

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

GIOVANA BOLONHEZI OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA
NÁUTICA

Joinville

2018

GIOVANA BOLONHEZI OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA
NÁUTICA

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

Orientador: Dr. Gabriel Benedet Dutra

Joinville

2018

GIOVANA BOLONHEZI OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA
NÁUTICA

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.

Banca Examinadora:

Gabriel Benedet Dutra

Dr.
Orientador
Presidente

Viviane Lilian Soethe

Dra.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Thiago Antonio Fiorentin

Dr.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

João Marcos Warmling Dudy

Eng.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, Vitor e Elaine, e a meu irmão, Vitor, que sempre me mostraram os verdadeiros valores da vida e do comprometimento para com o trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por toda força e coragem que me concebeu para a execução deste trabalho. Sou grata também aos meus pais, Vitor Edson Correa de Oliveira e Elaine Maria Bolonhezi de Oliveira, pela paciência, apoio e amor, fazendo com que eu me fortalecesse como pessoa dia após dia.

Agradeço ao meu irmão, Vitor Bolonhesi Oliveira, pelas palavras de encorajamento, suporte e carinho durante a execução deste trabalho.

A meu namorado, Diego Montautti, que se fez presente, me incentivando e apoiando com bastante zelo. Assim como minhas amigas, com palavras de carinho, sempre me confortando em momentos que geraram aflição.

Ao meu orientador, Gabriel Benedet Dutra, que se fez solícito do início ao fim deste trabalho, sempre muito cuidadoso e dedicado, fazendo o que este trabalho se concretizasse de forma agradável.

A Luiz Felipe Kamienski, estagiário do Laboratório de Modelos e Construção Naval, que me ajudou na confecção das amostras, sempre dedicado e realizando as tarefas de maneira correta.

Ao Professor Thiago Antonio Fiorentin, membro da banca, que me auxiliou nos ensaios de vibração, ao Engenheiro João Marcos Warmling Dudy, também membro da banca que me ajudou na realização dos testes de tração e flexão e ao Professor Vitor Takashi Endo, que me auxiliou nas análises de elementos finitos, pois todos se mostraram solícitos quando os contatei e compartilharam muito conhecimento comigo, sendo sua ajuda fundamental para a elaboração deste trabalho.

A Professora Vanessa Aparecida Alves de Lima, que me ajudou na formatação do trabalho, e a Viviane Lilian Soethe, membra da banca, com palavras de apoio e se mostrando sempre disposta a qualquer tipo de ajuda que eu precisasse.

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo.” Nelson Mandela.

RESUMO

Quando em atividade, materiais compósitos utilizados na indústria náutica são submetidos a cargas ou forças aplicadas, por exemplo, peças de embarcações de recreio como cascos, lemes, mastros, decks, plataformas, entre outros. Diante dessas situações, faz-se necessário o conhecimento das características do material de interesse, de modo a prevenir falhas e níveis de deformação inaceitáveis. Através de experimentos em laboratório, baseados em normas da ASTM, respostas do comportamento mecânico de materiais são obtidas. Em virtude de possíveis imprecisões nos resultados de testes de tração em compósitos, por consequência do pré tensionamento das fibras contínuas, o presente trabalho teve como objetivo analisar e comparar resultados das propriedades mecânicas provenientes do ensaio de tração, estabelecido pela norma ASTM D 3039, e do ensaio de flexão, baseado na norma ASTM D 6272-17, em amostras produzidas em compósitos de fibra de vidro na forma de manta e de tecido em matriz de poliéster, que definem reforços correntemente empregados no setor de construção náutica. Também, foram testadas em tração, com e sem uso de abas, espécimes com reforço em tecido, pois a utilização de abas pode influenciar nas respostas obtidas, gerando resultados possivelmente mais precisos. Ensaio de vibração foram efetuados em todas as amostras, baseado na norma ASTM E 1876-01, com o intuito de obter resultados de propriedades mecânicas para posterior comparação com os outros métodos de teste. Uma análise micromecânica foi feita em ambos os laminados, para obter propriedades mecânicas e, da mesma forma, comparar seus resultados com os experimentos práticos. Corpos de prova de compósitos, fibra de vidro, na configuração de tecido e de manta, em matriz de poliéster, foram fabricados por intermédio do processo de laminação manual; posteriormente foram executados em laboratório os testes de vibração, tração e de flexão. Os cálculos da micromecânica foram feitos manualmente e baseados na Lei das Misturas. Dessa forma, elaborou-se cálculos estatísticos para análise e comparação das respostas de todos os testes e da micromecânica. Os CPs submetidos ao ensaio de flexão não chegaram a romper, portanto só foi possível obter respostas de módulo de elasticidade, assim como no ensaio de vibração, o que já era previsto. Dessa forma, os três testes práticos resultaram em módulos de elasticidade muito próximos, já as respostas da micromecânica se diferenciaram dos demais pelo possível fato do parâmetro de entrada ter sido diferente do real. Através do ensaio de tração e da micromecânica alcançaram-se valores das tensões de ruptura e, quando comparados, apresentaram grande semelhança. O uso de abas nos testes de tração não apresentou diferenças significativas dos testados sem uso, não sendo possível comprovar por esse método a imprecisão dos resultados nos testes de tração. Em todos os experimentos, assim como nos cálculos da micromecânica, as amostras com reforço em manta exibiram menores resultados das em tecido, como já era esperado, pois a manta não é um reforço resistente por apresentar fios descontínuos. Após a realização dos ensaios de tração, tanto os espécimes de tecido quanto os de manta, romperam em regiões muito próximas às garras da máquina, podendo gerar imprecisões nos resultados alcançados. Portanto, foi elaborada uma análise em elementos finitos do modo de falha em tração de uma peça modelada com geometrias de acordo com a norma ASTM D 3039, para caracterizar e justificar o modo de falha em tração, onde foi analisado que um espécime com maiores áreas nas extremidades evitaria concentração de tensão nessa região, fazendo com que ele se rompa em uma área mais próxima ao centro e consequentemente gerando respostas mais precisas.

Palavras-chave: Fibra de vidro. Resina de poliéster. Ensaio mecânicos. Tensão de ruptura. Módulo de elasticidade.

ABSTRACT

When in activity, composite materials used in the naval industry are exposed to force or applied force, such as recreational crafts, for instance, rudders, masts, decks, platforms, among others. These situations make it necessary to know the characteristics of the interested material, in order to prevent flaws and unacceptable deformation levels. Through lab experiments, based on ASTM regulations, answers of the mechanical behavior are obtained. Because of possible inaccuracy in the results of tensile testing in composites, a consequence of continuous fiber preload, the following study aims to analyse and compare results of the mechanical properties provenient from the traction trial, established by the ASTM rule D 3039, and the bending test, ruled by ASTM norm D 6272-17, in samples produced in glass fiber composites, in the format of mat and polyester resin, which define reinforcement employed in the sector of naval construction. Also, specimens with fabric reinforcement have been tested under traction, with and without tabs. Whereas, the use of tabs may influence the answers obtained, resulting in possibly more precise results. Vibration tests have been conducted in each sample, based on the ASTM E 1876-01 norm, aiming to attain mechanical property results for further comparison with the other testing methods. A micromechanics analysis has been conducted in both laminates, with the purpose of getting mechanical properties, and, in the same way, compare the result with practical experiment. Composite specimen and glass fiber have been fabricated in woven mat configuration through the process of hand lay up. Subsequently, vibration, traction and bending tests have been executed in laboratory. The micromechanics calculations have been done manually based on the Rule of Mixtures. Therefore, statistical calculations have been elaborated for analysis and comparison of the answers of all micromechanics tests. Specimen submitted to bending test haven't breached, thus it's only been possible to obtain answers in the elasticity module, as well as the vibration test, wich had been predicted. Hence, all three practical tests have resulted in close elasticity modules. However, micromechanics results have distinguished from the others possibly because of the input parameter being different from the real one. Through traction trial and micromechanics, the value of maximum stress has been reached, and when compared, represent great similarity. Using tabs in the traction trials didn't present any significant results, therefore not being possible to prove the inaccuracy from the results in the traction trials. In all experiments, as well as the micromechanics calculatuions, the samples with reinforced mat showed smaller results than the woven ones. After the completion of the traction trials, both specimens in woven and mat breached next to the machine grabs, which could result in inaccuracies in the answers. Consequently, an analysis in finite elements of the failure mode in traction has been elaborated in a piece modeled with geometries according to the ASTM regulation D 3039, in order to characterize and justify the failure mode in traction, in which has been analysed that a specimen with bigger areas in the extremities would avoid the stress concentration in this region, making it breach in an area that is closer to the center, and, consequently, generating more precise answers.

Keywords: Glass fiber. Polyester resin. Mechanical tests. Maximum stress. Elasticity module.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparações entre materiais convencionais (aço e alumínio) e materiais <i>compósitos</i>	20
Figura 2 - Esquema de classificação dos três principais grupos de materiais <i>compósitos</i>	20
Figura 3- Representação esquematizada de uma máquina utilizada em ensaios de tração.	24
Figura 4 Esquema de carregamento em flexão, em barras retangulares, em três (a) e quatro pontos (b), com comportamento em deflexão da linha central de ambos os casos (c).....	27
Figura 5 – Passos do processo de laminação manual.	35
Figura 6 – Representação das dimensões dos CPs através do software Abaqus.	36
Figura 7 - Disposição dos instrumentos empregados no ensaio de vibração.	37
Figura 8- Posição dos equipamentos utilizados no ensaio de vibração de acordo com a norma.	38
Figura 9- Ensaio de vibração no momento do impacto com o martelo em amostras de material compósito.	39
Figura 10 - Distância do aplicador de carga e dos suportes.	40
Figura 11 - Testes de flexão antes (a) e durante (b) a aplicação de carga nos CPs.	41
Figura 12 - Ensaio de tração num CP com a presença do extensômetro.	42
Figura 13 - Superfície dos laminados de (a) tecido/poliéster e (b) manta/poliéster após o desmolde.	47
Figura 14 – CPs já submetidos ao corte a jato d’água e etiquetados.	47
Figura 15 – CPs de tecido/poliéster após o ensaio de tração com e sem uso de abas.	48
Figura 16 – Amostras de manta/poliéster posteriormente ao ensaio de tração.	49
Figura 17 – Comparação entre resultados de deformação máxima de CPs de manta e tecido com e sem uso de abas.	51
Figura 18 – Peça modelada no Abaqus para análise do modo de falha em tração.	52
Figura 19 – CPs posteriormente aos ensaios de flexão.	54
Figura 20 - Resultados dos <i>módulos de elasticidade</i> provenientes dos ensaios mecânicos e da micromecânica para as amostras fabricadas de manta/poliéster.	57
Figura 21 - Resultados dos <i>módulos de elasticidade</i> provenientes dos ensaios mecânicos e da micromecânica para as amostras fabricadas de tecido/poliéster.	57
Figura 22 - Resultados dos <i>módulos de elasticidade</i> provenientes dos ensaios mecânicos e da micromecânica para as amostras fabricadas de tecido/poliéster e manta/poliéster.	58

Figura 23 – Resultados de <i>tensão máxima</i> provenientes dos testes de tração e da micromecânica para amostras de manta/poliéster e tecido/poliéster.....	59
Figura 24 – Gráfico <i>tensão-deformação</i> de CPs, com reforço em manta, submetidos a ensaio de tração.....	72
Figura 25 – Gráfico <i>tensão-deformação</i> de CPs com reforço em tecido submetidos a ensaio de tração <i>sem uso de abas</i>	72
Figura 26 – Gráfico <i>tensão-deformação</i> de CPs com reforço em tecido submetidos a ensaio de tração <i>com uso de abas</i>	73
Figura 27 – Gráfico <i>tensão-deformação</i> de CPs com reforço em <i>manta</i> submetidos a ensaio de flexão.	74
Figura 28 – Gráfico <i>tensão-deformação</i> de CPs com reforço em tecido submetidos a ensaio de flexão.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Legenda das <i>etiquetas</i> dos CPs.....	37
------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da distribuição t de student para os módulos de elasticidade obtidos do ensaio de tração.	50
Tabela 2 - Resultados da distribuição t de student para tensões máximas obtidas do ensaio de tração.	50
Tabela 3 - Resultados da distribuição t de student para deformações máximas obtidas do ensaio de tração.	51
Tabela 4 - Resultados da distribuição t de student para os módulos de elasticidade obtidos do ensaio de flexão.	54
Tabela 5 - Resultados da distribuição t de student para os módulos de elasticidade obtidos do ensaio de vibração.	55
Tabela 6 - Resultados da análise micromecânica para a placa laminada com reforço de manta e para a de tecido.	56
Tabela 7 – Valores das espessuras de cada amostra.	69
Tabela 8 – Valores obtidos da medição das larguras dos espécimes.	70
Tabela 9 – Área da seção transversal e massa de cada CP.	71
Tabela 10 – Resultados das variáveis para obtenção do E nos ensaios de vibração.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

b – Largura da amostra

CP – Corpo de prova

CPs – Corpos de prova

E – Módulo de Elasticidade

E_f – Módulo de elasticidade para a fibra

E_r – Módulo de elasticidade para a resina

E_m – Módulo de elasticidade para o laminado de manta/poliéster

E_t – Módulo de elasticidade para o laminado de tecido/poliéster

EPI – Equipamento de segurança individual

IC – Índice de confiança

ISO – International Organization for Standardization

L – Comprimento da amostra

NS – Nível de significância

PRFV – Plásticos reforçados com fibra de vidro

T1 – Fator de correção para o modo de flexão

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Deformação
$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação máxima
ρ_f	Densidade da fibra de vidro do tipo E
ρ_r	Densidade da resina de poliéster
λ	Fator de adesão entre as fibras e a matriz
β	Fator de eficiência do alinhamento das fibras
M_f	Fração mássica de fibra
M_r	Fração mássica de resina
f_f	Frequência de ressonância em flexão
σ	Tensão
σ_f	Tensão de ruptura da fibra de vidro do tipo E
σ_m	Tensão de ruptura da manta
σ_t	Tensão de ruptura do tecido
σ_r	Tensão de ruptura para resina de poliéster
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima
V_f	Volume específico de fibra
V_r	Volume específico de resina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	19
2.1.1 Laminados estruturais	21
2.2 ENSAIOS MECÂNICOS.....	22
2.2.1 Ensaio de Tração	23
<u>2.2.1.1 Norma de ensaio de tração para compósitos</u>	<u>24</u>
<i>2.2.1.1.1 Trabalhos reportados na literatura</i>	25
2.2.2 Ensaio de flexão	26
<u>2.2.2.1 Norma de ensaio de flexão para compósitos</u>	<u>27</u>
<i>2.2.2.1.1 Trabalhos reportados na literatura</i>	28
2.2.3 Ensaio de Vibração	29
<u>2.2.3.1 Norma de ensaio de vibração</u>	<u>30</u>
<i>2.2.3.1.1 Trabalhos reportados na literatura</i>	30
2.3 MICROMECAÂNICA.....	31
2.4 ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 FABRICAÇÃO DOS CPS	33
3.1.1 Materiais utilizados	33
3.1.2 Laminação manual	34
3.2 ENSAIO DE VIBRAÇÃO	37
3.2.1 Materiais empregados	37
3.2.2 Método da viga livre-livre	38
3.3 ENSAIO DE FLEXÃO	40
3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	42
3.5 MICROMECAÂNICA.....	43
3.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 FABRICAÇÃO DOS CPS	46

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	48
4.3 ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS	52
4.4 ENSAIO DE FLEXÃO	53
4.5 ENSAIO DE VIBRAÇÃO	54
4.6 MICROMECAÂNICA.....	55
4.7 COMPARAÇÕES DE PROPRIEDADES MECÂNICAS	56
4.7.1 Módulo de Elasticidade	56
4.7.2 Tensão máxima	59
4.8 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	60
4.8.1 Confeção dos CPs.....	60
4.8.2 Ensaios mecânicos	60
5 CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A – MEDIDAS DOS CPS.....	69
APÊNDICE B – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO	72
APÊNDICE C – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO ENSAIO DE FLEXÃO	74
APÊNDICE D – RESULTADOS ENSAIOS DE VIBRAÇÃO	75

1 INTRODUÇÃO

Reduções de custos aliadas à melhoria de propriedades mecânicas são incentivos para muitas empresas potencializarem os processos de fabricação de novos produtos. Na indústria em geral, esses fatores fizeram com que a utilização de materiais compósitos se tornasse um diferencial competitivo (GALVÃO, 2012).

Em 2016, a produção global de compósitos foi de nove milhões de toneladas, a Europa dispôs de, aproximadamente, um terço dessa produção; esses dados estão muito abaixo quando comparados à produção global de outros materiais de construção, porém é mais do que esperado para um material potencial do futuro cuja inovação ainda está por vir (MATHES, 2018).

Dentre as mais importantes indústrias que fazem uso de materiais compósitos, está a náutica, em virtude de diversas vantagens que esses materiais têm quando comparados a outros, como a variedade de estruturas que pode ser conseguida combinando materiais básicos, alta resistência à corrosão e à abrasão, leveza, facilidade de uso e de reparação e baixo custo de fabricação (NASSEH, 2007).

Desde a década de sessenta, compósitos são considerados materiais de engenharia comuns; o crescimento de seu uso deu-se em razão de uma grande conscientização em relação ao desempenho do produto e aumento da ocorrência no mercado global para componentes leves. Eles têm o potencial de substituir o aço e o alumínio, garantindo economia de 20 a 80% em peso de elementos (MAZUMDAR, 2002). Os compósitos constituem uma classe importante e bastante ampla de materiais, pois é possível adaptar suas estruturas facilmente às condições de serviço requisitadas (HULL; CLYNE, 1996).

Segundo Callister (2008), é de extrema importância compreender como são medidas propriedades mecânicas desses materiais e o que representam, por consequência das aplicações que são sujeitos, de modo a evitar falhas ou níveis inadequados de deformação. O autor ainda afirma que o comportamento mecânico de um material reflete a relação entre sua resposta ou deformação a uma força aplicada, e podem ser estimados por meio de experimentos realizados em laboratório, retratando precisamente as condições de trabalho.

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos utilizados na indústria náutica são tipicamente caracterizadas por aplicações de testes padronizados pela American Society for Testing and Materials (ASTM) (GREENE, 1999).

Neste trabalho são destacados os ensaios quase estáticos, fundamentados nas normas ASTM D 3039, que caracteriza o ensaio de tração; ASTM D 6272-17, que determina o ensaio de flexão; ensaio dinâmico, e não destrutivo, de vibração, estabelecido pela norma ASTM E 1876-01. Além disso, foram efetuados cálculos manuais da micromecânica, baseados na Lei das Misturas modificada para compósitos.

Entretanto, por consequência da possível imprecisão dos resultados de ensaio de tração devido ao pré tensionamento das fibras contínuas, o presente trabalho faz um estudo comparativo entre as respostas obtidas dos ensaios de tração, flexão, vibração e dos cálculos da micromecânica, em corpos de prova (CPs) fabricados por compósito fibra de vidro/poliéster, com fibras curtas e descontínuas na forma de manta, e fibras contínuas na forma de tecido, os quais caracterizam reforços usualmente aplicados no setor de construção náutico.

