecidos, todas possuíam valores muito próximos entre si, apesar da variação da quantidade de camadas. Assim, a variação V5, com 197,81 MPa de tensão máxima, 9,01 mm/mm de deformação máxima e 29,15 MPa de módulo de elasticidade, por possuir menos camadas e propriedades com uma pequena diferença em relação as demais, é a variação mais recomendada.

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

ABSTRACT

Composite materials are high-performance engineering materials designed and manufactured for various applications in the aerospace, automotive and naval industries, combining excellent mechanical properties with low weight. Composites are formed by a combination of two or more materials, one of which is the reinforcement, which provides strength and elasticity to the composite, and the matrix, which provides the means by which the loads will be transferred to the fibers. The objective of this work was to produce a fiberglass reinforced epoxy matrix composite material, determine its mechanical properties and analyze the influence of the configuration of the fiberglass layers on the material properties. The configuration of the side of a vessel produced in a shipyard in the city of Itajaí/SC was used as a reference and, from this configuration, were defined eight configuration variations changing the amount of fabrics/blanket fiber. For each configuration, a composite material plate was produced through manual lamination and five specimens were made. The specimens were submitted to the mechanical tensile test and the values of Maximum Stress, Maximum Strain and Modulus of Elasticity were obtained. Among the analyzed variations, the CO, V1, V2 and V5 variations stand out with better mechanical properties, all of them with four layers of fabric, in relation to the other configurations that have two or no layers of fabric. The results obtained show the best mechanical properties of the fabrics in relation to the blankets, due to their continuous fibers. It was possible to observe that among the variations with four fabrics, all had values very close to each other despite the variation in the number of layers. Thus, the variation V5, with 197.81 MPa of Maximum Stress, 9.01 mm/mm of Maximum Strain and 29.15 MPa of Modulus of Elasticity, as it has fewer layers and properties with a small difference in relation to the others, is the most recommended variation.

Keywords: Composite material. Epoxy resin. Fiberglass. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um reforço inserido em uma matriz.	13
Figura 2 – a) Manta de fibra de vidro, b) Tecido de fibra de vidro.	16
Figura 3 – Processo de Laminação manual.	19
Figura 4 – Representação do comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia para ensaio mecânico de tração.	20
Figura 5 – Fluxograma dos processos empregados na produção e análise dos laminados epóxi/fibra de vidro.	21
Figura 6 – Configuração original dos tecidos e mantas do compósito de referência.	21
Figura 7 – Configurações propostas de mantas e tecidos para a produção dos compósitos epóxi/fibra de vidro.	22
Figura 8 – Resina Epóxi American e Endurecedor Epóxi American.	23
Figura 9 – Produção do Laminado: Corte da fibra (a) e Limpeza da chapa de vidro (b).	24
Figura 10 – Pesagem do endurecedor.	24
Figura 11 – Aplicação do rolete tira bolhas.	25
Figura 12 – Desmolde de uma das placas laminadas produzidas.	26
Figura 13 – Preparação dos Corpos de Prova para determinação das propriedades mecânicas.	27
Figura 14 – Máquina Universal de Ensaio Instron, modelo 23-100.	27
Figura 15 – Medição dos CPs com auxílio do paquímetro (a) e CP rompido após o ensaio (b).	28
Figura 16 – Comparativo da tensão máxima das variações.	34
Figura 17 – Comparativo da deformação máxima das variações.	35
Figura 18 – Comparativo dos valores do módulo de elasticidade das variações.	37
Figura 19 – Curvas tensão-deformação para a Configuração Original (CO)	48
Figura 20 – Curvas tensão-deformação para a variação (V1)	48
Figura 21 – Curvas tensão-deformação para a variação 2 (V2)	49
Figura 22 – Curvas tensão-deformação para a variação 5 (V5)	49
Figura 23 – Curvas tensão-deformação para a variação 6 (V6)	50
Figura 24 – Curvas tensão-deformação para a variação 7 (V7)	50
Figura 25 – Curvas tensão-deformação para a variação 8 (V8)	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas propriedades das fibras de vidro.....	15
Tabela 2 – Descrição das variações de mantas e tecidos propostos em relação à Configuração Original.	22
Tabela 3 – Dimensões médias e área da secção transversal dos CPs.....	31
Tabela 4 – Média da tensão máxima, desvio padrão, IC 95% e limites superior e inferior dos valores calculados para as variações dos compósitos produzidos.	33
Tabela 5 – Média da deformação máxima, desvio padrão, IC 95% e limites superior e inferior dos valores calculados para as variações dos compósitos produzidos.	34
Tabela 6 – Média do módulo de elasticidade, desvio padrão, IC 95% e limites superior e inferior dos valores calculados para as variações dos compósitos produzidos.	36
Tabela 7 – Propriedades e configuração variações CO, V1, V2 e V5.....	38
Tabela 8 – Valores das espessuras dos CPs.....	45
Tabela 9 – Valores das larguras dos CPs.....	46
Tabela 11 – Propriedades Mecânicas	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – Sociedade Americana de Testes e Materiais (do inglês *American Society for Testing and Materials*).

CO – Configuração Original

CP – Corpo de Prova

CPs – Corpos de Prova

EPI – Equipamento de Proteção Individual

IC – Índice de Confiança

V1 – Variação 1

V2 – Variação 2

V5 – Variação 5

V6 – Variação 6

V7 – Variação 7

V8 – Variação 8

LISTA DE SÍMBOLOS

Δl – Deslocamento

l_0 – Comprimento inicial

ε – Deformação

σ – Tensão

A – Área da seção transversal

E – Módulo de elasticidade

F – Força

n – Quantidade de amostras

s – Desvio padrão

t – t de *Student*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivos Gerais	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	13
2.1.1 Fibra de Vidro.....	14
2.1.2 Resina Epóxi.....	16
2.2 LAMINAÇÃO MANUAL (<i>HAND LAY UP</i>)	18
2.2 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO	19
3 METODOLOGIA.....	21
3.1 MATERIAS.....	22
3.2 PROCESSO DE LAMINAÇÃO	23
3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	26
3.4 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1 DIMENSIONAIS DOS CORPOS DE PROVA COMPÓSITOS	30
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS POR TRAÇÃO UNIAXIAL.....	32
4.3 ANÁLISE DAS VARIAÇÕES	37
5 CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS	43
APÊNDICE A – MEDIDAS DAS AMOSTRAS.....	45
APÊNDICE B – PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AMOSTRAS.....	47
APÊNDICE C – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO	48

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento tecnológico de projetos surge a necessidade da utilização de materiais avançados e de alto desempenho nos mais diversos ramos da engenharia. Tal fato impulsiona uma grande quantidade de estudos teóricos e experimentais das propriedades dos materiais, de modo a facilitar a fabricação, melhorar as características finais e facilitar os métodos de detecção de falhas.

Dentro de uma importante classe destes novos materiais encontram-se aqueles que apresentam uma microestrutura heterogênea, constituída pela combinação discreta de diferentes fases. Nesta classe se enquadram, por exemplo, os compósitos reforçados por fibras que, normalmente, servem como materiais de reforço ou de enrijecimento. Os materiais compósitos avançados, reforçados por fibras, apresentam como principal característica elevadas relações resistência/peso e rigidez/peso, o que tem justificado, nas últimas décadas, o seu intenso emprego nas indústrias aeroespacial, automobilística e naval (ESCARPINI FILHO, 2010).

Na indústria naval, materiais compósitos são utilizados em diferentes aplicações. A combinação de excelentes propriedades mecânicas com uma alta resistência a corrosão tornam esses materiais ideais para a fabricação de cascos na indústria náutica, partes e elementos de navios de aplicação militar, e até mesmo no reparo ou manufatura de tubos para extração de petróleo (RUBINO et al., 2020).

Reforçadores para estruturas compósitas navais são, principalmente, as fibras de vidro devido ao seu custo em relação às características de resistência e trabalhabilidade. Elas representam mais de 90% das fibras utilizadas para reforçadores plásticos por serem baratas de produzir e possuírem boa característica resistência/peso. Além disso, as fibras de vidro também possuem uma boa resistência química e elevada processabilidade (GREENE, 1999).

Dentre os compósitos de matriz polimérica, a resina epóxi é a matriz mais comumente empregada nas indústrias aeroespacial e automobilística, apesar do seu custo maior. Para indústria naval, a resina mais empregada é a poliéster. O epóxi é um sistema de resina muito versátil, permitindo uma ampla gama de propriedades e capacidades de processamento. Apresenta baixa retração, bem como excelente adesão a uma variedade de materiais de substrato (MAZUMDAR, 2002).

Devido à praticidade e ao baixo custo de investimento, a laminação manual, também conhecida como *Hand Lay Up*, é o processo de fabricação mais utilizado atualmente no mundo. O processo consiste na colocação de sucessivas camadas de reforços devidamente

impregnadas pela matriz polimérica, de forma manual, sobre a superfície de um molde que tem a forma negativa da peça a ser fabricada. O processo permite uma fácil assimilação, tornando-se um negócio atraente. Embora simples, o processo de laminação exige conhecimento técnico (MARINUCCI, 2011).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi analisar a influência da variação da quantidade de camadas e da gramatura das mantas de reforço nas propriedades mecânicas de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade de laminados produzidos com fibra de vidro e resina epóxi utilizando o processo de laminação manual.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção será apresentado o objetivo geral bem como os objetivos específicos necessários para a realização deste trabalho.

1.1.1 Objetivos Gerais

Analisar a influência da estrutura tecido/manta nas propriedades mecânicas tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade de laminados compósitos constituídos de fibra de vidro e resina epóxi produzidos por laminação manual.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Produzir laminados compósitos epóxi/fibra de vidro utilizando laminação manual (*hand lay-up*) variando a configuração das camadas de tecido/manta;
- ✓ Obter as propriedades mecânicas de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade dos compósitos produzidos;
- ✓ Determinar a melhor configuração das camadas de tecido/manta do laminado produzido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

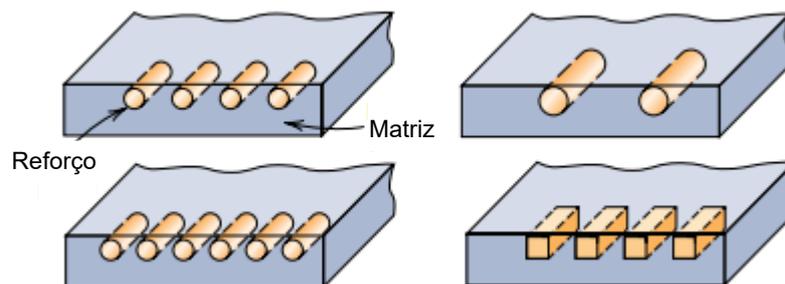
Nesta seção são apresentados os conceitos básicos e necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Assim, serão descritos os conceitos e as características dos materiais compósitos, da fibra de vidro, da resina epóxi, da laminação manual (*Hand Lay Up*) e do método utilizado para a realização do ensaio mecânico de tração.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Material compósito é uma substância consistindo de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil com propriedades que não são encontradas nos materiais isoladamente (ASTM D 3878, 2020). Um constituinte é chamado de reforço e o outro, no qual o reforço está inserido, de matriz. Os materiais de reforço podem ser na forma de fibras, partículas ou flocos. A matriz normalmente é constituída de um material contínuo (KAW, 2006).

A Figura 1 apresenta algumas variações espaciais e geométricas dos reforços inseridos em uma matriz. É possível observar que o reforço pode ter diversos formatos e pode estar em diferentes concentrações no material compósito.

Figura 1 – Representação de um reforço inserido em uma matriz.



Fonte: Adaptado de CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH (2008).

Os materiais compósitos tornaram-se materiais comuns de engenharia e são projetados e fabricados para diversas aplicações, incluindo componentes automotivos, artigos esportivos, peças aeroespaciais, bens de consumo e para as indústrias marinha e petrolífera. O crescimento do uso de compósitos também ocorreu devido ao aumento da conscientização sobre o desempenho do produto e aumento da concorrência no mercado global de componentes leves. Entre todos os materiais, os compósitos têm o potencial de substituir materiais amplamente utilizados, como aço e alumínio, e com melhor desempenho. A

substituição de componentes de aço por compósitos pode economizar de 60 a 80% no peso do componente, e a substituição do alumínio pode gerar de 20 a 50% de economia no peso (MAZUMDAR, 2002).

