



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITO VIGA-SANDUÍCHE PARA CONSTRUÇÃO DE EMBARCAÇÕES EM ESCALA

Darley de Aguiar Nogueira

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Materiais

Orientadores:

Célio Albano da Costa Neto

Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Rio de Janeiro
Dezembro de 2020

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITO VIGA-SANDUÍCHE PARA
CONSTRUÇÃO DE EMBARCAÇÕES EM ESCALA

Darley de Aguiar Nogueira

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA DE MATERIAIS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE MATERIAIS.

Examinado por:



Prof. Célio Albano da Costa Neto, Ph.D.



Prof. Paulo de Tarso Themistocles Esperança, D. Sc.



Prof. Hector Guillermo Kotik, Dr-Ing.



Prof. Luis Volnei Sudati Sagrilo, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO de 2020

de Aguiar Nogueira, Darley

Propriedades mecânicas de compósito viga-sanduiche para construção de embarcações em escala/ Darley de Aguiar Nogueira. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2020.

XII, 50 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Célio Albano da Costa Neto

Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Materiais, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 49 – 50.

1. Compósitos. 2. Propriedades Mecânicas. 3. Embarcações em Escala. I. Albano da Costa Neto, Célio. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Materiais. III. Título.

*Dedico este trabalho a minha irmã
Thais, minha única família.*

Agradecimentos

Uma lista completa de pessoas que permitiram e me ajudaram chegar até ao fim de mais uma conquista pessoal não seria possível sem o consumo de inúmeras páginas e dessa forma posso omitir pessoas responsáveis direta ou indiretamente para a conclusão deste, mas tentarei deixá-la minimamente justa.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Centro Federal de educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), ambiente no qual tive o primeiro passo na minha formação profissional e tive contato com a engenharia de materiais através de dois excelentes professores, José Cláudio Teixeira e Marcus Vinícius.

Este trabalho não seria possível sem o apoio e incentivo profissional do Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano), local onde comecei a trabalhar com engenharia e pesquisa. Agradeço a todos os funcionários do setor de infra-estrutura pela motivação em superar as dificuldades, todos do setor de mecânica/modelo, em especial ao Flávio Antunes Maia pelo exemplo de funcionário público e dedicação à UFRJ/COPPE ajudando diretamente na conclusão desse projeto. Não poderia deixar de fora o professor Paulo de Tarso Themistocles Esperança por reconhecer minha capacidade técnica antes mesmo da obtenção do diploma em engenharia. E todos os outros profissionais do laboratório pelos momentos sérios e alegres dentro e fora do ambiente de trabalho.

Agradeço diretamente ao professor Célio Albano da Costa Neto por ouvir, acreditar e permitir que esse tema se transformasse em um conteúdo valioso para a engenharia de materiais e naval, simultaneamente com o Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais (LPCM).

Agradeço também aos amigos que fiz na Universidade e a troca de experiências contínuas e descontínuas durante esses anos.

Não poderia deixar de agradecer a todos os amigos que fiz durante minha vida até o presente momento pela união que é a força motriz para o crescimento pessoal.

Agradeço a minha ascendência, a qual é, biologicamente responsável pela expansão desse galho da árvore genética.

Por fim, agradeço ao meu avô Anízio pela abdicação de qualidade vida para transformar a vida das gerações sucessoras mais confortável. Minha vó Maria José pelo amor incondicional e exemplo de força para seguir em frente. E por fim, minha mãe Flávia por provar que nenhum sistema de comunicação ou linguagem é capaz de materializar o abstrato sentimento materno.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Materiais.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITO VIGA-SANDUÍCHE PARA CONSTRUÇÃO DE EMBARCAÇÕES EM ESCALA

Darley de Aguiar Nogueira

Dezembro / 2020

Orientador: Célio Albano da Costa Neto

Coorientador: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Curso: Engenharia de Materiais

Este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de um material compósito viga-sanduíche na construção de embarcações em escala reduzida para ensaios em tanque oceânico. Para tal, a caracterização das propriedades mecânicas de tração e flexão em materiais compósitos sanduíches, formados por um núcleo de espuma de PVC e laminado com manta de fibra de vidro e resina epóxi, foram analisadas estatisticamente utilizando-se a distribuição de Weibull de dois parâmetros. As tensões de ruptura, deformações de ruptura, módulos de elasticidade, bem como tensões máximas flexionais, deformações máximas flexionais e módulos de elasticidade flexionais foram calculados com um nível de confiança de 95,45% para estes materiais laminados manualmente. As propriedades mecânicas apresentaram boa adesão à distribuição de Weibull ao aplicar o teste de hipótese de Anderson-Darling, no entanto, o método de fabricação manual mostrou-se pouco reprodutivo comparando-se os desvios das propriedades obtidas. As micrografias foram analisadas qualitativamente buscando descrever as características de fratura desses materiais. Por fim, as propriedades mecânicas específicas obtidas foram comparadas com as propriedades de materiais compósitos em geral. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que os projetos de embarcações utilizando-se esses materiais compósitos estão aptos para aplicação.

Palavras-chave: materiais compósitos, propriedades mecânicas, laminação manual, distribuição de Weibull, teste de hipótese e embarcações em escala.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Engineer.

MECHANICAL PROPERTIES OF SANDWICHES COMPOSITE MATERIALS
APPLIED IN SCALE VESSELS

Darley de Aguiar Nogueira

December / 2020

Advisor: Célio Albano da Costa Neto

Co-Advisor: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Course: Materials Engineering

This study aimed to evaluate the applicability of a sandwich composite material in the construction of scaled vessels for testing in an ocean tank. Thus, mechanical properties as tensile and flexural properties of composite materials of PVC foam's core laminated manually by fiber glass and epoxy resin, have been statistically analyzed using Weibull distribution of two parameters. Ultimate tensile strength, ultimate tensile strain, tensile chord modulus of elasticity, maximum flexural stress, maximum flexural strain, and flexural chord modulus of elasticity have been estimated with confidence level of 95,45%. The study also analyzed the processing method in terms of its reproducibility capacity, comparing the average values with their own deviations. A statistical hypothesis testing (confirmatory data analysis) proposed by Anderson-Darling was used to verify if the samples data were really molded via Weibull's extreme value distribution. A micrograph was qualitatively analysed only to describe fracture characteristics on the material. Finally, the performance of the materials showed in this study was compared with what is expected from a general composite material. All the results obtained in this study indicate their applicability in scaled vessels design is appropriate.

Keywords: composite materials, mechanical properties, hand lay-up, weibull distribution, hypothesis test and scale vessels.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1. Introdução	1
2. Objetivo	2
3. Revisão Bibliográfica	3
3.1. Resumo Histórico	3
3.2. Materiais Compósitos	4
3.2.1. Estruturas-sanduiche	4
3.2.2. Junta adesiva	5
3.2.3. Matriz Polimérica	5
3.2.4. Fibra de Vidro	6
3.2.5. Processo de Fabricação	6
3.2.5.1. Laminação Manual	7
3.2.6. Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos	7
3.2.6.1. Micromecânica	9
3.2.6.2. Macromecânica	9
3.2.7. Ensaio de Tração	10
3.2.8. Ensaio de Flexão	12
3.2.9. Análise Estatística	13
3.2.9.1. Distribuição de Weibull	13
3.2.9.2. Teste de Hipótese	15
4. Materiais e Métodos	18
4.1. Materiais	18
4.2. Especificação dos Corpos-de-prova	19
4.2.1. Corpos-de-prova de tração	19
4.2.2. Corpos-de-prova de flexão	20
4.3. Laminação Manual	21
4.4. Fabricação dos corpos-de-prova	22
4.5. Ensaio de Tração	24
4.5.1. Obtenção dos Dados de Tração	25

4.6. Ensaio de Flexão	25
4.6.1. Obtenção dos Dados de Flexão	26
4.7. Análise Estatística	27
4.7.1. Aplicação da Distribuição de Weibull	28
4.7.2. Teste de Hipótese para adesão dos dados	30
4.8. Observação Microestrutural	31
4.9. Densidade do Compósito	31
5. Resultados e Discussões	32
5.1. Análise preliminar	32
5.2. Resultados preliminares	33
5.2.1. Ensaio de tração	33
5.2.2. Ensaio de flexão	34
5.3. Análise estatística pela distribuição de Weibull	35
5.3.1. Ensaio de tração	36
5.3.2. Ensaio de flexão	39
5.4. Teste de Hipótese de Anderson-Darling	43
5.5. Caracterização Microestrutural Qualitativa	43
5.6. Comparação entre materiais disponíveis	44
5.7. Considerações dos Resultados Obtidos	45
6. Conclusão	47
7. Sugestões para trabalhos futuros	48
Referências Bibliográficas	49

Lista de Figuras

1. Representação esquemática do método de laminação manual. [7]	7
2. Materiais sanduichados transversalmente isotrópicos.	8
3. Curva tensão - deformação típica; adaptado de [2]	11
4. Especificação dos corpos-de-prova segundo a norma D3039.[2]	12
5. Especificação dos corpos-de-prova segundo a norma D7264. [3]	13
6. Efeito dos parâmetros no comportamento da distribuição de Weibull.	14
7. Curvas características de $F(t)$, $R(t)$ e $f(t)$	15
8. Especificação dos corpos-de-prova de tração.	20
9. Especificação dos corpos-de-prova de flexão.	20
10.Mesa de desempenho encerada.	21
11.Placa do compósito produzido.	21
12.Corpos-de-prova de tração cortados.	22
13.Corpos-de-prova de flexão cortados.	22
14.Montagem do ensaio de tração.	24
15.Montagem do ensaio de flexão.	26
16.Gráfico de regressão linear aplicado.	29
17.Curva de confiabilidade dos estimadores para ensaio de tração.	30
18.Curva de confiabilidade dos estimadores para ensaio de flexão.	30
19.Diagrama de caixa dos ensaios;	32
20.Resultado dos corpos-de-prova após os testes de tração;	33
21.Resultado dos corpos-de-prova após os testes de tração;	34
22.Faixa de variação das propriedades mecânicas equivalente a confiabilidade de 68%;	35
23.Linearização de Weibull da tensão de ruptura;	36

24.Linearização de Weibull da deformação de ruptura;	37
25.Linearização de Weibull do módulo de elasticidade;	37
26.Densidade de probabilidade de Weibull do ensaio de tração;	38
27.Linearização de Weibull da tensão máxima flexional;	40
28.Linearização de Weibull da deformação máxima flexional;	40
29.Linearização de Weibull do módulo de elasticidade flexional;	41
30.Densidade de probabilidade de Weibull do ensaio de flexão;	42
31.Micrografia com aumento de 25x;	44
32.Diagrama de propriedades específicas; adaptado de [21]	45

Lista de Tabelas

1. Composição dos tipos de fibras de vidro. [12]	6
2. Modificações e pontos percentuais superiores para estatística de A^2 . [17]	17
3. Dependência do p-valor com a estatística de A^2 . [17]	17
4. Propriedades mecânicas do Divinycell [®] H60	18
5. Propriedades mecânicas da manta de fibra de vidro.	18
6. Propriedades físico-químicas da resina epóxi.	19
7. Dimensionais dos corpos-de-prova de tração.	23
8. Dimensionais dos corpos-de-prova de flexão.	23
9. Resultados dos corpos-de-prova de tração.	34
10. Resultados dos corpos-de-prova de flexão.	34
11. Resultados para confiabilidade de 95,45%	38
12. Média e desvio-padrão da distribuição de Weibull.	39
13. Resultados para confiabilidade de 95,45%	41
14. Média e desvio-padrão da distribuição de Weibull.	42
15. Resultado do teste de Anderson-Darling.	43
16. Propriedades mecânicas específicas.	45

1. Introdução

Com a evolução da capacidade humana e as novas demandas tecnológicas para entendermos os fenômenos da natureza e os quantificar cada vez mais precisamente, surgiu a necessidade de compreender o comportamento micro e macroscópico dos materiais a fim de selecionar os mais adequados para cada aplicação. Dessa forma, a utilização de materiais compósitos surge como excelente alternativa para suprir as demandas tecnológicas que os materiais tradicionais (metais, cerâmicos e polímeros) isoladamente não atenderiam. Dessa forma, combinando-se materiais distintos é produzido um novo material com diferentes propriedades.

Materiais compósitos sanduíches são utilizados para aplicações que requerem elevada resistência e módulo de elasticidade específico e, portanto, apresentam excelentes propriedades mecânicas atreladas às baixas densidades em relação aos materiais tradicionais. Assim, as aplicações dos GFRP's (*Glass Fiber Reinforced Polymers*) estão tornando-se cada vez mais comuns, sendo utilizados largamente nas áreas de construção civil, naval e *offshore* [1].

O Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano), o laboratório com o tanque mais profundo do Ocidente, para os ensaios mais diversos solicitados, utiliza um método de fabricação dos GFRP's para a construção de embarcações em escala reduzida que consiste em um núcleo de espuma de PVC (Divinycell[®]) laminado por uma matriz polimérica de resina epóxi reforçada por fibras conforme o ITTC-2011 (*International Towing Tank Conference*). E, portanto, devem apresentar elevada resistência para que os modelos suportem os carregamentos provenientes de condições ambientais em escala.

Dessa forma, este trabalho visa obter e caracterizar, através de ensaios destrutivos e análise estatística, as propriedades mecânicas desses materiais.

2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo medir as propriedades mecânicas em tração e em flexão de uma viga-sanduíche de núcleo polimérico Divinycell[®] e faces externas de compósito epóxi reforçado com fibra de vidro.

Para avaliar os dados serão utilizados vinte e cinco (25) corpos-de-prova de tração fabricados de uma placa contínua para garantir que todos apresentem as mesmas condições de fabricação e processo. Além de dez (10) corpos-de-prova para os testes de flexão, fabricados de uma outra placa contínua. Também será estudado o impacto dos dados para a especificação e fabricação das embarcações em escala reduzida.

Serão realizados ensaios de tração, segundo a norma ASTM D3039/3039M [2], para determinar as propriedades como tensão de ruptura, deformação de ruptura, módulo de elasticidade e, se ocorrer a bilinearidade, a deformação de transição. Também serão realizados ensaios de flexão, segundo a norma ASTM D7264/7264M [3], para determinar as propriedades de tensão máxima flexional, deformação flexional e módulo de elasticidade flexional.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Resumo Histórico

- Embarcações Reais:

No início da expansão marítima até, aproximadamente, o fim do século XIX, os cascos das embarcações eram predominantemente fabricadas com ferro e madeira. Assim, estes materiais foram substituídos por placas de aço majoritariamente rebitadas até meados do século XX. Na 2ª Guerra Mundial, modificou-se então, a técnica de união das placas, passando a serem soldadas.

Desde então, vários materiais são utilizados para a fabricação de embarcações, como ligas de alumínio (5083, 5086, 5456, 6061-T6) e materiais não-metálicos como GFRP's. [4]

- Modelos em Escala Reduzida:

Historicamente, modelos representativos vem sendo utilizados não apenas para visualizar conceitualmente as estruturas, como as pirâmides, mas também como um plano de trabalho para o projeto real. Por exemplo, modelos de embarcações são extremamente úteis desde os tempos dos Faraós, a saber pelos modelos encontrados nas tumbas.[5]

Projetistas e fabricantes de embarcações utilizam as mesmas técnicas de modelos desde 1600. Esses modelos são os precursores dos computadores analógicos e, mesmo sem um forte conhecimento analítico, o método de utilização de modelos vem sendo utilizado com sucesso por séculos.[5]

Modelos de estabilidade para navios já eram utilizados para determinar o deslocamento e o carregamento nas embarcações. Já os modelos mecânicos vieram a ser usados na revolução industrial, com efeito, a compreensão do fenômeno de modelagem de mecânica dos fluidos proposta por Reynolds e Froude que desenvolveram critérios para efeitos viscosos e inerciais, respectivamente. Modelos, de maneira geral, são em essência, representação dos protótipos (originais), através dos quais o comportamento pode ser previsto. Dessa forma, modelos de teste são um conjunto de procedimentos experimentais utilizados para auxiliar as técnicas de modelagem numérica e analítica. Os

modelos podem ser divididos em três grupos: réplicas em escala, modelos distorcidos e analógicos. [5]

Segundo as recomendações de procedimentos e diretrizes do ITTC (*International Towing Tank Conference*) [6], para materiais compósitos, tratados no documento como FRP (*fibre reinforced plastic*), a construção de modelos ocorre pela usinagem de uma espuma (neste trabalho é o Divinycell[®]) e finalizado por laminação manual. [6]

3.2. Materiais Compósitos

Material compósito é uma combinação de dois ou mais materiais diferentes com uma interface reconhecível entre eles de forma que um dos constituintes é chamado de matriz, a qual transfere os carregamentos solicitados para o outro constituinte chamado reforço. Assim, a união desses materiais resulta em propriedades (mecânicas, elétricas, térmicas etc) dos constituintes. [7]

3.2.1. Estruturas-sanduíche

Estruturas-sanduíche são placas compostas por três itens principais: duas finas camadas externas, chamadas de faces, e uma espessa camada interna, chamada de núcleo. As faces tem um papel de suportar os carregamentos normais de tração, compressão ou tensões cisalhantes no plano e o núcleo desempenha a função de manter as faces afastadas, garantindo elevado momento de inércia, além de apresentar uma rigidez de forma que evite o esmagamento e uma rigidez ao cisalhamento *out-of-plane* para garantir que o conjunto funcione conforme uma unidade. Esses tipos de compósitos apresentam como principal característica, elevada resistência e módulo de elasticidade com baixo peso. Com as características apresentadas, o núcleo pode ser constituído por materiais leves, como espumas, madeiras, plásticos, colmeias e corrugados. [8]

A escolha do material para o núcleo pode trazer vantagens e desvantagens que variam de de acordo com a aplicação desejada. Dessa forma, as propriedades mecânicas variam com essa escolha e, mesmo utilizando-se o mesmo material, essas propriedades variam com a densidade. Geralmente, há uma relação proporcional das propriedades mecânicas com a densidade do material, embora o aumento da resistência específica, que é a resistência mecânica de tração e flexão dividida pela densidade, seja determinante para a escolha do núcleo. Arelada a boa resistência à compressão e ao cisalhamento, é necessário também ter afinidade química com o adesivo, resistência à fadiga e corrosão, além de ser hidrofóbico para garantir a performance do material compósito.