Deste modo, foram produzidas amostras de material compósito fibra de vidro curta/poliéster e fibra de vidro contínua/poliéster, em seguida se realizou os testes práticos em laboratório e os cálculos baseados na Lei das Misturas que presume as propriedades mecânicas de materiais compósitos.

Assim, se comparou as respostas observadas em cada ensaio por meio de cálculos estatísticos, de acordo com a distribuição t de student. Ainda, se efetuou uma análise do modo de falha em tração pelo método de elementos finitos, para explicar e justificar o porquê das amostras submetidas ao ensaio de tração terem rompido na região analisada.

1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática da possível imprecisão dos resultados de ensaio de tração em fibras contínuas, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Análise das respostas provenientes do ensaio de tração e de flexão, nas amostras produzidas em compósitos de fibra de vidro na forma de manta e de tecido em matriz de

poliéster, de modo a estabelecer se há imprecisão, ou não, nas respostas do teste de tração devido ao pré tensionamento das fibras contínuas nas garras da máquina do teste de tração.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar o comportamento mecânico de amostras de compósitos reforçados com manta de fibra de vidro e tecidos de fibra de vidro;
- Efetuar teste de vibração em todas as amostras, de forma a comparar os valores dos módulos de elasticidade alcançados com os dos outros experimentos;
- Realizar teste de tração com uso de abas em amostras de tecido/poliéster, para comparação com as respostas daquelas testadas sem uso de abas e com os outros testes práticos;
- Verificar através de cálculos da micromecânica os valores, obtidos experimentalmente, de ensaio de tração, flexão e vibração;
- Elaborar análise em elementos finitos para caracterizar modos de falha de peças submetidas a forças trativas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando o objetivo geral deste trabalho, que é estabelecer se há imprecisão, ou não, nas respostas do teste de tração, em amostras produzidas de compósitos de fibra de vidro contínua e descontínua, neste capítulo serão apresentados materiais compósitos, ensaios mecânicos, normas para esses ensaios, trabalhos reportados na literatura e análise micromecânica.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

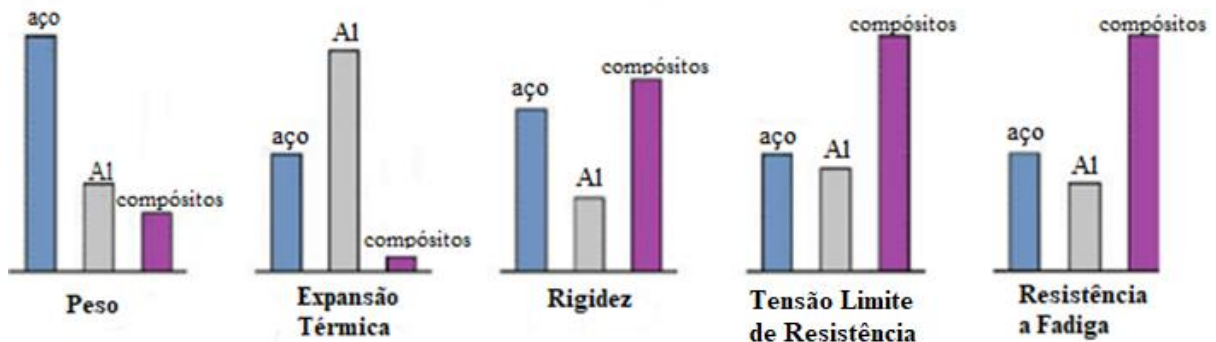
A obtenção de materiais compósitos é feita pela união de materiais para conseguir uma combinação de propriedades que não é possível de atingir em materiais originais. Os mesmos podem ser selecionados para alcançar combinações incomuns de rigidez, peso, resistência a altas temperaturas, resistência à corrosão, dureza ou condutividade (ASKELAND, 2008).

De maneira geral, muitos compósitos são constituídos por duas fases, onde uma é chamada matriz, responsável pela distribuição de cargas e pela resistência do material ao ambiente, e envolve outra, denominada fase dispersa, que incorpora resistência e elevada rigidez em relação ao peso do material (MAZUMDAR, 2002).

Estes materiais representam um passo grandioso no esforço progressivo de otimização de materiais, seus sistemas resultam em um desempenho inatingível pelos elementos individuais e oferecem vantagem de um design flexível; os mesmos também correspondem positivamente à grande demanda por estruturas leves, fortes e rígidas (CHAWLA, 1998).

A Figura 1 demonstra possibilidades de melhorias que podem ser alcançadas sobre materiais convencionais, como alumínio e aço, pelo uso de materiais compósitos. Tais melhorias são: peso, expansão térmica, rigidez, tensão limite de resistência e resistência a fadiga, respectivamente.

Figura 1 - Comparações entre materiais convencionais (aço e alumínio) e materiais *compósitos*.



Fonte: Modificado de Deutsch (1978) apud Chawla (2012).

Materiais compósitos podem ser classificados em três grupos principais: reforçados com partículas, subdividido em compósitos com partículas grandes e reforçados por dispersão, nesse grupo a fase dispersa encontra-se na forma equiaxial; reforçados com fibras, divididos em fibras descontínuas, alinhadas ou orientadas aleatoriamente, ou contínuas, nesse caso a fase dispersa tem geometria semelhante a uma fibra; compósitos estruturais, laminados ou painéis sanduíche, caracterizados pela combinação de materiais homogêneos e compósitos (CALLISTER, 2008). A Figura 2 apresenta um esquema da classificação desses materiais.

Figura 2 - Esquema de classificação dos três principais grupos de materiais *compósitos*.



Fonte: Callister (2008).

Na indústria náutica, o uso de materiais compósitos fibrados e estruturais são mais comuns devido às suas excelentes características mecânicas e econômicas, possibilitando a

implementação de novos processos de produção, por exemplo, laminação a vácuo e infusão (NASSEH, 2007). No presente trabalho são abordados laminados estruturais sem a presença de núcleo inercial, os quais correspondem a laminados do tipo *single skin*.

2.1.1 Laminados estruturais

Em 1960 o desenvolvimento de vidro de elevada resistência e fibras com alto teor de boro, associado ao forte desejo da indústria aeroespacial em melhorar o desempenho e diminuir o peso de aeronaves e veículos espaciais, fizeram com que o aperfeiçoamento de compósitos de plásticos reforçados com fibra se tornasse um avanço em tecnologia (SHENOI; WELLICOME, 1993).

A construção em fibra de vidro tem sido o pilar da indústria náutica desde o meio da década de sessenta devido às características que os materiais plásticos proporcionam, tais como leveza, amortecimento de vibrações, resistência à corrosão e ao impacto, pequenos custos de construção e facilidade de fabricação, manutenção e reparo (GREENE, 1999).

Fios flexíveis de vidro fibroso combinados com termoplásticos ou plásticos termoendurecíveis (resinas) formam os plásticos reforçados com fibra de vidro (PRFV). A fibra de vidro pode ser confeccionada de diferentes formas, como tecidos unidirecionais, bidirecionais, fios contínuos ou descontínuos, entre outros. A combinação da fibra de vidro com o plástico aprimora suas propriedades mecânicas; o grau de melhoria dessas propriedades aumenta quanto maior a quantidade de vidro utilizada (CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1995).

Fibras de vidro são confeccionadas em grande variedade de composições químicas, com diferentes propriedades; as do tipo E são as mais utilizadas no setor náutico, produzidas especialmente para isolamento elétrico, esse material tem como característica o baixo teor alcalino, elevada resistência à tração e boa rigidez em relação à flexão.

Com o desenvolvimento das resinas sintéticas, essas fibras foram introduzidas de forma ampla no mercado, promovendo maior utilização (NASSEH, 2007). Para a realização deste trabalho, foram utilizadas fibras de vidro do tipo E e resina de poliéster ortoftálica.

Ao projetar estruturas feitas de materiais reforçados com fibras, abordagens baseadas em valores característicos de propriedades mecânicas podem levar a sérios riscos à vida útil do material, pois o início e a probabilidade de falha não são dados precisos, ou seja, oferecem informações insuficientes a respeito de segurança (CARPINTERI et al., 2016).

Dessa forma, é imprescindível saber como chegar às propriedades incluídas nos manuais dos materiais, o que significam e verificar se foram obtidas de ensaios mecânicos padronizados (ASKELAND, 2008).

Portanto, neste trabalho foram realizados ensaios convencionais de tração e flexão, além de ensaio não destrutivo de vibração, para determinar propriedades mecânicas dos laminados confeccionados. Além disso, foram feitas aproximações via micromecânica (Lei das Misturas) e análise de modo de falha em elementos finitos.

2.2 ENSAIOS MECÂNICOS

Todo projeto de um componente mecânico, ou qualquer projeto de engenharia, exige grande conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais a serem utilizados. Critérios de especificação impõem métodos normalizados que registram propriedades mecânicas e comportamento dos materiais através de determinadas condições de cargas aplicadas, o que é fundamental para que se estabeleça uma linguagem comum entre fornecedores e usuários, reduzindo problemas associados a esse tipo de atividade (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Resultados dos ensaios de materiais são usados para obtenção de valores das propriedades mecânicas e controle de qualidade, os mesmos devem ser feitos de maneira coerente, de modo a estabelecer confiança e segurança aos usuários e produtores. Contudo, inúmeros tipos de métodos de teste padrão foram desenvolvidos para variados materiais por sociedades profissionais, como ASTM, International Organization for Standardization (ISO), British Standards Institution (BSI), entre outras (DOWLING, 2012).

Nos Estados Unidos, ASTM é a sociedade classificadora mais ativa, seu anuário de padrões dispõe de numerosos volumes, anualmente editados e atualizados (CALLISTER, 2008). Na indústria náutica, os laminados são usualmente qualificados pelos testes padrões da ASTM (GREENE, 1999).

Ensaio mecânicos são classificados de acordo com a plenitude da peça, segmentando-se em ensaios destrutivos, quando há ruptura ou deterioração da peça, e ensaios não destrutivos. Divide-se também em ensaios mecânicos estáticos, onde a carga é aplicada de maneira bastante lenta; ensaios mecânicos dinâmicos, quando há esforços rápidos ou cíclicos; e ensaios mecânicos de carga constante, onde a carga é aplicada durante um longo período (LIMA, 2011).

O presente trabalho faz abordagem dos ensaios mecânicos destrutivos quase estáticos, sendo estes: ensaio de tração e ensaio de flexão; e também ensaio dinâmico não destrutivo, correspondendo ao ensaio de vibração. Além de aproximações via micromecânica e análise de modo de falha a partir de métodos numéricos.

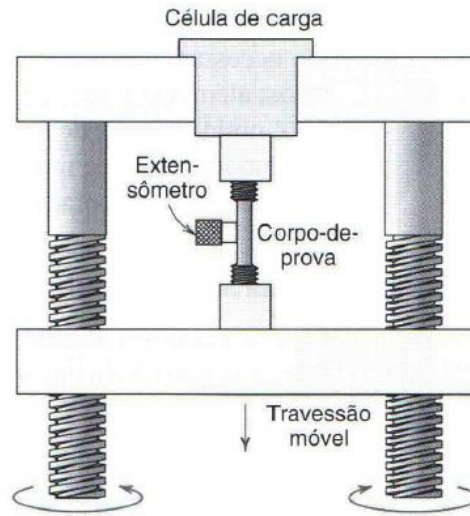
2.2.1 Ensaio de Tração

Diversas propriedades significativas de materiais de engenharia são especificadas por meio de ensaio de tração padronizado. Sua principal função é a determinação da relação entre a tensão normal média e da deformação normal média. É um dos testes mais importantes para caracterização da resistência de um material, a qual depende da capacidade do mesmo em tolerar uma carga aplicada sem sofrer deformidade ou romper-se (HIBBELER, 2004).

Teste de tração consiste em estirar lentamente uma amostra de determinado material, com força axial, até sofrer ruptura. As dimensões dos CPs podem abranger uma seção transversal circular ou retangular, suas extremidades em geral são aumentadas de forma a garantir área extra para a máquina fixar precisamente e evitar que as amostras fraturem nas garras. Os métodos de fixar as extremidades variam de acordo com a geometria da amostra, garantindo força de tração pura (DOWLING, 2012).

Ensaio tensão-deformação levam alguns minutos e são do tipo destrutivo. A máquina utilizada deve ser projetada para alongar o espécime constantemente, medir de maneira contínua a carga que é aplicada e os alongamentos resultantes, por meio de um extensômetro; um travessão móvel faz com que o CP seja alongado. Usualmente, os resultados são registrados em computadores onde a carga se encontra em função do alongamento final (CALLISTER, 2008). A Figura 3 apresenta esquematicamente a máquina empregada em ensaios de tração.

Figura 3- Representação esquematizada de uma máquina utilizada em ensaios de tração.



Fonte: Hayden, Moffatt e Wulff (1965) apud Callister (2008).

Este tipo de ensaio fornece procedimentos para avaliação de laminados do tipo *single skin*, com amostras de geometria retangular, de preferência; são realizados axialmente ou orientados no plano; o eixo de teste deve ser anteriormente especificado para todas as fibras orientadas; esses padrões são seguidos de acordo com as regras da ASTM (GREENE, 1999).

2.2.1.1 Norma de ensaio de tração para compósitos

ASTM D 3039 é uma norma que determina as propriedades de tração para especificações de materiais compósitos em matriz polimérica reforçados com fibras contínuas ou descontínuas. Pesquisa, desenvolvimento e garantia de qualidade são características que resultam desse método de teste. Propriedades mecânicas como resistência à tração, tensão final de tração, módulo de elasticidade, razão de Poisson e deformação, são obtidas através desse ensaio (ASTM, 2014). O presente trabalho fez uso dessa norma para sua realização.

A norma registra que a amostra, de seção transversal retangular constante, deve ser montada nas garras de uma máquina de ensaio mecânico e carregada de forma monotônica em tensão, enquanto registra a força, onde a resistência final do material é alcançada a partir da força máxima transportada antes da falha. Dimensões dos CPs são estabelecidas de acordo com alguns parâmetros e com a direção da fibra e a quantidade de amostras testadas deve ser de no mínimo cinco (ASTM, 2014).

Quanto ao emprego de abas, não é obrigatório quando modos de falhas aceitáveis ocorrem com frequência razoável, portanto é preciso determinar e analisar a necessidade do uso e seus principais parâmetros de design (ASTM, 2014).

Em virtude das possíveis imprecisões nos resultados do teste de tração, por consequência do pré tensionamento das fibras contínuas, é possível prever tal situação com a utilização de abas, de forma a comparar os resultados dos testes, com e sem abas, com resultados dos testes de flexão, vibração e com a micromecânica, verificando se existe ocorrência de consideráveis diferenças.

2.2.1.1.1 Trabalhos reportados na literatura

Kretsis (1987) realizou um estudo onde foram analisados trabalhos de pesquisas publicados referentes a compósitos híbridos - compósitos contendo mais de um tipo de fibra - com ênfase especial nas propriedades mecânicas desses materiais. O autor declara que o comportamento do material depende da qualidade da ligação entre fibra e resina e que, geralmente, é aceito que o módulo de tensão longitudinal obedeça à Lei das Misturas ou micromecânica.

No trabalho experimental realizado por Bittencourt (2015), consta que os ensaios de tração, em materiais compósitos fibra de vidro/poliéster, seguiram a norma ASTM D 3039 para sua elaboração, sem emprego de abas, apenas as extremidades dos CPs que ficariam em contato com as garras da máquina foram lixadas para prever escorregamento dos mesmos.

A partir dos resultados alcançados desses testes, obtiveram-se valores de resistência à tração dos materiais. Também foi efetuada uma análise teórica, pela micromecânica, para comparação com o método prático, onde foi feito cálculo manual de resistência à tração, com utilização da Lei das Misturas. A diferença entre valores experimentais e teóricos foi de 13% para laminação manual (BITTENCOURT, 2015).

Um trabalho experimental onde CPs de material compósito foram sujeitos a ensaio de tração, compressão e flexão, de acordo com padrões ASTM, foi elaborado por Nandaragi et al. (2017). Os autores realizaram laminação manual e após a cura das chapas, as mesmas foram submetidas à corte a jato d'água. Com as forças de ruptura obtidas dos ensaios, alcançaram-se os valores para a tensão de ruptura de cada amostra.

Nandaragi et al. (2017) concluem que os três testes demonstraram comportamento normal de falha. Os valores médios de rigidez para cada um dos testes variam dentro de 7% dos espécimes de teste específicos correspondentes, que é com a variação esperada e que o

módulo de flexão é maior do que os valores obtidos para dados de teste de compressão ou tração.

Em seu trabalho experimental, Spigosso (2017) realizou ensaio de tração em espécimes de material compósito fibra de vidro/poliéster, embasado na norma ASTM D 3039, sem o uso de abas, onde se obteve valores da tensão de ruptura do material junto aos pontos onde ocorreram as falhas; ainda foram executados cálculos baseados na micromecânica para comparação com os resultados obtidos do teste prático.

Spigosso (2017) declara que a maioria dos CPs testados falhou em regiões bastante próximas da extremidade, onde os mesmos são fixados nas garras da máquina. Esse fato indica que os CPs sofreram influência de concentração de tensão nessas regiões, proveniente de um mau alinhamento dos mesmos nas garras, que pode ter alterado o limite de ruptura das amostras.

O trabalho experimental exercido por Rothbarth (2016) elaborou ensaios de tração em materiais compósitos, de acordo com a norma ASTM D 3039, com o intuito de quantificar o limite de resistência à tração de amostras fraturadas e não fraturadas. O autor enfatiza que, de acordo com a norma, é recomendado o uso de abas para alcançar melhores resultados em laminados com reforços unidirecionais e para uso de tecidos bidirecionais, é indicado pela norma utilizar lixa pano de esmeril na parte que fica em contato com as garras da máquina.

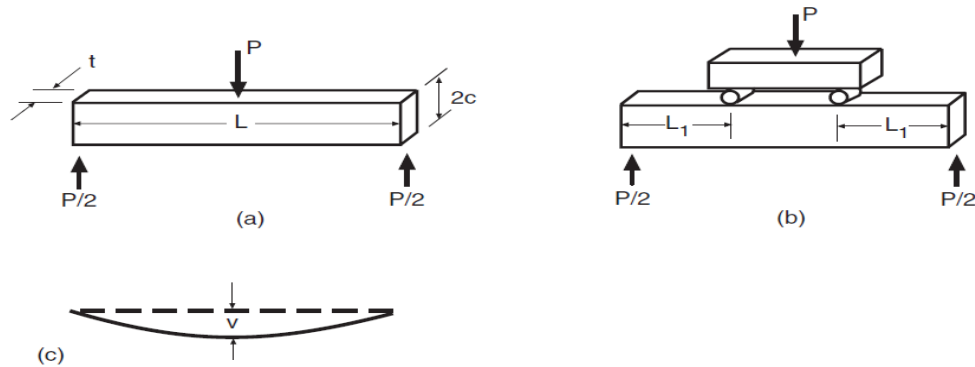
2.2.2 Ensaio de flexão

Ensaio de flexão resume-se na aplicação de uma carga progressiva em especificados pontos de amostra com geometria padrão, que pode encontrar-se biapoiada ou engastada em uma extremidade. É muito utilizado para controle de princípios mecânicos para materiais de engenharia, pois fornece dados quantitativos da deformação que esses podem sofrer sempre que submetidos a cargas de flexão; impõe, concomitantemente, níveis de tensões trativas, compressivas e cisalhantes sobre a seção transversal do espécime (GARCIA et al., 2014).