Quando as fibras, a forma mais comum na indústria náutica, segundo Greene (1999), são combinadas com uma resina ou uma matriz, os filamentos individuais são unidos formando um material composto com propriedades determinadas tanto pelos filamentos como pela matriz. Os principais objetivos da matriz são suportar e proteger as fibras do material composto e proporcionar o meio pelo qual as cargas serão transferidas para as fibras, com o intuito de obter um desempenho uniforme no material composto. A principal função das fibras no material composto é conduzir o carregamento ao longo dos reforçadores. Estes reforçadores proporcionam a resistência e a elasticidade ao composto (AL-QURESHI, 2010).

As propriedades dos compósitos são fortemente influenciadas pelas propriedades dos materiais constituintes, sua distribuição e a relação entre eles. A contribuição de um único componente nas propriedades gerais do compósito é determinada pela sua concentração, que é medida em termos da fração de volume ou peso. A concentração geralmente é considerada como o fator de influência mais importante nos compósitos, sendo também uma variável de fabricação facilmente controlável para alterar as propriedades de tais materiais. Além disso, a orientação dos reforços afeta a isotropia do sistema, sendo assim relevante nas propriedades finais do compósito. Para o caso de reforços de fibra, o processo de manufatura pode induzir orientações nas fibras e assim induzir alguma anisotropia (AGARWAL, 1990).

Segundo Gross (2010), de maneira a evitar falhas quando uma carga é aplicada em uma direção diferente da preferencial, compósitos são geralmente fabricados com uma sequência de camadas de fibras orientadas em diferentes direções, promovendo assim propriedades mais isotrópicas. Entre as fibras mais utilizadas está a fibra de vidro.

2.1.1 Fibra de Vidro

A grande maioria dos materiais possuem propriedades de resistência e rigidez mais elevadas na forma de fibras do que na forma de partículas. Uma grande relação comprimento diâmetro de fibra permite uma transferência de carga muito efetiva pela matriz do material para as fibras. Portanto, fibras são muito eficientes e atrativos materiais de reforço (AGARWAL, 1990).

A fibra de vidro é a fibra mais comum usada em compósitos de matriz polimérica. Suas vantagens incluem elevada resistência, baixo custo, alta resistência química e boa

propriedade isolante. Suas desvantagens incluem baixo módulo de elasticidade, fraca adesão aos polímeros, sensibilidade a abrasão (reduz a resistência à tração), e baixa resistência à fadiga (KAW, 2006).

As fibras de vidro são produzidas a partir do vidro em forma líquida, que é resfriado a alta velocidade. Através do controle de temperatura e velocidade de escoamento do vidro através de placas de platina são produzidos vários tipos de filamentos com diâmetros variados. Uma variedade de composições químicas é utilizada na produção, cada uma delas exibindo diferentes propriedades mecânicas e químicas, e designadas por uma letra do alfabeto (NASSEH, 2011). Sendo assim, existe uma série de tipos de fibra de vidro, de acordo com suas composições químicas. Na Tabela 1 estão representadas algumas propriedades das fibras de vidro tipo A, C, E e S.

Tabela 1 – Algumas propriedades das fibras de vidro

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

Fonte: Marinucci (2011)

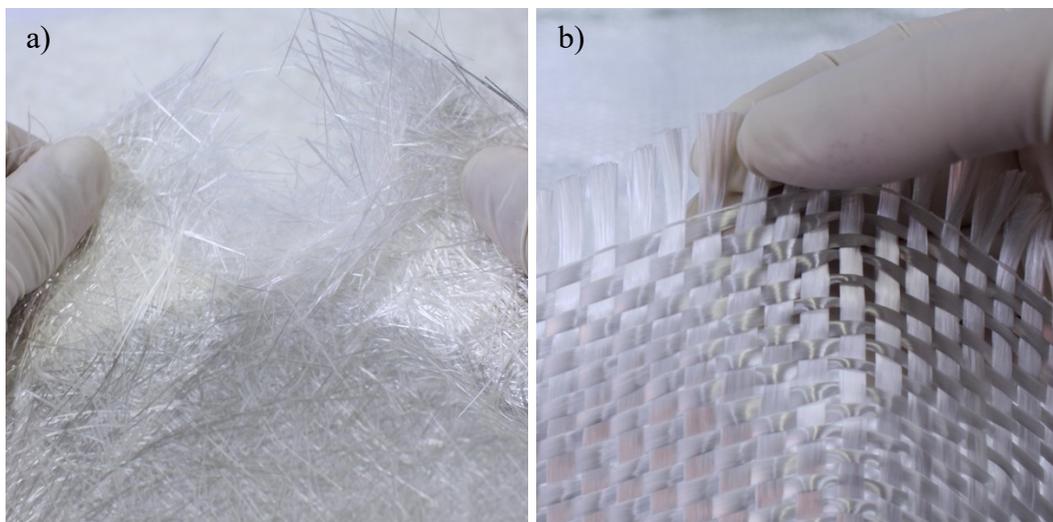
De acordo com Nasseh (2011), o vidro tipo E é o mais popular entre os construtores de barcos e talvez 95% de todas as embarcações de fibra do mundo sejam feitas com este material. O vidro tipo E é constituído de alumina, boro e sílica, produzindo a maioria das mantas e tecidos deste reforço. Sob o ponto de vista da engenharia, as principais vantagens do vidro tipo E são o baixo custo, a boa resistência mecânica, a alta resistência ao impacto, e a excelente estabilidade química e térmica. Dentre as principais desvantagens, destaca-se o módulo de elasticidade relativamente baixo quando comparado a outros materiais de reforço e a resistência mecânica sensível a falhas superficiais (AL-QURESHI, 2010).

As fibras de vidro são disponibilizadas na forma de fibras curtas e fragmentadas ou na forma de filamentos contínuos. Fibras curtas (*chopped fibers*) são obtidas pela fragmentação de fibras contínuas, com comprimentos que podem variar de 0,6 até 5,0 cm. Quando as fibras picadas são unidas por um material ligante, podem ser fabricadas as mantas, material de reforço bastante usual. As mantas apresentam uma distribuição relativamente uniforme da

resistência em qualquer direção devido à distribuição ao acaso das fibras e possuem como vantagens fácil aplicação, excelente molhabilidade e boa moldabilidade. Já os tecidos são formados por filamentos contínuos. A montagem das fibras na direção do comprimento do fio e na direção transversal permite a fabricação de tecidos que conferem ao compósito resistência em duas direções. Os tecidos possuem maior custo quando comparados às mantas, entretanto, oferecem propriedades superiores em termos de resistência e rigidez e maior estabilidade dimensional ao compósito (MARINUCCI, 2011). Existem também os tecidos que são combinados com mantas e trazem importantes ganhos na absorção da resina e na impregnação entre camadas, como o tecido biaxial 1808.

A Figura 2 apresenta a imagem de uma manta, formada pela junção de várias fibras curtas, e de um tecido, formado pelo conjunto de filamentos contínuos entrelaçados. É possível notar a aleatoriedade da distribuição dos filamentos de vidro na manta, enquanto que para o tecido existe uma organização muito clara da distribuição dos filamentos - esta organização específica é característica de um reforço conhecido como tecido padrão tela.

Figura 2 – a) Manta de fibra de vidro, b) Tecido de fibra de vidro.



Fonte: *Advanced Vacuum* (2022).

2.1.2 Resina Epóxi

As fibras não podem ser diretamente carregadas devido a suas pequenas dimensões de seção transversal e, além disso, elas não são capazes de transmitir cargas de uma para a outra para compartilhar as tensões, limitando severamente seu uso direto em aplicações de engenharia. Esta limitação é superada incorporando-as com a matriz e formando um compósito. A matriz se liga a fibra e, uma vez juntas, transfere cargas para as fibras,

protegendo-as de ataques ambientais e danos pelo manuseio. A matriz tem uma forte influência em várias propriedades mecânicas do compósito, como no cisalhamento e na compressão (AGARWAL, 1990).

Quando os filamentos fibrosos são combinados com uma resina ou uma matriz de polímero conveniente, os filamentos individuais são unidos formando um material composto com propriedades determinadas tanto pelos filamentos como pela matriz. Assim, os principais objetivos da matriz são proporcionar o meio pelo qual as cargas serão transferidas pelas fibras, com o intuito de obter um desempenho uniforme no material composto, e suportar e proteger as fibras do material. O material composto apresenta alta tensão de ruptura e rigidez, mas mantendo uma baixa densidade (AL QURESHI, 2010).

O termo resina epóxi se refere a um amplo grupo de compostos reativos que são caracterizados pela presença do grupo epóxi, que é representado por um átomo de oxigênio ligado com dois átomos de carbono. Uma resina epóxi pode ser qualquer molécula contendo mais de um desses grupos epóxi (PETRIE, 2006).

A resina epóxi é obtida pela reação com aminas orgânicas e/ou ácidos compostos, o que a torna dura e infusível. Além disso, os epóxios têm boa adesão e alta resistência de ruptura, baixo encolhimento na cura e boas propriedades elétricas. Entretanto, os epóxios não produzem água de condensação durante a polimerização, o que facilita a ocorrência de vazios na laminação (AL QURESHI, 2010).

As resinas epóxi são um tipo de resina termorrígida que, uma vez curadas, não podem ser remoldadas. Durante a cura elas formam ligações moleculares tridimensionais, chamadas de ligações cruzadas, e, devido a estas ligações, as moléculas não são mais flexíveis e não podem ser remoldadas. Quanto maior for o número de ligações cruzadas, mais rígido e termicamente estável será o material (MAZUMDAR, 2002).

Segundo Greene (1999), as resinas epóxi apresentam as melhores características de performance dentre todas as resinas. Ela é a matriz mais utilizada apesar de ter um maior custo em relação às outras matrizes poliméricas. Suas principais características são a elevada dureza, a baixa viscosidade e as baixas taxas de fluxo, o que permite um bom umedecimento das fibras, um pequeno desalinhamento durante o processo, uma baixa volatilidade durante a cura e uma baixa taxa de encolhimento, que reduz a tendência de ganho de tensões de cisalhamento na ligação entre os reforços e a matriz (KAW, 2006).

2.2 LAMINAÇÃO MANUAL (*HAND LAY UP*)

A laminação manual (*Hand Lay Up*) é a técnica mais antiga, simples e comumente utilizada para a fabricação de produtos reforçados, onde as fibras de reforços e a matriz são aplicadas manualmente sobre a superfície do molde. Este é um método de molde aberto para a laminação de termofixos em associação com fibras. A técnica de laminação manual é mais bem utilizada em aplicações onde o volume de produção é baixo e outras formas de produção seriam proibitivas devido a custos ou requisitos de tamanho. As aplicações típicas incluem barcos e cascos de barcos, dutos, piscinas, móveis e chapas onduladas (AGARWAL, 1990).

O processo de laminação manual praticamente não requer investimento em equipamentos, sendo necessários apenas produtos auxiliares como pincéis, roletes, espátulas, bastões, ferramentas de corte e recipientes para a preparação da matriz. Equipamentos de Proteção Individual (EPI's) são necessários e obrigatórios, bem como exaustão na área de laminação devido a formação de vapores durante o processo. Devido à necessidade contínua da limpeza dos materiais auxiliares, solventes apropriados devem fazer parte da rotina de qualquer fabricação. A acetona é um dos produtos mais eficientes para essa tarefa e os materiais devem ser limpos imediatamente após a utilização (MARINUCCI, 2011).

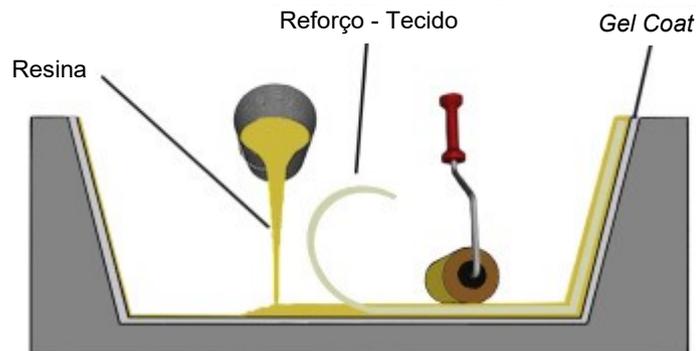
Quando uma boa aparência da superfície é desejada, o primeiro passo é a aplicação de uma camada de uma resina chamada *gel coat*. O *gel coat* produz uma superfície decorativa, protetora, brilhante e colorida, que requer pouco ou nenhum acabamento superficial. A resina e o catalisador (endurecedor) pré-medidos são completamente misturados e podem ser aplicados sobre as fibras de vidro (AGARWAL, 1990).