A utilização de estruturas-sanduíches proporciona também uma série de benefícios à construção naval como o isolamento termoacústico, interior livre de longarinas e cavernas, boa resistência à penetração e impacto, além de fluabilidade positiva, característica esta de grande importância para os testes em modelos de escala reduzida.

3.2.2. Junta adesiva

Uma montagem formada pelo uso de um adesivo é chamada junta adesiva, a qual é constituída por materiais sólidos, chamados de aderentes, e o adesivo. O fenômeno que permite o adesivo transferir o carregamento do aderente para a junta adesiva é chamado de adesão. Com isso, as propriedades mecânicas de uma junta adesiva são determinadas pelas propriedades do aderente, do adesivo e também da interface. [9]

Pelo estudo tratar de um material composto sanduíche, a adesão entre o núcleo e as lâminas é extremamente importante para o resultado final esperado, já que a adesão é responsável pela transferência de carregamento entre os componentes e, se apresentar falha de adesão, as propriedades mecânicas obtidas serão insatisfatórias.

3.2.3. Matriz Polimérica

Historicamente, os primeiros materiais compostos desenvolvidos utilizaram resinas baseadas em formaldeídos. Atualmente, as resinas mais comumente utilizadas como matriz polimérica para materiais compostos são os polímeros termo-endurecíveis reticulados, como poli-ésteres e resinas epóxi, sendo estes empregados quando são necessárias melhores propriedades mecânicas, e os poli-ésteres são empregados de forma mais genérica.[10]

Dessa forma, essas resinas são classificadas como termoplásticas quando as ligações entre as cadeias são secundárias, e termorrígidas quando as ligações entre as cadeias são primárias covalentes formando as ligações cruzadas ou reticuladas.

O material utilizado como matriz nesse trabalho é a resina epóxi (termorrígida) cujo processo de cura pode ocorrer à temperatura ambiente desde que o tempo necessário para a formação das reticulações seja possível, necessitando-se de um processo posterior de pós-cura para que o restante das ligações sejam finalizadas.

3.2.4. Fibra de Vidro

As fibras de vidro surgiram no início do século XX, com o desenvolvimento de tecnologia de fabricação, no entanto, o uso extensivo ocorreu a partir do início da Segunda Guerra Mundial. Com o surgimento de radares e sua instalação em caças e aviões, além das solicitações das cargas aerodinâmicas às baixas temperaturas, bem como a necessidade da transparência às ondas de alta frequência, o que excluía qualquer solução com materiais metálicos, passou-se assim a utilizar compostos de vidro/poliéster. [8]

Fibras de vidro consistem primariamente de sílica (dióxido de Silício). Para aplicações estruturais utiliza-se as fibras de vidro-E (letra E designada às propriedades elétricas) e vidro-S ou vidro-R (letra S *strength* devido ao ganho de propriedades mecânicas, a diferença entre as nomenclaturas ocorre devido ao local de fabricação, sendo o tipo S Americano, e ao tipo R Européia), que podem chegar até aproximadamente 30% a mais de resistência a tração e 20% de módulo de elasticidade. As fibras de vidro tipo A (*High-Alkali-glass content*) não são comumente utilizadas. [11]

As fibras de vidro são fabricadas com uma variedade de composições químicas, o tipo *E-glass* é o mais utilizado na produção de laminados para as mais diversificadas aplicações. Já a fibra vidro-S é utilizada quando é necessário obter propriedades mecânicas mais elevadas. A Tabela 1 apresenta a composição química das fibras citadas.

Tabela 1: Composição dos tipos de fibras de vidro. [12]

COMPOSIÇÃO	A	E	S	R
SiO ₂	72,0	52,4	64,4	60,0
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	1,5	14,4	25,0	25,0
CaO	10,0	17,2	-	9,0
MgO	2,5	4,6	10,3	6,0
Na ₂ O, K ₂ O	5,0	0,8	0,3	-
B ₂ O ₃	-	10,6	-	-

3.2.5. Processo de Fabricação

Os processos de fabricação dos materiais compósitos são extremamente importantes de acordo com a aplicação. Isso ocorre porque se tratando de materiais compósitos, estes são projetados e construídos não apenas a estrutura como também o material estrutural. Portanto, a seleção do método de fabricação é dependente dos materiais constituintes do compósito, sendo o material da matriz a chave do composto. [11]

Existem inúmeros métodos de fabricação de materiais compósitos formados por uma matriz polimérica (termofixos) reforçados por fibra, embora cada método seja adequado para uma determinada aplicação que depende do custo do processo, escala de produção, dimensão física do componente, volume relativo de fibra e repetibilidade do processo. [8]

O processo de fabricação aqui apresentado é o de laminação manual por ser a técnica empregada na fabricação de embarcações em escala reduzida.

3.2.5.1. Laminação Manual

A laminação manual consiste na fabricação de uma lâmina ou várias lâminas sobrepostas compostas por uma matriz e uma fibra de reforço, a partir de instrumentos de uso manual. Assim, o operador responsável pela fabricação do compósito une as fibras de uma manta ou tecido através da matriz polimérica (resina) pressionando-os com o auxílio de um rolo para espalhar a resina e uma trincha para impregnar as fibras. [12]

O processo de laminação manual é um método simples de fabricação com baixo custo. Utilizado em larga escala em barcos, lanchas e reparos. Um exemplo de laminação manual é apresentado na Figura 1:

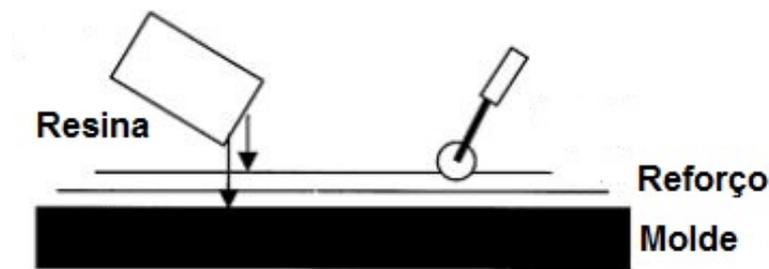


Figura 1: Representação esquemática do método de laminação manual. [7]

Esse método apresenta grandes vantagens para peças de grandes dimensões, permitindo a fabricação de peças de forma contínua e sem emendas. Além de contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas ao realizar uniões entre elementos quando comparado com outros processos. [12]

3.2.6. Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos

Um material compósito laminado é constituído por várias lâminas, e estas podem apresentar variações na orientação das fibras de reforço envolvidas pela matriz polimérica. As propriedades mecânicas são determinadas de acordo com as propriedades de cada lâmina individualmente através da micromecânica.

Tratando-se de materiais compósitos não se pode utilizar a mesma "intuição" do comportamento de materiais homogêneos (propriedades não variam de ponto em ponto no material) e, portanto, isotrópicos (propriedades não dependem da orientação). Os materiais compósitos são geralmente heterogêneos e anisotrópicos, assim as propriedades variam de acordo com a mudança de matriz para fibra, bem como de acordo com a direção em que são medidas. [11]

Devido a anisotropia do constituinte de reforço dos materiais compósitos, estes são considerados ortotrópicos, e portanto, apresentam propriedades dependentes das direções principais. Materiais compósitos constituídos por reforços de fibras são considerados transversalmente isotrópicos, para os casos em que são utilizados mantas e alguns tecidos bidirecionais ou multidirecionais e, portanto, possuem um plano de simetria. [13]

O material compósito utilizado neste estudo apresenta o plano de isotropia como o plano normal à direção de alinhamento das fibras devido a utilização de manta de fibra de vidro como o constituinte de reforço, conforme a Figura 2 apresenta.

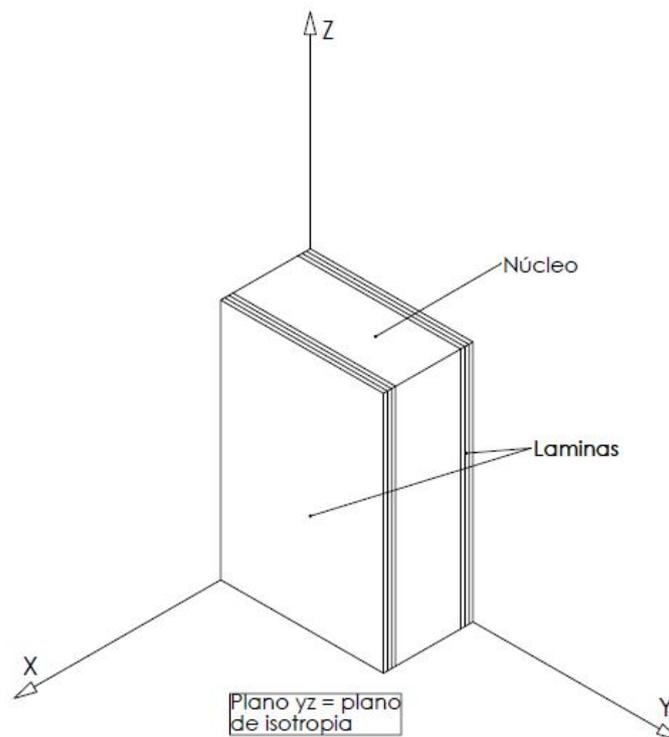


Figura 2: Materiais sanduichados transversalmente isotrópicos.

3.2.6.1. Micromecânica

A analítica das propriedades dos compósitos em termos das propriedades dos materiais constituintes é chamada de micromecânica. Idealmente, os modelos de micromecânica devem responder aos efeitos de várias combinações de Fibra/Matriz, utilizando a regra das misturas (modelo clássico) e também outros modelos, sem necessariamente ter que fabricá-los ou testá-los. No entanto, esse modelo faz algumas considerações ao estudar as propriedades, como a uniformidade da distribuição das fibras na matriz, esforços puramente longitudinais ou transversais em relação à orientação das fibras, ausência de tensões residuais, inexistência de vazios e comportamento dos constituintes na faixa linear elástica.

De acordo com as considerações acima, obtém-se as equações (1) e (2), comumente conhecidas como a regra das misturas direta e inversa, respectivamente. Nessas equações, os sub-índices c , m e f representam, respectivamente, as propriedades do compósito, da matriz e da fibra. Dessa forma, a fração volumétrica ocupada pela proporção de matriz no compósito é representada por (ν_m) e analogamente, a fração volumétrica ocupada pela proporção de fibra é representada por (ν_f) , o que dá origem a (3). Nas equações abaixo a variável P_c representa a propriedade do material. [11]

$$P_c = P_f \nu_f + P_m \nu_m \quad (1)$$

$$\frac{1}{P_c} = \frac{\nu_f}{P_f} + \frac{\nu_m}{P_m} \quad (2)$$

$$\nu_c = \nu_f + \nu_m = 1 \quad (3)$$

A partir da equação (1), pode-se estimar as propriedades referentes à densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson longitudinais, bem como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson transversais e módulo de cisalhamento através da equação (2).

3.2.6.2. Macromecânica

O comportamento macromecânico é designado ao comportamento da lâmina quando as propriedades mecânicas aparentes médias macroscópicas são consideradas. Essas propriedades podem ser obtidas através de ensaios experimentais ou calculadas de

acordo com a micromecânica. Assim, conhecidas essas propriedades, estima-se o comportamento do material (lâmina) sob um conjunto de carregamentos combinados. [8]

A teoria macromecânica assume um comportamento elástico-linear para o material compósito estudado, comportamento este encontrado nas lâminas de vidro E/Epóxi. No entanto, materiais compósitos podem apresentar um comportamento elasto-plástico de acordo com os materiais empregados. Mas para materiais compósitos à base de fibra/resina, como a linearidade desses materiais são superiores aos materiais metálicos, a teoria é utilizada largamente na engenharia. [8]

Assim, segundo a lei de Hooke, a relação tensão-deformação de um material elástico-linear é dada para equação abaixo:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ \text{sim.} & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (4)$$

onde os σ_i e τ_{ij} representam as tensões normais e cisalhantes, respectivamente; ε_i as deformações normais e γ_{ij} as deformações cisalhantes e o tensor C_{ij} a matriz de rigidez do material.

3.2.7. Ensaio de Tração

Devido a imensa variação de combinações que podem ser feitas para compor um material compósito, este não possui uma norma tão rígida quanto as outras classes de materiais para um ensaio de tração. No entanto, para este presente estudo, a norma ASTM D3039/D 3039M foi adotada como referência para um procedimento de teste. [2]

O ensaio de tração consiste em impor a um corpo de prova uma taxa de deslocamento constante e medir como resposta a resistência a esse deslocamento. Através do ensaio de tração é possível obter tensão de ruptura, deformação de ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, além da deformação de transição, comportamento bilinear (quando o material compósito apresenta dois módulos de elasticidade, no entanto, pouco usual para a maioria dos materiais compósitos), como a Figura 3 apresenta.

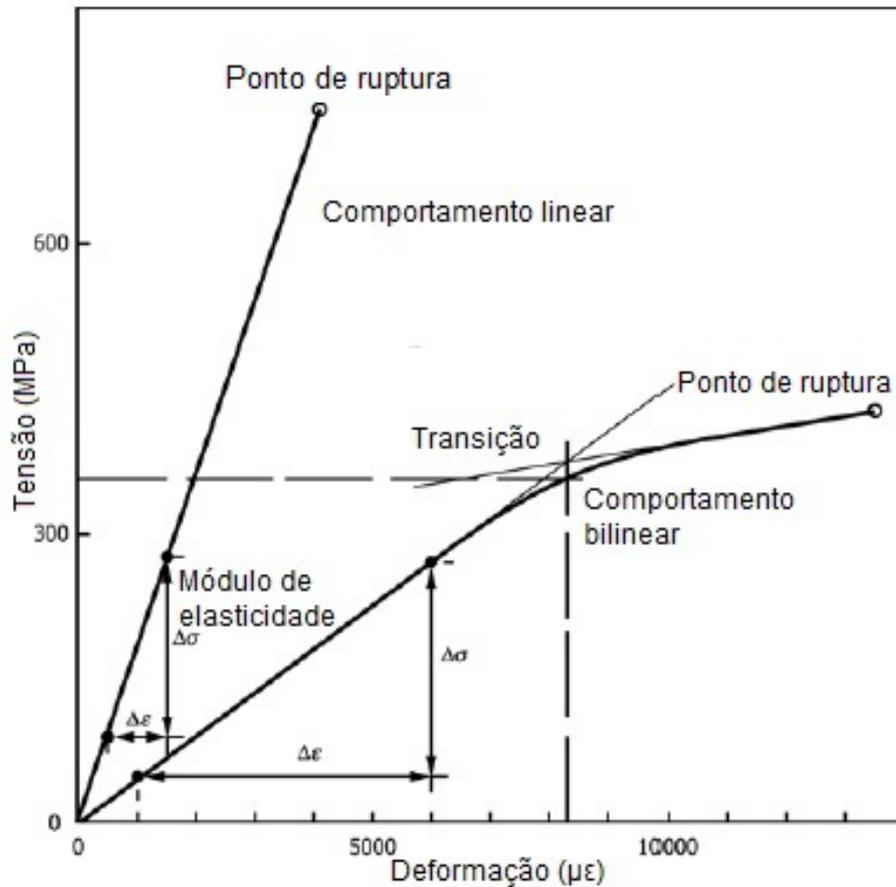


Figura 3: Curva tensão - deformação típica; adaptado de [2]

O comportamento mecânico de materiais compósitos é classificado de forma linear elástica até a ruptura, comportamento este frágil e em concordância com o material de reforço caracterizado pela baixa deformação de ruptura.