Segundo Dowling (2012), testes de flexão são usualmente empregados em barras de material lisas e embasados em testes padrões da ASTM; são essenciais para estimar a resistência à tração de materiais frágeis, pois são difíceis de serem testados em simples tensão uniaxial e rachaduras se formam nas regiões dos CPs próximas às garras. Em geral, as amostras dispõem de seções transversais retangulares e podem ser submetidas às cargas de flexão de três ou quatro pontos.

A Figura 4 retrata tipos de ensaio de flexão, com carregamento em flexão aplicado em três pontos, quatro pontos e em barras retangulares.

Figura 4 Esquema de carregamento em flexão, em barras retangulares, em três (a) e quatro pontos (b), com comportamento em deflexão da linha central de ambos os casos (c).



Fonte: Dowling (2012).

Garcia et al. (2014) explica que esse ensaio constitui-se na aplicação de uma carga no centro de um CP, apoiado em dois pontos. A carga parte de um valor inicial igual a zero e aumenta devagar até que o CP se rompa. Ainda constata que “O equipamento é dotado de dois suportes ajustáveis, um dispositivo de aplicação da carga e um medidor da deflexão ou curvatura.” (p. 172).

Quando se trata de laminados *single skin*, Greene (1999) enfatiza que para avaliação de suas propriedades mecânicas, sob carga de flexão, diversos procedimentos padrões estão disponíveis e a partir disso obtém-se resistência à flexão e módulo de flexão. O autor também alega que, independente do tipo de reforço, amostras retangulares são requeridas; e que esse tipo de ensaio é excelente para comparação entre laminados de geometrias semelhantes e são usados com frequência em programas de garantia de qualidade, baseados na norma ASTM D 6272 e ISO 178. O presente trabalho realizou ensaio de flexão com quatro pontos, baseado na norma ASTM D 6272-17.

2.2.2.1 Norma de ensaio de flexão para compósitos

A norma ASTM D 6272–17 (2017), utilizada neste trabalho, caracteriza métodos de teste padrão para propriedades flexurais de plásticos, reforçados e não reforçados, e de materiais elétricos isolantes; as mesmas são bastante úteis para desígnios de controle de qualidade e especificação.

O método de teste com três pontos é geralmente empregado para materiais rígidos e semirrígidos, porém, não pode ser usado para aqueles materiais que não quebram ou cedem na superfície externa do CP dentro do limite de deformação de 5%. Portanto, para esse tipo de material é recomendado realização do teste de flexão de quatro pontos, que se diferencia do de três pontos pela localização do momento de flexão máximo e das tensões máximas de fibra axial (ASTM D 790-17, 2017).

Dessa forma, no presente trabalho, foi utilizado o método de quatro pontos, onde é usado um mecanismo indicador de deflexão capaz de mostrar mudança no movimento do atuador, obtendo assim a deformação do material e, a partir disso, outras propriedades mecânicas podem ser alcançadas através de equações propostas (ASTM D 6272-17, 2017).

Quanto à geometria dos espécimes, a sociedade classificadora alega que aceita amostras que são cortadas de placas ou formas moldadas para obtenção das dimensões finais desejadas. Ainda, afirma que a profundidade dos CPs não deve exceder sua largura e que a seção transversal deve ser retangular com lados opostos planos e paralelos e com lados adjacentes perpendiculares ao longo de toda a extensão da amostra.

2.2.2.1.1 *Trabalhos reportados na literatura*

No trabalho experimental feito por Casaril (2004), uma análise do comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras curtas e partículas foi realizada, obtendo o módulo de elasticidade e tensão de ruptura desses materiais através de cálculos teóricos, embasados na Lei das Misturas, e por intermédio de ensaio de flexão em três pontos, de acordo com a norma ASTM D 790-92, de forma com que os resultados teóricos concordaram com os experimentais.

Em sua dissertação o autor ainda salienta que a qualidade do processamento do material compósito, desde a homogeneização das matérias-primas até fabricação e ensaio dos CPs, pode influenciar nos resultados, em razão das interações presentes na microestrutura do material. Por isso é essencial ter cuidado em todas as etapas de obtenção das respostas finais.

Mehndiratta et al. (2017) em seu trabalho, alegam que o teste e avaliação de propriedades mecânicas para peças de plásticos reforçados com fibras, desempenham papel significativo para qualificá-las para o uso final. Ainda enfatizam que a resistência à flexão varia para diferentes materiais, variando também o comprimento de teste. Portanto, fizeram um estudo visando encontrar um comprimento ideal para testar a resistência à flexão para espécimes feitos de material compósito.

Assim, os autores executaram teste de flexão nas amostras, de acordo com a norma ASTM D 790, e compararam os resultados experimentais com os obtidos num programa de elementos finitos, onde os resultados alcançados mostraram uma boa concordância, indicando que um comprimento de vão ótimo pode ser obtido para testar a resistência à flexão, sendo útil para projetistas e fabricantes de compósitos para realizar melhores procedimentos de teste padrão.

No trabalho experimental realizado por Chaudhary, Singh e Venugopal (2016), foi feita uma investigação na resistência à flexão de um laminado de PRFV sem núcleo inercial. Os testes de flexão foram efetuados em consentimento com a norma ASTM D 790. Elaborou-se uma análise de elementos finitos para validar os resultados experimentais e também foi feito um estudo sobre a estrutura e a morfologia das amostras fraturadas usando um microscópio eletrônico de varredura. Os autores encontraram um erro dentro de um intervalo de 10%, revelando boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos.

2.2.3 Ensaio de Vibração

Vibração define-se como qualquer movimento que se repete após um determinado intervalo de tempo; recentemente, na área da engenharia, foram motivados estudos em aplicações de vibração, como em motores, estruturas, projeto de máquinas, sistemas de controle, entre outros (RAO, 2011).

Para determinação da deformação em uma dada frequência de pico, de máquinas ou estruturas, é realizado um teste dinâmico nas mesmas, que pode ser feito através de duas abordagens: uma onde a forma de deflexão dinâmica forçada é medida sob a frequência de estado estacionário do sistema e outra através de testes modais (RAO, 2011).

Materiais compósitos são considerados anisotrópicos, ou seja, dependem da direção que um determinado esforço é aplicado sobre eles; portanto, devem ser utilizados métodos de testes dinâmicos de forma que as propriedades mecânicas do material possam ser estabelecidas nos eixos de ortotropia (FIORENTIN, 2007).

Por intermédio do método da viga livre-livre, embasado na norma ASTM E 1876-01, é possível obter respostas das propriedades dinâmicas de materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos à temperatura ambiente. Dessa maneira, desde que pressupostos os efeitos de anisotropia, compósitos também podem ser submetidos a esse tipo de método (FIORENTIN, 2007).

2.2.3.1 Norma de ensaio de vibração

O método de teste ASTM E 1876-01 (2006) consiste na medição da frequência de ressonância de espécimes de geometria adequada, excitando-as mecanicamente por apenas um golpe na amostra com uma ferramenta; um transdutor detecta as vibrações mecânicas resultantes do CP e as transforma em sinais elétricos, que são analisados; a frequência de ressonância fundamental é isolada e medida pelo analisador de sinal, que fornece uma leitura numérica que diz respeito à frequência ou o período de vibração do espécime.

Desenvolvimento de material, caracterização, geração de dados de projeto e controle de qualidade são obtidos através da aplicação desse método de teste em amostras, que podem ser de seção transversal retangular ou circular, placas planas e discos (ASTM E 1876-01, 2006).

A norma enfatiza que esse teste é de natureza não destrutiva e que pode ser usado para amostras que serão utilizadas em outros tipos de ensaios; o teste de excitação por impulso (o qual foi utilizado no presente trabalho) faz uso de uma ferramenta de impacto e suportes simples para o CP, sem exigência de sistemas de suporte complexos que solicitem configuração ou alinhamento elaborado (ASTM E 1876-01, 2006).

Quando amostras de materiais compósitos forem submetidas a esse teste, a norma ASTM E 1876-01 (2006) ressalta que deve haver consideração da anisotropia desses materiais, só assim o método pode ser aplicado a eles; o caráter do reforço e heterogeneidades nos espécimes tem efeito direto sobre suas propriedades elásticas como um todo e devem ser considerados na interpretação dos resultados dos testes para compósitos e materiais não homogêneos. Neste estudo, o ensaio de vibração foi utilizado para estimar o módulo de elasticidade das amostras confeccionadas.

2.2.3.1.1 Trabalhos reportados na literatura

Em sua dissertação, Fiorentin (2007) efetuou um estudo para determinação das forças excitatórias que provocam vibração das paredes de um reator elétrico, feitas de fios de alumínio e encapsulados por fibra de vidro e resina; para caracterização das propriedades mecânicas desses materiais, foram realizados ensaios dinâmicos em CPs.

Consoante à norma ASTM E 1876-01 foi feito o método de teste de viga livre-livre para caracterizar a forma de vibração do reator; modelos analíticos e em elementos finitos também foram desenvolvidos para prever a forma de vibração das paredes do reator. Os

resultados foram comparados e concluiu-se que, apesar das simplificações contidas, os modelos forneceram bons resultados (FIORENTIN, 2007).

No trabalho experimental feito por Spigosso (2017) avaliou-se a influência da pós-cura nas características físicas e mecânicas em amostras de material compósito, fabricadas pelo autor através do método de laminação manual.

Ensaio de vibração baseado na norma ASTM E 1876-01 foi usado por Spigosso (2017) para estimar o módulo de elasticidade dos CPs e verificar se o processo de pós-cura aprimorou essa característica do material compósito.

Uma investigação experimental de métodos de teste que podem detectar danos em compósitos de cimento foi realizada por Neithalath (2006); métodos convencionais de detecção de danos foram efetuados junto a testes dinâmicos para determinação do módulo de elasticidade e capacidade de amortecimento, embasados na norma ASTM E 1876-01.

Neithalath (2006) alega que o módulo dinâmico foi escolhido em seu estudo, pois se acredita que o monitoramento periódico da mudança na rigidez com a duração da exposição a condições extremas seja um método conveniente e poderoso para detectar e quantificar os danos.

2.3 MICROMECAÂNICA

De acordo com Marinucci (2011), a micromecânica investiga interações microscópicas entre os elementos que formam um laminado, que são as fibras e matriz. Através desse estudo é possível obter os módulos de elasticidade e tensões de ruptura de compósitos, determinando suas propriedades mecânicas em termo dos elementos que o constituem, assim como as proporções relativas de matriz e reforço.

A Lei das Misturas foi elaborada para presumir as propriedades mecânicas de materiais compósitos; ela está embasada no princípio da Aditividade, o qual estipula que ao se acrescentar uma ou mais fases dispersas à matriz, com o intuito de formar um material compósito, as propriedades do novo material serão intermediárias entre as propriedades dos itens participantes (CASARIL, 2004). Dessa forma, este trabalho faz uso da Lei das Misturas, seguindo o princípio da micromecânica, para determinação das propriedades mecânicas dos espécimes confeccionados.

As vantagens desse método de cálculo é ser simples, poder ser aplicado em todos os tipos de materiais compósitos e híbridos, poder substituir a análise macromecânica, a qual se caracteriza por ser complexa, e não necessitar de programação computacional. Entretanto, os

resultados alcançados são aproximados e frágeis aos parâmetros de entrada, dessa forma é muito importante que os valores sejam detalhados (BITTENCOUT, 2015).

2.4 ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos é um método numérico para solução de problemas em áreas da engenharia como análises estruturais, transferência de calor, fluxo de fluídos, potenciais eletromagnéticos, entre outros (LOGAN, 2012).

No dia a dia de engenheiros e projetistas há enorme variedade de problemas técnicos, alguns mais simples e outros mais complexos. É nocivo que a maioria das estruturas de importância prática são demasiadamente herméticas para serem averiguadas por técnicas matemáticas clássicas (ALVES FILHO, 2000).

Dessa forma, é preciso recorrer a métodos numéricos, tal como os elementos finitos, para exibirem respostas aceitáveis e aproximadas, resultando em sistemas de equações algébricas simultâneas para solução, ao invés de exigir a resolução de equações diferenciais provenientes da matemática clássica (LOGAN, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com os objetivos deste trabalho, já apresentados, este capítulo aborda os processos de confecção dos CPs, os ensaios experimentais efetuados (vibração, tração e flexão), cálculos da micromecânica, baseados na Lei das Misturas, e análise de modos de falha através de elementos finitos.

3.1 FABRICAÇÃO DOS CPS

Laminação manual, também conhecida por *hand lay up*, caracteriza-se pelo processo de disposição de vários reforços de fibra sobre um molde e aplicação de resina sobre eles. Com esforço manual, deve-se distribuir resina uniformemente sobre as fibras e esperar até sua polimerização final (NASSEH, 2008).

Dessa forma, CPs foram confeccionados no Laboratório de Modelos e Construção Naval da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville, no dia 6 de abril de 2018. Os materiais utilizados, assim como o procedimento de laminação e corte das amostras são descritos a seguir.

3.1.1 Materiais utilizados

Na realização da laminação manual para obtenção dos CPs, foram usados dois moldes planos feitos de vidro; em um deles foi empregada manta com gramatura de 300 g/m² e resina de poliéster ortoftálica da marca Sama, acompanhada com catalisador; no outro molde foi aplicado tecido biaxial com gramatura de 330 g/m² e mesma resina.

Para a prática da laminação, foi considerado, em massa, 30% de reforço e 70% de matriz. Por garantia de que não faltasse resina a ser impregnada, assumiu-se 15% a mais de resina para os dois experimentos.

Foi utilizado solvente de limpeza da marca ABCOL, cera desmoldante TecGlaze® N e desmoldante líquido PVA (álcool polivinílico) incolor da ABCOL. Não foi usado gelcoat,

pois não se fez necessário bom acabamento da superfície do material, conseqüentemente, facilitando o processo de laminação.

Os instrumentos e equipamentos utilizados para efetuar a laminação foram: equipamentos de segurança individual (EPIs), pincel, estopa, esponja, fita crepe, tesoura, rolete, espátula, régua, fita métrica, calculadora, balança, recipientes de plástico e alumínio, dosador de reagente e palito de madeira para homogeneização.

3.1.2 Laminação manual

Para o procedimento de *hand lay up*, inicialmente, foram colocados os EPIs, em seguida, mediu-se a temperatura e umidade do laboratório, que foi de 24 graus Celsius e 51% de umidade; assim, limpou-se os moldes com a ajuda de uma espátula e solvente de limpeza; com uma estopa seca removeu-se o excesso de solução de limpeza.

Posteriormente, foi colocada a primeira camada de cera desmoldante sobre o molde limpo. Com uma estopa seca, retirou-se o excesso e esperou-se, aproximadamente, 20 minutos para a segunda mão de cera; o processo se repetiu para a aplicação da terceira mão. Após a sobreposição das três camadas, com esponja, foi empregado o desmoldante líquido sobre toda superfície e esperou-se 15 minutos até secar.

O passo seguinte foi cortar as mantas e tecidos com tesoura, de acordo com as dimensões estipuladas. Então, foi feito gel time, com 1,5% de catalisador para 100 gramas de resina, definindo qual o tempo que poderia ser usado para impregnação de resina.

Dessa forma, em um dos moldes foi efetuada a primeira laminação, aplicando resina sobre ele e a espalhando com auxílio de um pincel. Seguidamente, foi colocada uma camada de manta e então se impregnou resina com ajuda de pincel e rolete, esse procedimento foi repetido por mais duas vezes para chegar à espessura adequada à norma.

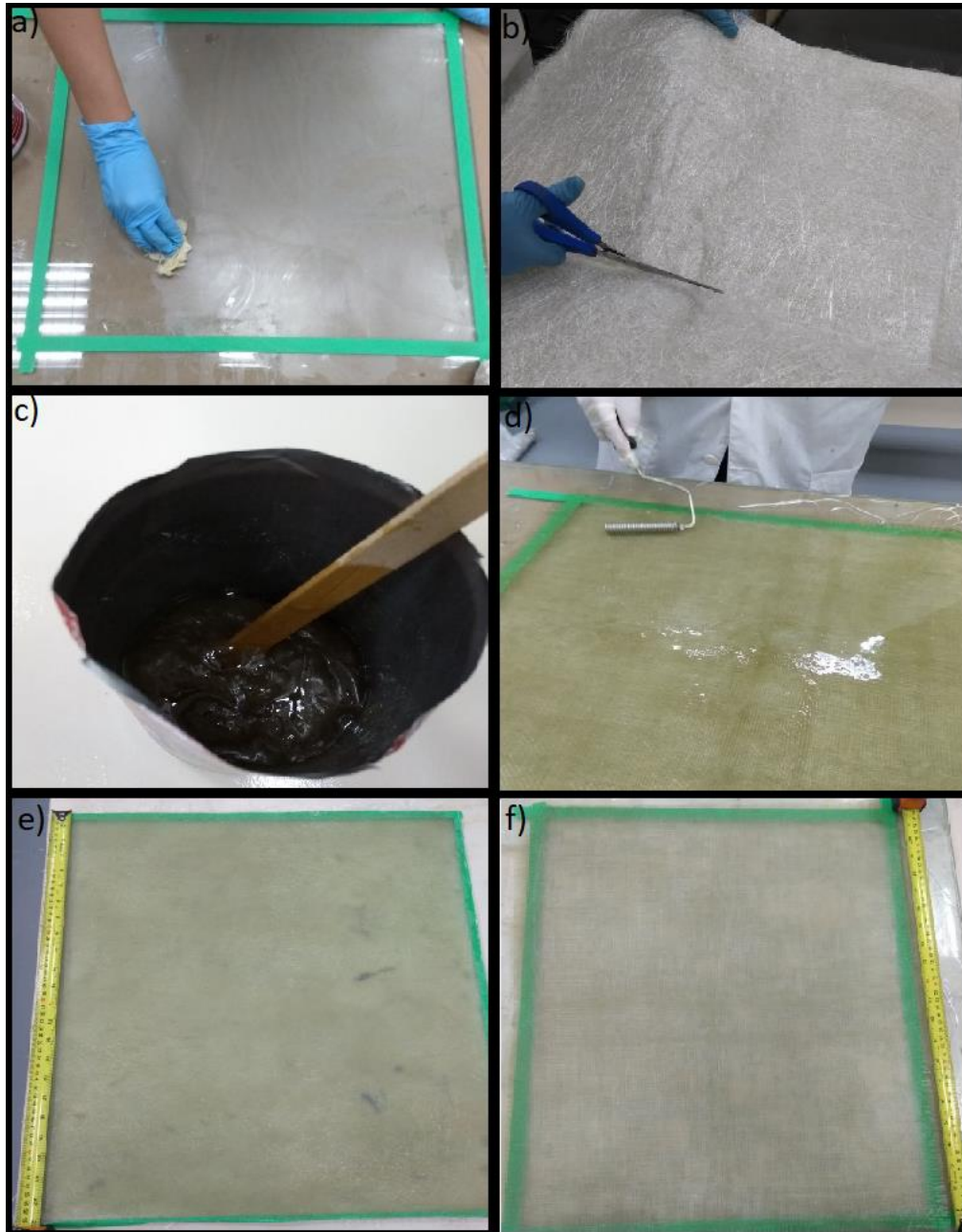
No outro molde foi realizada a laminação com os tecidos, onde primeiro aplicou-se resina sobre o molde, em seguida colocou-se uma camada de tecido e depois foi empregado resina com ajuda de pincel e rolete, esse processo foi refeito por mais cinco vezes para ficar com a espessura requerida pela norma.