A primeira camada de fibra de vidro pode ser feita aplicando *rovings*, tecidos ou mantas manualmente sobre o molde, enquanto a resina é aplicada com pincéis, rolos ou rodos. Outras camadas são aplicadas da mesma maneira até obter-se a espessura desejada. A resina catalisada permite a cura à temperatura ambiente, mas também pode ser acelerada usando aceleradores ou aquecedores (AL-QURESHI, 2010). De acordo com Nasseh (2011), o teor de fibras médio obtido com a laminação manual utilizando mantas e tecidos como reforços é de 30%, enquanto que se for com tecido multiaxial pode chegar a valores próximos a 50%. A Figura 3 apresenta a representação de uma laminação manual.

A quantidade de camadas, os tipos de reforço, a orientação e a sequência de formação das camadas devem seguir rigorosamente as instruções do roteiro de laminação, sendo que nenhuma alteração deve ser realizada na configuração de laminação sem uma análise prévia. As vantagens associadas ao processo são a simplicidade, a flexibilidade de projeto, o baixo

investimento, nenhuma restrição de tamanho de peça e a possibilidade de laminação no campo de trabalho. No entanto, a laminação por contato exige elevada incidência de mão-de-obra e produz acabamento em apenas uma das faces da peça. A qualidade do produto é fortemente dependente da habilidade do laminador (MARINUCCI, 2011).

Figura 3 – Processo de Laminação manual.



Fonte: Adaptado de Raji (2009)

2.3 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

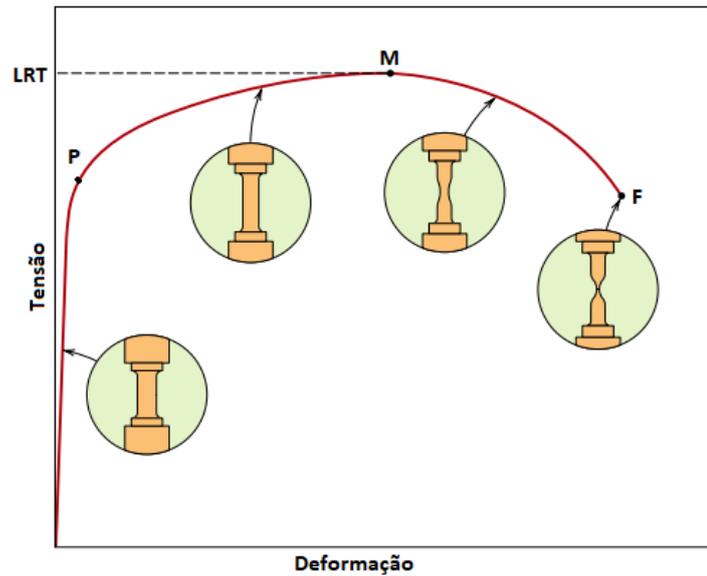
A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura. Essa propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada por métodos experimentais. Um dos testes mais importantes é o ensaio de tração ou compressão. Embora seja possível determinar muitas propriedades mecânicas importantes de um material por esse teste, ele é usado primariamente para determinar a relação entre a tensão normal média e a deformação normal média em muitos materiais usados na engenharia, como metais, cerâmicas, polímeros e compósitos (HIBBELER, 2004).

O ensaio mecânico de tração pode ser usado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais que são importantes em projetos. Uma amostra é deformada, geralmente até a sua fratura, mediante uma carga de tração gradativamente crescente aplicada uniaxialmente ao longo do eixo longitudinal de um corpo de prova. A máquina de ensaios é projetada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, além de medir contínua e simultaneamente a carga instantânea aplicada (com uma célula de carga) e os alongamentos resultantes (com um extensômetro). Tipicamente, um ensaio de tensão-deformação dura vários minutos, sendo destrutivo, isto é, a amostra testada é deformada de maneira permanente, sendo geralmente fraturada (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2008).

A Figura 4 traz uma representação que, segundo Callister e Rethwisch (2008), é o comportamento típico da curva tensão-deformação para os ensaios de tração. O ponto P se

refere ao limite de escoamento do material, ou seja, o limite entre a sua região plástica e sua região elástica. O ponto M se refere a tensão máxima da curva tensão-deformação, também chamada de Limite de Resistência à Tração (LRT). Já o ponto F é o momento em que o material sofre a ruptura.

Figura 4 – Representação do comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia para ensaio mecânico de tração.



Fonte: CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH (2008).

Sendo assim, a máquina de ensaio mecânico de tração permite alongar o corpo a uma taxa constante e, através de um extensômetro, quantificar o alongamento resultante até seu ponto de ruptura. Utilizando os dados registrados ao decorrer do ensaio, é possível determinar a tensão (σ) que relaciona a força (F) e a área da secção transversal (A_0) através da Equação 1. A deformação da amostra (ε) pode ser determinada através da leitura no extensômetro ou pela Equação 2, que é obtida pela relação entre a variação do comprimento de referência do CP (Δl) pelo comprimento de referência original do CP (l_0). Sendo assim, a relação entre σ e ε resulta no módulo de elasticidade (E_m) do material, descrito pela Equação 3.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

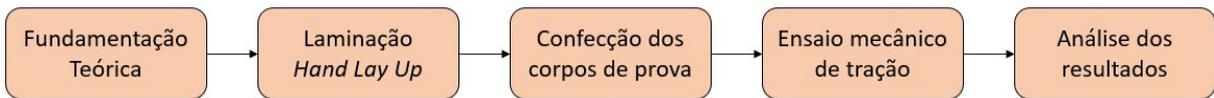
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

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

3 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a metodologia de estudo aplicada para a produção deste trabalho, sendo ela formada pelo conjunto de processos, métodos e ferramentas utilizadas a fim de atingir o objetivo de produção e caracterização mecânica dos laminados. A Figura 5 apresenta um fluxograma geral dos processos da metodologia.

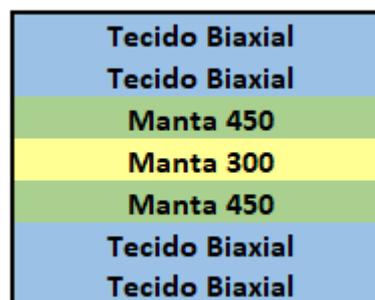
Figura 5 – Fluxograma dos processos empregados na produção e análise dos laminados epóxi/fibra de vidro.



Fonte: Autor (2022).

O objetivo desse trabalho é comparar a caracterização mecânica de diferentes configurações de laminados de fibra de vidro produzidos com resina epóxi. Sendo assim, utilizou-se como referência a configuração do costado de uma embarcação produzida em um estaleiro da região de Itajaí/SC, sendo ela formada por quatro tecidos biaxiais, quatro mantas de 450 gm^{-2} e uma manta de 300 gm^{-2} . A disposição do laminado de referência está representada na Figura 6, sendo ela nomeada “Configuração Original”.

Figura 6 – Configuração original dos tecidos e mantas do compósito de referência.



Fonte: Autor (2022).

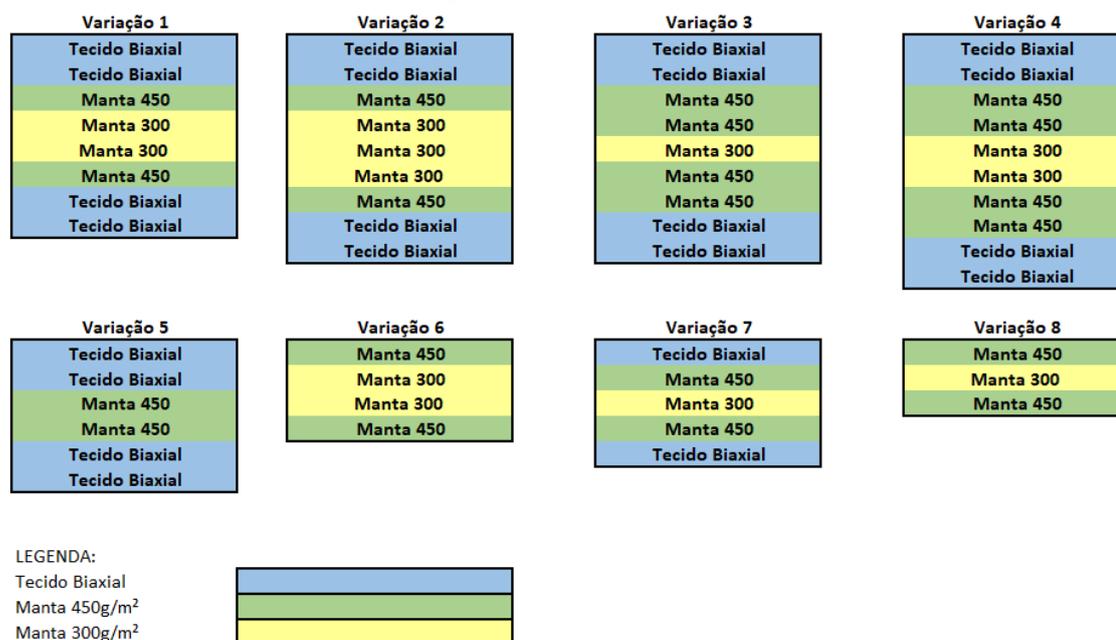
A partir desta configuração original foram propostas variações no número de camadas tanto de mantas como também de tecidos. Ao todo, foram selecionadas oito variações a serem comparadas com a configuração original, chamada de CO. Na Tabela 2 encontra-se a descrição destas variações e na Figura 7 estão representadas as variações definidas.

Tabela 2 – Descrição das variações de mantas e tecidos propostos em relação à Configuração Original.

DESCRIÇÃO		QTDE MANTA 300	QTDE MANTA 450	QTDE TECIDOS BIAXIAIS
CONFIGURAÇÃO ORIGINAL		1	2	4
V1	Acréscimo 1 manta 300	2	2	4
V2	Acréscimo 2 mantas 300	3	2	4
V3	Acréscimo 2 mantas 450	1	4	4
V4	Acréscimo 2 mantas 450 + 1 manta 300	2	4	4
V5	Retirar 1 manta 300	0	2	4
V6	Acréscimo 1 manta 300 + Retirar 4 tecidos	2	2	0
V7	Retirar 2 tecidos biaxial	1	2	2
V8	Retirar 4 tecidos biaxial	1	2	0

Fonte: Autor (2022).

Figura 7 – Configurações propostas de mantas e tecidos para a produção dos compósitos epóxi/fibra de vidro.



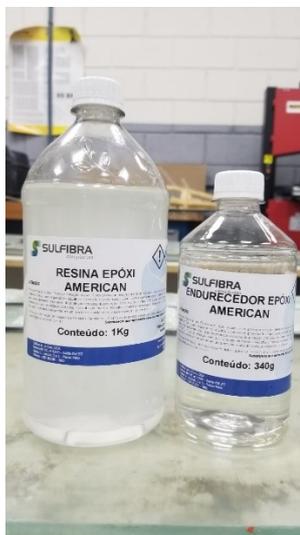
Fonte: Autor (2022).

3.1 MATERIAS

Para a laminação foi utilizada a Resina Epóxi American e um Endurecedor Epóxi American, ambos da marca Sulfibras (Figura 8). Em relação às fibras de vidro, foram utilizadas mantas com gramatura de 300 g/m² e 450 g/m² e o tecido biaxial 1808 da empresa Central Fibras. Vale destacar que o tecido biaxial 1808 utilizado nesse trabalho é composto

por um tecido de 600 gm^{-2} combinado com uma manta de 225 gm^{-2} , tendo a manta um papel muito importante na absorção da resina e impregnação com as demais camadas do laminado.

Figura 8 – Resina Epóxi American e Endurecedor Epóxi American.