Segundo a norma ASTM D3039/D3039M, o corpo de prova utilizado para um ensaio de tração de um material compósito deve apresentar largura constante, o que diferentemente para outros materiais cuja forma utilizada é a de gravata, a utilização de uma largura constante impede uma ruptura precoce devido a concentração de tensões em regiões com descontinuidade ou desalinhamento das fibras de reforço, além disso, *tabs* podem ser utilizados para diminuir a probabilidade de falha nas garras. A figura 4¹ apresenta o corpo de prova recomendável:

¹Figura retirada da norma ASTM D3039/D3039M e notas podem ser lidas através da mesma.

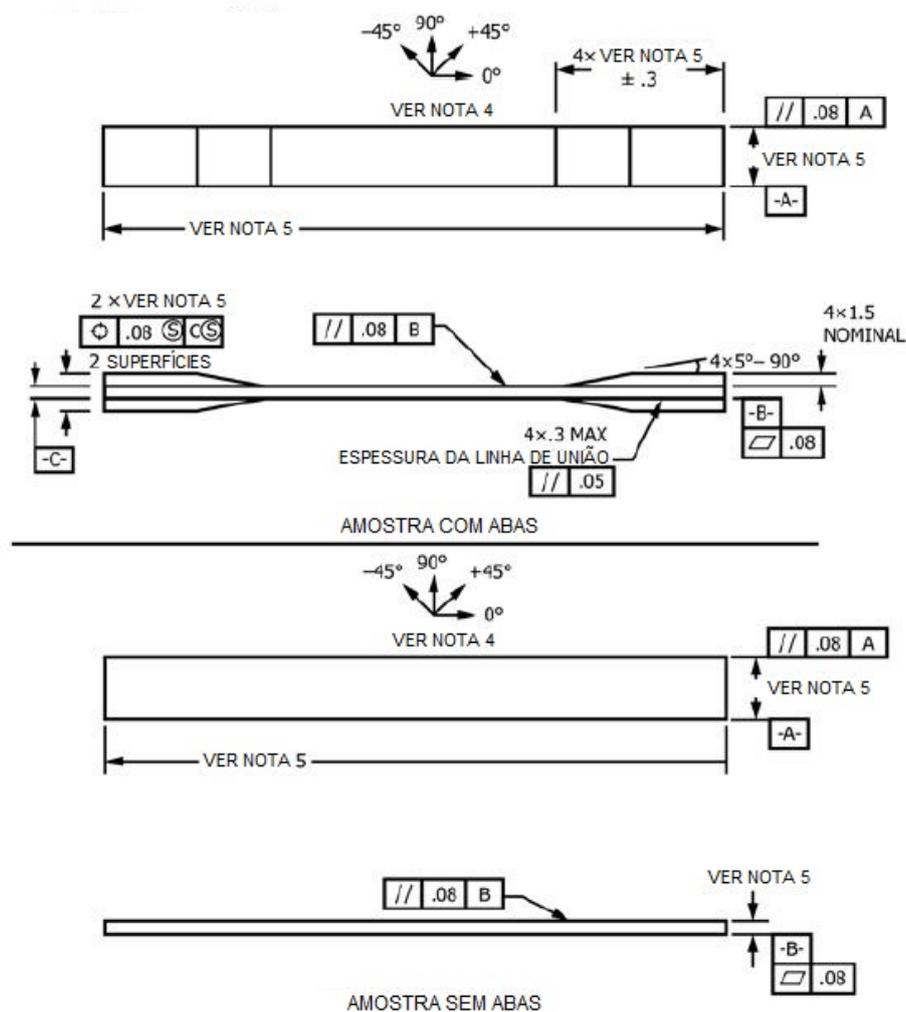


Figura 4: Especificação dos corpos-de-prova segundo a norma D3039.[2]

3.2.8. Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão representa a determinação das propriedades flexionais de um material, ou seja, determina a resistência de um determinado corpo resistir a um carregamento perpendicular a uma seção longitudinal.

Para a determinação das propriedades flexionais do compósito em questão, foi utilizada a norma D7264/D7264M que determina através dos métodos de flexão à três pontos (utilizando carregamento no centro da amostra) ou quatro pontos (utilizando dois pontos de carregamento igualmente espaçados) a rigidez flexional e a rigidez ao cisalhamento transversal. [3]

A norma determina que a relação comprimento/espessura seja pelo menos de uma razão de $16:1 + 50 \text{ mm}$, ou seja, o comprimento deve ser dezesseis vezes maior que a espessura com adicional de 50 mm . Esta também define que estes tenham uma largura pelo menos duas vezes a espessura e também três vezes maior que a espessura do núcleo.

[3]

O método escolhido para a determinação das propriedades flexionais foi o de 3 pontos visando tolerâncias de planicidade e paralelismo das superfícies mais abrangentes e factíveis, já que são requisitos de difícil obtenção em corpos de materiais compósitos. A Figura 5 apresenta o esquema do ensaio de flexão para o método de 3 pontos.

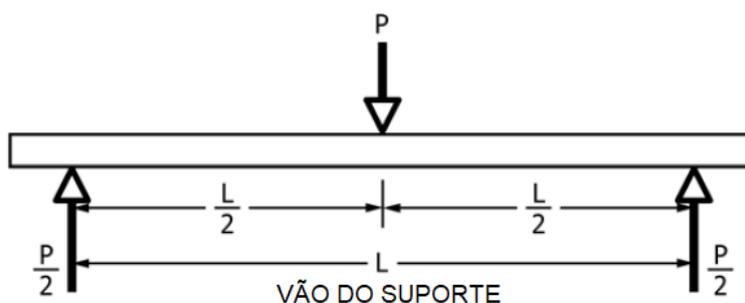


Figura 5: Especificação dos corpos-de-prova segundo a norma D7264. [3]

3.2.9. Análise Estatística

3.2.9.1. Distribuição de Weibull

Materiais compósitos são anisotrópicos, além disso, apresentam comportamento teórico linear elástico até a ruptura e variação da resistência de acordo com a estrutura interna e extremamente dependente da quantidade de defeitos no material e, portanto, não apresentam valores específicos que representam seu comportamento mecânico. Assim, como a fragilidade apresentada pode ser considerada como uma intolerância aos defeitos, já que qualquer heterogeneidade pode acarretar a ruptura do compósito. Dessa forma, necessita-se de uma análise estatística para a utilização segura em projetos de engenharia. Uma das análises estatísticas usadas é a distribuição de Weibull, a qual vem sendo utilizada para determinação das propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas desses materiais por apresentar melhor adesão dos dados a essa distribuição. [14]

A distribuição de Weibull é uma distribuição contínua de probabilidade nomeada como tal em homenagem à Waloddi Weibull, que a descreveu em detalhes em 1951. A distribuição de Weibull tornou-se uma das mais importantes distribuições utilizadas em engenharia e outras áreas. E, adequadamente, descreve o tempo de falha observadas em diferentes tipos de componentes e fenômenos. [15]

A função de distribuição proposta por Weibull é baseada na equivalência entre eventos ocorridos em quaisquer partes do componente como os mesmos eventos observados no componente como um todo. Tal equivalência é chamada de "Teoria do elo

mais fraco”, que analogamente a uma corrente, apresenta falha quando qualquer elo falha. Essa distribuição é utilizada não apenas para a previsão do comportamento de falha de materiais frágeis e suas propriedades, mas também na indústria para estimar a vida de um produto e, academicamente, para a modelagem de diversos fenômenos inclusive a ocorrência de terremotos.

A função de distribuição acumulada descreve como as probabilidades são associadas aos valores ou aos intervalos de valores de uma variável aleatória. Ela representa a probabilidade de uma variável aleatória ser menor ou igual a um valor real t , e é suficiente para entendermos o comportamento de uma variável aleatória. Ela é chamada de função de distribuição acumulada, pois acumula as probabilidades dos valores inferiores ou iguais a t .

A seguir são apresentadas as equações (5) e (6) para a distribuição de Weibull com dois e três parâmetros [15] :

$$F(t, \beta, \alpha) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right], \quad t \geq 0, \beta \geq 0, \alpha \geq 0 \quad (5)$$

$$F(t, \tau, \beta, \alpha) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \tau}{\beta} \right)^\alpha \right], \quad t \geq \tau \quad (6)$$

Dessa forma, a Figura 6 apresenta a distribuição de Weibull variando-se o fator de forma e o parâmetro de escala:

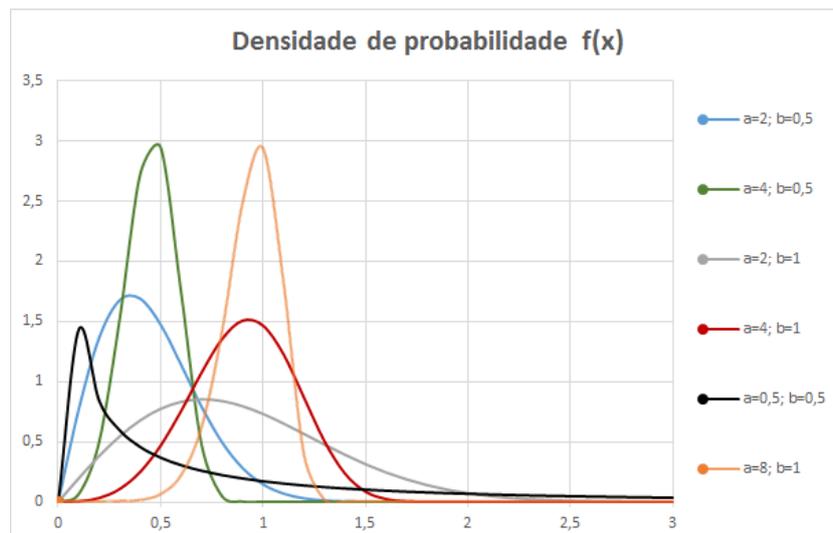


Figura 6: Efeito dos parâmetros no comportamento da distribuição de Weibull.

Assim, aplicando-se a distribuição de Weibull para os casos de comportamento mecânico de materiais frágeis, $F(t, \beta, \alpha)$ é tratado como a probabilidade da tensão de ruptura ser igual ou menor que t ; como o que importa é determinar um valor mínimo, comumente analisa-se a distribuição de $R(t, \beta, \alpha)$, a qual é a confiabilidade que o material apresentará um valor mínimo t . A saber:

$$F(t, \beta, \alpha) + R(t, \beta, \alpha) = 1 \quad (7)$$

As curvas características de $F(t)$ e $R(t)$ estão apresentadas na Figura 7. A área abaixo das curvas de $F(t)$ e $R(t)$ é sempre igual a 1, e a partir dessas informações é possível determinar a probabilidade da variável t assumir um valor dentro dessa região.

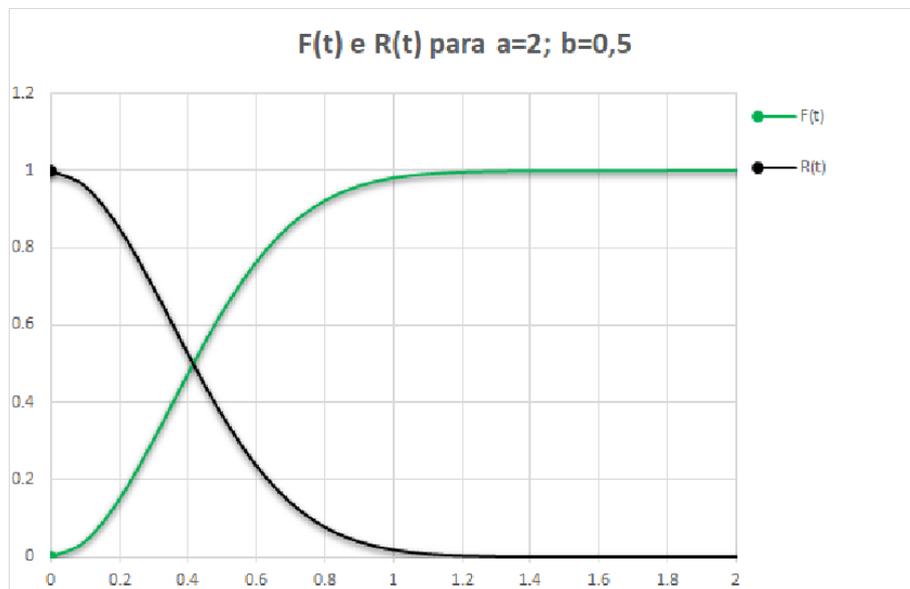


Figura 7: Curvas características de $F(t)$, $R(t)$ e $f(t)$.

3.2.9.2. Teste de Hipótese

O teste de hipótese consiste na avaliação da validade (ou não) de uma afirmação sobre uma determinada propriedade da população, baseando-se nos dados de uma amostra desta. Busca-se, portanto, estabelecer o critério de decisão que aceite uma hipótese nula H_0 ou rejeitá-la, ou seja, favorecer a hipótese alternativa H_1 . [16]

Essa decisão a ser tomada pode gerar dois tipos de erro: o erro do tipo I (com probabilidade α de ocorrer), o qual consiste na rejeição da hipótese nula H_0 , quando esta é verdadeira, e o erro do tipo II (com probabilidade β de ocorrer), que consiste na aceitação da hipótese nula H_0 , quando esta é falsa. Dessa forma, vale ressaltar que α e β se relacionam de tal forma que a ocorrência de α influencia no acréscimo de β e vice-versa.

Neste trabalho o erro tipo I é tratado sendo o mais relevante e atribuindo-se um nível de significância de 0,05 ($\alpha = 5\%$).

A rotina para a tomada de decisão consiste:

- Especificação da hipótese H_0 ;
- Determinação do nível de significância α ;
- Determinar a distribuição de probabilidade correspondente a H_0 ;
- Especificar a região de rejeição, os quais levarão a rejeitar H_0 ;
- Coletas dos dados e decisão pela aceitação ou rejeição de H_0 .

No presente trabalho, o teste de hipótese utilizado é conhecido como teste de qualidade de ajuste de Anderson-Darling. Esse teste é utilizado para distribuições de valores extremos como a distribuição de Weibull, distribuição adotada para as análises mais aprofundadas dos dados obtidos. O teste de hipóteses para verificar a adequação da distribuição $F(x)$ aos dados é:

- H_0 : a amostra tem distribuição $F(x)$;
- H_1 : a amostra não tem distribuição $F(x)$.

A estatística do teste é dada por:

$$A^2 = -n - \sum_{i=1}^n \frac{(2i-1)}{n} \ln [F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n+1-i}))] \quad (8)$$

Onde:

n = tamanho amostral;

$F(x_i)$ = Função de distribuição acumulada;

Assim, três situações de testes podem ser distinguidas segundo o comportamento da distribuição de Weibull conforme a Equação 5.[17]

Caso 0: α e β ambos conhecidos e $F(x)$ é completamente especificado;

Caso 1: β é conhecido e α tem que ser estimado;

Caso 2: α é conhecido e β tem que ser estimado;

Caso 3: α e β ambos desconhecidos e precisam ser estimados.

A Tabela 2 apresenta as modificações necessárias para a avaliação de A^2 para cada caso conforme apresentado acima para distribuições de Weibull.

Tabela 2: Modificações e pontos percentuais superiores para estatística de A^2 . [17]

Estatística	Modificação	Nível de significância				
		0,25	0,10	0,05	0,025	0,01
Caso 0	NA	-	1,933	2,492	3,070	3,857
Caso 1	$A^2 (1 + 0,3/n)$	0,736	1,062	1,0321	1,591	1,959
Caso 2	NA	1,060	1,725	2,277	2,854	3,640
Caso 3	$A^2 (1 + 0,2/\sqrt{n})$	0,474	0,637	0,757	0,877	1,038

Assim, após a determinação dos valores de A^2 podemos calcular o p-valor cuja relação com A^2 depende do valor do mesmo encontrado. Para o teste de hipótese de pequenos p-valores representam que a hipótese nula pode ser rejeitada e os dados não seguem a distribuição de Weibull. A Tabela 3 apresenta as relações. [17]

Tabela 3: Dependência do p-valor com a estatística de A^2 . [17]

Estatística A^2	Fórmula de p-valor
$A^2 \geq 0,60$	$p - valor = \exp(1,2937 - 5,709 \times A^2 + 0,0186 \times (A^2)^2)$
$0,34 \geq A^2 \leq 0,60$	$p - valor = \exp(0,9177 - 4,279 \times A^2 - 1,38 \times (A^2)^2)$
$0,20 \geq A^2 \leq 0,34$	$p - valor = \exp(-8,318 + 42,796 \times A^2 - 59,938 \times (A^2)^2)$
$A^2 \leq 0,20$	$p - valor = \exp(-13,436 + 101,14 \times A^2 - 223,73x \times (A^2)^2)$

4. Materiais e Métodos

4.1. Materiais

Conforme descrito anteriormente, o material utilizado como núcleo da estrutura sanduíche é a espuma de PVC produzida pela Diab e as propriedades mecânicas² estão descritas na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Propriedades mecânicas do Divinycell[®] H60

Propriedade	Procedimento	H60	
Resistência à compressão ³	ASTM D 1621	Nominal	0,9 MPa
		Mínimo	0,7 MPa
Módulo de compressão ³	ASTM D 1621-B-73	Nominal	70 MPa
		Mínimo	60 MPa
Limite de resistência ³	ASTM D 1623	Nominal	1,8 MPa
		Mínimo	1,6 MPa
Módulo de elasticidade ³	ASTM D 1623	Nominal	75 MPa
		Mínimo	57 MPa
Resistência ao cisalhamento	ASTM C 273	Nominal	0,76 MPa
		Mínimo	0,63 MPa
Módulo de cisalhamento	ASTM C 273	Nominal	20 MPa
		Mínimo	16 MPa
Densidade	ISO 845	Nominal	60 kg/m ³

Para fabricação da lâmina foi utilizada uma manta de fios cortados M710B Advantex[®], qualificada como fibras de vidro E-CR pelas normas ISO 2078, DIN 1259 e ASTM D578, que são cortadas e aglutinadas através de ligante com alta solubilidade em monômero de estireno, e com compatibilidade com resina epóxi, da empresa fabricante Owens Corning[®]. As propriedades dessa manta encontra-se na Tabela 5⁴:

Tabela 5: Propriedades mecânicas da manta de fibra de vidro.

