



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia aeroespacial

Monitoramento das deformações específicas de vasos de pressão fabricados por bobinagem filamentar

Autor: Danilo Fernandes Duarte
Orientador: Prof. Dr. Artem Andrianov

Brasília, DF
Setembro de 2024



Danilo Fernandes Duarte

Monitoramento das deformações específicas de vasos de pressão fabricados por bobinagem filamentar

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Artem Andrianov

Brasília, DF

Setembro de 2024

Danilo Fernandes Duarte

Monitoramento das deformações específicas de vasos de pressão fabricados por bobinagem filamentar/ Danilo Fernandes Duarte. – Brasília, DF, Setembro de 2024- 96 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Artem Andrianov

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , Setembro de 2024.

1. Compósitos. 2. Bobinagem Filamentar. I. Prof. Dr. Artem Andrianov.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Monitoramento das deformações específicas de vasos de pressão fabricados por bobinagem filamentar

CDU 02:141:005.6

Danilo Fernandes Duarte

Monitoramento das deformações específicas de vasos de pressão fabricados por bobinagem filamentar

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia aeroespacial).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, :

Prof. Dr. Artem Andrianov
Orientador

**Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias
Barcelos Júnior**
Convidado 1

Prof. Dr. Sébastien R.M.J. Rondineau
Convidado 2

Brasília, DF
Setembro de 2024

Em memória do meu pai, Nilo Paulo Maia Duarte, cuja imagem permanece em minha mente como o exemplo primeiro da dignidade e o respeito que podem ser conquistados pelo exercício dedicado e honesto a um ofício. Ele como mecânico e eu, em breve, como engenheiro.

Agradecimentos

Agradeço todos os professores, mestres e outros educadores que participaram de minha formação acadêmica... Desses, em primeiro lugar e mais do que qualquer outro à minha mãe Lara Nise Silva Fernandes, minha primeira professora de ciências naturais, a quem serei perpetuamente grato pelos incansáveis esforços que tornaram possível o privilégio da minha educação.

E aos professores Artem Andrianov, Emerson Costa, Eleine P. Rezende, Luiz Fernando Balduino, Mateus Miranda, Nelsi Guntzel, Odetiza Martins e Poliana Cândida, dentre muitos outros, cujas lições e exemplos de diferentes formas influenciaram o modo com que esse trabalho foi conduzido e o profissional que espero ser um dia. Agradeço também ao professor Artem Andrianov pelas orientações e oportunidades fornecidas ao longo da condução desse e de outros trabalhos.

Também deixo expresso os meus reconhecimentos a meu irmão Douglas Duarte e meus amigos e colegas de graduação e carreira Alef Dias, Bruna Jardim, Gabriel Metre, Giancarlo Catafesta, Gustavo Weffort, Igor Bezerra, Julia Borges, dentre outros, a quem sou grato pela companhia e apoio ao longo dos meus anos de graduação.

Agradeço também a Ana Paula Militão pelo suporte durante todo o processo de execução desse trabalho e pela ajuda para finalizá-lo. Nos encontramos pessoalmente pela primeira vez quando iniciei as pesquisas aqui relatadas e no mesmo laboratório no qual foram conduzidas. Agora, ao final deste ciclo, percebo o quanto não tinha ideia do trabalho que estava por vir e da sorte que tive em conhecê-la naquele dia.

A execução das atividades descritas nesse documento foi concomitante com meu tempo de estágio e trabalho no Ministério de Minas e Energia. Pelas acomodações que foram feitas para tornar possível conciliar essas atividades eu sou grato a meus amigos e colegas nos departamentos de Biocombustíveis e de Gás Natural.

Muitas das atividades aqui relatadas foram feitas ou com a ajuda ou na companhia de Gabriel de Knecht, Maria Fernanda Pimentel e Artem Andrianov, além dos visitantes e outros colaboradores do laboratório 103. A estes, por todo o auxílio e pelos litros de café compartilhados os meus mais veementemente agradecimentos.