Fonte: Autor (2022).

Além disso, outros materiais também foram importantes tanto para a laminação quanto para a confecção dos Corpos de Prova (CPs), como a cera desmoldante da marca TecGlaze-N, papel toalha para limpeza e aplicação da cera, diluente, espátula de metal, tesoura, estilete, recipiente plástico, balança, pincel, rolete, esmerilhadeira, e disco de corte.

3.2 PROCESSO DE LAMINAÇÃO

Todo o processo de laminação foi realizado no Laboratório de Modelagem e Construção Naval da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville. Foi adotado um processo de laminação plana manual, já que o formato dos CPs para a realização do ensaio mecânico de tração é simples.

Antes de iniciar a laminação, foi necessária a preparação dos materiais e do molde em que o laminado foi produzido. Deste modo, primeiramente foi realizado o corte das mantas e tecidos, deixando-os com as dimensões de $17,0 \times 8,5 \text{ cm}$. Nesta etapa foram utilizadas como apoio uma tesoura e um estilete. Na sequência, foi realizada a limpeza da superfície da chapa de vidro, utilizada como molde para a realização da laminação. Para tal limpeza foi utilizada uma espátula de metal para retirar as grandes partículas e depois foi aplicado um agente diluente para a retirada de partículas menores. Na Figura 9 é possível observar o corte da fibra (a) e a limpeza da chapa de vidro (b).

Figura 9 – Produção do Laminado: Corte da fibra (a) e Limpeza da chapa de vidro (b).

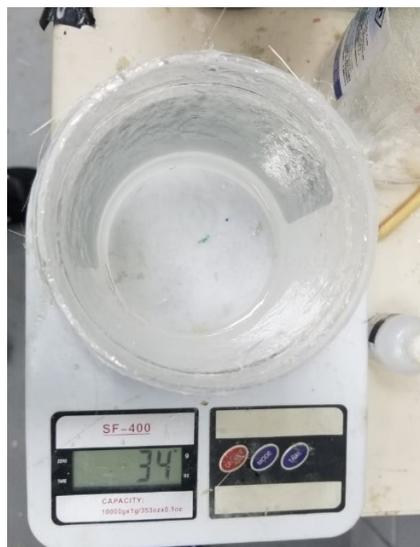


Fonte: Autor (2022).

Após esse processo, foi iniciada a aplicação da cera desmoldante para facilitar o desmolde das placas após a cura. Foram aplicadas três camadas de cera, com um intervalo de 10 minutos entre cada aplicação.

O passo seguinte foi a preparação da resina. Com o auxílio de uma balança foram pesados, separadamente, a resina e o endurecedor. Seguindo a proporção de 1 g de resina para 0,34 g de endurecedor, indicada pelo próprio fabricante, foi realizada a mistura em um recipiente plástico. A Figura 10 apresenta a pesagem de 34 g do endurecedor que foi misturado com 100 g de resina para aplicação na laminação.

Figura 10 – Pesagem do endurecedor.



Fonte: Autor (2022).

Desta forma, com o molde e os materiais preparados, foi iniciada a laminação. Primeiramente era aplicada, com o auxílio de um pincel, uma fina camada da mistura resina/endurecedor e esta era sobreposta pela fibra de vidro na forma de tecido ou manta, de acordo com a configuração proposta. Após cada camada de fibra de vidro, independente da forma, foi aplicada novamente a mistura resina/endurecedor seguido do rolete tira bolhas para remoção do excesso de bolhas. A Figura 11 retrata a aplicação do rolete tira bolhas.

Figura 11 – Aplicação do rolete tira bolhas.



Fonte: Autor (2022).

Realizando os procedimentos descritos, foram laminadas nove placas com dimensões de 20 x 20 cm com as configurações propostas na Tabela 2. Para uma maior segurança e confiabilidade de cura completa, o desmolde das placas foi realizado 72 horas após a laminação. Assim, foi utilizada uma espátula de metal para auxílio no desmolde das placas, sendo que cada uma delas recebeu uma identificação. A Figura 12 representa o desmolde de uma das placas laminadas.

Figura 12 – Desmolde de uma das placas laminadas produzidas.



Fonte: Autor (2022).

3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A confecção dos corpos de prova (CPs) foi realizada seguindo as recomendações da norma *Standard Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* (ASTM D3039), sendo definidas as dimensões 15 x 1,5 cm para cada CP. Assim, com o objetivo de confeccionar 5 CPs por placa e deixar uma margem de segurança para o corte dos CPs, foi acrescentado 1,0 cm em cada extremidade, deixando cada placa com 17,0 x 8,5 cm.

Para a confecção dos CPs foi utilizada a esmerilhadeira angular DWT WS08 115 com disco diamantado da marca Classic. Antes da realização do corte foi realizada a marcação dos limites dos CPs nas placas com o auxílio de uma caneta permanente. As dimensões dos CPs são de 15 cm de comprimento por 1,5 cm de largura, seguindo a norma ASTM D 3039. Como o objetivo do trabalho é a caracterização mecânica do material através do ensaio de tração, não foi necessária a realização de acabamentos nos CPs. A Figura 13 mostra como foi realizado o corte de cada CP.

Figura 13 – Preparação dos Corpos de Prova para determinação das propriedades mecânicas.



Fonte: Autor (2022).

3.4 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO

O ensaio mecânico de tração foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Blumenau. Foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio Instron, modelo 23-100, com capacidade de carga de 100 kN. Os ensaios foram conduzidos com base na norma ASTM D3039, que é o padrão de ensaio para a análise de CPs de matriz polimérica. Na Figura 14 está representada a Máquina Universal de Ensaio utilizada para a realização dos ensaios nos CPs compósitos poliméricos.

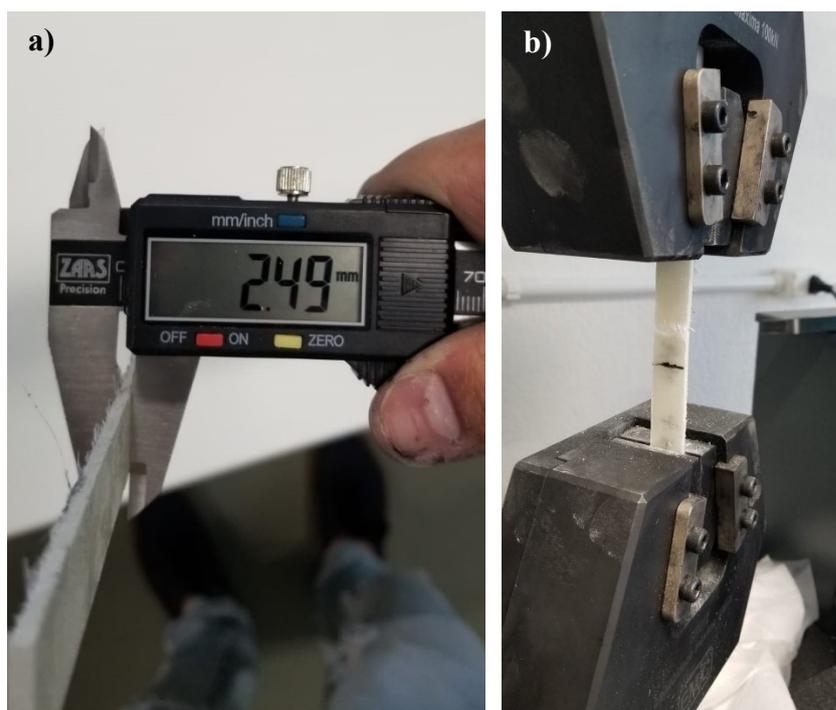
Figura 14 – Máquina Universal de Ensaio Instron, modelo 23-100.



Fonte: Autor (2022).

Para a determinação das propriedades mecânicas foram medidas a largura e a espessura de todos os CPs com o auxílio de um Paquímetro Digital Universal da marca Zars. A Máquina Universal de Ensaio foi configurada com a sua carga máxima, de 100 kN, e com uma velocidade de operação de 4 mm/min. A Figura 15 mostra a medição da espessura de um dos CPs (a) e um CP rompido após a realização do ensaio de tração (b).

Figura 15 – Medição dos CPs com auxílio do paquímetro (a) e CP rompido após o ensaio (b).



Fonte: Autor (2022).

A Máquina Universal de Ensaio utilizada possui algumas limitações, como por exemplo, uma capacidade máxima de carga de 100 kN e restrições quanto as dimensões dos CPs, suportando CPs com largura máxima de 40 mm e espessura máxima de 8 mm. Devido à grande quantidade de camadas de algumas das configurações, as amostras 3 e 4 superaram esse limite máximo de 8 mm e não foi possível realizar o teste com elas. Sendo assim, essas configurações foram desconsideradas do restante do trabalho. Além disso, o CP 5 da variação 2 sofreu um deslizamento das garras durante o ensaio, sendo também retirado das análises.

A partir do ensaio mecânico de tração tem-se como dados de saída a força aplicada pela máquina, ao longo do tempo, e o deslocamento das suas garras. Assim, para o cálculo da tensão, foi considerado um valor constante de área para cada CP dividido pela força aplicada pela máquina. Para o cálculo da deformação do material utilizou-se como estimativa o

deslocamento das garras da máquina ao longo do tempo. Deste modo, foi possível construir o gráfico tensão-deformação para cada um dos CPs. Sabendo que o módulo de elasticidade é calculado na parte elástica da curva tensão-deformação, para cada variação foi selecionado um valor de tensão no intervalo entre 50 e 90 MPa e foi realizado a divisão entre tensão e deformação nesse ponto, obtendo assim o módulo de elasticidade do CP.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a abordagem teórica dos principais temas deste trabalho e da metodologia utilizada, esta seção apresenta os resultados obtidos no ensaio mecânico de tração nos CPs e as discussões ligadas às análises desses dados.

4.1 DIMENSIONAIS DOS CORPOS DE PROVA COMPÓSITOS

A configuração utilizada como referência foi a de um costado produzido no estaleiro da cidade de Itajaí/SC possuindo quatro tecidos biaxiais, duas mantas 450 gm^{-2} e uma manta 300 gm^{-2} . Com o objetivo de analisar o impacto da quantidade de camadas nas propriedades mecânicas dos laminados, foram definidas variações a partir da Configuração Original, onde nas variações V1, V2, V3 e V4 foram acrescentadas mantas, na variação V5 foi retirada uma manta, em V7 retiraram-se tecidos, e em V6 e V8 foram retirados tecidos e mantas, conforme apresentado na Figura 7.

A laminação *Hand Lay Up*, utilizada neste trabalho, depende muito da habilidade do laminador para a obtenção de um material com boas propriedades. Apesar de ser uma laminação considerada simples, é a habilidade do laminador que garante uma uniformidade na aplicação da resina na amostra e uma baixa quantidade de vazios no material. Durante a produção dos laminados foi utilizado um rolo tira bolhas para amenizar esse efeito nas amostras. Entretanto, a pouca experiência do laminador pode ter afetado na qualidade das amostras, obtendo-se laminados com quantidades consideráveis de vazios.

Após a laminação das placas, foi realizado o corte para a confecção dos CPs com o auxílio de uma esmerilhadeira. Tendo em vista que foi definido que os CPs teriam as dimensões de $15,0 \times 1,5 \text{ cm}$, o processo utilizado para o corte foi bastante satisfatório, já que a variação entre o valor teórico e o valor real obtido para as larguras foi muito próximo. Conforme descrito na norma ASTM D3039, foi realizada a aferição dos valores de espessura e largura das amostras em três diferentes pontos, a fim de se obter a média dessas dimensões para cada CP. As dimensões aferidas podem ser observadas no Apêndice A, onde a Tabela 8 apresenta os valores para a espessura e a Tabela 9 apresenta os valores para a largura dos CPs.

Assim, com a obtenção dos valores médios da espessura e da largura de cada amostra foi possível calcular o valor da área da seção transversal para cada CP. Na Tabela 3 estão listadas as dimensões médias e a área de seção transversal para cada um dos CPs analisados.

Tabela 3 – Dimensões médias e área da secção transversal dos CPs.