Após a cura completa da resina, executou-se o desmolde dos laminados. Neste trabalho, esperou-se cinco dias para desmoldar, garantindo um bom resultado e desmolde completo da peça.

A Figura 5 apresenta passos do processo de laminação efetuados: a) aplicação da cera desmoldante; b) corte dos reforços com auxílio de tesoura; c) resina curada após o gel

time; d) impregnação de resina e remoção de bolhas com ajuda do rolete; e) laminado de manta/poliéster curado; f) laminado de tecido/poliéster curado.

Figura 5 – Passos do processo de laminação manual.

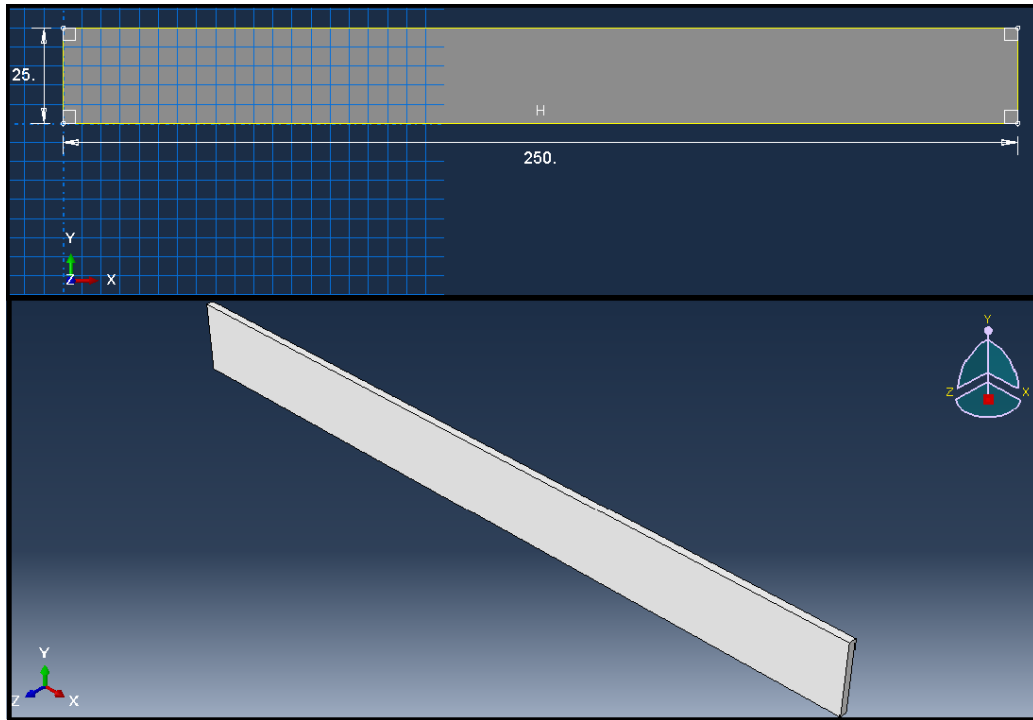


Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Posteriormente ao desmolde, foi necessário o corte das amostras de acordo com as dimensões estabelecidas pelas normas dos ensaios mecânicos. Portanto, para um melhor resultado e acabamento, as chapas laminadas foram submetidas ao corte a jato d'água, na empresa Omax, situada em Joinville, SC.

Com o auxílio do programa computacional Abaqus, foram caracterizadas as dimensões, em milímetro, dos CPs e enviadas à empresa para a efetuação dos cortes. A Figura 6 apresenta os desenhos em duas e três dimensões, respectivamente.

Figura 6 – Representação das dimensões dos CPs através do software Abaqus.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Foram cortadas doze amostras de tecido/poliéster e doze de manta/poliéster, totalizando em vinte e quatro CPs. Os mesmos foram enumerados e etiquetados com legendas como é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Legenda das *etiquetas* dos CPs.

MF	CP com reforço de manta submetido a ensaio de flexão.
MT	CP com reforço de manta submetido a ensaio de tração.
TF	CP com reforço de tecido submetido a ensaio de flexão.
TT	CP com reforço de tecido submetido a ensaio de tração sem uso de abas.
TA	CP com reforço de tecido submetido a ensaio de tração com uso de abas.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Foram realizadas medições de espessura, por meio de um paquímetro digital, em três pontos de cada espécime e, assim, foi feita uma média desses valores; por garantia, o mesmo foi feito para medir a largura das amostras. O comprimento de cada espécime foi medido com auxílio de régua. Feito isso, com as médias das larguras e espessuras, calculou-se a área da seção transversal (A) de todos os CPs; também, os mesmos foram pesados individualmente.

3.2 ENSAIO DE VIBRAÇÃO

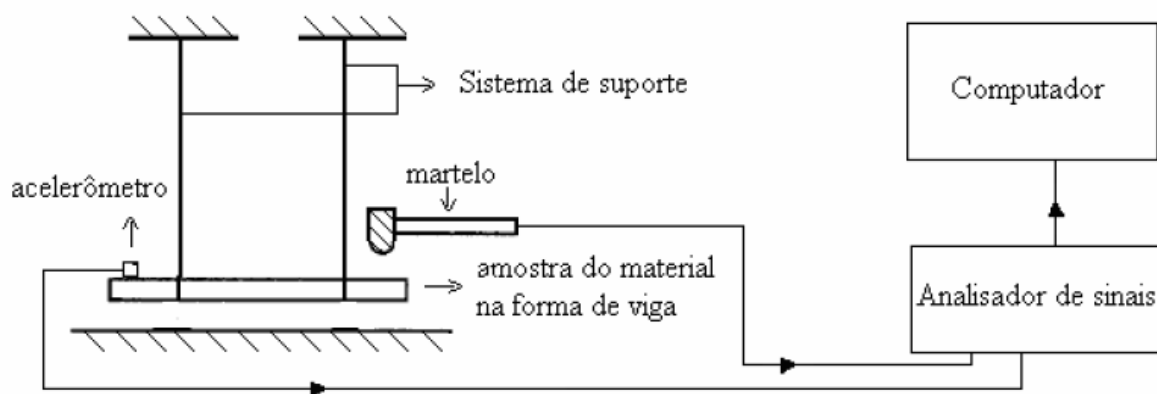
O ensaio de vibração foi efetuado no dia 27 de abril de 2018, no Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville. Foi o primeiro teste a ser realizado devido à sua característica não destrutiva, permitindo o procedimento com os outros ensaios sem possíveis danos nas amostras.

Esse teste foi feito com o intuito de determinar o módulo de elasticidade de todos os CPs confeccionados, de forma a comparar seus resultados com os dos outros experimentos. Portanto, nos seguintes tópicos são abordados os materiais empregados assim como o método utilizado.

3.2.1 Materiais empregados

Para a prática deste experimento foi necessário o uso dos seguintes materiais: martelo de impacto, acelerômetro, suporte rígido para caracterizar as amostras na condição livre-livre, analisador de sinais e computador. A Figura 7 apresenta os instrumentos dispostos na elaboração dos ensaios de vibração deste trabalho.

Figura 7 - Disposição dos instrumentos empregados no ensaio de vibração.



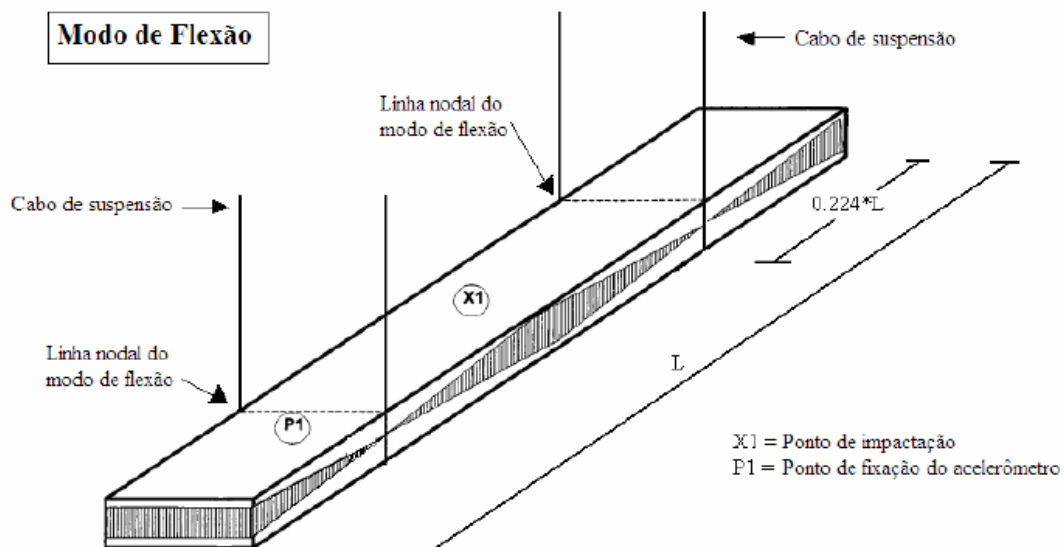
Fonte: Fiorentin (2007).

3.2.2 Método da viga livre-livre

Para a obtenção do módulo de elasticidade dos CPs, foi usado o método da viga livre-livre, fundamentado na norma ASTM E 1876-01, onde, com a ajuda dos suportes, as amostras ensaiadas caracterizam uma viga no estado livre-livre.

Inicialmente, foi preciso medir dois pontos a $0,224L$ das extremidades de cada amostra para posicionar os suportes sobre as linhas nodais, pontos que não demonstram deslocamento no primeiro modo de flexão do CP, onde L caracteriza o comprimento do espécime. As posições dos outros equipamentos são especificadas pela norma e estão demonstradas na Figura 8.

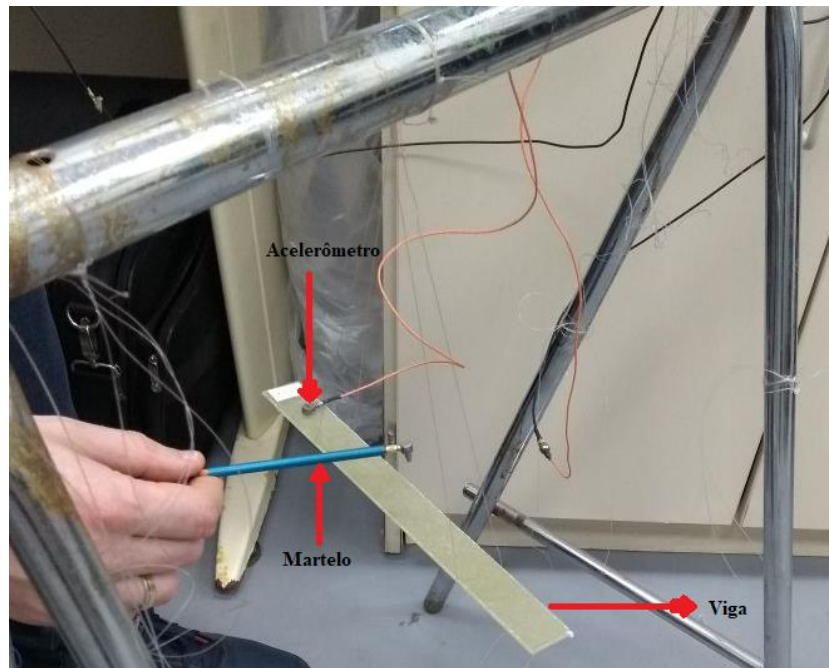
Figura 8- Posição dos equipamentos utilizados no ensaio de vibração de acordo com a norma.



Fonte: Fiorentin (2007).

Dessa forma, para determinar a frequência de ressonância em flexão (f_f), deve ser feita a média de cinco funções resposta em frequência. A Figura 9 retrata o ensaio de vibração, realizado no presente trabalho, no momento do impacto com o martelo nas amostras confeccionadas de material compósito, para a coleta dos dados das frequências.

Figura 9- Ensaio de vibração no momento do impacto com o martelo em amostras de material compósito.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Então, pôde-se calcular para cada CP o módulo de elasticidade (E) através da Equação 1; e o fator de correção para o modo de flexão (T1) que, segundo a norma, se a razão do comprimento pela espessura do espécime for maior ou igual a 20, como em todos os CPs ensaiados neste trabalho, esse fator pode ser estabelecido pela Equação 2.

$$E = 0,9465 \left(\frac{mf_f^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T1 \quad (1)$$

$$T1 = [1,000 + 6,585 \left(\frac{t}{L} \right)^2] \quad (2)$$

Onde:

L é o comprimento do espécime;

b retrata largura da amostra;

t representa espessura do CP;

m é a massa do espécime.

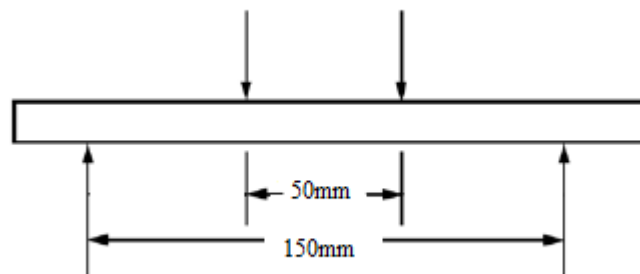
3.3 ENSAIO DE FLEXÃO

O teste de flexão foi efetuado no dia 3 de maio de 2018 no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis, com o objetivo de obter respostas de propriedades mecânicas das amostras confeccionadas tanto por manta quanto por tecido.

A máquina usada para a realização dos ensaios foi uma Máquina Universal de Ensaio MTS, Criterion Model 45, que foi previamente ajustada a uma célula de carga de 100 kN, mas como a primeira amostra submetida atingiu uma carga muito baixa, para a prática dos outros ensaios, modificou-se a célula de carga para 5 kN; a velocidade equivalente adotada foi de 10 mm/min.

Na máquina, a distância estipulada entre os suportes foi de 150 mm e a do aplicador de carga foi de um terço da distância entre os suportes. A Figura 10 caracteriza esses intervalos.

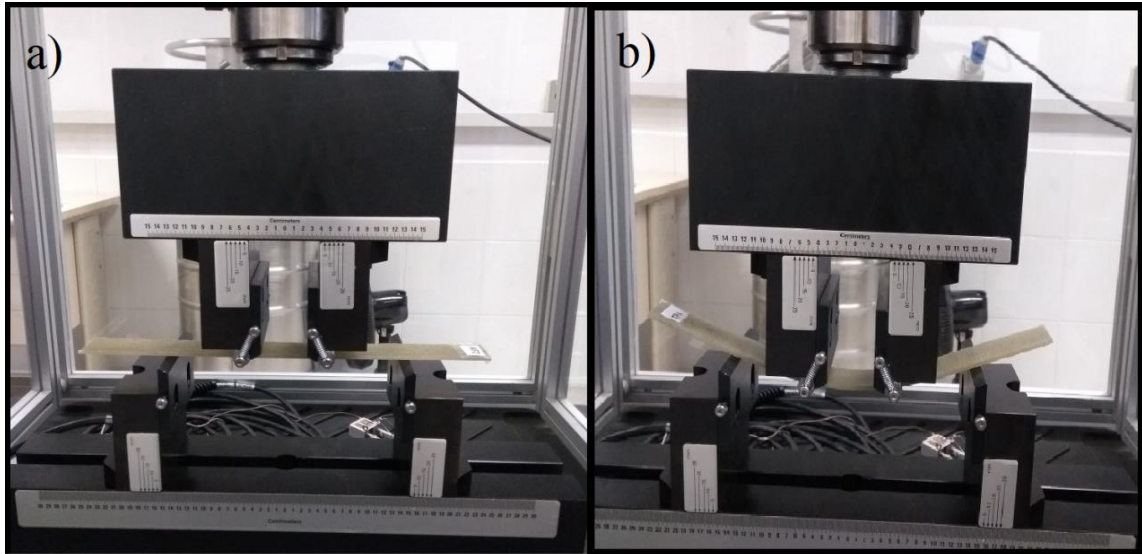
Figura 10 - Distância do aplicador de carga e dos suportes.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Foram testados seis CPs de manta/poliéster e quatro de tecido/poliéster. A Figura 11 demonstra o ensaio de flexão, onde (a) é o registro antes da aplicação da célula de carga na amostra e (b) é a aplicação de carga no CP após alguns segundos.

Figura 11 - Testes de flexão antes (a) e durante (b) a aplicação de carga nos CPs.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Posteriormente à elaboração dos experimentos, foram feitos os cálculos para obtenção das propriedades mecânicas desejadas. Portanto, em conformidade com a norma ASTM D 6272-17, calculou-se a tensão e a deformação em cada ponto, através das Equações 3 e 4, respectivamente.

$$S = \frac{PL}{bd^2} \quad (3)$$

$$r = \frac{4,70Dd}{L^2} \quad (4)$$

Onde:

S é tensão;

P é a carga aplicada;

L é a distância entre os suportes;

d é a espessura do espécime;

r nesse caso determina deformação;

D é a deflexão no centro da amostra.

Por fim, se calculou o módulo de elasticidade em flexão (E_b) por meio da Equação 5 a seguir, onde m , nesse caso, é a relação entre força e deflexão $[P/D]$ no regime elástico.

$$E_b = \frac{0,21L^3m}{bd^3} \quad (5)$$

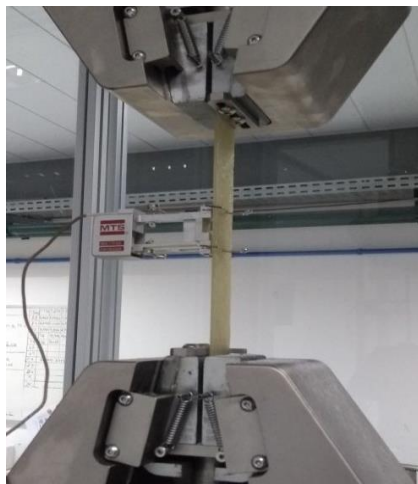
3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

No dia 3 de maio de 2018, no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis, foram efetuados os testes de tração nos CPs com a finalidade de obter respostas do comportamento do material, para posterior comparação com os outros métodos de teste

A máquina adotada para a efetuação dos experimentos foi uma Máquina Universal de Ensaio MTS, Criterion Model 45, ajustada a uma célula de carga de 100 kN e velocidade equivalente de 5 mm/min. Foram implementados testes de tração sem utilização de abas em quatro CPs de tecido/poliéster e em seis de manta/poliéster; e com o uso de abas, em quatro amostras de tecido/poliéster. O material usado como aba foi uma lixa pano de esmeril (*emery cloth*), que é estabelecida na região do CP que fica em contato com as garras da máquina.