PROPRIEDADES	MPa (seco)	MPa (úmido)
Resistência à tração	76 - 96	69 - 83
Módulo de tração	7500 - 8900	5200 - 6200
Resistência à flexão	165 - 193	130 - 140
Módulo de Flexão	7500 - 8900	5300 - 6200
Gramagem	450 (g/m ²)	

²Informações retiradas dos dados técnicos fornecidos pela empresa fabricante Diab.

³Propriedades medidas perpendicularmente ao plano e a temperatura de 23°C.

⁴Informações retiradas dos dados técnicos fornecidos pela empresa fabricante Owens Corning[®].

Já a resina epóxi utilizada foi a LNE - 7000 3/1 (super lento) da empresa TecpoX[®] comumente empregada para a laminação de reforços de fibras de vidro em cascos de embarcações. A Tabela 6 apresenta as propriedades físico-químicas⁵ dos componentes A e B da resina:

Tabela 6: Propriedades físico-químicas da resina epóxi.

PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
Viscosidade da mistura (A+B)	300 cps
Peso específico ⁶	1,1 g/cm ³
Pot-life (Avaliação do tempo de vida útil da mistura) ⁶	60 min
Rendimento (Laminação)	1,3 kg/kg(reforço)
Relação de mistura (peso ou volume)	3(A) : 1(B)

4.2. Especificação dos Corpos-de-prova

4.2.1. Corpos-de-prova de tração

Os corpos-de-prova tiveram a geometria especificada de acordo com as recomendações da norma ASTM D3039/D3039M-14 [2], excetuando-se a espessura devido ao material polimérico do núcleo. Assim, devido à espuma utilizada no núcleo, a norma seguida não satisfaz seu uso para o material viga-sanduíche, e seu uso se deu para padronizar os corpos-de-prova. A Figura 8 apresenta o detalhamento dos corpos-de-prova cujas características também são apresentadas abaixo:

- Núcleo - Espuma de PVC (Divinycell H60) de 6mm;
- Lâmina - 2 Mantas de fibra de vidro de 450g/m² de gramatura e resina epóxi;
- *Tabs* (cp's para teste de tração) - 2 Mantas de fibra de vidro de 450g/m² de gramatura e resina epóxi com comprimento de 56mm;

⁵Informações retiradas dos dados técnicos fornecidos pela empresa fabricante TecpoX[®].

⁶Propriedades medidas a temperatura de 25°C.

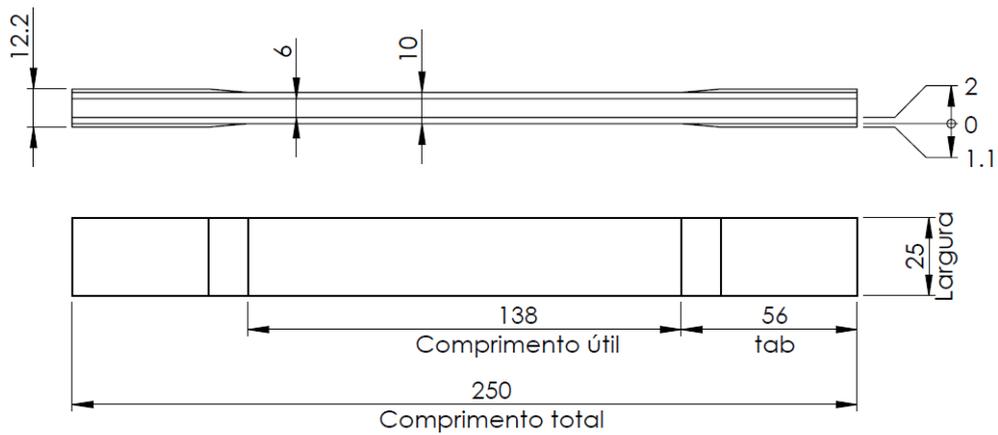


Figura 8: Especificação dos corpos-de-prova de tração.

4.2.2. Corpos-de-prova de flexão

Os corpos-de-prova tiveram a geometria especificada de acordo com as recomendações da norma ASTM D7264 [3], excetuando-se a espessura devido ao material polimérico do núcleo. A Figura 9 apresenta o detalhamento dos corpos-de-prova cujas características também são apresentadas abaixo:

- Núcleo - Espuma de PVC (Divinycell H60) de 6mm;
- Lâmina - 2 Mantas de fibra de vidro de 450g/m² de gramatura e resina epóxi;
- Comprimento total suficiente para manter a distância entre apoios de 160mm.

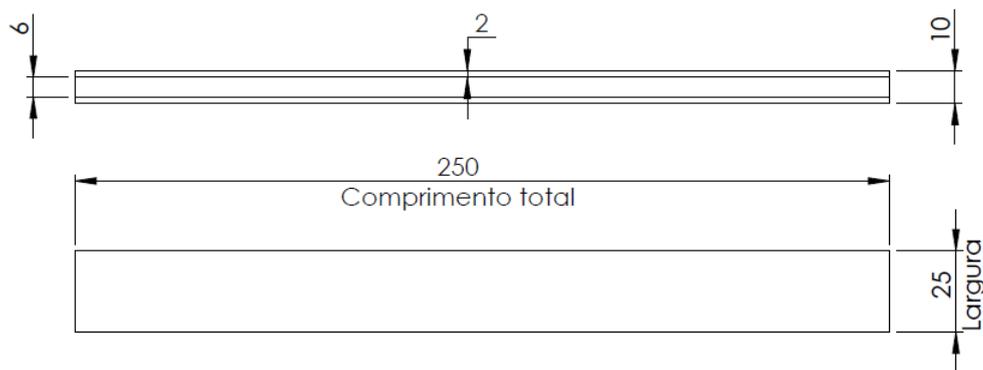


Figura 9: Especificação dos corpos-de-prova de flexão.

4.3. Laminação Manual

A laminação manual foi realizada em uma mesa plana certificada, garantindo a uniformidade da superfície laminada, após limpeza e aplicação de cera para impedir a adesão da resina na mesma, conforme a Figura 10 apresenta. Para a laminação manual foram utilizados rolos de polímero e metal para conformar a manta de fibra de vidro na superfície do núcleo unindo-os através da resina epóxi, primeiramente com o rolo convencional aplicou-se de maneira uniforme a resina epóxi catalizada na face do núcleo para a colocação das duas camadas de manta de fibra de vidro, dessa vez aplicando com o rolo convencional e uniformizando com o rolo de metal, para finalizar colocou-se o *peel ply*, deixando a superfície texturizada e pronta para laminações secundárias, sobre o compósito produzido, também com o rolo de metal.

A placa, então laminada, teve cura de 48h até o manuseio da mesma. A Figura 11 apresenta a placa laminada através da qual foram retirados os corpos-de-prova para os ensaios destrutivos:



Figura 10: Mesa de desempenho encerada.



Figura 11: Placa do compósito produzido.

Após o tempo de cura, mais duas camadas de fibra de vidro (*tabs*) foram adicionadas nas extremidades para impedir falha devido ao aperto das garras da máquina de tração. Novamente, 48h foram utilizadas para o tempo de cura da placa até que esta foi usinada para gerar 25 corpos-de-prova de tração.

O mesmo procedimento foi realizado para os corpos-de-prova para os testes de

flexão. Portanto, os corpos-de-prova de tração foram obtidos através de uma única placa e os corpos-de-prova de flexão de uma outra placa.

4.4. Fabricação dos corpos-de-prova

Os mesmos procedimentos adotados para a fabricação dos corpos de prova para o ensaio de tração também foram utilizados para a geração dos corpos de prova para o ensaio de flexão, excetuando-se os *tabs*. Os corpos de prova foram cortados utilizando-se uma fresa. Assim, os corpos-de-prova de tração com seção retangular de dimensões nominais de 250.0mm de comprimento (comprimento útil de 138.0mm, descontando-se o comprimento dos *tabs*), 24.7mm de largura e 9.5mm de espessura, aproximadamente, e os corpos-de-prova de flexão com seção retangular de dimensões 250.0mm de comprimento, 25.0mm de largura e 10.2mm de espessura, aproximadamente. As Figuras 12 e 13 apresentam os corpos-de-prova de tração e flexão antes dos ensaios:

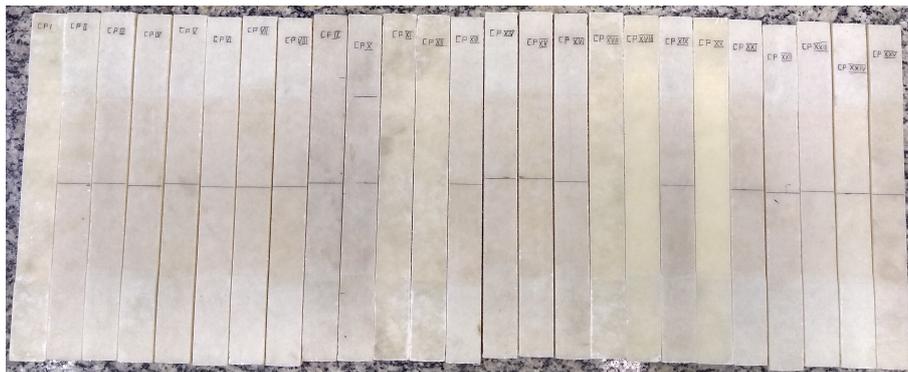


Figura 12: Corpos-de-prova de tração cortados.



Figura 13: Corpos-de-prova de flexão cortados.

A seguir, nas Tabelas 7 e 8, são apresentados os valores de dimensionais de cada corpo de prova para os ensaios de tração e flexão, respectivamente. Cada valor apresentado é composto por uma média de 3 pontos de medição em cada corpo-de-prova:

Tabela 7: Dimensionais dos corpos-de-prova de tração.

CP	Comprimento Útil	Largura	Espessura
CP1	137.8mm	25.0mm	9.2mm
CP2	138.1mm	24.9mm	9.5mm
CP3	137.9mm	24.7mm	9.7mm
CP4	138.1mm	24.7mm	9.5mm
CP5	137.9mm	24.5mm	9.8mm
CP6	138.0mm	24.9mm	9.7mm
CP7	138.0mm	24.6mm	9.5mm
CP8	138.1mm	24.7mm	9.5mm
CP9	138.1mm	24.8mm	9.6mm
CP10	138.0mm	25.1mm	9.3mm
CP11	138.1mm	24.7mm	9.1mm
CP12	138.2mm	24.9mm	9.1mm
CP13	138.1mm	24.7mm	9.4mm
CP14	138.1mm	24.6mm	9.3mm
CP15	138.0mm	24.9mm	9.4mm
CP16	138.0mm	24.5mm	9.5mm
CP17	138.0mm	24.7mm	9.4mm
CP18	138.1mm	24.9mm	9.6mm
CP19	137.9mm	24.8mm	9.7mm
CP20	138.1mm	24.9mm	9.6mm
CP21	137.8mm	24.4mm	9.7mm
CP22	138.0mm	24.6mm	9.7mm
CP23	137.9mm	24.7mm	9.7mm
CP24	137.9mm	24.7mm	9.6mm
CP25	138.0mm	24.8mm	9.5mm

Tabela 8: Dimensionais dos corpos-de-prova de flexão.

CP	Comprimento.	Largura	Espessura
CP1	250.1mm	25.0mm	10.3mm
CP2	249.9mm	25.0mm	10.3mm
CP3	249.9mm	25.2mm	10.1mm
CP4	249.9mm	25.0mm	10.3mm
CP5	250.0mm	24.8mm	10.4mm
CP6	249.9mm	24.9mm	10.0mm
CP7	249.9mm	25.0mm	10.1mm
CP8	250.0mm	25.0mm	10.2mm
CP9	249.9mm	24.9mm	10.1mm
CP10	250.0mm	25.3mm	10.0mm

4.5. Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado seguindo as recomendações da norma ASTM D3039/D3039M. O número de amostras testadas foi determinado baseando-se nas informações encontradas na literatura que recomenda uma quantidade superior a 20 amostras para a distribuição de Weibull. Apesar do aumento do tamanho amostral, a utilização da distribuição de Weibull permite a extrapolação das propriedades mecânicas quando há variação volumétrica do material compósito.[18]

Para todos os ensaios foi utilizada a máquina Shimadzu AG-X 100kN, com uma célula de carga (PWG-100kNA) de 100kN e velocidade de deslocamento do travessão de 2mm/min, o que representou uma taxa de deformação aproximadamente de $0,242m.s^{-1}$. Acoplado aos corpos-de-prova, em cada teste, foi utilizado um extensômetro também da Shimadzu, modelo SG50-50, de comprimento inicial L_0 igual a 50mm. Todos os corpos-de-prova foram ensaiados até a ruptura e os dados gerados pelo software integrado à máquina. A Figura 14 apresenta a montagem do ensaio de tração:

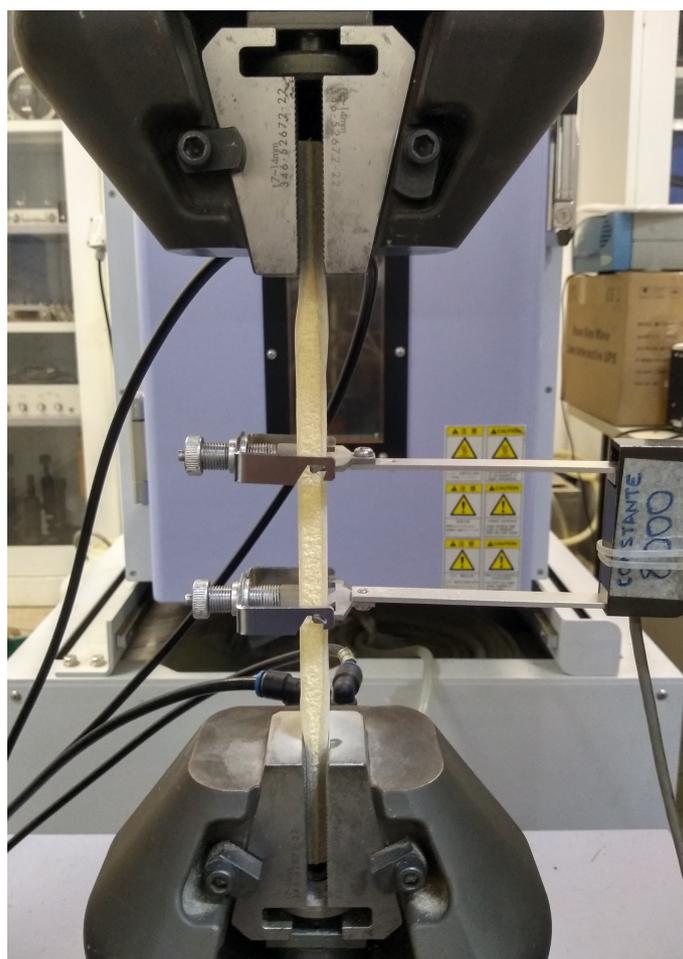


Figura 14: Montagem do ensaio de tração.

4.5.1. Obtenção dos Dados de Tração

Os dados obtidos provenientes do ensaio de tração foram a força de reação do material F , como resistência ao deslocamento imposto ao mesmo, medido pela célula de carga, bem como o deslocamento do material δ medido pelo extensômetro. Com esses dados, foi possível calcular a tensão de ruptura σ e a deformação de ruptura ϵ do material, conforme as Equações (9) e (10), respectivamente. Onde A representa a área média da seção transversal de cada corpo-de-prova e L_0 representa o comprimento inicial do extensômetro utilizado. E conforme a recomendação da norma, o módulo de elasticidade E pode ser calculado através da relação linear do gráfico tensão-deformação.

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A} \quad (9)$$

$$\epsilon_f = \frac{\delta_f}{L_0} \quad (10)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (11)$$

As propriedades mecânicas obtidas e analisadas do ensaio de tração foram a tensão de ruptura σ_f , deformação de ruptura ϵ_f e o módulo de elasticidade E .

A tensão máxima de ruptura foi obtida considerando-se o ponto de maior carga aplicada ao corpo-de-prova antes do material fraturar. Não foi observado nenhum ponto de instabilidade e nem comportamento bilinear em nenhum dos testes. A deformação de ruptura foi obtida segundo a descrição acima e a Equação (10). Os valores de módulo de elasticidade foram obtidos segundo a recomendação da norma D3039/D3039M, utilizando a inclinação da curva tensão-deformação na faixa de 1000μ e 3000μ de deformação do material.