Variações	Espessura Média (mm)	Largura Média (mm)	Área da Secção Transversal (mm²)
CONFIGURAÇÃO ORIGINAL	7,30	15,02	109,60
	7,35	15,04	110,52
	7,36	14,97	110,15
	7,31	15,02	109,82
	7,29	15,00	109,33
VARIAÇÃO 1	6,06	15,03	91,01
	6,00	15,02	90,09
	6,25	15,04	94,03
	5,93	15,03	89,11
	6,14	15,05	92,39
VARIAÇÃO 2	7,29	15,04	109,59
	7,36	15,03	110,67
	7,25	15,02	108,84
	7,18	15,04	108,01
	7,28	15,05	109,59
VARIAÇÃO 5	5,49	15,01	82,45
	5,41	15,07	81,60
	5,62	15,01	84,31
	5,41	15,06	81,47
	5,48	15,06	82,46
VARIAÇÃO 6	2,43	14,99	36,38
	2,52	14,99	37,82
	2,48	15,07	37,37
	2,43	15,01	36,53
	2,38	15,07	35,87
VARIAÇÃO 7	4,48	15,02	67,30
	4,44	15,06	66,85
	4,50	15,05	67,73
	4,52	15,02	67,89
	4,57	15,03	68,64
VARIAÇÃO 8	3,54	15,05	53,23
	3,48	15,00	52,26
	3,69	15,08	55,68
	3,50	15,02	52,58
	3,48	15,04	52,28

Fonte: Autor (2022).

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS POR TRAÇÃO UNIAXIAL

A realização do ensaio mecânico de tração teve como limitador o valor máximo para a espessura do CP. Isso porque as garras da máquina de ensaio utilizada possuem capacidade máxima de abertura de oito milímetros.

Os dados de saída forneceram o deslocamento e a força aplicada ao longo do tempo. Desse modo, foi possível calcular a tensão máxima, a deformação máxima e o módulo de elasticidade para cada CP. Essas propriedades mecânicas estão disponibilizadas no Apêndice B, na Tabela 10.

Assim, com o intuito de facilitar a análise comparativa entre as variações, foram calculadas a média, o desvio padrão e o Índice de Confiança (IC) para cada uma das propriedades mecânicas encontradas. Para isso, foi utilizada a técnica de distribuição *t* de *student* com Nível de Confiança de 95%. O cálculo do Intervalo de Confiança (IC), Limite Superior e Limite Inferior da distribuição *t* de *student* são representados pelas Equações 4, 5 e 6 (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2009).

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

$$\text{Limite Superior} = x_m + t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

$$\text{Limite Superior} = x_m - t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Onde, x_m representa a média das amostras, t é o valor obtido da tabela de *Student*, s é o desvio padrão e n é a quantidade de amostras consideradas para cada variação. Analisando a tabela de distribuição de *Student*, para o nível de confiança de 95% e cinco amostras, o valor de t é de 2,776, e para quatro amostras o valor de t é 3,182.

A Tabela 4 apresenta as médias de tensão máxima de cada variação, juntamente com seus desvios padrão, IC e limites superiores e inferiores, onde CO representa a Configuração Original e V(1,2,5,6,7,8) os compósitos produzidos com diferentes configurações, conforme descrito em Materiais e Métodos.

Tabela 4 – Média da tensão máxima, desvio padrão, IC 95% e limites superior e inferior dos valores calculados para as variações dos compósitos produzidos.

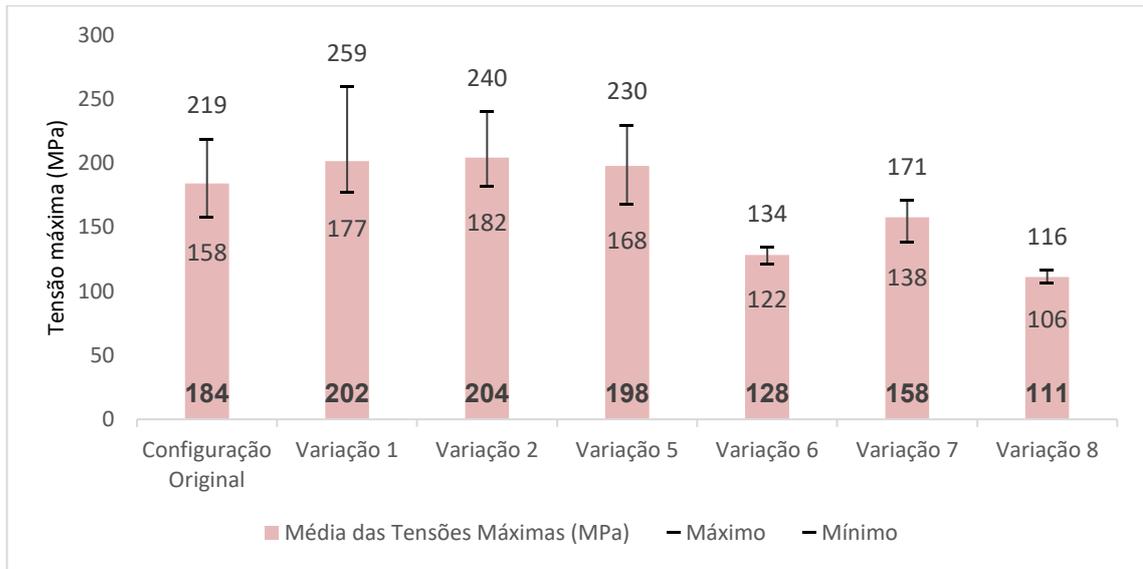
Variações	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente t Student	IC 95% (MPa)	Limite Superior (MPa)	Limite Inferior (MPa)
CO	184,04	20,69	2,776	25,69	209,72	158,35
V1	201,60	29,73	2,776	36,91	238,51	164,69
V2	204,21	21,83	3,182	34,72	238,93	169,48
V5	197,81	20,76	2,776	25,77	223,58	172,04
V6	128,16	5,43	2,776	6,74	134,90	121,43
V7	157,55	10,55	2,776	13,10	170,65	144,45
V8	111,01	4,28	2,776	5,31	116,32	105,69

Fonte: Autor (2022).

Analisando os dados apresentados na Tabela 4 é observado que a variação V2, que possui a maior quantidade de camadas, é a que suporta uma maior tensão, com um valor de 204,21 MPa. Já a variação V8, que possui a menor quantidade de camadas, é a que suporta a menor tensão quando comparada com as demais variações, com um valor de 111,01 MPa. Assim, nota-se que quanto maior a quantidade de camadas, maior a resistência do compósito.

A Figura 16 apresenta um comparativo dos valores da tensão máxima das variações. Nesta figura é possível observar a influência que a fibra de vidro na forma de tecido traz para o compósito. A variação V6 possui uma camada a mais que a variação V8, ambas não possuindo tecido na sua configuração, e a diferença de tensão entre elas é considerada baixa. Entretanto, quando a variação V6 é comparada com a V7, que possui duas camadas de tecido, nota-se que existe uma diferença maior nas tensões, sendo que a diferença de camada entre elas também é de uma camada. O mesmo pode ser observado comparando a V7 com a configuração original, onde existe um acréscimo na quantidade de tecido e a diferença entre tensões é alta. Já para o caso das variações CO, V1, V2 e V5 nota-se que a diferença entre tensões é relativamente baixa.

Figura 16 – Comparativo da tensão máxima das variações.



Fonte: Autor (2022).

A Tabela 5 apresenta as médias de deformação máxima de cada variação, juntamente com seus desvios padrão, IC e limites superiores e inferiores. A deformação máxima é uma propriedade mecânica que mede a capacidade do material de se alongar até que exista a sua ruptura, ou seja, ele corresponde a deformação do material no momento em que ele se rompe.

Tabela 5 – Média da deformação máxima, desvio padrão, IC 95% e limites superior e inferior dos valores calculados para as variações dos compósitos produzidos.

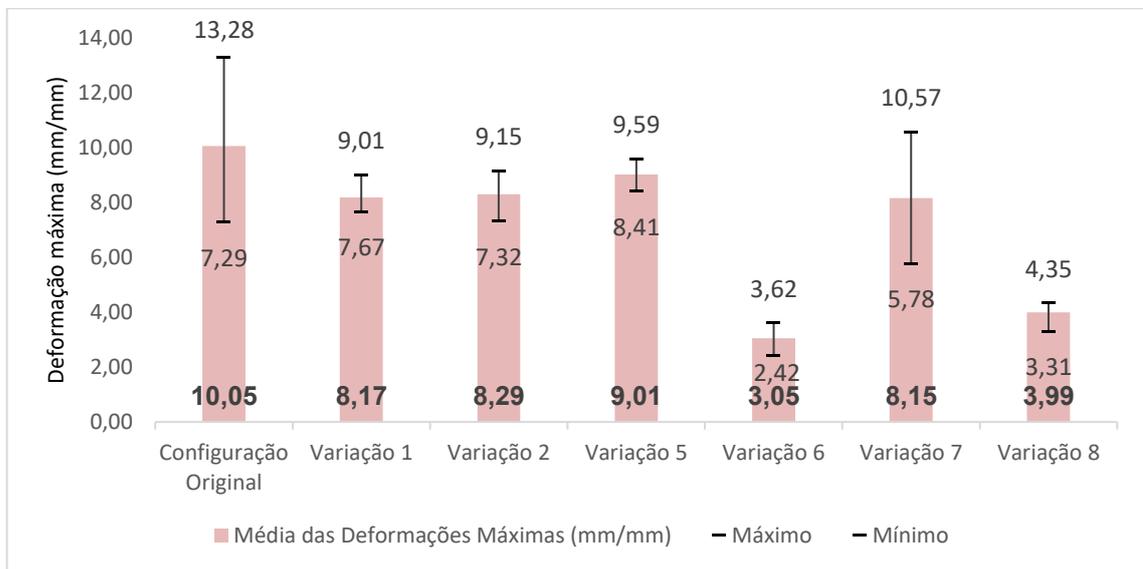
Variações	Deformação máxima (mm/mm)	Desvio Padrão (mm/mm)	Coefficiente <i>t Student</i>	IC 95% (mm/mm)	Limite Superior (mm/mm)	Limite Inferior (mm/mm)
CO	10,05	2,06	2,776	2,56	12,60	7,49
V1	8,17	0,48	2,776	0,59	8,77	7,58
V2	8,29	0,59	2,776	0,82	9,11	7,47
V5	9,01	0,39	2,776	0,48	9,50	8,53
V6	3,05	0,42	2,776	0,52	3,57	2,53
V7	8,15	1,53	2,776	1,90	10,05	6,25
V8	3,99	0,37	2,776	0,46	4,45	3,52

Fonte: Autor (2022).

Analisando os dados apresentados na Tabela 5 é observado que as variações CO, V1, V2, V5 e V7, que possuem tecidos na sua configuração, possuem valores de deformação máxima muito superiores aos das variações V6 e V8, que não possuem tecidos. Mesmo

comparando variações com apenas uma camada de diferença, por exemplo, V6 e V7, nota-se que existe um salto entre a que apresenta tecido (V7 com um valor de 8,15 mm/mm) em relação a que não apresenta (V6 com um valor de 3,05 mm/mm), evidenciando assim a influência dos tecidos sobre a deformação dos compósitos. Dessa forma, a variação com a maior deformação máxima foi CO, que possui quatro camadas de tecido, com um valor de 10,05 mm/mm e a que teve a menor deformação foi a V6, que não possui nenhuma camada de tecido, com um valor de 3,05 mm/mm. A Figura 17 traz um comparativo dos valores da deformação máxima das variações.

Figura 17 – Comparativo da deformação máxima das variações.



Fonte: Autor (2022).

Apesar de ser evidente a influência da fibra de vidro na forma de tecido, quando se comparam variações com a mesma quantidade de tecido, por exemplo, variações CO, V1, V2 e V5, não é possível observar um “padrão” de comportamento referente a quantidade de camadas de mantas. Todas essas variações possuem dois tecidos em sua configuração, mas, à medida que se adiciona ou se retira uma camada de manta, não é observado um padrão de comportamento nos valores da deformação.