Para medição do alongamento resultante de cada CP, foi conectado um extensômetro nos mesmos, que após certo período era desacoplado, pois o material tinha grande chance de se romper, podendo causar algum dano ao extensômetro. A Figura 12 exibe o ensaio sendo executado assim como o extensômetro acoplado no espécime.

Figura 12 - Ensaio de tração num CP com a presença do extensômetro.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Por conseguinte, foram realizados os cálculos para consecução das propriedades mecânicas do material em cada ponto, como mostram as Equações 6, 7 e 8 abaixo.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{C}{l} \quad (7)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (8)$$

A fórmula para obter a tensão (σ), relaciona a força (P) e a área da seção transversal da amostra (A); a equação da deformação (ε) é a divisão entre o deslocamento (C) e comprimento do espécime (l), desconsiderando as extremidades que ficam presas nas garras da máquina; e E é alcançado pela Lei de Hooke, que é a relação entre σ e ε .

Portanto, realizou-se uma média dos valores de E em cada ponto até a tensão de escoamento, desconsiderando os primeiros valores devido a imprecisões no início do teste.

3.5 MICROMECAÂNICA

Para a realização dos cálculos pela micromecânica, assumiu-se que as camadas de manta possuem mesma resistência e as de tecido dispõem de resistência equivalente na direção da fibra.

Por intermédio de um estudo efetuado por Bittencout (2017), considerou-se o valor de 900 MPa para a tensão de ruptura da fibra de vidro do tipo E (σ_f) e densidade (ρ_f) de 2,55 g/cm³; para a matriz de poliéster usou-se 52 MPa de tensão de ruptura (σ_r) e densidade (ρ_r) de 1,12 g/cm³. Desse modo, foi possível obter a resistência à tração de cada camada do laminado.

O cálculo do volume específico de cada camada do laminado exige os valores das massas dos reforços antes e após a laminação, portanto, mediram-se as massas dos reforços e, posteriormente, do laminado pronto através de uma balança. A massa da matriz foi alcançada pelo cálculo da diferença entre a massa do laminado e dos reforços.

Por conseguinte, calculou-se a fração mássica de fibra (M_f) e de resina (M_r) de cada camada, dividindo a massa do reforço ou matriz pela massa total da placa.

Assim, foi possível obter os volumes específicos de fibra (V_f) e resina (V_r) de cada placa, manipulando as Equações 9 e 10, identificadas em Al-qureshi (2010), e assumindo volume de vazios nulo.

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_r}{\rho_r}} \quad (9)$$

$$V_r = 1 - V_f \quad (10)$$

A partir dos dados resultantes, foi viável a execução dos cálculos para obtenção da tensão de ruptura do tecido (σ_t) e da manta (σ_m), através da Lei das Misturas Modificada, apresentada em Casaril (2004), como mostra a Equação 11.

$$(\sigma_x) = \beta \sigma_f V_f + \lambda \sigma_r V_r \quad (11)$$

Onde, segundo Casaril (2004), β determina o fator de eficiência do alinhamento das fibras, que para tecido é igual a 1,00 e para manta 0,37; λ é o fator de adesão entre as fibras e matriz, que para laminação manual é considerado igual a 0,85.

A obtenção do valor do módulo de elasticidade para o laminado de tecido/poliéster (E_t) e do de manta/poliéster (E_m) foi feita de acordo com Levy Neto e Pardini (2006), considerando o módulo de elasticidade para a fibra (E_f) de 70 GPa e para resina (E_r) de 3 GPa como mostra a Equação 12.

$$(E_x) = \beta E_f M_f + \lambda E_r M_r \quad (12)$$

3.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Para caracterização do modo de falha das amostras, com reforços de tecido e de manta, submetidas ao ensaio de tração, com auxílio do software Abaqus modelou-se o espécime como um elemento de casca deformável e plano, em três dimensões e considerando uma estrutura isotrópica e homogênea.

Os dados de entrada para obtenção das respostas desejadas foram:

- ✓ Geometria (250 x 25 x 2,5 mm);
- ✓ Material (elástico e isotrópico);
- ✓ Módulo de elasticidade - proveniente dos resultados da micromecânica (20,02 GPa);
- ✓ Coeficiente de Poisson – de acordo com Levy Neto e Pardini (2006) (0,27);
- ✓ Intensidade da força aplicada – baseada em resultados dos testes práticos;
- ✓ Condições de contorno de acordo com o tipo de esforço a ser analisado (uma extremidade engastada e outra submetida a forças axiais concentradas).

Então, foi viável obter respostas do comportamento da peça quando sujeitada a esforços trativos, como sua deformação, tensões máxima e nominal, para explicar o motivo de possíveis rupturas próximas às garras da máquina nos ensaios práticos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a explicação teórica dos principais elementos abordados neste trabalho, assim como toda a metodologia empregada no mesmo, neste capítulo serão expostos os resultados e discussões provenientes da confecção das amostras, de todos os ensaios efetuados, cálculos da micromecânica e análise por elementos finitos.

A fim de caracterizar as respostas alcançadas para determinação das possíveis imprecisões nos resultados do teste de tração, foi criado um tópico neste capítulo que abrange comparações realizadas entre os ensaios práticos e os calculados baseados na Lei das Misturas. Também foi elaborado um tópico no qual estão contidas considerações sobre cada metodologia empregada para a realização deste trabalho, explicitando o que cada método conseguiu gerar de informações e quais as vantagens e desvantagens de cada um.

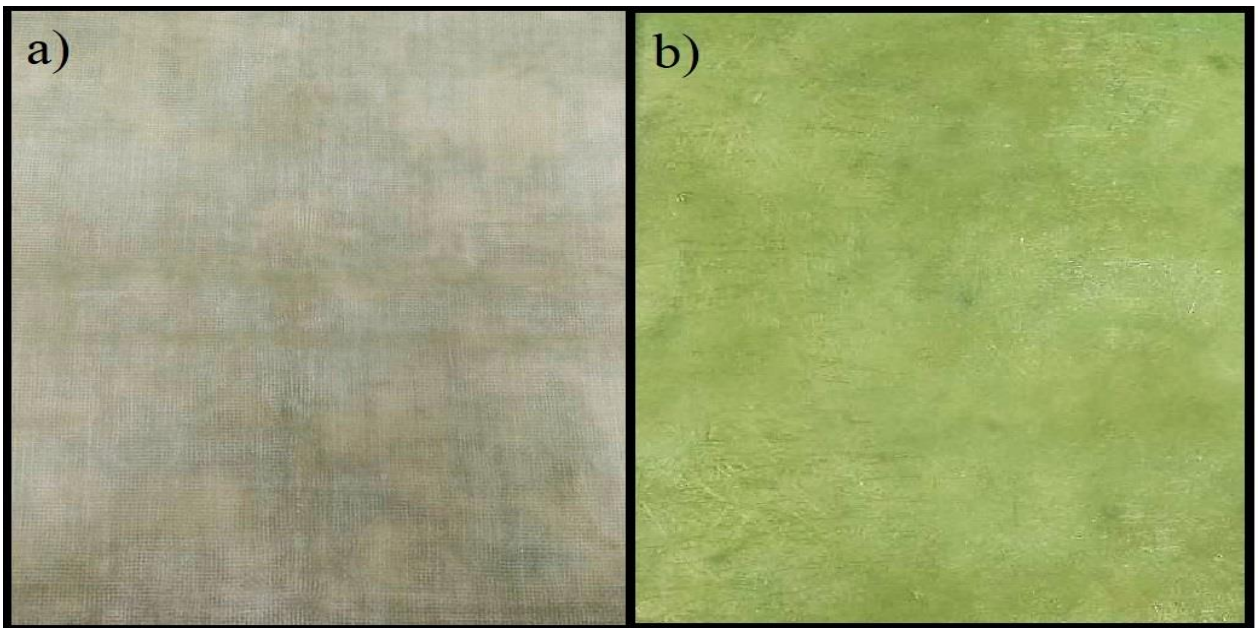
4.1 FABRICAÇÃO DOS CPS

A laminação manual feita nos dois moldes ocorreu como o esperado, as peças foram desmoldadas sem dificuldade, as espessuras não apresentaram uniformidade e houve a presença de pequenas bolhas em algumas regiões das placas.

O corte a jato d'água resultou em dimensões de comprimento das amostras bem definidas, como proposto pela norma (250 mm); as larguras exibiram pequenas variações, onde a maior foi de 0,43 mm; já as espessuras tiveram variações mais acentuadas devido a não uniformidade proveniente do processo de fabricação das placas. Os resultados de todas essas medições são exibidos no Apêndice A.

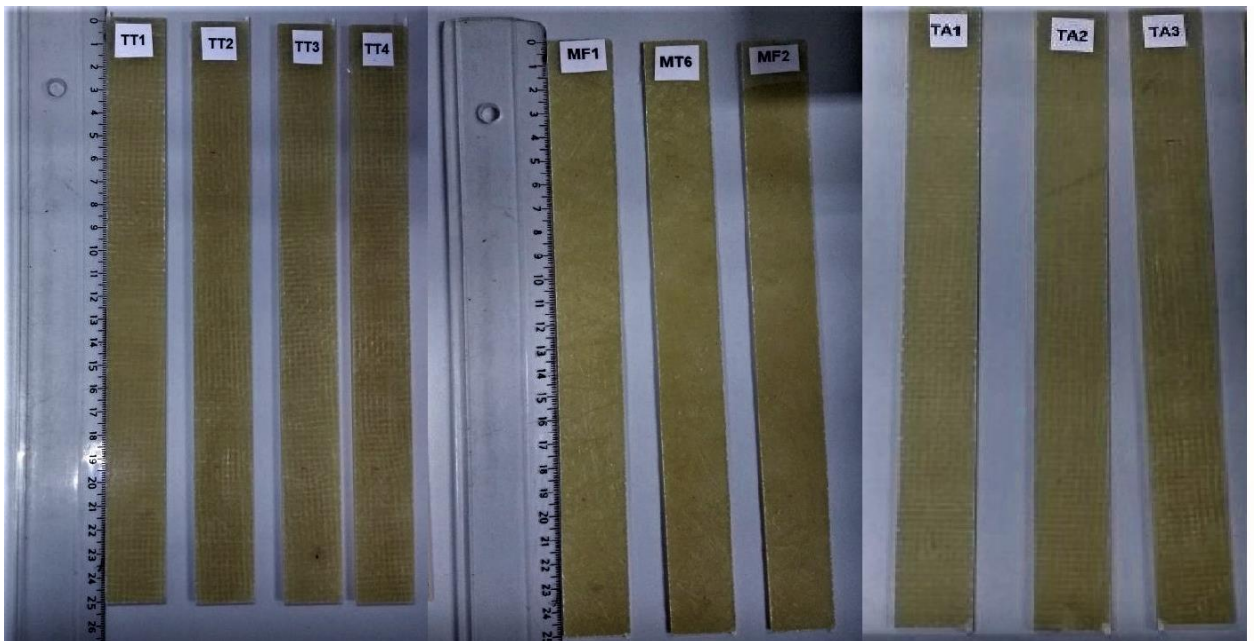
A partir da Figura 13 observa-se a superfície do laminado de (a) tecido/poliéster e (b) manta/poliéster, posteriormente ao desmolde. Pode ser analisado na Figura 14 alguns dos CPs de cada material após serem submetidos ao corte e etiquetados.

Figura 13 - Superfície dos laminados de (a) tecido/poliéster e (b) manta/poliéster após o desmolde.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 14 – CPs já submetidos ao corte a jato d'água e etiquetados.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

As amostras confeccionadas por manta/poliéster revelaram menores espessuras que as de tecido/poliéster, conseqüentemente menores áreas e menores massas. Esses efeitos possivelmente foram resultados da laminação manual, onde é muito difícil manter uma

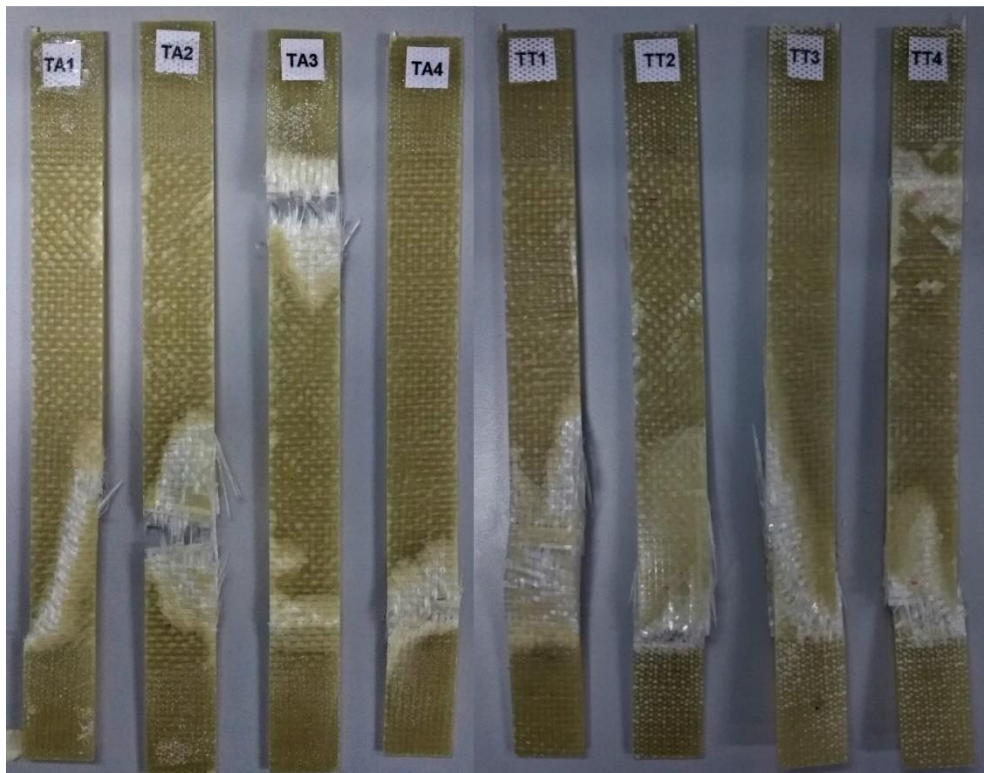
superfície homogênea por ser um trabalho artesanal e pelo fato do reforço manta possuir maior porosidade e absorver mais resina durante o processo de impregnação que o tecido.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram efetuados em seis amostras de manta/poliéster, em quatro de tecido/poliéster, sem uso de abas, e em quatro de tecido/poliéster, com utilização de abas, com a finalidade de obter respostas de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade. No Apêndice B encontram-se as curvas tensão-deformação provenientes dos ensaios de tração, sendo viável a interpretação do comportamento dos CPs.

Todos os espécimes testados sofreram deformidade e romperam-se, como pode ser visto na Figura 15, que apresenta os espécimes de tecido/poliéster com e sem uso de abas, e a Figura 16 que mostra as amostras de manta/poliéster, após a efetuação dos experimentos.

Figura 15 – CPs de tecido/poliéster após o ensaio de tração com e sem uso de abas.



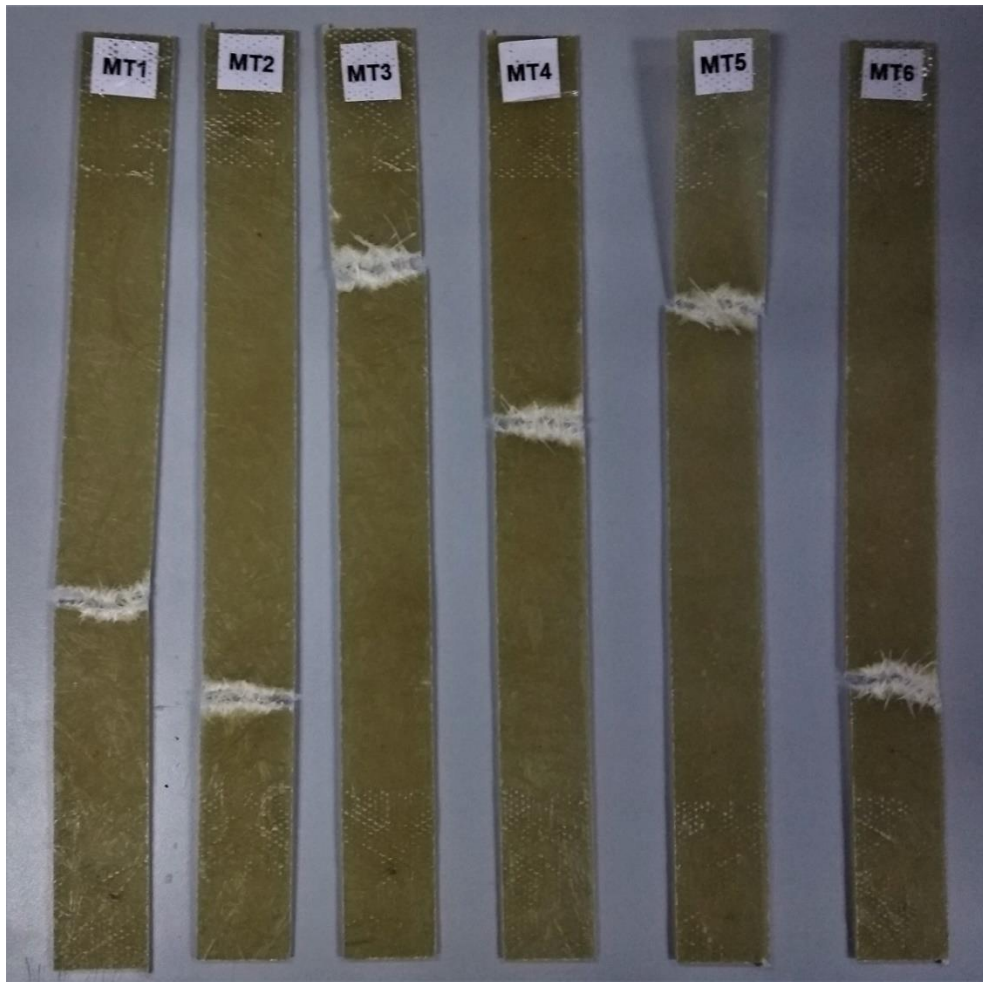
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Tanto as amostras de tecido, que foram testadas com o uso de abas, quanto as que foram testadas sem, romperam em regiões próximas às extremidades das garras da máquina,

como pode ser observado na Figura 15. Portanto, nesse caso, a utilização de abas não mostrou influência para esse tipo de fenômeno.