4.6. Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão foi realizado seguindo as recomendações da norma ASTM D7264/D7264M. O número de testes realizados foi reduzido para 10 corpos-de-prova para minimizar o custo de fabricação e teste dos mesmos, mas ainda assim permitindo uma análise estatística satisfatória.

A mesma máquina de ensaio universal também foi utilizada para o ensaio de flexão. A velocidade de deslocamento do travessão foi de 1mm/min. Para a medição da deflexão

dos corpos-de-prova utilizou-se um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Todos os corpos-de-prova foram ensaiados até que a carga máxima atingisse o patamar constante máximo e os dados também foram gerados pelo software integrado à máquina (*TrapeziumX*). A Figura 15 apresenta a montagem do ensaio de flexão:



Figura 15: Montagem do ensaio de flexão.

4.6.1. Obtenção dos Dados de Flexão

Os dados obtidos do ensaio de flexão foram a força de reação do material P , como resistência ao deslocamento imposto ao centro do corpo do material, medido pela célula de carga, bem como a deflexão no centro do material δ medido pelo LVDT. Com essas informações foi possível calcular a tensão máxima flexional σ (testes foram realizados até a carga máxima apresentada pela máquina) e a deformação máxima flexional ε utilizando-se as Equações (12) e (13), respectivamente. Onde L é a distância entre apoios correspondente à 160mm, b a média da largura e h a espessura média do corpo-de-prova. O módulo de elasticidade flexional E_f foi calculado segundo a recomendação da norma ASTM D7264/D7264M.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{6h\delta}{L^2} \quad (13)$$

$$E_f^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (14)$$

As propriedades mecânicas flexionais obtidas e analisadas foram a tensão máxima flexional σ , deformação flexional ε e o módulo de elasticidade flexional E_f .

A tensão máxima de flexão foi obtida adotando-se o patamar, aproximadamente constante, de maior carga aplicada ao corpo-de-prova. Algumas curvas de força-deflexão apresentaram comportamento inicial não-linear. A deformação flexional foi calculada segundo a Equação (13) conforme descrito anteriormente. Já os valores de módulo de elasticidade flexional foram calculados conforme a Equação (14) pelo método de corda adotando uma faixa de 2000μ , no entanto, utilizando-se os pontos de 3000μ e 5000μ de deformação do material para garantir o comportamento linear de todos os corpos-de-prova.

As vigas-sanduiche são estruturas complexas, as equações empregadas seguindo a norma ASTM D7264/D7264M pertencem a mecânica do contínuo para materiais homogêneos, as quais não representam adequadamente o material em questão. A norma adequada para calcular as propriedades mecânicas flexionais das vigas-sanduiche é a norma ASTM D7050/D7050M. [19]

A norma ASTM D7050/D7050M não foi utilizada devido ao tempo maior para a realização dos ensaios.

4.7. Análise Estatística

A análise estatística inicial, tanto para o ensaio de tração quanto para o ensaio de flexão, consistiu no cálculo de média e desvio-padrão conforme as Equações (15) e (16), bem como o coeficiente de variação CV conforme a Equação (17) para a tensão de ruptura σ_f , deformação de ruptura ε_f , tensão máxima flexional σ e deformação máxima flexional ε . O procedimento foi repetido para o módulo de elasticidade E e o módulo de elasticidade flexional E_f após o cálculo do coeficiente angular da curva tensão-deformação.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i \quad (15)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (16)$$

$$CV = 100 \frac{s_{n-1}}{\bar{x}} \quad (17)$$

4.7.1. Aplicação da Distribuição de Weibull

O tratamento dos dados foi realizado aplicando-se a distribuição de Weibull de dois parâmetros, visto que não se pode garantir a existência de um valor mínimo para as propriedades mecânicas, assim o parâmetro de localização τ foi adotado como zero, representando que as propriedades sejam positivas. Portanto, a distribuição de Weibull de dois parâmetros mostrou ser mais adequada para representar os dados obtidos.

O método de regressão linear foi utilizado para a determinação dos dois parâmetros pertencentes à distribuição: O parâmetro de escala β e o fator de forma α . A linearização da distribuição de Weibull é apresentada na Equação (18), aplicando-se o logaritmo natural duas vezes na Equação (5).

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t, \beta, \alpha)} \right) \right] = \alpha [\ln(t) - \ln(\beta)] \quad (18)$$

Na equação 18, x representa os valores obtidos de propriedade mecânica estudada, seja de tração quanto de flexão. $F(t, \beta, \alpha)$ representa a probabilidade que uma determinada propriedade mecânica tenha o valor menor ou igual de x . Assim, os valores de $F(t, \beta, \alpha)$ devem ser estimados para o uso do método de regressão linear utilizando-se funções estimadoras disponíveis. Para isso, algumas propostas que estimam $F(t, \beta, \alpha)$ através de uma função de distribuição empírica, entre elas Jiang, Murthy e Xie descrevem cinco possibilidades.[20]

$$F(t) = \frac{j}{N} \quad (19) \quad F(t) = \frac{j}{N+1} \quad (20)$$

$$F(t) = \frac{j-0.5}{N} \quad (21) \quad F(t) = \frac{j-0.3}{N+0.4} \quad (22)$$

$$F(t) = \frac{j-0.375}{N+0.25} \quad (23)$$

Para o uso das funções estimadoras é necessário ordenar de forma crescente o conjunto de dados, associando um valor de x à um novo índice j , respectivamente. Assim, sabendo-se $F(x, \beta, \alpha)$ é possível aplicar o método de regressão linear por mínimos quadrados. A figura 16 apresenta o gráfico gerado relacionando $\ln(x)$ com $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(x, \beta, \alpha)} \right) \right]$.

Com a curva linearizada é possível determinar os valores de α e β . O coeficiente angular da reta é o fator de forma α e o coeficiente linear é utilizado na equação 24 para

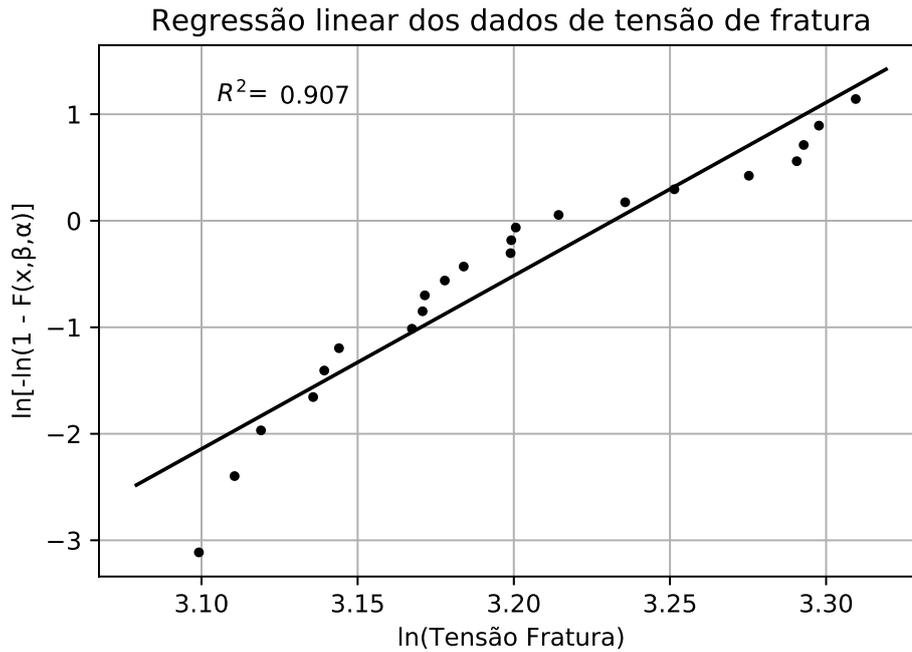


Figura 16: Gráfico de regressão linear aplicado.

determinar o parâmetro de escala β .

$$\beta = e^{\frac{-b}{\alpha}} \quad (24)$$

Sabendo-se os dois parâmetros da distribuição de Weibull é possível calcular os valores das propriedades mecânicas para um determinado valor de confiabilidade $R(x)$ utilizando-se a equação 25. No contexto deste trabalho, a probabilidade relevante é $R(x)$ representa probabilidade de uma determinada propriedade mecânica assumir, no mínimo, o valor de x . A probabilidade adotada foi de 95% como comumente é adotado na engenharia.

$$R(t, \beta, \alpha) = \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (25)$$

Verificou-se dentre as principais funções estimadoras aquela que melhor representasse o comportamento dos dados obtidos. Assim, a função estimadora escolhida foi a Equação (20) por apresentar melhor coeficiente de determinação com os dados obtidos. As Figuras 17 e 18 apresentam a curva de confiabilidade x tensão, dos ensaios de tração e flexão, com os cinco estimadores apresentados e seus respectivos coeficientes de determinação:

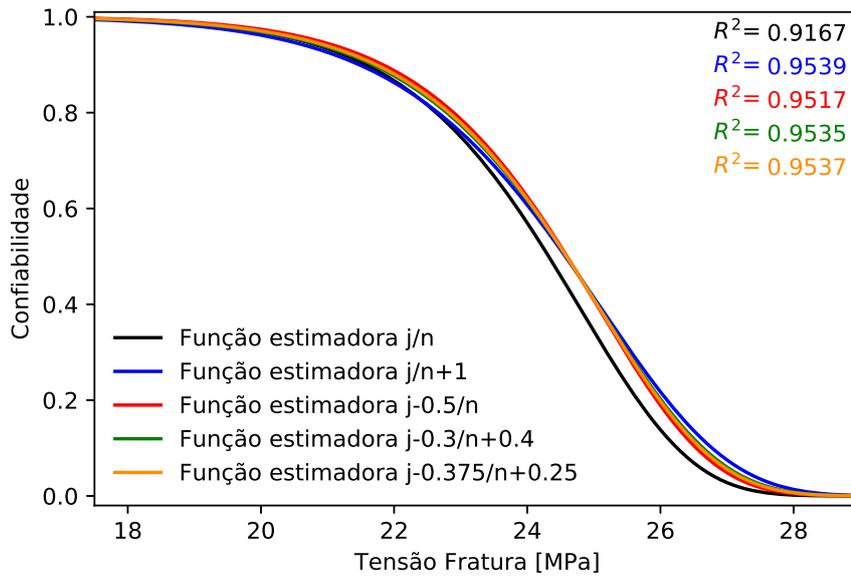


Figura 17: Curva de confiabilidade dos estimadores para ensaio de tração.

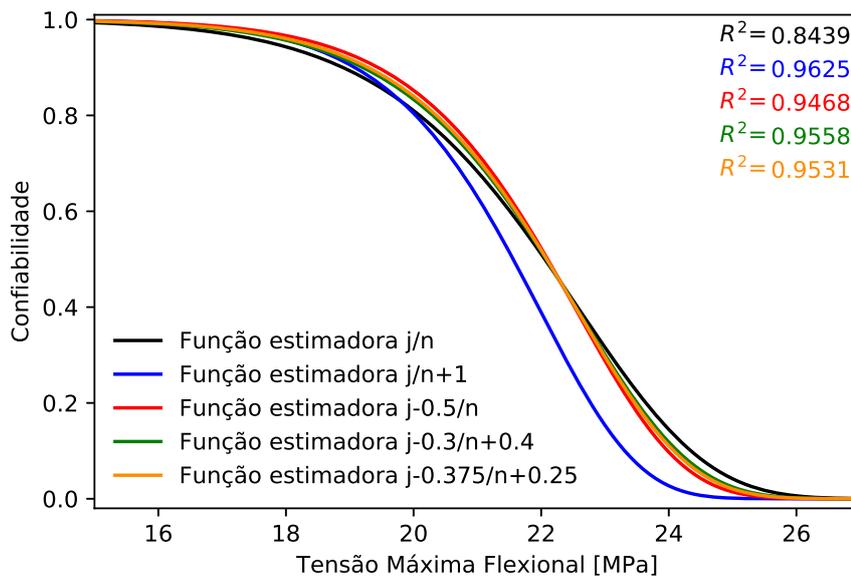


Figura 18: Curva de confiabilidade dos estimadores para ensaio de flexão.

4.7.2. Teste de Hipótese para adesão dos dados

Com o objetivo de verificar se a adesão dos dados à distribuição de Weibull poderia ser aceita, foi realizado o teste de hipótese proposto por Anderson-Darling com a finalidade de concluir se a hipótese nula de que os dados seguem tal distribuição poderia ser aceita.[17]

Cada propriedade mecânica foi tratada separadamente de acordo com o número

de amostras, médias e variâncias conforme a Equação 5 e Equação 8. A estatística A^2 foi calculada, e depois corrigida, utilizando-se o caso 3 da Tabela 2. Assim o p-valor foi calculado conforme à Tabela 3 possibilitando concluir se a hipótese H_0 deve ser aceita ou rejeitada. Os resultados dessa análise encontram-se no próximo capítulo.

4.8. Observação Microestrutural

Para alguns corpos-de-prova foram realizadas micrografias da seção fraturada com aumento de 25X e 100X utilizando-se MEV (microscópio eletrônico de varredura). Esses corpos-de-prova foram metalizados com deposição de ouro utilizando-se um metalizador por *sputtering*.

Com as imagens foi possível observar qualitativamente a aparência das fraturas.

4.9. Densidade do Compósito

O método hidrostático foi utilizado para a medição da densidade do material, esse método consiste na medição da massa de uma amostra seca e submersa em água. Assim, utilizando-se a Equação 26 e com os valores de massa seca (m_c), massa submersa em água (m_s) e medindo a densidade da água (ρ_L) é possível calcular a densidade do compósito (ρ_c).

$$\rho_c = \left(\frac{m_c}{m_c - m_s} \right) \rho_L \quad (26)$$

Uma vez obtido o valor da densidade do material é possível calcular as propriedades mecânicas específicas do material, a saber, a resistência específica obtida pela divisão da tensão de ruptura pela densidade e também o módulo específico obtido pelo módulo de elasticidade dividido pela densidade. Dessa forma é possível localizar o material em um dos diagramas de seleção de materiais e compará-lo com os materiais disponíveis.[21]

5. Resultados e Discussões

5.1. Análise preliminar

Os corpos-de-prova 3 e 7 (CP3 e CP7) apresentaram a fratura com descolamento da laminação do núcleo, dessa forma uma análise preliminar por diagrama de extremos e quartis, tanto para o ensaio de tração quanto para o ensaio de flexão, foi feita para verificar se haviam *outliers* e retirar esses dados do restante das análises. A Figura 19 apresenta o diagrama de caixa dos dados obtidos:

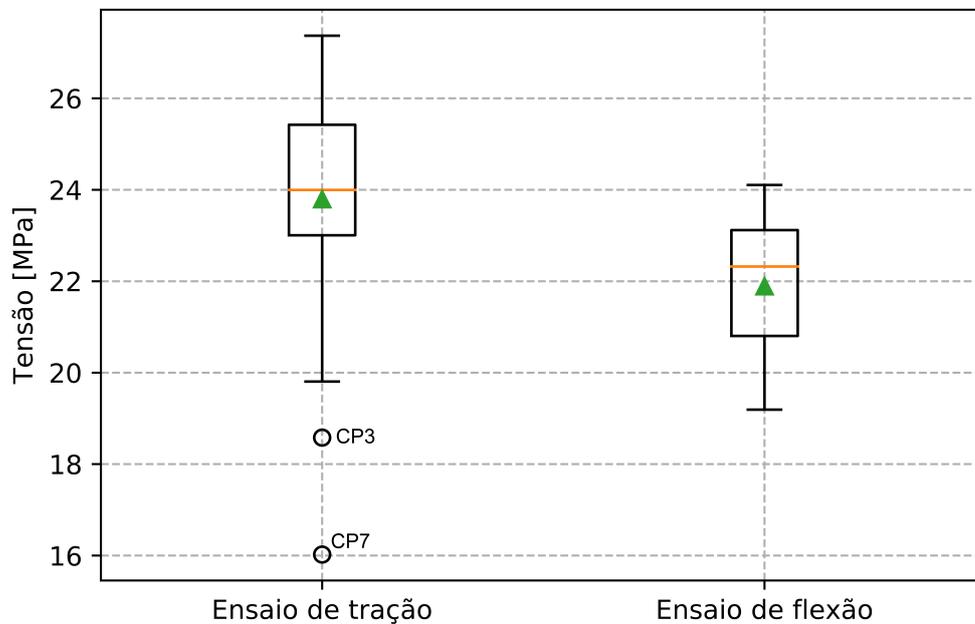


Figura 19: Diagrama de caixa dos ensaios;

No gráfico acima, os traços laranjas correspondem a mediana, os triângulos verdes as médias, as caixas de *boxplot* os percentis superior e inferior referentes a 75% e 25%, respectivamente.