Esta falta de padrão no comportamento dos compósitos ensaiados pode ser justificada pela interferência de bolhas presentes nos CPs, resultantes do processo de laminação manual realizada por um laminador sem experiência. Além disso, outro fator que pode ter influenciado foi a realização do ensaio mecânico de tração sem o uso do extensômetro, que não estava disponível no equipamento onde foi realizado o ensaio. O extensômetro é um

dispositivo capaz de medir a deformação mecânica em um corpo de prova com uma maior precisão, já que o valor de deformação mostrado pela máquina de ensaio de tração é simplesmente o deslocamento das garras, assim, existem possíveis erros que podem impactar na verdadeira deformação da amostra, como a deformação da máquina e o escorregamento do CP das garras do equipamento.

A Tabela 6 apresenta as médias do módulo de elasticidade de cada variação, juntamente com seus desvios padrão, IC e limites superiores e inferiores. O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que mede a rigidez de um material, ou seja, a resistência à deformação elástica, através da relação entre tensão e a deformação. Sendo assim, quanto maior for o módulo de elasticidade, mais rígido será o material e menor será a sua deformação elástica.

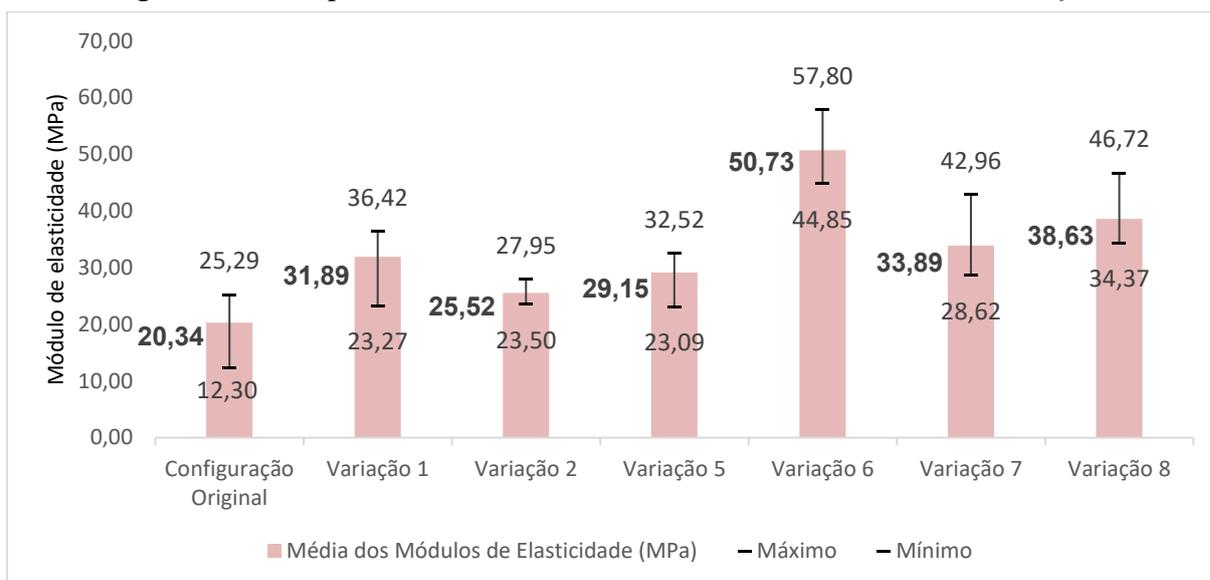
Tabela 6 – Média do módulo de elasticidade, Desvio Padrão, IC 95% e limites superior e inferior dos valores calculados para as variações dos compósitos produzidos.

Variações	Módulo de elasticidade (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente t student	IC 95% (MPa)	Limite Superior (MPa)	Limite Inferior (MPa)
CO	20,34	4,83	2,776	6,00	26,34	14,34
V1	31,89	4,57	2,776	5,68	37,57	26,22
V2	25,52	1,63	3,182	2,60	28,12	22,92
V5	29,15	3,21	2,776	3,98	33,13	25,16
V6	50,73	5,11	2,776	6,34	57,08	44,39
V7	33,89	6,06	2,776	7,52	41,41	26,37
V8	38,63	4,67	2,776	5,79	44,42	32,83

Fonte: Autor (2022).

Analisando os dados apresentados na Tabela 6 é observado que a variação V6, com valor de 50,73 MPa, possui um valor muito superior para o módulo de elasticidade seguido pela variação V8, com valor de 38,63 MPa, sendo que ambas não apresentam tecido em sua configuração. Dentre as demais variações, todas com camadas de tecido em sua configuração, nota-se que a variação V7, com um valor de 33,89 MPa, possui o maior módulo de elasticidade e a variação CO, com um valor de 20,34 MPa, possui o menor. A Figura 18 apresenta um comparativo dos valores do módulo de elasticidade das variações.

Figura 18 – Comparativo dos valores do módulo de elasticidade das variações.



Fonte: Autor (2022).

Sabendo que o módulo de elasticidade é calculado pela relação entre tensão e deformação, entende-se que os elevados valores de módulo de elasticidade para as variações V6 e V8 são resultado dos baixíssimos valores que estas variações apresentaram para a deformação. Analisando os dados das tabelas anteriores é possível notar que, apesar de as variações V6 e V8 apresentarem valores inferiores em relação às demais variações tanto para a tensão quanto para a deformação, observa-se que proporcionalmente a diferença em relação à deformação é muito maior. Isso faz com que os resultados do módulo de elasticidade observados sejam superiores em relação às demais variações.

Para as variações CO, V1, V2, V5 e V7, que possuem tecidos em sua configuração, não foi possível observar um padrão de comportamento do módulo de elasticidade em relação à quantidade de camadas que estas variações possuem.

As curvas tensão-deformação das amostras estão dispostas no Apêndice C, demonstrando o comportamento de cada CP no ensaio de tração.

4.3 ANÁLISE DAS VARIAÇÕES

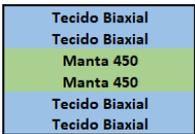
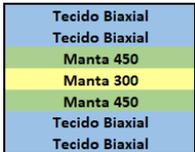
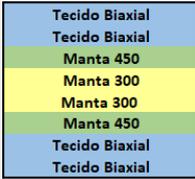
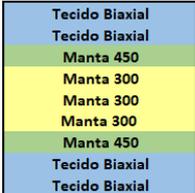
Neste trabalho foram obtidas as propriedades mecânicas de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade de materiais compósitos de fibra de vidro e resina epóxi para diferentes variações de configuração de camadas de tecidos e mantas de fibra de vidro. A partir desses resultados obtidos, tem-se como objetivo identificar qual das variações laminadas oferece o melhor conjunto de propriedades mecânicas. É possível

observar que as variações com tecido em sua configuração possuem valores superiores tanto em tensão quanto em deformação quando comparadas às configurações que possuem apenas mantas. Assim, pode-se concluir que as variações com tecido entregam melhores propriedades mecânicas aos seus materiais laminados.

A variação V7 apresenta bons valores de deformação máxima (8,15 mm/mm) e módulo de elasticidade (33,89 MPa), mas sua tensão máxima (157,55 MPa) é inferior ao das variações CO, V1, V2 e V5. Entende-se que esta diferença entre os valores da tensão máxima se dá devido à quantidade de tecidos na sua configuração, já que V7 apresenta apenas duas camadas de tecido enquanto as demais apresentam quatro camadas.

Sendo assim, destacam-se as variações CO, V1, V2 e V5. A Tabela 7 consolida os valores obtidos para as propriedades mecânicas e a configuração dessas variações.

Tabela 7 – Propriedades e Configuração variações CO, V1, V2 e V5

Laminado	Tensão Máxima (MPa)	Deformação máxima (mm/mm)	Módulo de elasticidade (MPa)	Configuração
Varição 5	197,81	9,01	29,15	
Configuração Original	184,03	10,04	20,34	
Varição 1	201,59	8,17	31,89	
Varição 2	204,20	8,29	25,52	

Fonte: Autor (2022).

Analisando a Tabela 7 é possível observar que os valores obtidos para as propriedades mecânicas de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade, dentre as variações analisadas nessa tabela, são muito próximos uns dos outros. A variação V2 se destaca por apresentar os maiores valores para tensão máxima. Entretanto, é possível observar que seus valores possuem uma pequena diferença em relação aos da variação V1, com uma diferença de 1,28% para a tensão máxima, 1,44% para deformação máxima e menor módulo de elasticidade. Quando se compara a variação V2 com a V5, a diferença é de 3,13% para a tensão máxima e menor módulo de elasticidade e deformação máxima. Já quando se compara as variações V1 e V5, a diferença é de 1,87% para a tensão máxima e 8,59% para o módulo de elasticidade, sendo que a deformação máxima da V5 é 9,33% maior que a da V1.

Deste modo, levando em consideração que a variação V5 possui duas camadas a menos que a V1 e três camadas a menos que a V2, sendo que os valores obtidos para as propriedades mecânicas são muito próximos, como detalhado no parágrafo anterior, entende-se que a melhor organização é a variação V5. A expectativa ao se utilizar mais camadas no laminado é que se obtenham melhores propriedades mecânicas, entretanto foi observado que o ganho nas propriedades mecânicas foi muito baixo quando comparada a variação V5 com a Configuração Original, V1 e V2. Assim, como é necessário um maior investimento de materiais e de trabalho para laminados para um maior número de camadas, entende-se que, dentre as variações analisadas, a variação V5 é a que apresenta a melhor configuração.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo para a caracterização das propriedades mecânicas de materiais compósitos de fibra de vidro e resina epóxi. Foi utilizada como base a configuração do costado de uma embarcação de um estaleiro da região, chamada de Configuração Original, e, a partir dela, foram desenvolvidas oito variações alterando a quantidade de camadas e a gramatura das mantas de fibra de vidro.

Segundo Marinucci (2011), a maior desvantagem das mantas está associada às baixas propriedades mecânicas e elásticas que o material possui em relação às fibras contínuas. Assim, analisando os dados obtidos pelas variações com tecido (CO, V1, V2, V5 e V7) em comparação com os obtidos para as variações somente com mantas (V6 e V8), é possível observar que tanto para a tensão quanto para a deformação as amostras com tecidos são superiores, atendendo o que era esperado.

Entretanto, para a comparação entre amostras com e sem tecidos, a ordem de grandeza dos resultados chamou a atenção. Pelo fato de o tecido de fibra de vidro ser formado por fibras contínuas era esperado que a sua resistência em relação à manta fosse mais elevada. Apesar de isto ter sido observado nos ensaios, e levando em consideração que existe uma diferença na quantidade de camadas entre as amostras, nota-se que essa diferença entre as tensões é relativamente pequena. Por outro lado, analisando as deformações é possível perceber que os resultados dos tecidos chegam a ser três vezes maiores que os das mantas.

Como reflexo desses resultados de uma tensão um pouco maior e de deformações muito mais elevadas, foi observado que o módulo de elasticidade para amostras que apresentam apenas mantas é superior as amostras que apresentam tecidos em sua configuração.

Além disso, também foi observada uma falta de padrão no comportamento das propriedades mecânicas para amostras com a mesma quantidade de tecidos. Por exemplo, para as amostras que apresentam quatro camadas de tecido em sua configuração (CO, V1, V2 e V5), à medida que se acrescentam ou se retiram camadas, os valores tanto de tensão quanto de deformação dessas amostras não seguem um padrão, como esperado.

Deste modo, vale destacar que as limitações deste trabalho consistiram nas dimensões das garras da máquina de ensaio de tração, que resultou no expurgo de duas das variações mais espessas planejadas para o estudo; nas bolhas geradas na laminação manual das camadas dos materiais produzidos, influenciando diretamente na resistência dos materiais; e na falta de

uso do extensômetro durante o ensaio de tração, influenciando na precisão dos resultados referentes a deformação dos CPs.

Dentre os resultados obtidos, destacam-se as variações que possuem quatro camadas de tecido em sua configuração (CO, V1, V2 e V5), sendo que estas variações apresentaram propriedades mecânicas muito próximas umas das outras. Dentre essas variações, a CO é a que apresenta os menores valores de tensão máxima (184,04 MPa) e módulo de elasticidade (20,34 MPa). Apesar de possuir o maior valor para a deformação máxima (10,05 mm/mm), entende-se que esta variação não apresenta propriedades tão boas quanto às demais.