A Figura 16 exibe os espécimes com reforço em manta sucessivamente ao teste de tração, que ocorreu mais rapidamente, pois a manta é menos resistente que o tecido, acarretando em uma ruptura mais prévia.

Figura 16 – Amostras de manta/poliéster posteriormente ao ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os CPs de manta/poliéster romperam em regiões ligeiramente mais afastadas das extremidades que as de tecido/poliéster, como é visto na Figura 18, provavelmente pelo fato de apresentarem fios descontínuos, sem a causa de pré-tensionamento nas fibras.

Após os ensaios, calculou-se as propriedades mecânicas desejadas. Primeiro elaborou-se as médias, desvios padrão e Índices de Confiança (IC) dos E das amostras fabricadas com reforço de manta e de tecido, pela distribuição t de student com nível de confiança 95% e nível de significância (NS) 5%. A Tabela 1 aponta os valores alcançados.

Tabela 1 - Resultados da distribuição t de student para os módulos de elasticidade obtidos do ensaio de tração.

Reforço	Manta	Tecido com aba	Tecido sem aba
N. Amostras	6	4	4
E média [GPa]	6,35	10,76	10,36
Desvio Padrão [GPa]	0,23	1,01	0,74
Coefficiente t student	2,57	3,18	3,18
IC (95%) [GPa]	0,25	1,61	1,17
Limite Superior [GPa]	6,60	12,37	11,53
Limite Inferior [GPa]	6,10	9,15	9,19

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Como pode ser analisado na Tabela 1, assumindo um IC de 95%, as amostras que foram testadas com uso de abas apresentaram módulo de elasticidade semelhante das testadas sem abas, o que caracteriza o uso de abas pouco influente nos resultados de E.

As amostras de tecido, com e sem uso de abas, mostraram E maior em relação às de manta; esses resultados estão de acordo com o esperado, pois, segundo Nasseh (2007), manta é um tipo de reforço desfavorecido de resistência mecânica, pois as fibras são descontínuas e há baixo teor de vidro.

A Tabela 2 aponta valores obtidos para as tensões máximas provenientes do ensaio de tração para amostras de manta/poliéster e para as de tecido/poliéster, com e sem utilização, de abas.

Tabela 2 - Resultados da distribuição t de student para tensões máximas obtidas do ensaio de tração.

Reforço	Manta	Tecido com aba	Tecido sem aba
N. Amostras	6	4	4
Tensão máxima [MPa]	87,33	263,79	228,48
Desvio Padrão [MPa]	7,78	36,42	6,43
Coefficiente t student	2,57	3,18	3,18
IC (95%) [MPa]	8,16	57,96	10,24
Limite Superior [MPa]	95,49	321,75	238,72
Limite Inferior [MPa]	79,17	205,83	218,24

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os dados da Tabela 2 constataam que os espécimes testados com utilização de abas mostraram tensão máxima próxima às testadas sem abas, não revelando diferença significativa entre os resultados, entretanto, assumindo um IC de 95%, os valores se sobrepõe, possivelmente pelo número de amostras testadas em ambos os ensaios não ter sido o suficiente. As amostras de tecido, com e sem uso de abas, apresentaram tensão máxima mais elevada em relação às de manta, como previsto.

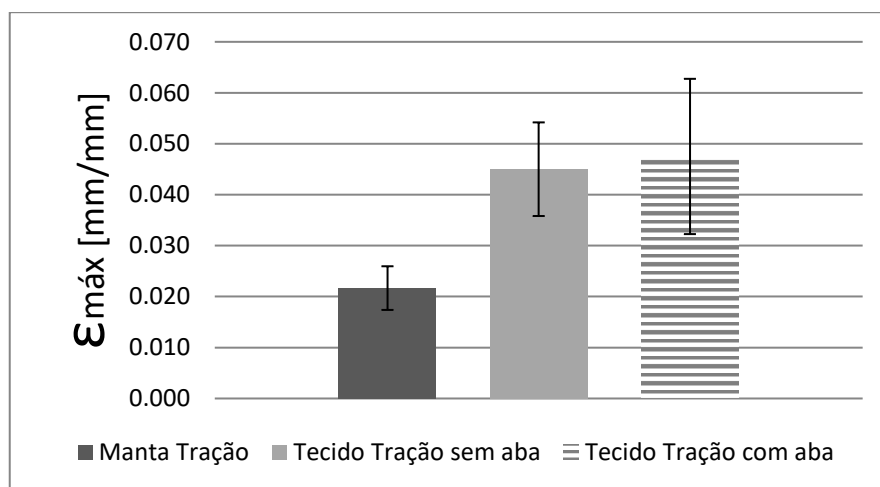
Na Tabela 3 e na Figura 17, observa-se respostas de deformação máxima que os espécimes, com reforços de manta e tecido, sofreram no ensaio de tração.

Tabela 3 - Resultados da distribuição t de student para deformações máximas obtidas do ensaio de tração.

Reforço	Manta	Tecido com aba	Tecido sem aba
N. Amostras	6	4	4
Deformação máxima [mm/mm]	0,022	0,048	0,045
Desvio Padrão [mm/mm]	0,004	0,006	0,010
Coefficiente t student	2,571	3,182	3,182
IC (95%) [mm/mm]	0,004	0,009	0,015
Limite Superior [mm/mm]	0,024	0,059	0,065
Limite Inferior [mm/mm]	0,016	0,041	0,035

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 17 – Comparação entre resultados de deformação máxima de CPs de manta e tecido com e sem uso de abas.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

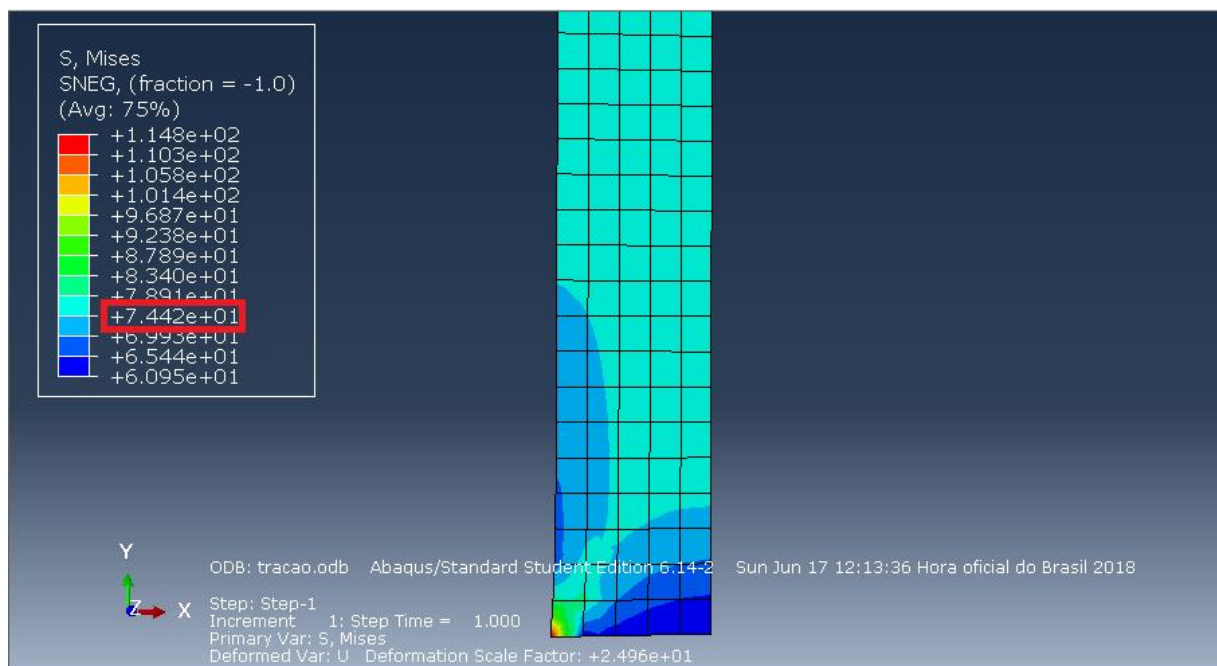
Segundo os registros da Tabela 3 e Figura 17, a deformação dos tecidos é maior que a da manta, pois as fibras contínuas suportam maiores níveis de tensão antes da ruptura, fazendo os CPs terem maior alongamento. Verificou-se também que os CPs testados com abas exibiram deformação máxima com valores próximos dos ensaiados sem abas. Portanto, a utilização de abas não resultou em diferenças significativas em relação aos valores de ε máx.

4.3 ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS

Visando apresentar o comportamento de falha de uma amostra sujeita à força trativa, foi realizada uma análise em elementos finitos em uma peça de mesma geometria e mesmo material que as fabricadas neste trabalho, de acordo com a norma ASTM D 3039 que caracteriza o ensaio de tração, por intermédio do software Abaqus.

A parte mais acima da peça modelada foi sujeita a força de tração de intensidade 2345,75 N, resultando em uma tensão de 75 MPa. A extremidade mais abaixo foi engastada, sendo restritos os movimentos nos três planos. A Figura 18 expõe o espécime em sua metade inferior e após ter sido executado o programa com os parâmetros de entrada.

Figura 18 – Peça modelada no Abaqus para análise do modo de falha em tração.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Através da legenda da Figura 18, pode-se verificar que há maior concentração de tensão na região junto ao engaste, onde todo o deslocamento transversal e longitudinal é restrito, consequentemente fazendo com que a amostra tenda a romper-se nessa parte.

Além do mais, se pode verificar que na região mais próxima ao centro da amostra é que se encontra a tensão nominal da mesma. Desse modo, nos ensaios práticos seria mais interessante se a amostra rompesse na região onde o registro de tensão nominal é expressivo, e não junto ao engaste, como ocorreu com a grande maioria dos CPs no ensaio de tração prático, como demonstrados anteriormente. Nesse caso, possivelmente, um espécime de maior área nas extremidades evidenciaria esse tipo de resposta (DOWLING, 2012).

4.4 ENSAIO DE FLEXÃO

Os testes de flexão foram executados em quatro amostras de tecido/poliéster e em seis de manta/poliéster, com o intuito de adquirir resultados de módulo de elasticidade, tensão máxima e deformação máxima. Porém, ao decorrer dos ensaios, as amostras não romperam, sendo viável apenas a obtenção dos valores de E.

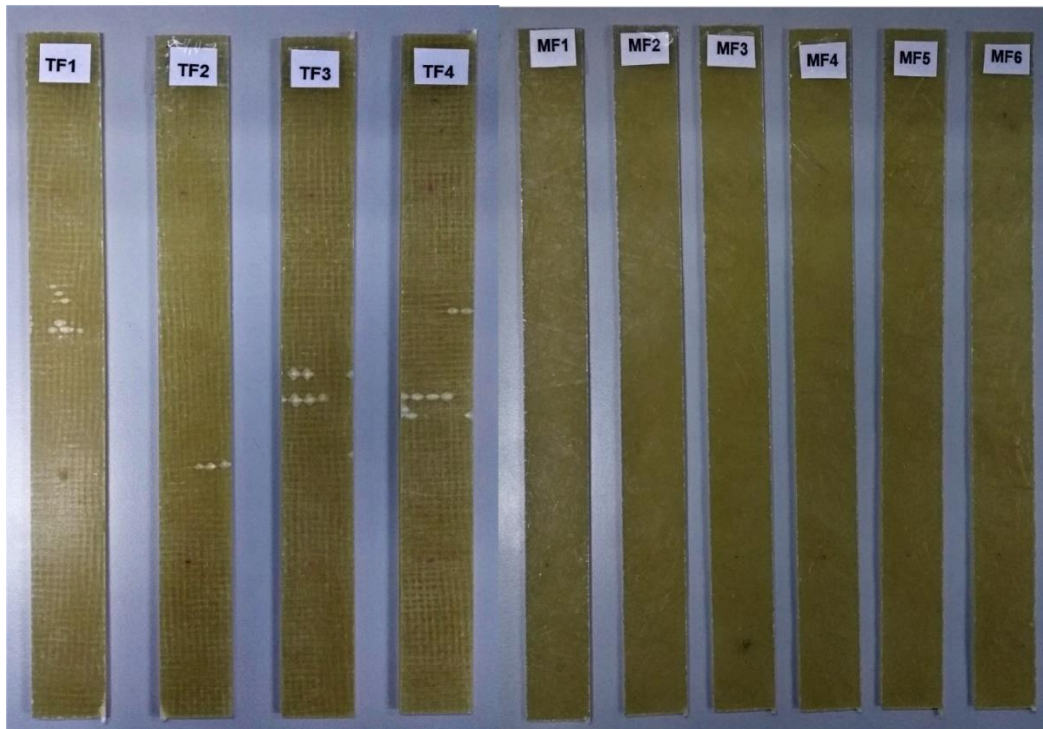
No Apêndice C, encontram-se as curvas de tensão–deformação dos ensaios de flexão para todas as amostras, sendo possível observar o comportamento dos espécimes durante os experimentos.

A Figura 19 caracteriza os CPs após a realização dos testes de flexão, onde pode ser verificado que as amostras sofreram maior deformação no centro, devido à deformação máxima executada na amostra ser nessa região, pois é onde a máquina aplica o deslocamento.

As deformações nas amostras de tecido/poliéster são mais nítidas do que nas de manta/poliéster, pois nessas as deformações se confundem com as fibras de vidro curtas.

Assim, foram calculadas as médias, desvios padrão e IC dos módulos de elasticidade das amostras fabricadas com reforço de manta e de tecido, pela distribuição t de student com nível de confiança de 95% e NS 5%. A Tabela 4 caracteriza os valores alcançados.

Figura 19 – CPs posteriormente aos ensaios de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Tabela 4 - Resultados da distribuição t de student para os módulos de elasticidade obtidos do ensaio de flexão.

Reforço	Manta	Tecido
N. Amostras	6	4
E média [GPa]	7,93	12,12
Desvio Padrão [GPa]	0,55	1,97
Coefficiente t student	2,57	3,18
IC (95%) [GPa]	0,58	3,13
Limite Superior [GPa]	8,51	15,25
Limite Inferior [GPa]	7,35	8,99

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A partir dos dados mostrados na Tabela 4 verifica-se que as amostras produzidas de tecido apresentaram módulo de elasticidade maior que as de manta, como o previsto e já referenciado nos ensaios de tração.

4.5 ENSAIO DE VIBRAÇÃO

O ensaio de vibração, efetuado em todos os CPs, foi o primeiro a ser realizado em consequência de sua característica não destrutiva e com a finalidade de obter o módulo de

elasticidade das amostras, para posterior comparação com resultados dos outros testes mecânicos.

Para obtenção de E foi preciso, primeiramente, determinar o fator de correção e frequência de ressonância em flexão de cada amostra e, junto às dimensões e massas das mesmas, que se encontram no Apêndice A, chegou-se aos resultados desejados, mostrados no Apêndice D.

Dessa forma, fez-se viável a elaboração das médias, desvios padrão e IC dos módulos de elasticidade das amostras fabricadas com reforço de manta e de tecido, pela distribuição t de student com nível de confiança 95% e NS 5%. A Tabela 5 caracteriza os valores alcançados.

Tabela 5 - Resultados da distribuição t de student para os módulos de elasticidade obtidos do ensaio de vibração.

Reforço	Manta	Tecido
Amostras	12	12
E média [GPa]	6,85	12,25
Desvio Padrão [GPa]	0,49	1,67
Coefficiente t student	2,20	2,20
IC (95%) [GPa]	0,31	1,06
Limite Superior [GPa]	7,16	13,31
Limite Inferior [GPa]	6,54	11,19

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A partir dos valores mostrados na Tabela 5, pode-se perceber que o valor do módulo de elasticidade para as amostras com reforço de tecido é maior que os de manta, como já previsto e justificado previamente.

4.6 MICROMECAÂNICA

Os cálculos embasados na análise micromecânica foram elaborados com o intuito de obter propriedades mecânicas de tensão máxima e módulo de elasticidade dos laminados.

Portanto, como foi explicitado na metodologia deste trabalho, primeiramente foi preciso dos valores das massas de reforço e matriz, para alcançar o volume específico de ambos e assim, chegar às respostas das propriedades mecânicas requeridas. A Tabela 6 indica todos os resultados para a placa de manta/poliéster e para a de tecido/poliéster.

Tabela 6 - Resultados da análise micromecânica para a placa laminada com reforço de manta e para a de tecido.

Reforço	Manta	Tecido
Massa reforço (g)	244,5	514
Massa matriz (g)	505,5	646
Massa placa (g)	750	1160
V_f	0,18	0,26
V_r	0,82	0,74
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	94,80	265,82
E [GPa]	10,20	20,02

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Conforme os dados exibidos na Tabela 6 verifica-se que a placa com reforço de tecido mostrou respostas de $\sigma_{m\acute{a}x}$ e E mais elevadas que a placa com reforço de manta, o que já era previsto.

A diferença entre as massas de reforço e matriz de um tipo de reforço para outro se deu pelo fato de o processo ser do tipo *hand lay up*, onde as quantidades de material usado são difíceis de serem medidas com alta precisão, por ser um trabalho totalmente artesanal, onde o reforço manta tende a ter porosidade mais elevada e absorver mais resina durante o processo produtivo que o tecido, justificando a diferença entre os teores de fibra e resina observados na Tabela 6.

4.7 COMPARAÇÕES DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Neste tópico são apresentadas as comparações efetuadas entre propriedades mecânicas obtidas de cada ensaio (vibração, flexão e tração), assim como da micromecânica. Através de gráficos de colunas, com Índices de Confiança de 95% mostrados nos tópicos anteriores, é possível observar as diferenças e semelhanças encontradas.

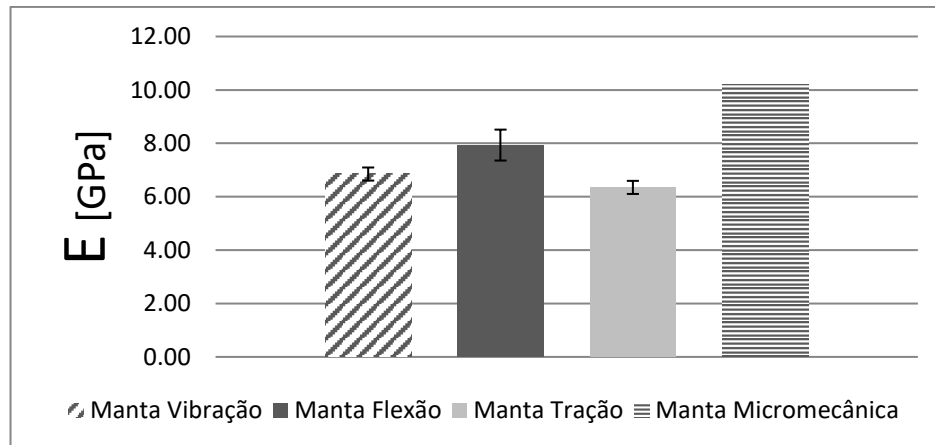
4.7.1 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que relaciona deformação com uma carga ou força aplicada e que determina a rigidez de um determinado material de engenharia (CALLISTER, 2008).