A partir da Figura 19, dois testes do ensaio de tração foram retirados por serem *outliers*, os corpos-de-prova 3 e 7. O restante dos resultados e discussões, portanto, não contemplam tais dados.

5.2. Resultados preliminares

Inicialmente, tanto para o ensaio de tração quanto para o ensaio de flexão, foram geradas as curvas de tensão-deformação e foram calculadas as médias, desvios-padrão e coeficiente de variação de ambos.

5.2.1. Ensaio de tração

As curvas de tensão-deformação para o ensaio de tração estão apresentadas na Figura 20, com os vinte e três (23) corpos-de-prova ensaiados.

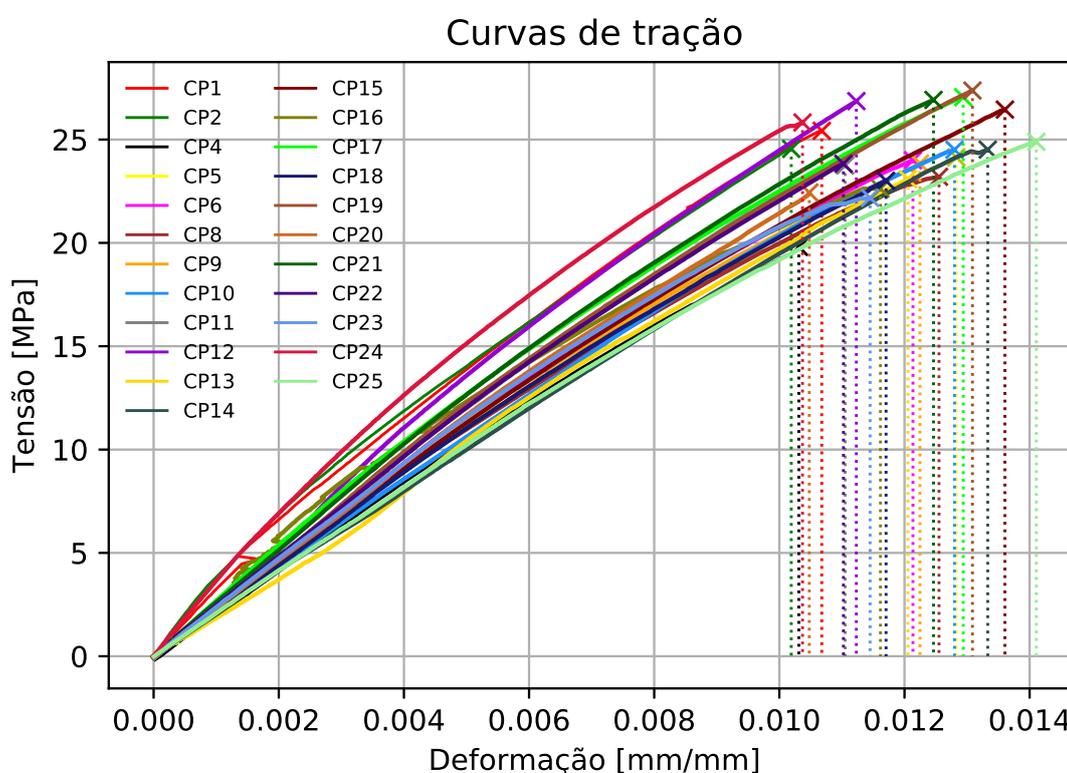


Figura 20: Resultado dos corpos-de-prova após os testes de tração;

É possível observar uma ligeira não-linearidade das curvas plotadas, característica de curvas de tensão-deformação de materiais poliméricos e é observada neste estudo devido à elevada fração volumétrica do núcleo em relação ao laminado do compósito. Além disso, é possível notar uma grande dispersão entre os valores das propriedades de cada corpo-de-prova, o que indica a necessidade de um estudo estatístico mais aprofundado afim de caracterizar as propriedades mecânicas do material.

Os resultados de média, desvio-padrão e coeficiente de variação das três propriedades mecânicas do ensaio de tração encontram-se na Tabela 9:

Tabela 9: Resultados dos corpos-de-prova de tração.

Propriedades	σ_f [MPa]	ε_f [%]	E [GPa]
Média	24,36	1,19	2,42
Desvio-padrão	1,85	0,11	0,33
coef. de variação	7,59%	9,54%	13,47%

5.2.2. Ensaio de flexão

As curvas de tensão-deformação para o ensaio de flexão estão apresentadas na Figura 21, contendo todos os dez (10) corpos-de-prova ensaiados.

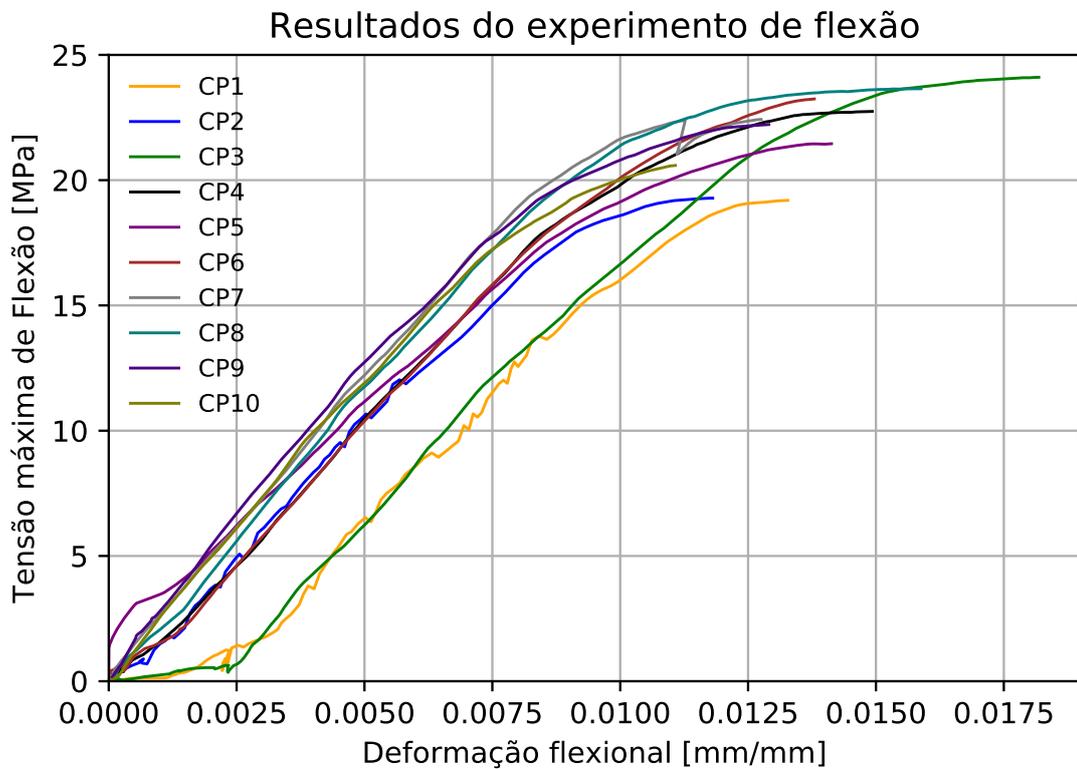


Figura 21: Resultado dos corpos-de-prova após os testes de tração;

Os resultados de média, desvio-padrão e coeficiente de variação das três propriedades mecânicas do ensaio de flexão encontram-se na Tabela 10:

Tabela 10: Resultados dos corpos-de-prova de flexão.

Propriedades	σ [MPa]	ε [%]	E_f^{chord} [GPa]
Média	21,89	1,39	2,37
Desvio-padrão	1,64	0,20	0,18
coef. de variação	7,50%	14,13%	7,72%

5.3. Análise estatística pela distribuição de Weibull

Em ambos os ensaios é possível observar que os valores dos desvios-padrões são elevados (todos acima de 5%), característica inerente aos materiais compósitos e teoricamente independente do método de processamento. Além disso, média e desvio padrão, conforme calculados acima, são parâmetros de uma distribuição normal. Segundo esta distribuição, o valor t em questão tem probabilidade igual a 68% de estar a um desvio padrão de distância da média, para mais ou para menos. Essa probabilidade representa um nível de confiança muito baixo, não representando adequadamente o comportamento desse material. [14]

A Figura 22 apresenta as curvas em azul correspondentes ao ensaio de tração e as curvas vermelhas para o ensaio de flexão, em ambos acompanhadas das áreas equivalentes à faixa de variação referente à probabilidade de 68%. Dessa forma, optou-se pela utilização da distribuição de Weibull, que é capaz de representar melhor os dados experimentais, afim de se obter um estudo estatístico mais aprofundado.

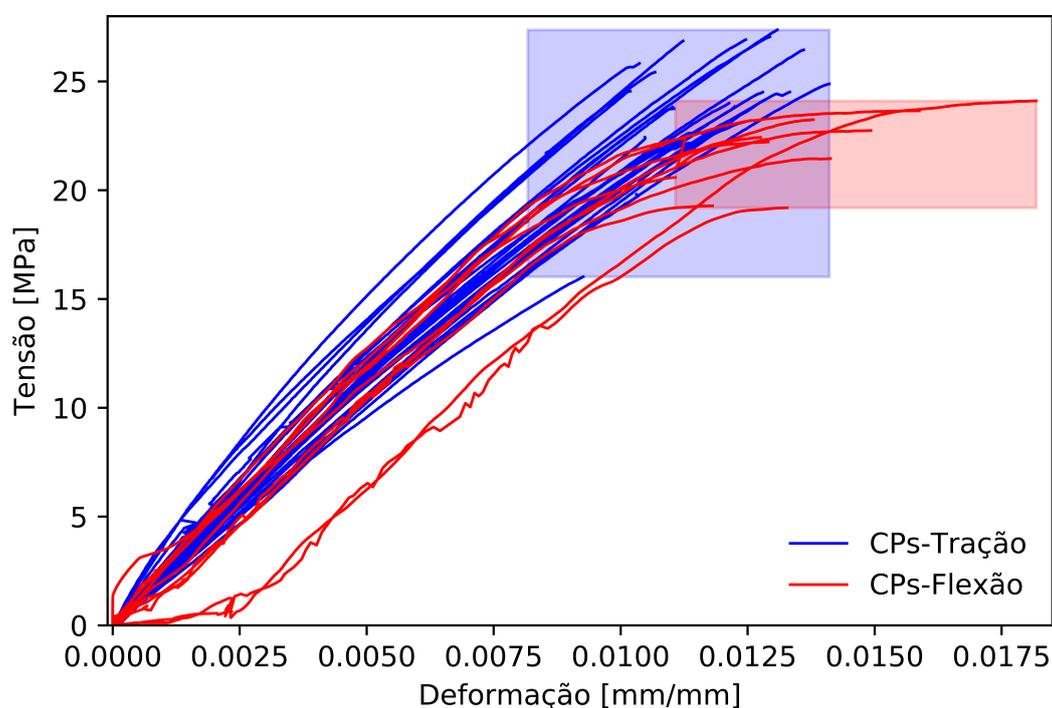


Figura 22: Faixa de variação das propriedades mecânicas equivalente a confiabilidade de 68%;

A aplicação da distribuição de Weibull foi feita, inicialmente com 5 funções estimadoras para que se fosse possível a comparação entre os resultados de cada uma delas como apresentado anteriormente.[20]

Os resultados apresentaram semelhanças significativas, embora a diferença entre os resultados para cada estimador aumente conforme o tamanho da amostra estudada diminui. O estimador $j/N+1$ se mostrou mais apropriado, e desta forma, foi escolhido para a análise por apresentar uma comportamento mais conservador conforme apresentado na Figura 17 e Figura 18. Com isso, os resultados apresentados a partir dessa seção referem-se apenas ao uso do estimador $j/N+1$.

5.3.1. Ensaio de tração

Para cada propriedade mecânica obtida através do ensaio de tração, utilizando-se a regressão linear da equação de Weibull foi gerada a comparação dos dados experimentais com a reta que os mesmos descrevem, obtendo-se assim, os valores dos parâmetros α e β , além do coeficiente de determinação R^2 de cada uma delas. As Figuras 23, 24 e 25 apresentam a linearização dos dados e da reta, além da incerteza de cada uma das propriedades.

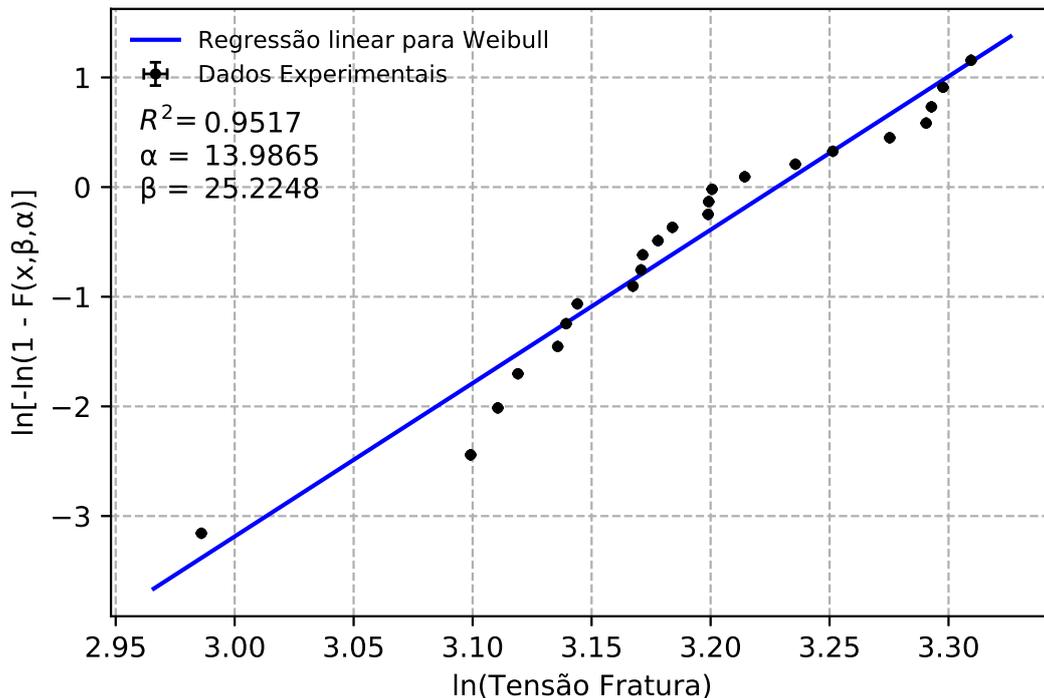


Figura 23: Linearização de Weibull da tensão de ruptura;

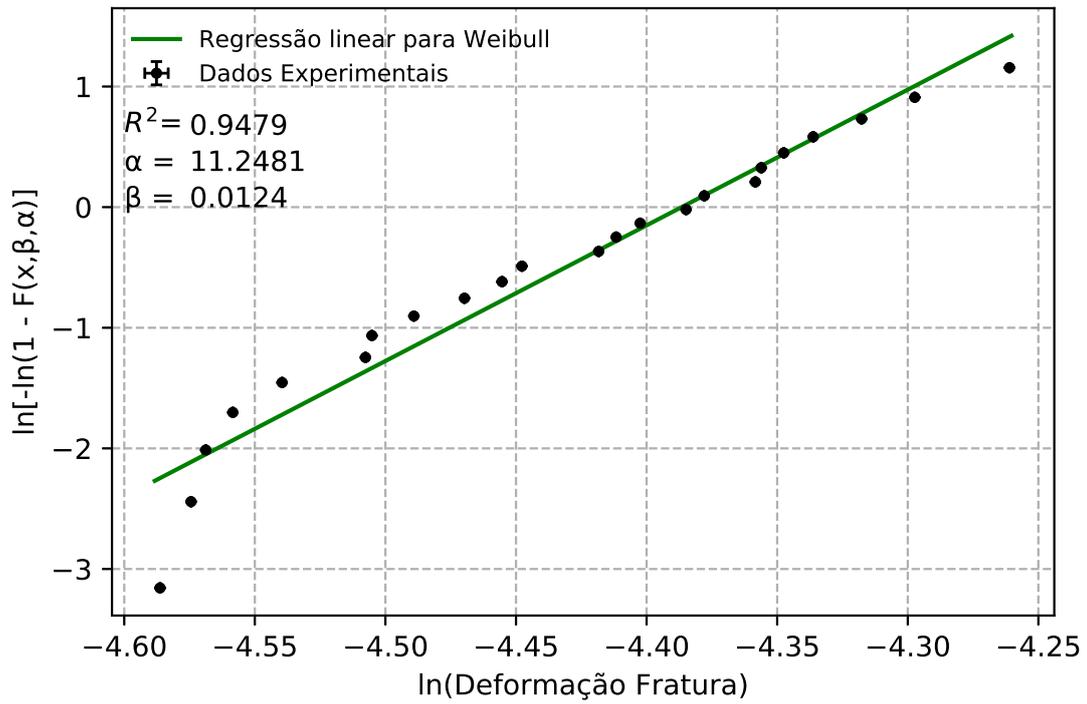


Figura 24: Linearização de Weibull da deformação de ruptura;