Analisando a tensão máxima, observa-se que a variação V1 (201,60 MPa), V2 (204,21 MPa) e V5 (197,81 MPa) possuem valores muito próximos. Para a deformação máxima, a variação V5 (9,01 mm/mm) apresenta o maior valor, seguido pela variação V2 (8,29 mm/mm) e V1 (8,17 mm/mm). Já para o módulo de elasticidade, a variação V1 (31,89 MPa) apresenta o maior valor, seguido pela variação V5 (29,15 MPa) e V2 (25,52 MPa).

Assim, é possível observar que a variação V5 apresenta um valor 3,13% menor que o valor máximo para a tensão máxima, quando comparado às variações V1 e V2, apresentando o maior valor para a deformação máxima, e é 8,60% menor que o maior valor máximo do módulo de elasticidade encontrado. Portanto, é possível determinar que a variação V5 é a mais indicada dentre as variações analisadas. Levando em consideração que a variação V5 possui duas camadas a menos que a V1 e três camadas a menos que a V2, entende-se que investimento para produzir os laminados V1 e V2 seriam maiores e com um benefício mecânico minimamente superior. Deste modo, a variação V5 é a que possui destaque entre as variações analisadas.

Vale destacar que os resultados obtidos indicam uma baixa contribuição das mantas de vidro nas características mecânicas dos laminados com tecidos, desta forma, com a substituição das três camadas de manta da Configuração Original por um tecido de vidro o laminado original provavelmente apresentaria uma redução no peso total, no custo e melhoraria suas propriedades mecânicas.

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se:

- ✓ Comparar as propriedades mecânicas obtidas pela laminação manual com outros tipos de laminação;
- ✓ Realizar outros tipos de ensaio mecânico nos materiais para comparar o resultado com o ensaio de tração;

- ✓ Produzir corpos de prova com outros tipos de reforço ao laminado e comparar os resultados;
- ✓ Produzir as amostras com outros tipos de gramatura de mantas e tecidos e com outro tipo de resina.

REFERÊNCIAS

ADVANCED VACCUM. **Produtos para laminação manual: Tecidos**. Disponível em: <<https://www.advancedvacuum.com.br/tecido/fibra-de-vidro>>. Acesso em: 18 de jun. de 2022.

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**. [s.l.:s.d.], 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3039: 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: 28 de mai. de 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3878 – 20B: Standard Terminology for Composite Materials**. West Conshohocken: ASTM International, 2020. 7 p. Disponível em: <<https://compass.astm.org/download/D3878.37012.pdf>>. Acesso em: 19 de abr. de 2022.

CALLISTER JÚNIOR. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

ESCARPINI FILHO, R. S. **Análise de estruturas de materiais compósitos viscoelásticos lineares através da teoria de volumes finitos**. 2010. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

GARCIA, R.; WEISSHAAR, T.A.; MCWITHEY, R.R.. **Experimental Mechanics**. 1980.

GREENE, E.. **Marine Composites**. 2 ed. Annapolis: Eric Greene Associates, 1999.

GROSS, T. M.. **Panorama e perspectiva da indústria brasileira de compósitos**. 2010. 42p.. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

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.

LAMB, T. et al. **Ship design and construction**. [S.l.]: Society of Naval Architects and Marine Engineers Jersey City, 2004. v. 4.

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. **Manual de construção de barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2011.

NASSEH, J. **Guia do Construtor: Selecionando Fibras de Vidro**. ACOBAR. Disponível em: <http://www.acobar.org.br/guia-do-construtor-pdfs/guia_do_construtor%20fibra%20de%20vidro.pdf>. Acesso em: 18 de jun. de 2022.

PETRIE, E. M.. **Epoxy Adhesive Formulations**. McGraw-Hill Companies, 2006.

RAJI, M. et al. **Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites**. 2019.

RUBINO, F. et al. **Marine application of fiber reinforced composites: A review**. Journal of Marine Science and Engineering. Jan. de 2020.

APÊNDICE A – MEDIDAS DAS AMOSTRAS

Tabela 8 – Valores das espessuras dos CPs

Variações	Amostras	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)
CONFIGURAÇÃO ORIGINAL	CP1 - CO	7,30	7,34	7,25	7,30
	CP2 - CO	7,41	7,33	7,30	7,35
	CP3 - CO	7,28	7,38	7,41	7,36
	CP4 - CO	7,26	7,35	7,33	7,31
	CP5 - CO	7,33	7,29	7,25	7,29
VARIAÇÃO 1	CP1 - V1	6,07	6,10	6,00	6,06
	CP2 - V1	5,91	5,99	6,09	6,00
	CP3 - V1	6,31	6,22	6,23	6,25
	CP4 - V1	5,94	5,98	5,87	5,93
	CP5 - V1	6,17	6,15	6,10	6,14
VARIAÇÃO 2	CP1 - V2	7,30	7,32	7,24	7,29
	CP2 - V2	7,43	7,37	7,29	7,36
	CP3 - V2	7,20	7,26	7,28	7,25
	CP4 - V2	7,18	7,23	7,13	7,18
	CP5 - V2	7,18	7,28	7,39	7,28
VARIAÇÃO 5	CP1 - V5	5,43	5,53	5,52	5,49
	CP2 - V5	5,31	5,42	5,51	5,41
	CP3 - V5	5,73	5,61	5,51	5,62
	CP4 - V5	5,35	5,45	5,43	5,41
	CP5 - V5	5,54	5,50	5,39	5,48
VARIAÇÃO 6	CP1 - V6	2,42	2,49	2,38	2,43
	CP2 - V6	2,50	2,58	2,49	2,52
	CP3 - V6	2,50	2,44	2,50	2,48
	CP4 - V6	2,36	2,42	2,52	2,43
	CP5 - V6	2,38	2,40	2,36	2,38
VARIAÇÃO 7	CP1 - V7	4,47	4,54	4,43	4,48
	CP2 - V7	4,50	4,46	4,36	4,44
	CP3 - V7	4,43	4,52	4,55	4,50
	CP4 - V7	4,50	4,58	4,48	4,52
	CP5 - V7	4,63	4,59	4,48	4,57
VARIAÇÃO 8	CP1 - V8	3,53	3,58	3,50	3,54
	CP2 - V8	3,46	3,50	3,49	3,48
	CP3 - V8	3,75	3,67	3,66	3,69
	CP4 - V8	3,42	3,50	3,58	3,50
	CP5 - V8	3,59	3,47	3,37	3,48

Fonte: Autor (2022).

Tabela 9 – Valores das larguras dos CPs.

Variações	Amostras	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)
CONFIGURAÇÃO ORIGINAL	CP1 - CO	15,07	15,07	14,92	15,02
	CP2 - CO	15,04	15,07	15,02	15,04
	CP3 - CO	14,91	14,92	15,09	14,97
	CP4 - CO	15,01	15,06	14,98	15,02
	CP5 - CO	14,92	15,02	15,05	15,00
VARIAÇÃO 1	CP1 - V1	15,01	15,05	15,02	15,03
	CP2 - V1	14,96	15,06	15,05	15,02
	CP3 - V1	15,04	15,04	15,03	15,04
	CP4 - V1	15,01	15,08	14,99	15,03
	CP5 - V1	15,05	15,08	15,01	15,05
VARIAÇÃO 2	CP1 - V2	15,04	15,07	15,01	15,04
	CP2 - V2	15,10	15,06	14,93	15,03
	CP3 - V2	14,94	15,07	15,05	15,02
	CP4 - V2	15,08	14,95	15,10	15,04
	CP5 - V2	15,04	15,05	15,05	15,05
VARIAÇÃO 5	CP1 - V5	15,06	15,07	14,90	15,01
	CP2 - V5	15,05	15,08	15,09	15,07
	CP3 - V5	14,98	15,04	15,01	15,01
	CP4 - V5	15,07	15,09	15,02	15,06
	CP5 - V5	14,97	15,10	15,10	15,06
VARIAÇÃO 6	CP1 - V6	15,03	15,05	14,90	14,99
	CP2 - V6	14,92	15,01	15,04	14,99
	CP3 - V6	15,03	15,08	15,09	15,07
	CP4 - V6	15,01	14,98	15,05	15,01
	CP5 - V6	15,09	15,07	15,06	15,07
VARIAÇÃO 7	CP1 - V7	14,97	15,07	15,03	15,02
	CP2 - V7	15,02	15,06	15,09	15,06
	CP3 - V7	15,09	15,02	15,04	15,05
	CP4 - V7	14,97	15,04	15,05	15,02
	CP5 - V7	15,10	14,90	15,09	15,03
VARIAÇÃO 8	CP1 - V8	15,06	15,07	15,02	15,05
	CP2 - V8	15,03	15,05	14,93	15,00
	CP3 - V8	15,05	15,09	15,09	15,08
	CP4 - V8	14,99	15,02	15,06	15,02
	CP5 - V8	15,01	15,04	15,06	15,04

Fonte: Autor (2022).

APÊNDICE B – PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AMOSTRAS

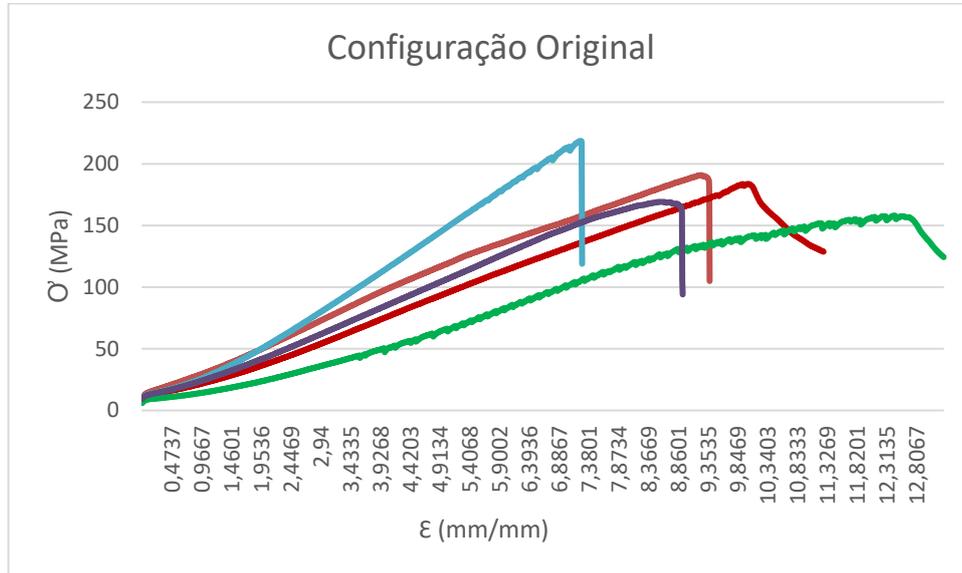
Tabela 10 – Propriedades Mecânicas.

Variações	Força Máxima (kN)	Deformação máxima (mm/mm)	Área da Secção Transversal (mm²)	Tensão máxima (Mpa)	Módulo de elasticidade (MPa)
CONFIGURAÇÃO ORIGINAL	20,90	9,41	109,60	190,70	20,27
	20,30	11,29	110,52	183,68	16,27
	17,40	13,28	110,15	157,96	11,89
	24,01	7,29	109,82	218,63	29,99
	18,50	8,96	109,33	169,22	18,89
VARIAÇÃO 1	16,09	8,35	91,01	176,75	21,17
	16,64	8,04	90,09	184,65	22,98
	18,61	7,81	94,03	197,88	25,34
	16,86	7,67	89,11	189,24	24,68
	23,97	9,01	92,39	259,46	28,80
VARIAÇÃO 2	22,01	7,32	109,59	200,84	27,44
	20,10	8,29	110,67	181,62	21,91
	21,15	8,75	108,84	194,31	22,21
	25,93	13,80	108,01	240,07	17,40
VARIAÇÃO 5	15,64	9,05	82,45	189,68	20,96
	18,73	8,84	81,60	229,54	25,97
	17,67	9,59	84,31	209,59	21,86
	13,65	8,41	81,47	167,54	19,92
	15,89	9,18	82,46	192,70	20,99
VARIAÇÃO 6	4,66	3,37	36,38	128,08	38,01
	4,60	2,42	37,82	121,61	50,25
	5,01	3,62	37,37	134,08	37,04
	4,91	3,01	36,53	134,40	44,65
	4,40	2,84	35,87	122,65	43,19
VARIAÇÃO 7	11,50	8,17	67,30	170,87	20,91
	10,73	5,78	66,85	160,50	27,77
	10,80	7,79	67,73	159,47	20,47
	10,76	10,57	67,89	158,49	14,99
	9,50	8,43	68,64	138,41	16,42
VARIAÇÃO 8	5,68	4,17	53,23	106,71	25,59
	6,08	4,23	52,26	116,34	27,50
	5,91	3,31	55,68	106,14	32,07
	5,80	3,87	52,58	110,30	28,50
	6,04	4,35	52,28	115,54	26,56

Fonte: Autor (2022).