Entretanto, a seguir são mostrados e comparados resultados dos testes de vibração, flexão, tração e da micromecânica, para os dois tipos de reforços utilizados para elaboração

deste trabalho, por intermédio da Figura 20, que expõe os resultados dos reforços de manta, e da Figura 21 que apresenta respostas dos reforços de tecido.

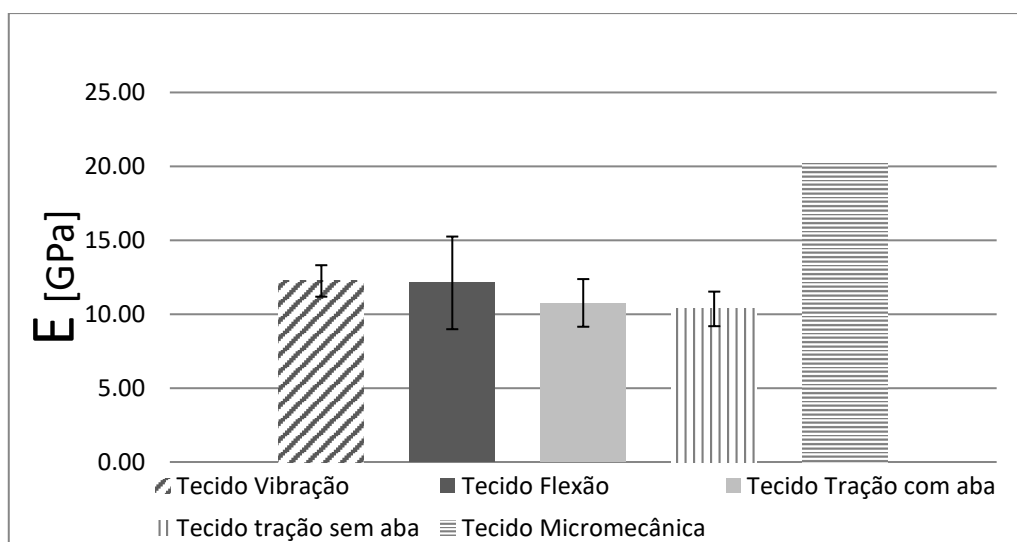
Figura 20 - Resultados dos *módulos de elasticidade* provenientes dos ensaios mecânicos e da micromecânica para as amostras fabricadas de manta/poliéster.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Consoante a Figura 20, as amostras de manta/poliéster nos ensaios de vibração, flexão e tração alcançaram resultados muito parecidos, somente a resposta da análise micromecânica ficou bastante superior aos ensaios práticos.

Figura 21 - Resultados dos módulos de elasticidade provenientes dos ensaios mecânicos e da micromecânica para as amostras fabricadas de tecido/poliéster.

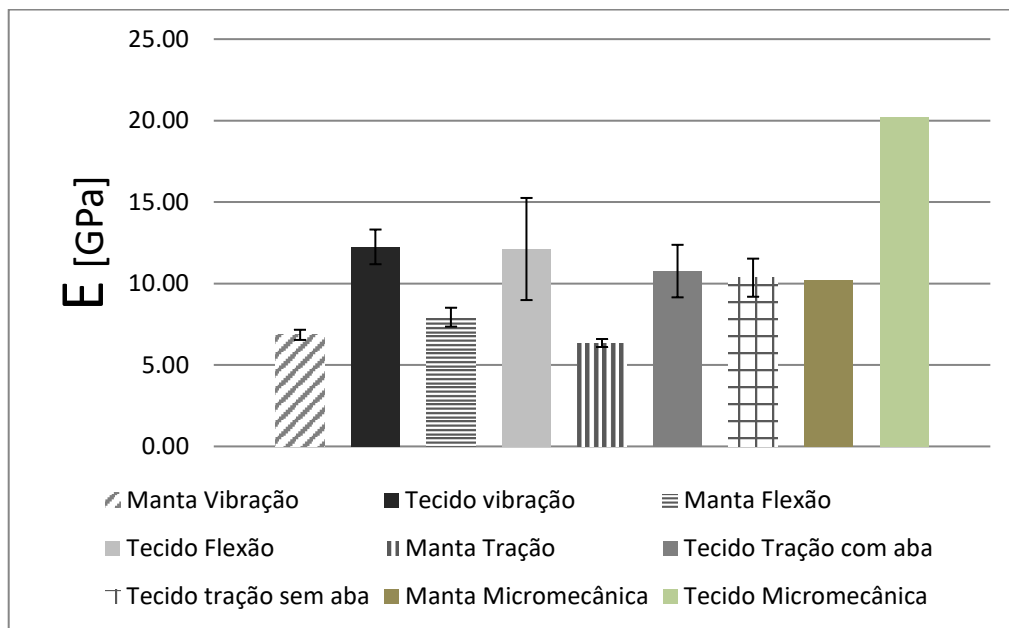


Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Verifica-se na Figura 21 que CPs de tecido/poliéster não houve diferença expressiva entre o ensaio de vibração e flexão; já os ensaios de tração, com e sem uso de abas, apontaram desigualdades levemente mais consideráveis quando comparados aos outros dois testes.

A Figura 22 exhibe as respostas tanto dos espécimes de manta/poliéster quanto de tecido/poliéster num mesmo gráfico, para uma comparação mais global.

Figura 22 - Resultados dos *módulos de elasticidade* provenientes dos ensaios mecânicos e da micromecânica para as amostras fabricadas de tecido/poliéster e manta/poliéster.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Por intermédio das figuras apresentadas neste tópico, foi verificado que para os dois tipos de reforços, os valores obtidos dos testes experimentais foram muito semelhantes e, como esperado, as respostas para os reforços de tecido foram superiores aos de manta, em virtude da presença dos fios contínuos.

Observou-se que, para ambos os reforços, houve uma tendência dos resultados do ensaio de flexão serem maiores que os de tração. Essa desigualdade pode ter ocorrido em consequência da forma de aplicação de cargas não ser unicamente em um sentido no teste de flexão, diferencialmente do ensaio de tração. Assim, em um estado de aplicação de cargas triaxial a resposta do material é distinta quando comparada a um estado uniaxial, onde a configuração do laminado tende a resistir maiores cargas com o mesmo nível de deformação, resultando em um maior E.

Os resultados da micromecânica ficaram bastante superiores aos medidos para ambos os reforços, fato que ocorreu em consequência de que um dos fatores principais na micromecânica é a seleção das propriedades de cada constituinte e, nesse caso, foi adotado um valor de 70 GPa para a fibra de vidro, conforme referência, e provavelmente o E da fibra utilizada neste trabalho é inferior ao adotado nos cálculos de micromecânica.

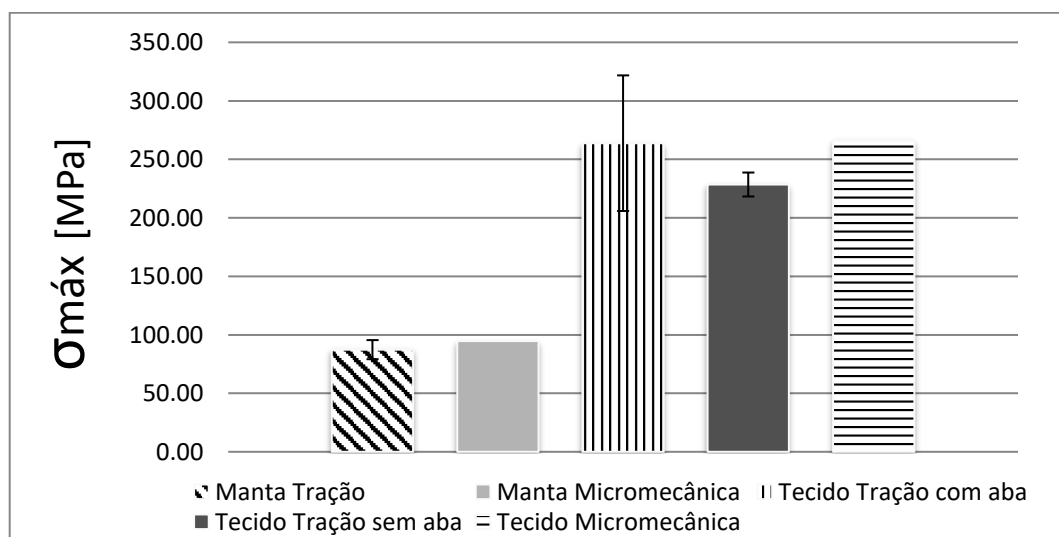
Além disso, constatou-se que os espécimes com reforço em manta demonstraram menores IC em todos os ensaios práticos, ao contrário dos CPs em tecido, evidenciando que seus resultados alcançados foram mais precisos que os de fios contínuos, demonstrando que, supostamente, existem imprecisões dos resultados de tração em reforços com tecido.

4.7.2 Tensão máxima

Tensão máxima, ou tensão de ruptura, é a máxima tensão que um CP suporta logo antes de romper-se (HIBBELER, 2004). Dessa forma, como nos ensaios práticos efetuados para a execução deste trabalho, somente as amostras submetidas ao ensaio de tração romperam-se, foi possível alcançar resultados de tensão máxima apenas desse teste prático.

A partir do estudo da micromecânica, também foi viável a obtenção dos valores dessa propriedade para os dois tipos diferentes de reforços. A Figura 25 mostra os valores de $\sigma_{m\acute{a}x}$ para as amostras com reforço de manta e também para as de tecido, oriundos dos experimentos práticos e da análise micromecânica.

Figura 23 – Resultados de *tensão máxima* provenientes dos testes de tração e da micromecânica para amostras de manta/poliéster e tecido/poliéster.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Por meio da Figura 23, constata-se que os espécimes fabricados com reforço de tecido apresentaram valores de $\sigma_{m\acute{a}x}$ superiores aos com reforço de manta em ambos os tipos de análise, conforme esperado e já apresentado. Com o IC assumido, as barras, para as amostras com uso de abas no ensaio de tração, se sobrepuseram supostamente pelo tamanho da população testada.

Observa-se na Figura 23, que as aproximações da micromecânica estão muito próximas do ensaio prático, tanto para as amostras com reforço de tecido, quanto para de manta. Isso porque os dados de entrada de tensão máxima da fibra de vidro e da resina devem estar próximos dos dados reais dos constituintes utilizados nesse estudo embasado na Lei das Misturas.

4.8 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Neste tópico são expostas considerações sobre cada metodologia empregada para a realização deste trabalho, explicitando o que cada método conseguiu gerar de informações e quais as vantagens e desvantagens de cada um.

4.8.1 Confeção dos CPs

O método de laminação manual concebeu superfícies não homogêneas, onde foi muito difícil manter a espessura requerida pela norma (2,5 mm), e apresentou considerável número de bolhas em algumas regiões do laminado.

Essas características resultantes podem afetar nas respostas dos testes práticos, pois amostras tendem a romper onde sua espessura é consideravelmente menor e onde há maior quantidade de bolhas.

Quando comparado a outros tipos de métodos mais complexos, a laminação manual exhibe menor eficiência, resistência, velocidade de construção e consistência. E a qualidade do laminado depende da aptidão do laminador. Porém, é um método simples, com baixo custo de ferramental e necessita de pouca tecnologia empregada (NASSEH, 2008).

4.8.2 Ensaios mecânicos

Os ensaios de tração efetuados nos CPs geraram informações necessárias para obtenção das propriedades mecânicas desejadas: tensão de ruptura, deformação máxima e

módulo de elasticidade. A utilização de abas neste trabalho não demonstrou diferença em termos de resultados obtidos assim, alternativas podem ser investigadas.

A vantagem desse teste é de ser rápido, com pouca necessidade de parâmetros de entrada e onde o operador consegue obter os resultados por intermédio de um computador, facilitando o procedimento.

A desvantagem é que pode haver concentração de tensão nas extremidades das amostras que ficam fixas nas garras da máquina de ensaio, podendo haver uma tendência do rompimento dos CPs nessa região, acarretando em respostas imprecisas. Outra desvantagem é que ao se aplicar esse teste em amostras fabricadas em fibra de vidro, há muita sujeira que resulta após a ruptura dos CPs.

A análise em elementos finitos gerou informações sobre o modo de falha em tração das amostras, podendo justificar o porquê dos espécimes romperem próximo à região das garras da máquina nos testes práticos de tração. A vantagem deste método é sua fácil implementação de geometrias complexas, carregamentos, restrições de movimentos, entre outros; gerando respostas com elevados valores agregados.

Neste trabalho, a desvantagem encontrada nesse método, foi que não foi possível obter o módulo de elasticidade proveniente da análise feita em cima da peça modelada e submetida a esforços trativos, devido ao fato do módulo de elasticidade ser um parâmetro de entrada para obtenção das respostas finais.

Os ensaios de flexão elaborados originaram respostas apenas do módulo de elasticidade dos espécimes testados. A vantagem é ser um método de teste de fácil manuseio para o operador, onde o mesmo consegue retirar os resultados dos ensaios a partir de um computador, como no ensaio de tração. No presente trabalho, a desvantagem desse ensaio foi de que as amostras não romperam, portanto não se pôde obter as tensões máximas e deformações máximas para posterior comparação dos resultados com os outros métodos de testes. Além disso, a forma de aplicação de carga não é uniaxial, tornando a análise do modo de falha um pouco mais complexa.

Os ensaios de vibração, efetuados em todas as amostras fabricadas, geraram respostas do E de cada CP. A vantagem é ser um método não destrutivo e de fácil e rápida execução. A desvantagem é que se houverem ruídos no ambiente, as respostas podem conter imprecisões, pois é utilizado um microfone para medição da vibração das amostras. Apesar disso, todos os resultados alcançados neste trabalho, via vibração, foram similares aos ensaios de tração e flexão.

A análise micromecânica efetuada neste trabalho reproduziu valores de tensão máxima e módulo de elasticidade para os laminados de manta/poliéster e para os de tecido/poliéster. A vantagem é ser um método de cálculo manual, rápido e acessível a qualquer pessoa que deseja obter respostas de propriedades mecânicas de materiais compósitos a partir da Lei das Misturas. E a desvantagem é conter algumas aproximações que podem acarretar em resultados incertos.

Neste trabalho, a desvantagem encontrada no método da micromecânica foi de que, como não era conhecido o valor exato do módulo de elasticidade da fibra usada, recorreu-se à literatura para um valor aproximado desse parâmetro, o que acarretou em um resultado muito elevado do E dos resultados das análises micromecânicas quando comparadas aos outros ensaios efetuados, comprovando que o valor de E utilizado não era compatível ao valor real.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se uma caracterização mecânica de materiais compósitos utilizados na indústria náutica por intermédio da comparação de propriedades mecânicas de amostras submetidas a ensaios de tração, flexão e vibração, assim como cálculos de acordo com a micromecânica. Também foi realizada análise do modo de falha em tração com base em elementos finitos.

Dessa forma, foram fabricadas duas chapas de material compósito através do processo de laminação manual, no qual uma delas foi laminada com reforço em manta, outra em tecido e ambas com matriz em resina de poliéster. Por meio de corte a jato d'água, foram obtidas amostras com dimensões de largura e comprimento estabelecidas por norma.

O ensaio de tração foi feito embasado na norma ASTM D 3039, onde os CPs de tecido foram testados com e sem uso de abas, para verificar se o uso dessas acarretaria em respostas distintas, podendo evitar pré tensionamentos das fibras contínuas. Amostras com reforço em manta também foram submetidas a ensaio de tração sem utilização de abas, já que essas dispõem de fios curtos e descontínuos.

Nas amostras de tecido testadas com abas, era esperado que fossem alcançados valores diferentes das ensaiadas sem uso, só que não houve diferenças significativas, não podendo comprovar, por esse método, que existem imprecisões nos resultados nos testes de tração efetuados em fibras contínuas.

Os CPs com reforço em tecido subordinados ao teste de tração romperam em regiões muito próximas às extremidades da garra da máquina, já as amostras em manta romperam ligeiramente mais afastadas dessa região. Para entender esse comportamento, foi feito um estudo baseado em elementos finitos que caracterizou esse modo de falha.

Pelo método de elementos finitos foi então efetuada uma representação do modo de falha em tração de uma peça modelada com geometrias de acordo com especificações da norma ASTM D 3039. A peça foi sujeitada a forças concentradas em uma extremidade, e em outra foi engastada. Ao observar os dados obtidos do programa, houve concentração de tensão na região próxima ao engaste, diferentemente do centro da amostra onde a tensão nominal era evidente. Segundo Dowling (2012), se o CP possuísse uma maior área nas

extremidades, seria possível encontrar respostas de tensões máximas diferentes e mais precisas, mais perto do centro da amostra, evitando concentração de tensão nas extremidades.

Para a elaboração do ensaio de flexão se utilizou a norma ASTM D 6272-17 como parâmetro, onde o teste é feito em quatro pontos. Como as amostras não romperam durante o experimento, foi viável apenas a obtenção do E das amostras testadas. Quando comparados ao ensaio de tração, os espécimes com reforço em manta e em tecido mostraram E levemente distintos em ambos os ensaios. Essa diferença de resultados pode ser atrelada a forma de aplicação de carga, onde no ensaio de flexão há uma distribuição triaxial de tensões e no ensaio de tração a distribuição é uniaxial.

O ensaio de vibração foi efetuado em todos os espécimes confeccionados e de acordo com a norma ASTM E 1876-01, gerando respostas do módulo de elasticidade, como esperado. No momento em que seus resultados foram comparados ao teste de flexão e tração, tanto os CPs com reforço em manta quanto os em tecidos exibiram respostas muito próximas.

Análise micromecânica dos laminados foi realizada de acordo com a Lei das Misturas, alcançando respostas do E e tensão máxima dos laminados com reforço em manta e em tecido. Os resultados dos E foram confrontados com de todos os experimentos práticos, onde a repercussão da micromecânica foi muito mais elevada que as dos outros, pelo possível fato de que o parâmetro de entrada foi mais expressivo do que realmente é. Já os resultados da tensão máxima, quando comparados aos do ensaio de tração, ficaram bastante próximos para ambos os reforços, o que representa que o parâmetro de entrada foi similar ao real.

Em todos os ensaios práticos e pela micromecânica, as amostras com reforço em manta resultaram em menores respostas que as reforçadas com tecido. Esse fato era esperado devido a manta ser um material de baixa resistência mecânica e por não apresentar fios contínuos, como explicado por Nasseh (2008). Os CPs reforçados em manta também exibiram menor IC que os em tecido, em todos os testes práticos, evidenciando que seus resultados alcançados foram menos dispersos que os de fios contínuos, onde possivelmente, devido aos fatos apresentados ao decorrer deste tópico, existem possíveis imprecisões dos resultados de tração em reforços com tecido.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se:

- ✓ Fabricar amostras por um melhor processo de fabricação resultando em espessuras mais precisas, como previsto por norma, e menor quantidade de bolhas no laminado;
- ✓ Submeter a ensaio de tração e flexão maior número de CPs com reforço em tecido, para possível alcance de respostas mais exatas;

- ✓ Realizar ensaio de tração em amostras com maiores áreas nas extremidades para evitar concentração de tensão nessa região, fazendo com que ela rompa em uma área mais próxima ao centro;
- ✓ Repetir os ensaios de flexão, de modo que as amostras se rompam, para obtenção dos valores de tensão e deformação máximas para confrontá-los com os resultados do ensaio de tração.