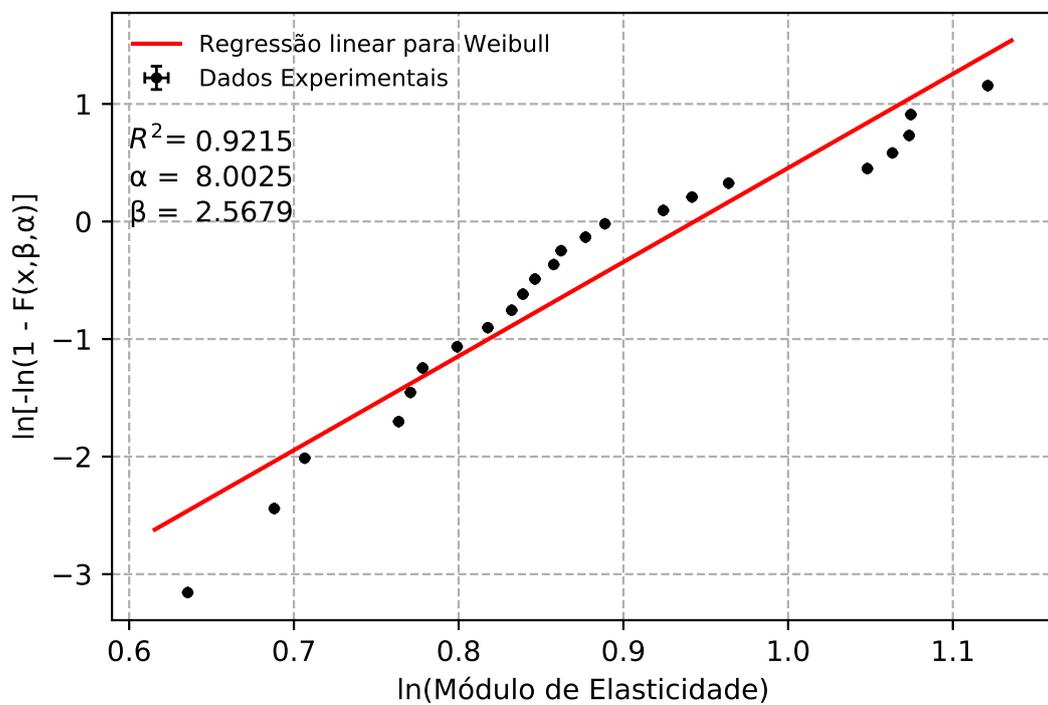


Figura 25: Linearização de Weibull do módulo de elasticidade;

Os resultados obtidos, que representam os valores característicos para a tensão de ruptura, deformação de ruptura e módulo de elasticidade, encontram-se na Tabela 11 com uma probabilidade de excedência de 95%. A Tabela 11 também apresenta os parâmetros α e β de Weibull para cada uma das propriedades:

Tabela 11: Resultados para confiabilidade de 95,45%

Propriedades	α	β	R^2	Valor _{95,45%}
σ_f	13,987	25,225	0,952	20,258MPa
ε_f	11,248	0,012	0,948	0,947%
E	8,002	2,568	0,922	1,750GPa

Com as informações do parâmetro de escala β e o fator de forma α da distribuição de Weibull do ensaio de tração, foi possível analisar o comportamento da função distribuição das três propriedades mecânicas. A Figura 26 apresenta a função densidade de probabilidade:

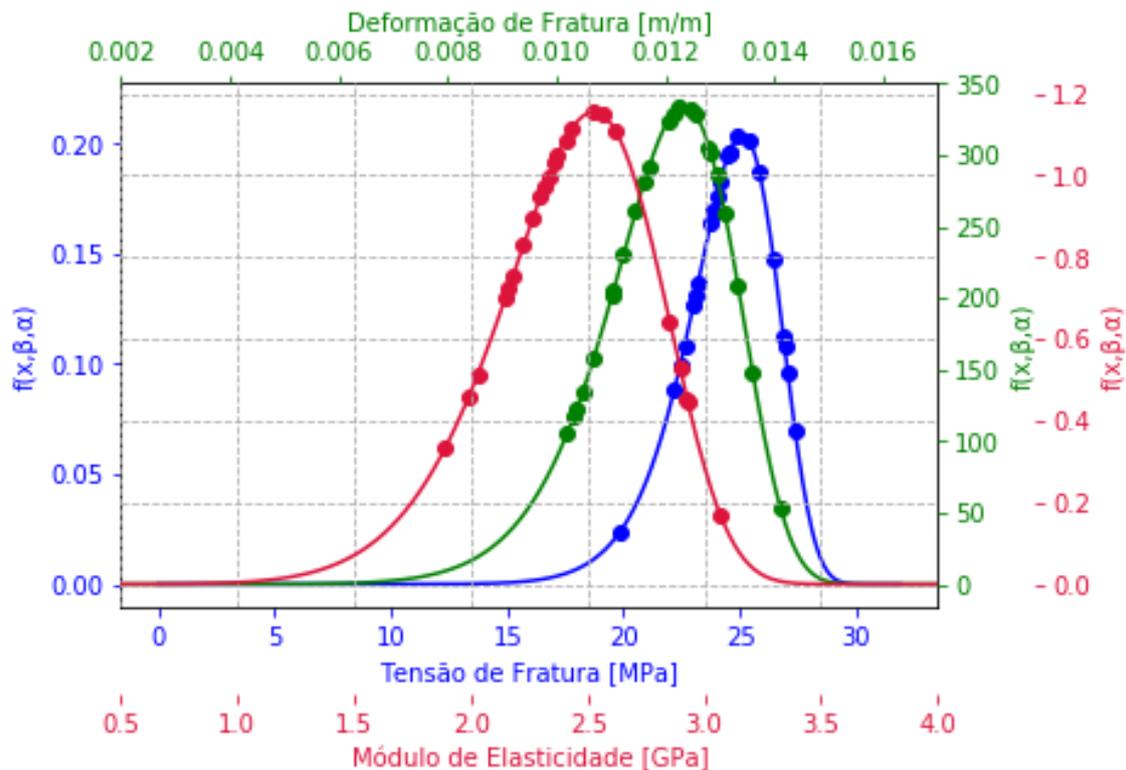


Figura 26: Densidade de probabilidade de Weibull do ensaio de tração;

Observando a densidade de probabilidade das propriedades mecânicas, pode-se notar que a tensão de ruptura apresenta uma curva mais fechada, enquanto o módulo de elasticidade uma curva mais aberta, desta forma, pode-se concluir que a tensão de ruptura tem uma menor dispersão dos dados enquanto o módulo de elasticidade uma

maior dispersão. As equações 27 e 28 referentes à média e ao desvio-padrão, respectivamente, comprovam tal afirmação conforme a Tabela 12 apresenta.

$$M_w(x) = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (27)$$

$$dp_w(x) = \sqrt{\beta^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right]} \quad (28)$$

Tabela 12: Média e desvio-padrão da distribuição de Weibull.

Propriedades	σ_f [MPa]	ε_f [%]	E [GPa]
$M_w(x)$	24,30	1,19	2,42
$dp_w(x)$	2,13	0,13	0,36

5.3.2. Ensaio de flexão

Para cada propriedade mecânica obtida através do ensaio de flexão, utilizando-se a regressão linear da equação de Weibull foi gerada a comparação dos dados experimentais com a reta que os mesmos descrevem, obtendo-se assim, os valores dos parâmetros α e β , nesse caso para as propriedades flexionais, além do coeficiente de determinação de cada uma delas. As Figuras 27, 28 e 29 apresentam a linearização dos dados e da reta, além da incerteza de cada uma das propriedades.

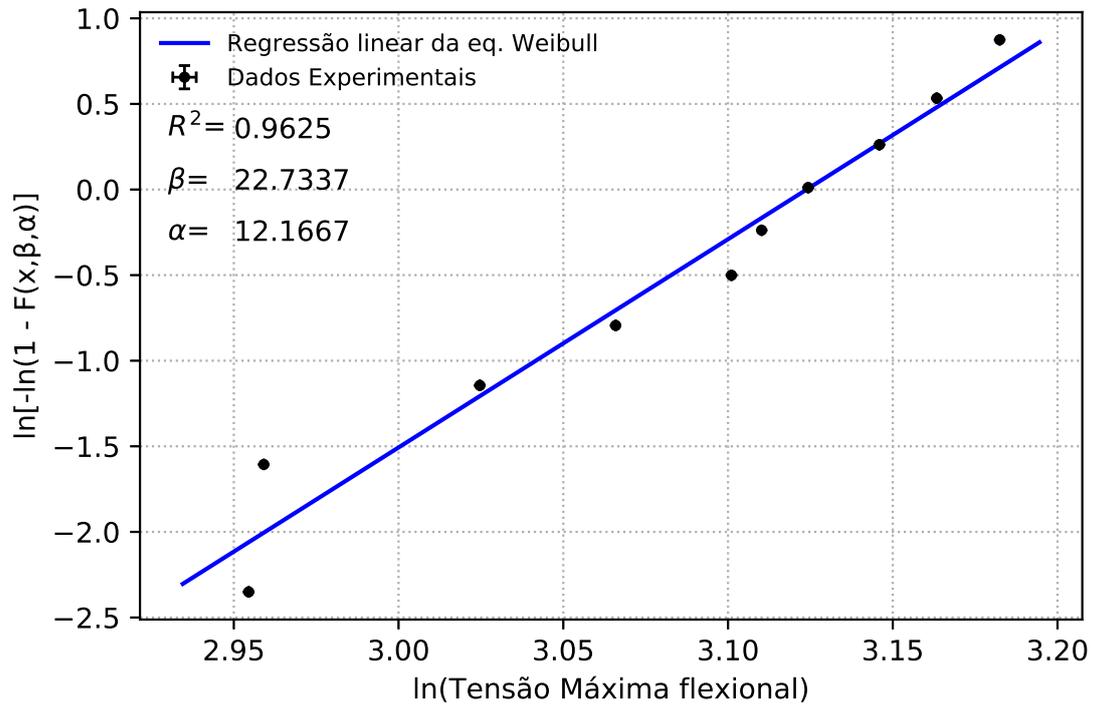


Figura 27: Linearização de Weibull da tensão máxima flexional;

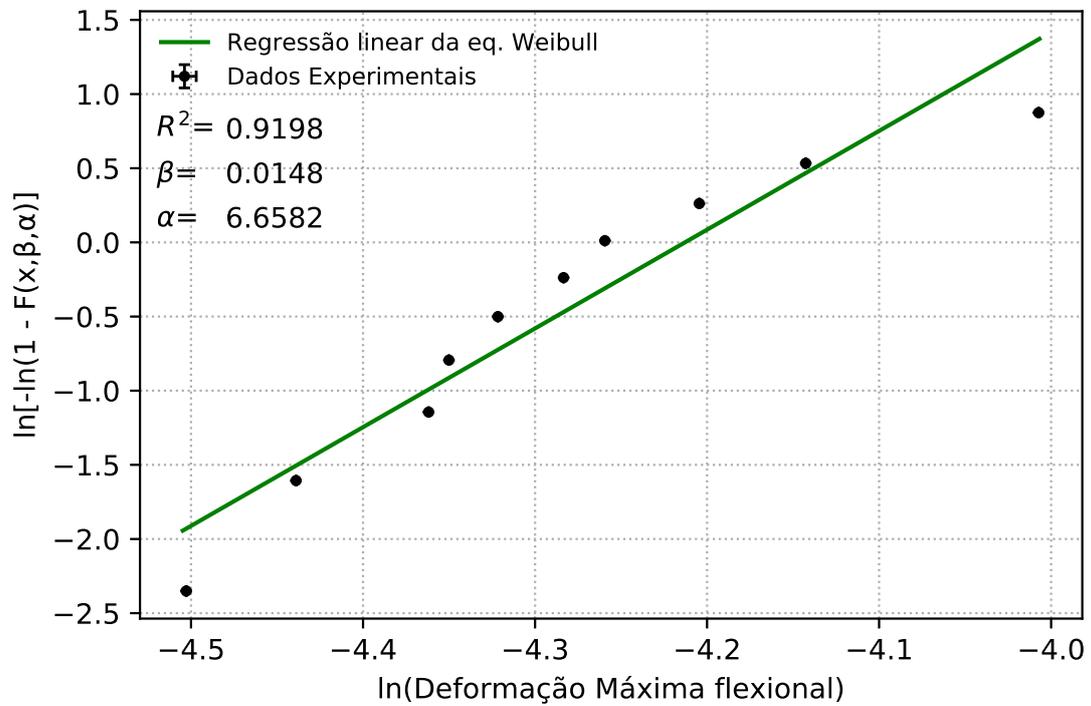


Figura 28: Linearização de Weibull da deformação máxima flexional;

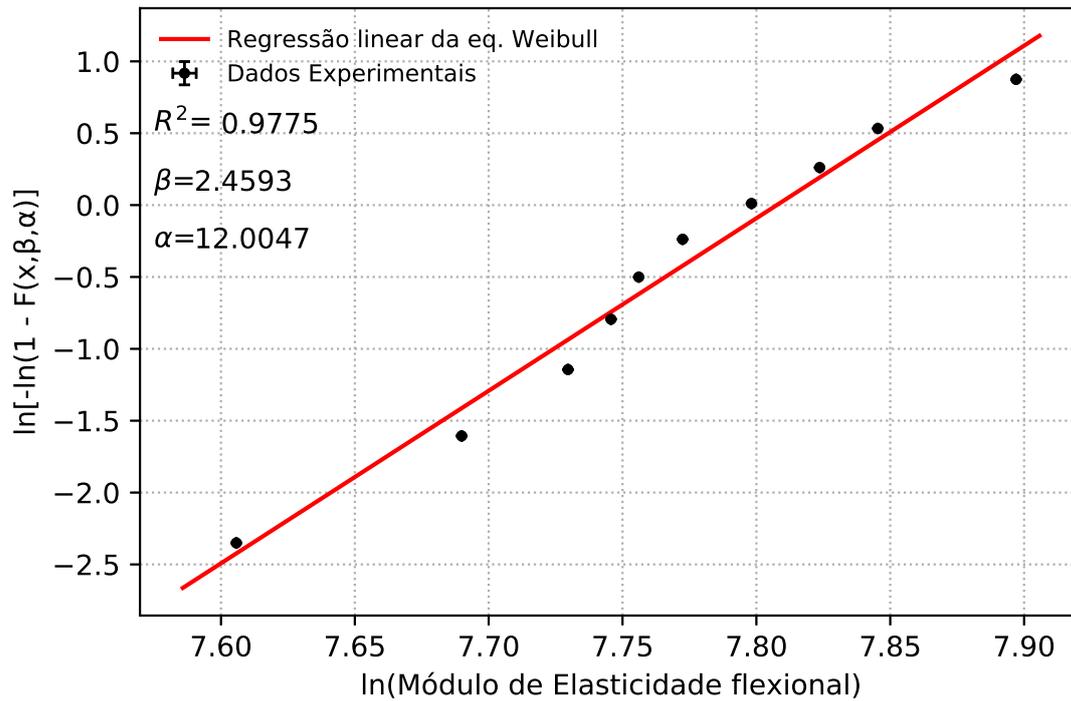


Figura 29: Linearização de Weibull do módulo de elasticidade flexional;

Os resultados obtidos para a tensão máxima flexional, deformação máxima flexional e módulo de elasticidade flexional encontram-se na Tabela 13 com um nível de confiança de 95,45%. A Tabela 13 também apresenta os parâmetros α e β de Weibull para cada uma das propriedades:

Tabela 13: Resultados para confiabilidade de 95,45%

Propriedades	α	β	R^2	Valor _{95,45%}
σ	12,167	22,734	0,962	17,668MPa
ε	6,658	0,015	0,920	0,934%
E_f^{chord}	12,005	2,459	0,978	1,905GPa

Analogamente, utilizando-se os parâmetros da distribuição de Weibull foi possível plotar a função densidade de probabilidade como Figura 30 apresenta:

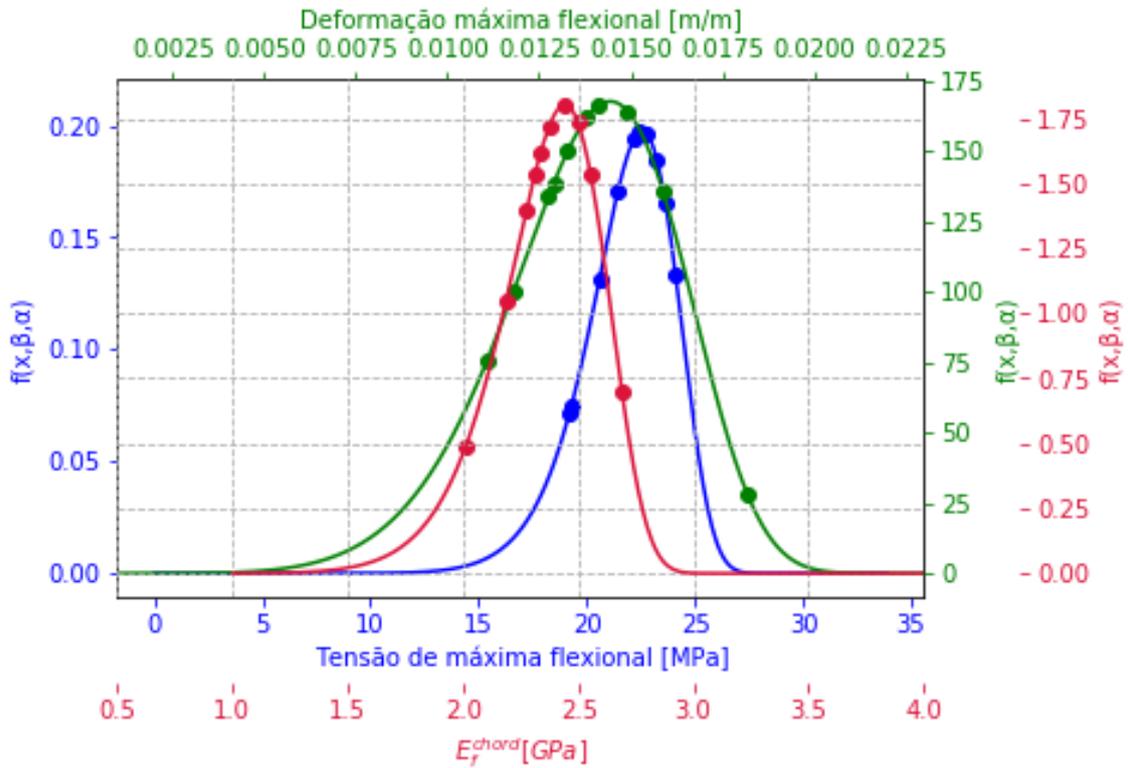


Figura 30: Densidade de probabilidade de Weibull do ensaio de flexão;

E analisando o comportamento das densidades de probabilidade das propriedades mecânicas flexionais, se tem menor dispersão da tensão máxima flexional e maior dispersão da deformação máxima flexional. A Tabela 14 apresenta os valores de média e desvio-padrão por Weibull:

Tabela 14: Média e desvio-padrão da distribuição de Weibull.