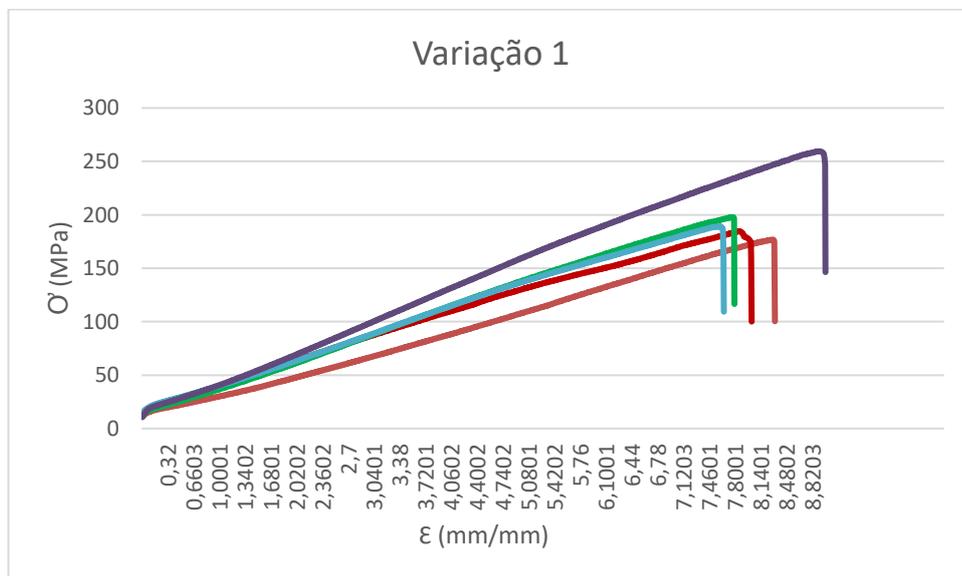
APÊNDICE C – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Figura 19 – Curvas tensão-deformação para a Configuração Original (CO)



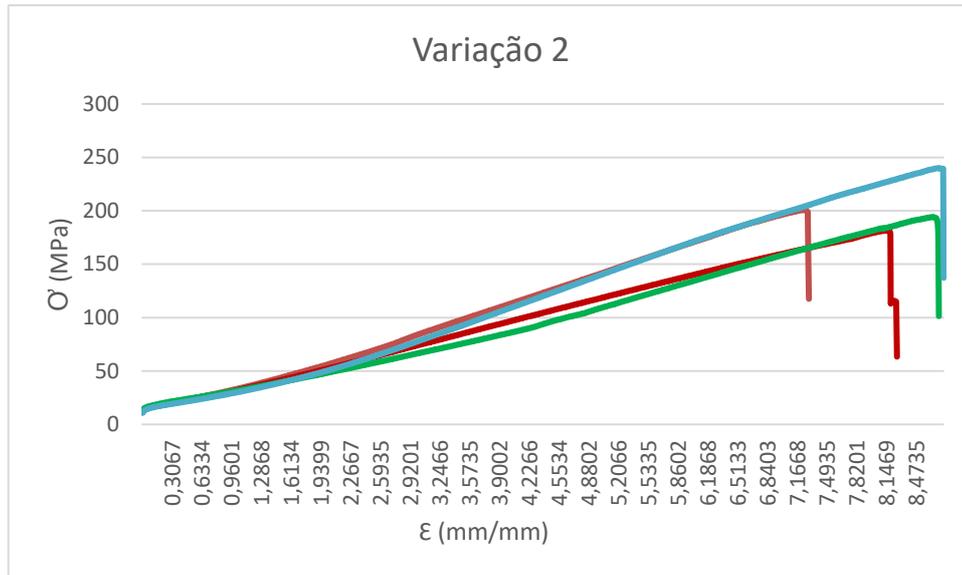
Fonte: Autor (2022).

Figura 20 – Curvas tensão-deformação para a variação (V1)



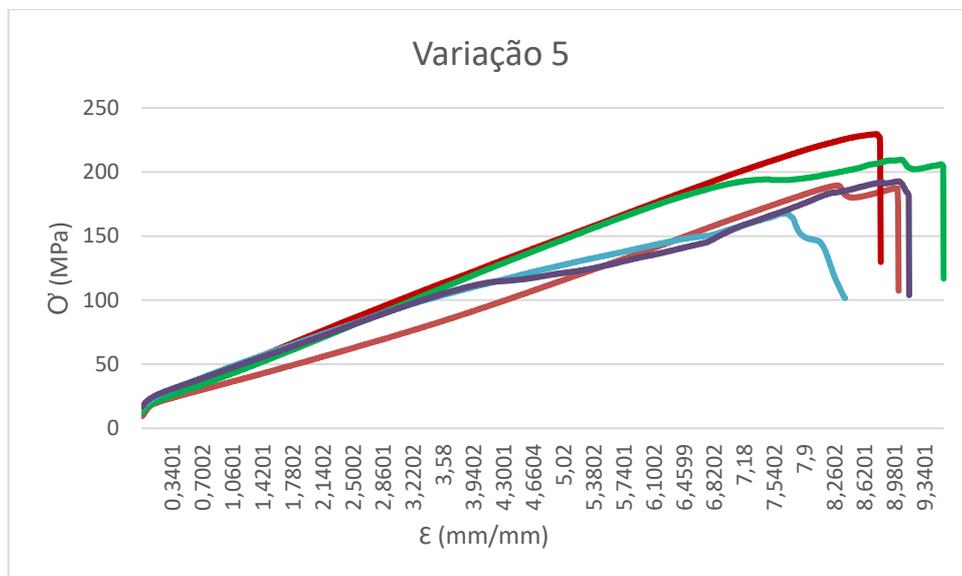
Fonte: Autor (2022).

Figura 21 – Curvas tensão-deformação para a variação 2 (V2)



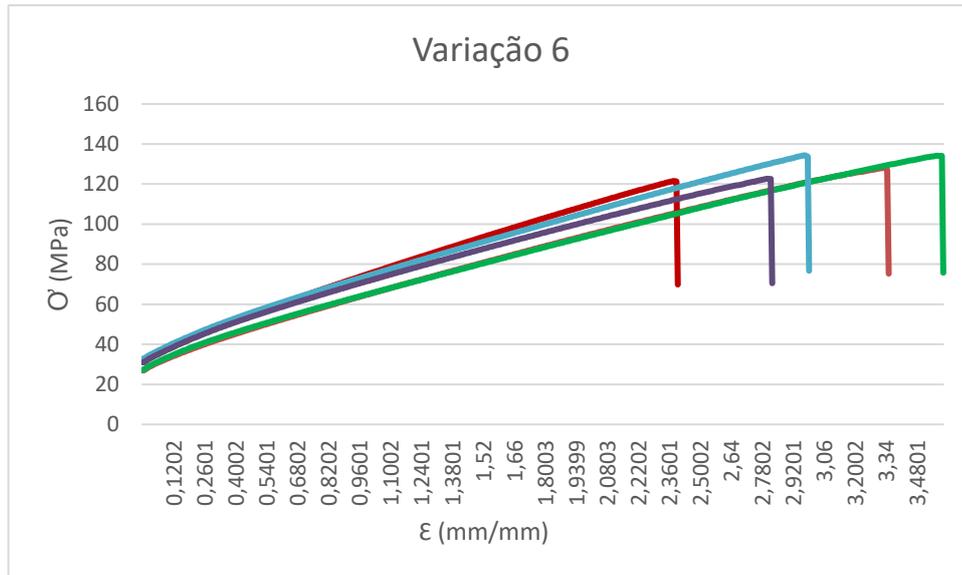
Fonte: Autor (2022).

Figura 22 – Curvas tensão-deformação para a variação 5 (V5)



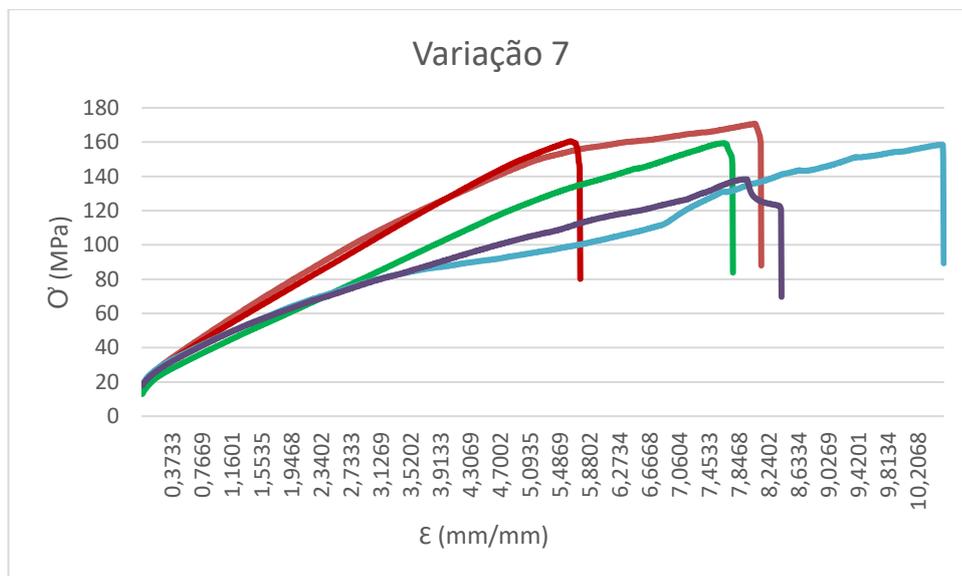
Fonte: Autor (2022).

Figura 23 – Curvas tensão-deformação para a variação 6 (V6)



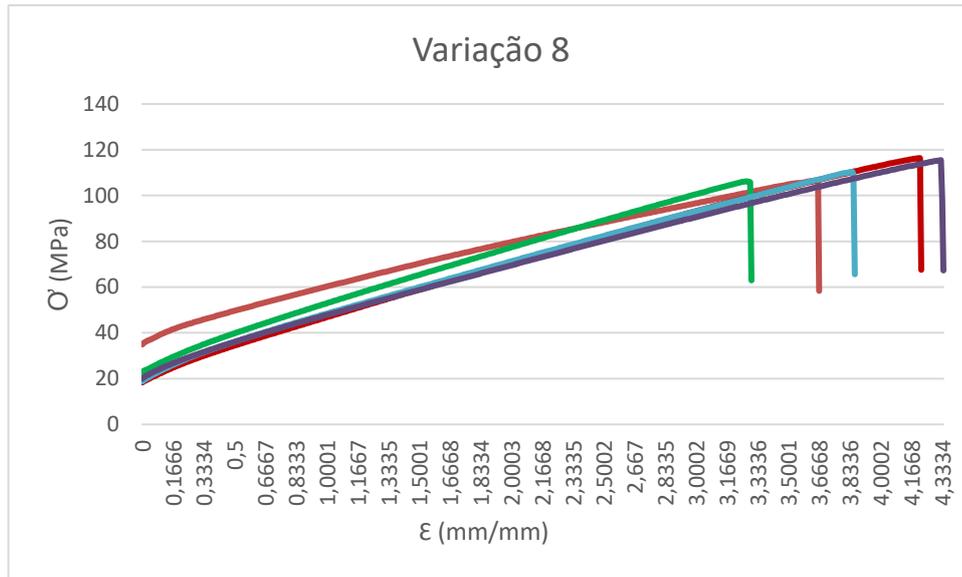
Fonte: Autor (2022).

Figura 24 – Curvas tensão-deformação para a variação 7 (V7)



Fonte: Autor (2022).

Figura 25 – Curvas tensão-deformação para a variação 8 (V8)



Fonte: Autor (2022).