REFERÊNCIAS

- AL-QURESHI, H. A. **Materiais compostos: análises e fabricação**. Florianópolis: UFSC/CEM, 2010. P. 469.
- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Érica Ltda, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3039**: Standard Test Method for Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken: Astm International, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 6272-17**: Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending. West Conshohocken: Astm International, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 790-17**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken: Astm International, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 1876-01**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken: Astm International, 2006.
- ASKELAND, D. R. **Ciência e engenharia de materiais**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- BITTENCOURT, A. P. P. **Estudo comparativo de processos de obtenção de compósitos fibra de vidro/poliéster**. 2015. 68 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.
- CALLISTER J. W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CARPINTERI, A. et al. Probabilistic failure assessment of Fibreglass composites. **Composite structures**. Porto, Portugal, v. 160, p. 1163-1170, jan. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316319559>>. Acesso em: 28 mar. 2018.
- CASARIL, A. **Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas**. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade federal de santa Catarina, 2004.
- CHAUDHARY, S. K.; SINGH, K. K.; VENUGOPAL, R.. Experimental and numerical analysis of flexural test of unfilled glass fiber reinforced polymer composite laminate. **Materials Today: proceedings**. Ongole, Andhra Pradesh, p. 184-192. out. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 08 maio 2018.

- CHAWLA, K. K. **Composite materials: science and engineering**. 3. ed. New York: Springer, 2012.
- CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF, N. P. **Fiberglass reinforced plastics**. New Jersey: Noyes Publications, 1995.
- DOWLING, N. E. **Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue**. 4. ed. Boston: Pearson, 2012.
- ALVES FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Érica Ltda, 2000.
- FIORENTIN, T. A. **Estudo de geração de ruído em reatores de núcleo de ar**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- GALVÃO, L. F. B. **A influência do processo de cura nas propriedades do compósito estrutural carbono/epóxi fabricado via VARTM: processamento e caracterização**. 2012. 95 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2012.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- GREENE, E. **Marine composites**. Annapolis, Maryland 21403: Eric Greene Associates, Inc., 1999.
- HIBBELER, R.C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2004.
- HULL, D.; CLYNE, T. W. **An introduction to composite materials**. New York: Cambridge University Press, 1996.
- KRETSIS, G. **A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of hybrid fibre-reinforced plastics**. Dissertação. Imperial College of Science and Technology. United Kingdom, 1987.
- LIMA, S. D. C. **Propriedades mecânicas I: fundamentos**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, Departamento de Ciência e Tecnologia, Exército Brasileiro, 2011.
- LOGAN, D. L. **A First Course in the Finite Element Method**. 5. ed. USA: Cengage Learning, 2012.
- MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos**. 1. ed. Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 3294 São Paulo: Artliber, 2011. v. 1.
- MATHES, Volker. The Composites Industry: plenty of opportunities in heterogeneous market. **Reinforced Plastics**, Oxford, United Kingdom, v. 62, n. 1, p.44-51, jan./fev. 2018. Disponível em: <<https://www.journals.elsevier.com/reinforced-plastics/>>. Acesso em: 26 mar. 2018.
- MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing: materials, product and process engineering**. Florida: CRC Press Ltd., 2002.

- MEHNDIRATTA, Akhil et al. Experimental investigation of span length for flexural test of fiber reinforced polymer composite laminates. **Jmr&t: Journal of Materials Reserch and Technology**. India, p. 89-95. 3 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 08 maio 2018.
- NASSEH, J. **Barcos: Métodos avançados de construção em composites**. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2007.
- NASSEH, J. **Técnica e prática de laminação em composites**. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2008.
- NANDARAGI S. R.; REGGY B.; NARAYANA K. B. Fabrication, testing and evaluation of mechanical properties of woven glass fibre composite material. **Materials today: proceedings**. India, p. 2429-2434. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- NEITHALATH, N. Damage assessment in celulose-cement composites using dynamics mechanical characteristics. **Cement & Concrete Composites**. New York, p. 658-667 fev. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 11 maio 2018.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2006.
- RAO, S. S. **Mechanical vibrations**. 5. ed. Miami: Pearson, 2011.
- ROTHBARTH, G. V. W. **Influência do ângulo de chanfro nos reparos em PRFV**. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- SHENOI, R. A.; WELLICOME, J. F. **Composite materials in marine structures: fundamental aspects**. v. 1. New York: Cambridge University Press, 1993.
- SPIGOSSO, I. B. **Estudo da pós-cura no aprimoramento das características mecânicas de compósitos**. 2017. 61 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2017.

APÊNDICE A – MEDIDAS DOS CPs

Tabela 7 – Valores das espessuras de cada amostra.

Amostras	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Média espessura (mm)
MT1	2,43	2,15	2,12	2,23
MT2	2,25	2,66	2,5	2,47
MT3	2,33	2,42	2,47	2,41
MT4	2,85	2,37	2,13	2,45
MT5	2,07	2,29	2,55	2,30
MT6	2,03	2,53	2,67	2,41
MF1	1,98	2,08	2,25	2,10
MF2	2,16	2,43	2,52	2,37
MF3	2,35	2,52	2,44	2,44
MF4	2,43	2,45	2,3	2,39
MF5	2,42	2,52	2,37	2,44
MF6	2,04	2,09	2,90	2,34
TT1	3,12	3,37	3,17	3,22
TT2	3,1	3,05	2,95	3,03
TT3	2,77	2,81	3,03	2,87
TT4	3,22	3,4	3,17	3,26
TA1	2,33	2,51	2,6	2,48
TA2	2,35	2,51	2,75	2,54
TA3	2,4	2,51	2,97	2,63
TA4	2,95	2,96	2,97	2,96
TF1	3,16	3,04	2,54	2,91
TF2	3,25	2,99	2,71	2,98
TF3	3,55	3,16	3,17	3,29
TF4	3,03	3,06	3,07	3,05

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Tabela 8 – Valores obtidos da medição das larguras dos espécimes.

Amostras	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Média Largura (mm)
MT1	25,15	25,15	25,10	25,13
MT2	25,16	25,21	25,29	25,22
MT3	25,33	25,23	25,26	25,27
MT4	25,21	25,20	25,23	25,21
MT5	25,1	25,11	25,15	25,12
MT6	25,09	25,24	25,17	25,17
MF1	25,03	25,16	25,14	25,11
MF2	25,08	25,15	25,2	25,14
MF3	25,17	25,20	25,19	25,19
MF4	25,16	25,15	25,20	25,17
MF5	25,21	25,19	25,20	25,20
MF6	25,32	25,30	25,31	25,31
TT1	25,34	25,21	25,20	25,25
TT2	25,24	25,25	25,22	25,24
TT3	25,15	25,20	25,22	25,19
TT4	25,29	25,24	25,25	25,26
TA1	25,21	25,24	25,29	25,25
TA2	25,18	25,21	25,28	25,22
TA3	25,16	25,27	25,23	25,22
TA4	25,23	25,20	25,18	25,20
TF1	25,19	25,23	25,22	25,21
TF2	25,24	25,29	25,35	25,29
TF3	25,43	25,43	25,40	25,42
TF4	25,24	25,19	25,21	25,21

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

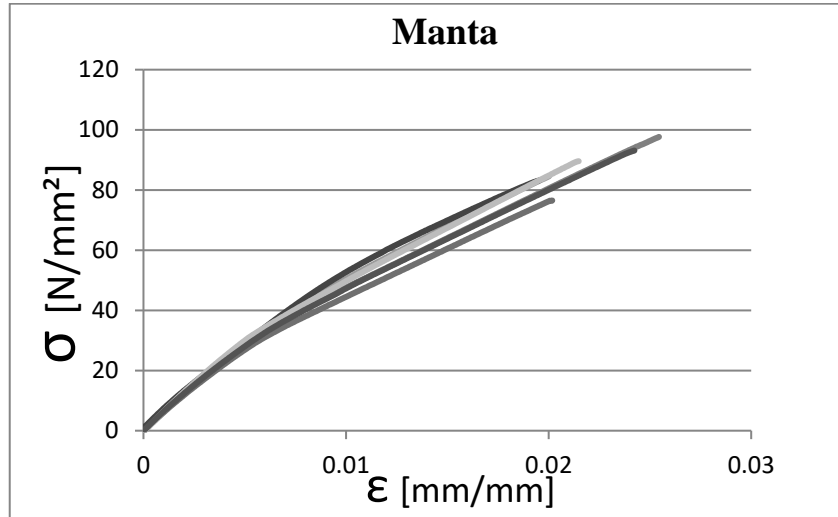
Tabela 9 – Área da seção transversal e massa de cada CP.

Amostras	Área seção transversal (mm²)	Massa (g)
MT1	56,13	18,68
MT2	62,29	19,88
MT3	60,82	19,61
MT4	61,77	19,10
MT5	57,86	18,87
MT6	60,65	19,10
MF1	52,81	17,13
MF2	59,59	18,96
MF3	61,37	19,72
MF4	60,24	18,93
MF5	61,40	19,42
MF6	59,31	18,79
TT1	81,31	30,44
TT2	76,55	28,78
TT3	72,30	26,58
TT4	82,43	30,00
TA1	62,61	25,00
TA2	63,98	25,75
TA3	66,24	25,99
TA4	74,60	28,23
TF1	73,45	28,23
TF2	75,46	28,13
TF3	83,72	28,38
TF4	76,98	29,58

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

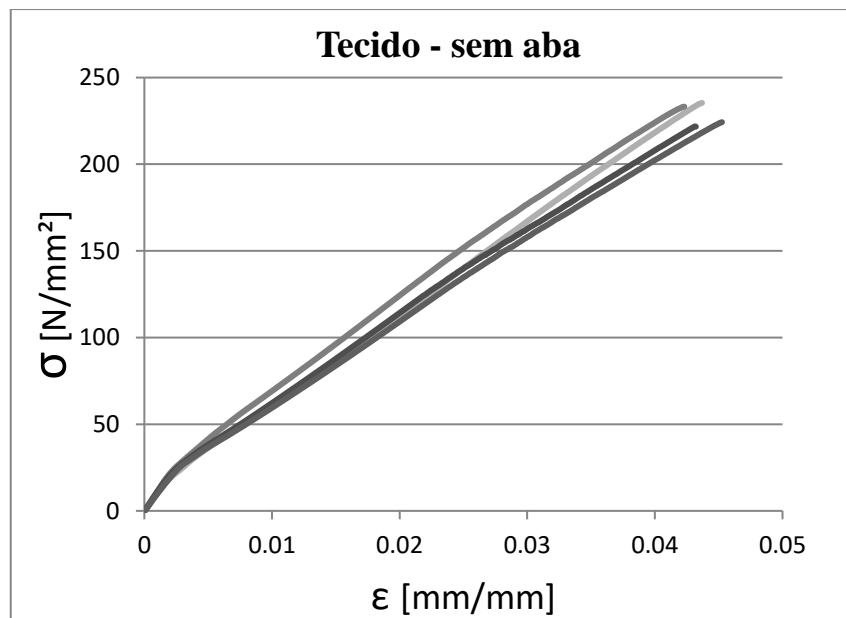
APÊNDICE B – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Figura 24 – Gráfico *tensão-deformação* de CPs, com reforço em manta, submetidos a ensaio de tração.



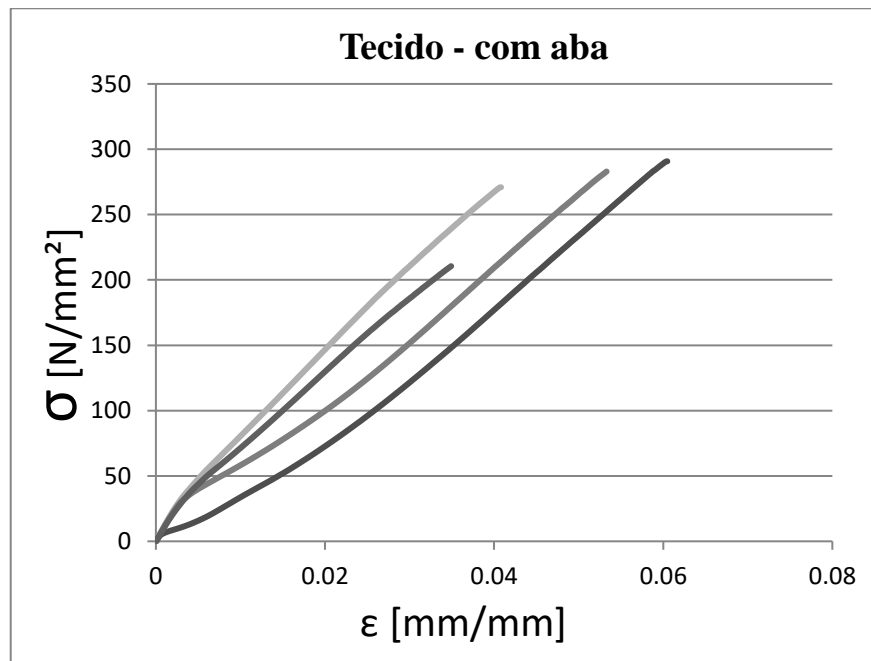
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 25 – Gráfico *tensão-deformação* de CPs com reforço em tecido submetidos a ensaio de tração *sem uso de abas*.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

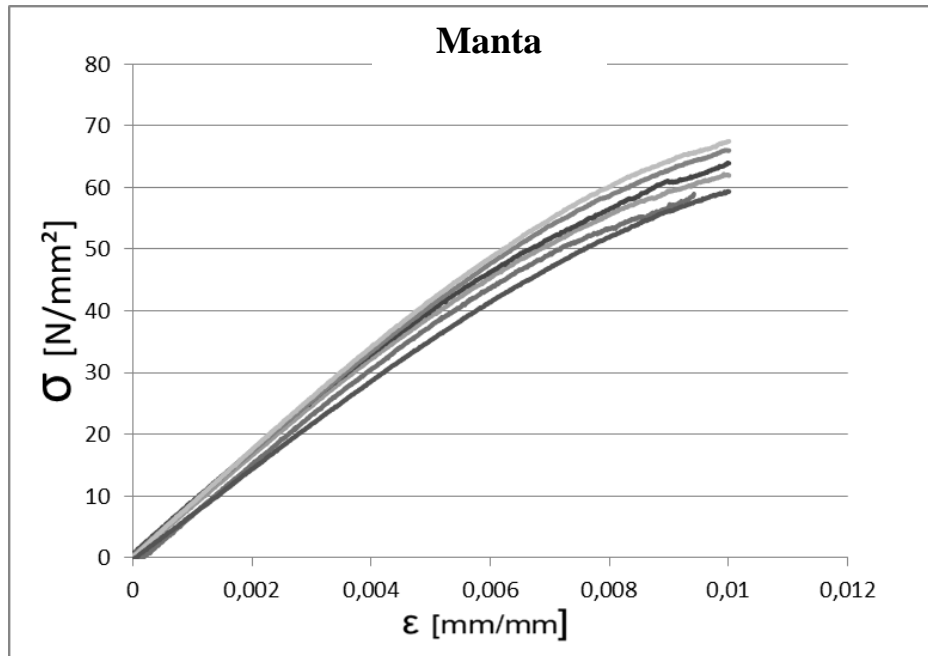
Figura 26 – Gráfico *tensão-deformação* de CPs com reforço em tecido submetidos a ensaio de tração *com uso de abas*.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

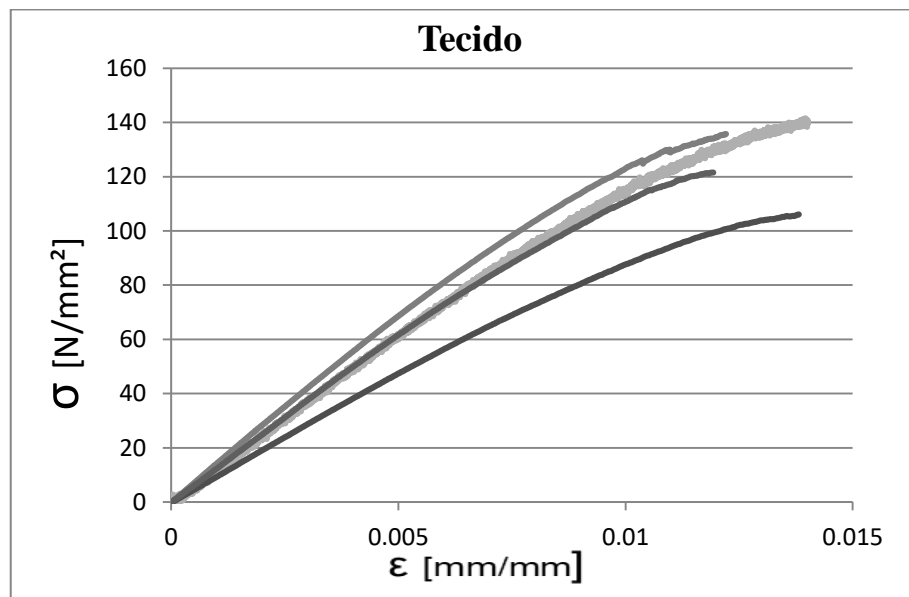
APÊNDICE C – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO ENSAIO DE FLEXÃO

Figura 27 – Gráfico *tensão-deformação* de CPs com reforço em *manta* submetidos a ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 28 – Gráfico *tensão-deformação* de CPs com reforço em tecido submetidos a ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

APÊNDICE D – RESULTADOS ENSAIOS DE VIBRAÇÃO

Tabela 10 – Resultados das variáveis para obtenção do E nos ensaios de vibração.

Amostras	T1	f_f (Hz)	E (GPa)
MT1	1,00	80,57	6,41
MT2	1,00	92,77	6,66
MT3	1,00	95,21	7,47
MT4	1,00	92,77	6,56
MT5	1,00	87,89	7,03
MT6	1,00	85,45	5,86
MF1	1,00	78,13	6,62
MF2	1,00	90,33	6,84
MF3	1,00	97,66	7,64
MF4	1,00	95,21	7,36
MF5	1,00	92,77	6,78
MF6	1,00	90,33	6,97
TT1	1,00	153,81	12,64
TT2	1,00	136,72	11,30
TT3	1,00	131,84	11,48
TT4	1,00	156,25	12,35
TA1	1,00	126,95	15,48
TA2	1,00	119,63	13,24
TA3	1,00	122,07	12,54
TA4	1,00	139,16	12,38
TF1	1,00	139,16	12,98
TF2	1,00	134,28	11,18
TF3	1,00	134,28	8,34
TF4	1,00	146,48	13,08

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