Propriedades	σ [MPa]	ε [%]	E_f^{chord} [GPa]
$M_w(x)$	21,80	1,38	2,36
$dp_w(x)$	2,18	0,24	0,24

5.4. Teste de Hipótese de Anderson-Darling

Por último, o teste de Anderson-Darling foi aplicado aos valores de todas as propriedades mecânicas obtidas, a estatística de p-valor calculada foi comparada com o nível de significância adotado ($\alpha = 5\%$), mostrando assim que para p-valores maiores que o nível de significância a hipótese H_0 deveria ser aceita. Os resultados encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15: Resultado do teste de Anderson-Darling.

Propriedades	A^2	$p - valor$	Hipótese H_0
σ_f [MPa]	0,526	0,820	Aceita
ε_f [%]	0,262	0,908	Aceita
E [GPa]	0,856	0,818	Aceita
σ [MPa]	0,282	0,639	Aceita
ε [%]	0,429	0,628	Aceita
E_f^{chord} [GPa]	0,239	0,328	Aceita

Baseando-se nos dados apresentados na Tabela 15, é possível concluir que a hipótese nula H_0 deve ser aceita e, portanto, os dados seguem a distribuição de Weibull.

5.5. Caracterização Microestrutural Qualitativa

As micrografias realizadas das seções transversais foram provenientes das rupturas do ensaio de tração. Buscou-se verificar a dispersão das fibras na laminação, bem como a interface entre o núcleo e a laminação, além de uma visão geral da seção do material utilizado no núcleo. A Figura 31 apresenta a micrografia com um aumento de 25x:

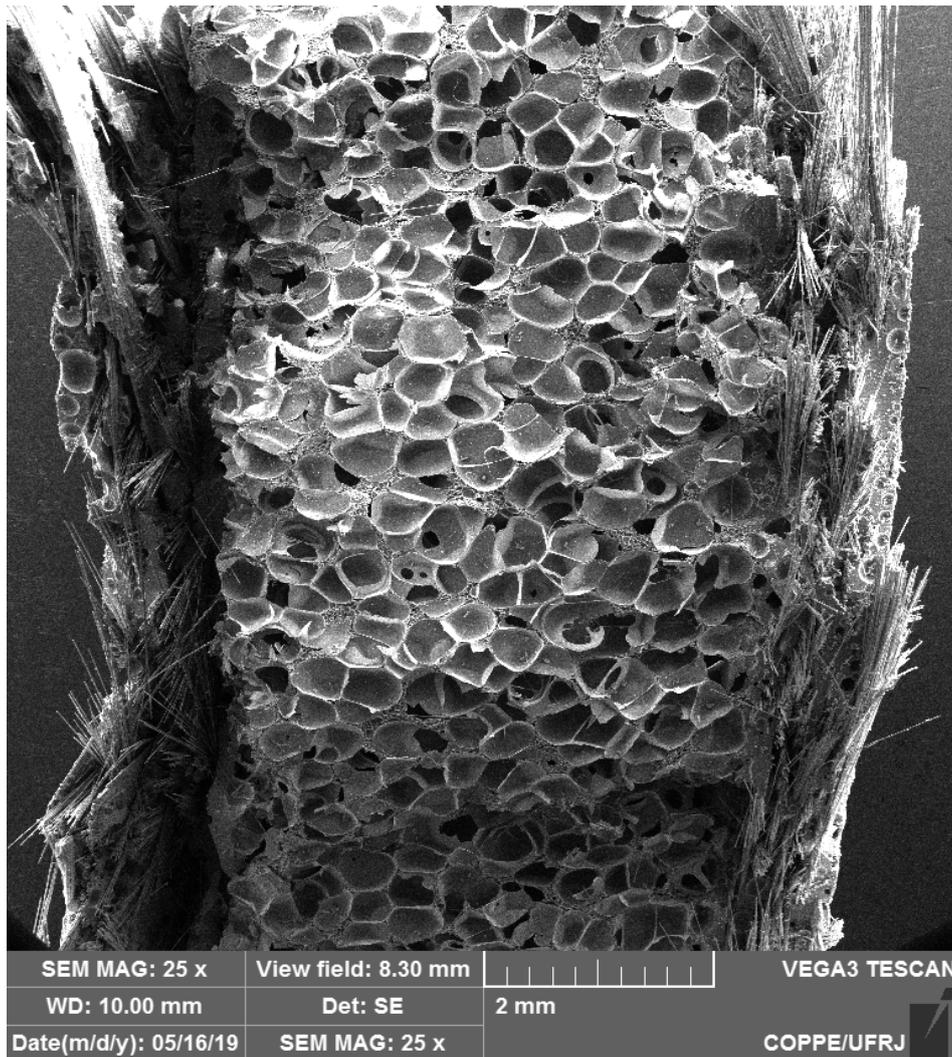


Figura 31: Micrografia com aumento de 25x;

Na micrografia acima, é possível observar o núcleo de espuma de PVC caracterizado por vazios, a aleatoriedade das fibras da lâmina, representando propriedades isotrópicas no plano de laminação, o que era esperado devido ao processo de fabricação da manta e laminação manual.

5.6. Comparação entre materiais disponíveis

Com a obtenção das propriedades mecânicas dos materiais com um nível de confiança de 95% e a respectiva densidade aparente média, foi possível calcular a resistência específica, bem como, o módulo específico conforme a Tabela 16 apresenta. A comparação com os materiais disponíveis foi feita utilizando-se uma diagrama de seleção de materiais, conforme proposto por Ashby.[21]

Tabela 16: Propriedades mecânicas específicas.

Propriedades	Valores
ρ [kg/m ³]	330
σ_f/ρ [MPa/(kg/m ³)]	0,07395
E/ρ [GPa/(kg/m ³)]	0,00736

Assim, através do diagrama apresentado na Figura 32, é possível concluir que o material estudado apresenta propriedades próximas às esperadas de materiais compósitos reforçados por fibra de vidro (GFRP).

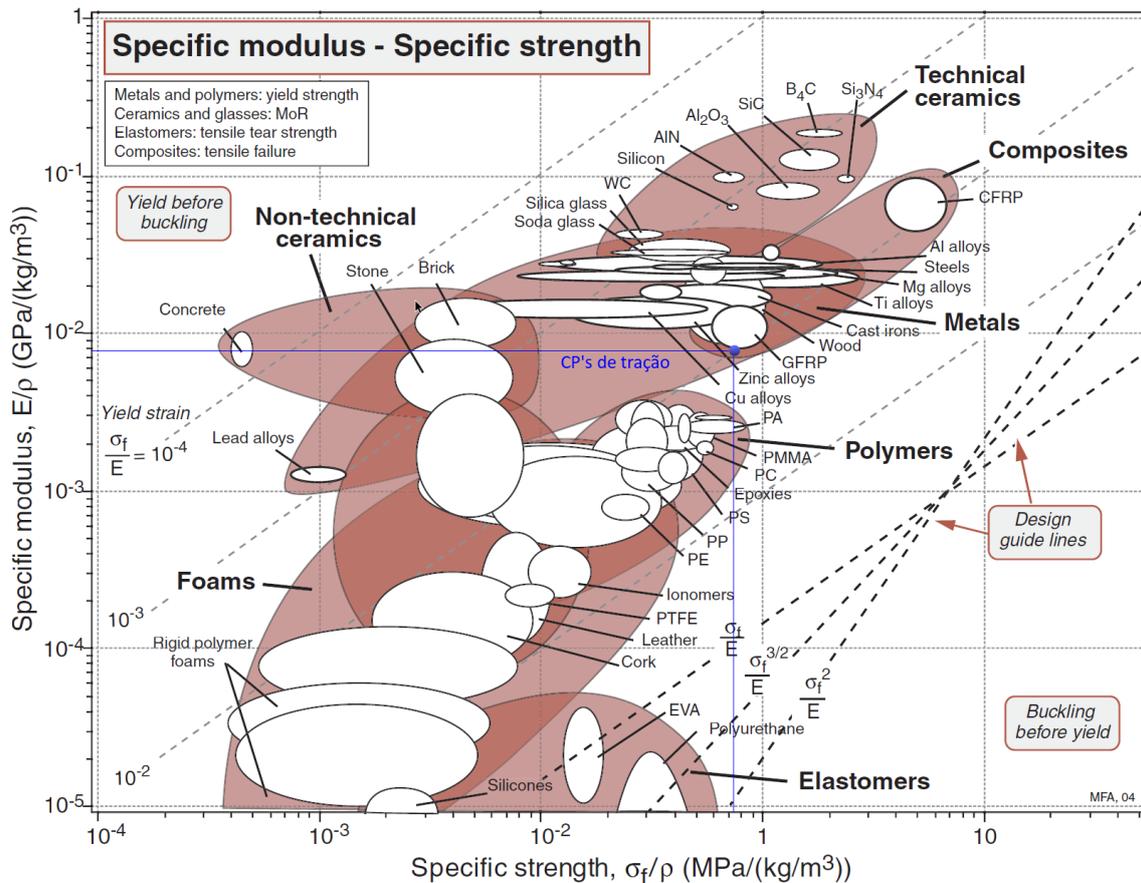


Figura 32: Diagrama de propriedades específicas; adaptado de [21]

5.7. Considerações dos Resultados Obtidos

Primeiramente, a dispersão das propriedades mecânicas mostrou-se relativamente elevada devido ao método de fabricação dos corpos-de-prova e inerente ao material compósito por causa de suas características anisotrópicas. Assim, as propriedades mecânicas de um material compósito não podem ser definidas por um valor único, sendo necessário uma distribuição estatística para caracterizá-las.

Tanto a tensão de ruptura quanto a tensão máxima flexional apresentaram menores

valores de dispersões em relação às outras propriedades mecânicas, que pode ser explicado devido a atuação da fibra de vidro como componente de reforço atuando no material.

Tanto a deformação de ruptura quanto a deformação máxima flexional apresentaram maiores dispersões em relação às outras propriedades mecânicas, dispersões estas causadas devido à heterogeneidade do material que faz com que os mecanismos de deformação ocorram de maneiras diferentes dependendo dos defeitos presentes. Enquanto os vazios (bolhas) se deformam mais facilmente por não haver resistência, regiões com maior concentração de fibras são mais frágeis e apresentam barreiras à deformação.

A aplicação da distribuição de Weibull mostrou-se adequada para a caracterização das propriedades mecânicas do material estudado tanto para o ensaio de tração com número de amostras superior a vinte (20) unidades, bem como para o ensaio de flexão com dez (10) amostras. E a adesão dos dados à distribuição foi comprovada pelo teste de estatística de Anderson-Darling.

6. Conclusão

Foi aplicada a distribuição de Weibull para os corpos-de-prova de tração e flexão, os resultados obtidos através dos testes de flexão apresentaram resultados semelhantes ao de tração, mesmo com um número de amostras inferior, o que pode ser explicado devido a uma melhor homogeneidade das amostras.

A variação dos valores obtidos para as propriedades mecânicas de um material compósito pode ser relacionada com a homogeneidade. Quanto mais homogêneo é o material menor é a dispersão observada para a tensão (de ruptura e máxima flexional) e módulo de elasticidade e maior a dispersão encontrada para a deformação (de ruptura e máxima flexional).

O método de laminação manual adotado para a fabricação de todos os corpos-de-prova apresenta baixa reprodutibilidade, o que é observado devido ao elevado coeficiente de variação das propriedades mecânicas.

O método de Anderson-Darling foi utilizado para a determinação da adesão dos valores obtidos à distribuição de Weibull para os corpos-de-prova de tração e flexão, e em ambos os casos não foi possível rejeitar a hipótese de que os dados seguem tal distribuição.

Os valores obtidos para o parâmetro de escala e o fator de forma da distribuição de Weibull, para um nível de confiança de 95%, a tensão de ruptura recomendada seria de 20,26 MPa, o módulo de elasticidade 1,75 GPa, a tensão máxima flexional 17,67 MPa e o módulo de elasticidade flexional 1,90 GPa.

7. Sugestões para trabalhos futuros

Fica como principal sugestão para trabalhos futuros, o estudo da incerteza de resultados proveniente de ensaios destrutivos para determinar as propriedades mecânicas de materiais compósitos sanduiches laminados manualmente. Além de uma análise das propriedades mecânicas do mesmo conceito de material compósito fabricado por infusão, bem como suas respectivas incertezas.

Referências Bibliográficas

- [1] LANDESMANN, A., SERUTI, C. A., BATISTA, E. D. M. “Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymers Members for Structural Applications”, *Materials Research*, v. 18, n. 6, pp. 1372–1383, 2015.
- [2] ASTM. *D3039/D3039M*: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 2014.
- [3] ASTM. *ASTM D7264/D7264M*: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 2015.
- [4] TAGGART, R. *Design and Construction WRITTEN BY A GROUP OF AUTHORITIES*. 1980.
- [5] CHAKRABARTI, S. K. *OFFSHORE STRUCTURE MODELING*, v. 9. Plainfield, Illinois, 1994.
- [6] ITTC. “ITTC - Recommended Procedures and Guidelines ITTC - Ship Models”, pp. 1–8, 2011.
- [7] MIRACLE, D., DONALDSON L. *Introduction to composites, Volume 21, Composites Handbook ASM International*. 2001.
- [8] MENDONÇA, P. D. T. R. *Materiais Compostos e Estruturas-sanduiche: projeto e análise*. Barueri, SP, Manole, 2005.
- [9] POCIUS, A. V. *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*. Hanser, 2012.
- [10] YOUNG, ROBERT J., L. P. A. *Introduction to Polymers*. Third ed. Manchester, United Kingdom, CRC Press, 2011.
- [11] GIBSON, R. F. *Principles of Composite Material Mechanics*. Detroit, Michigan, 1994.
- [12] NASSEH, J. *Barcos - Métodos Avançados de Construção em Composites*. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [13] L. A. CARLSSON, D. F. ADAMS, R. B. P. *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*. 2012.
- [14] AKTAS, I. R. A., DIRIKOLU, M. H. “Statistical Analysis of Fracture Strength of Composite Materials Using Weibull Distribution”, v. Turkish J. Eng. Env. Sci, 26, pp. 45–48, 2002.

- [15] LAI, C.-D. *Generalized Weibull Distributions*. Springer, 2014.
- [16] PINHEIRO, JOÃO I. D., CARVAJAL, SANTIAGO S. R., C. G. *Probabilidade e Estatística: Quantificando a incerteza*. CAMPUS, 2012.
- [17] RALPH B. D'AGOSTINO; STEPHENS, M. A. *GOODNESS-OF-FIT TECHNIQUES*, v. 68. 1986.
- [18] J. A. M. PEREIRA, E. A. C. *Determinação do tamanho de lote mínimo em amostragem aleatória para materiais, empregando a distribuição de Weibull*. Scielo, 2015.
- [19] INTERNATIONAL, A. *ASTM D 7250/D 7250M: Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness*. 2016.
- [20] JIANG, RENYAN, MURTHY, D. N. PRABHAKAR, X. *Weibull Models*. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004.
- [21] MICHAEL F. ASHBY. *Materials selection in mechanical design*. Elsevier, 2005.