*“Um amigo meu uma vez disse que não há diferença entre teoria e prática.
Há uma diferença, a prática não permite que você esqueça nada ou deixe algo de fora.
Na teoria, os problemas são facilmente resolvidos porque você pode deixar algo de fora”*

Charles F. Kettering

Resumo

O uso de materiais compósitos fabricados por bobinagem filamentar é amplamente difundido na fabricação de vasos de pressão em aplicações aeroespaciais devido às elevadas propriedades de rigidez e resistência específicas associadas a esses materiais, além do potencial de redução de custos por meio da automação da fabricação. O comportamento mecânico de estruturas fabricadas por esse processo é tipicamente distinto do observado em estruturas laminadas planas, como é o caso dos corpos de prova normalmente empregados na determinação de propriedades mecânicas. Nesse contexto e com o objetivo de melhor entender essa distinção de propriedades, esse trabalho estuda experimentalmente as deformações específicas de vasos de pressão revestidos por compósitos (COPV) submetidos à pressões internas. Para isso, três COPV de fibra de carbono/epóxi fabricados por bobinagem filamentar sobre mandris poliméricos utilizando um sistema passivo de controle de tensão do filamento são submetidos a testes hidrostáticos destrutivos. A relação entre pressão e deformação específica é aferida experimentalmente por extensômetros elétricos e transdutores de pressão e comparada com deformações calculadas analiticamente utilizando a teoria clássica dos laminados e propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração de amostras unidirecionais. Observou-se que as estimativas analíticas subestimaram as deformações aferidas e considerações acerca de possíveis causas dessa discrepância são discutidas.

Palavras-chaves: materiais compósitos. bobinagem filamentar. vasos de pressão.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de padrão de deposição de fibras sobre a superfície de um mandril cilíndrico com domos elípticos. Fonte: (ANDRIANOV et al., 2022).	22
Figura 2 – Exemplo de um padrão de bobinagem em formato de diamante e da configuração de empilhamento das fibras. Fonte: (LISBÔA et al., 2020)	23
Figura 3 – Classificação dos tipos de vasos de pressão em função da presença de revestimento. Fonte: (B.; CHAND; J., 2021) (AIR; SHAMSUDDOHA; PRUSTY, 2023)	25
Figura 4 – Intervalos de índices de performance típicos para diferentes tipos de construção de vasos de pressão. Fonte (KUHN; HIMMEL; MAIER, 2000).	26
Figura 5 – Tensões circunferenciais (fig. a) e longitudinais (fig. b) em um vaso de pressão cilíndrico de paredes finas. Fonte: (MEGSON, 2005).	27
Figura 6 – Estado plano de carregamentos na superfície do cilindro. Fonte: (MEGSON, 2005)	28
Figura 7 – Definição das direções principais de uma lâmina ortotrópica e dos componentes de tensão correspondentes. Fonte: (CARLSSON; ADAMS; PIPES, 2014).	30
Figura 8 – Rotação positiva (anti-horária) dos eixos principais do material (direções 1 e 2) em relação a dois eixos x e y arbitrários. Fonte: (CARLSSON; ADAMS; PIPES, 2014).	32
Figura 9 – Resultantes dos esforços (figura a) e momentos (figura b) em uma placa plana. Observa-se que todas as forças e momentos são desenhados como positivos por convenção. Fonte: (BARBERO, 2018).	35
Figura 10 – Geometria de um laminado de N lâminas. Fonte: (BARBERO, 2018).	35
Figura 11 – Exemplos de sequencias de empilhamento de alguns laminados e suas respectivas notações. Fonte: (NETTLES, 1994).	37
Figura 12 – Método ótico de análise de constituintes de materiais compósitos. Fonte: (DANIEL, 2007).	39
Figura 13 – Geometria das amostras empregadas na determinação de propriedades de tensão da lâmina unidirecional. A amostra "A" apresenta reforços longitudinais ($[0^{\circ}]_n$) enquanto a "B" reforços transversais ($[90^{\circ}]_n$). Fonte: (DANIEL, 2007).	40
Figura 14 – Principais modos de falha observados em testes de tração e seus códigos correspondentes. Fonte: (ASTM D3039/D3039M-17, 2017).	42

Figura 15 – Um corpo de prova de lâmina com ângulo de $[\pm 45]_{ns}$ deg sob tração uniaxial para determinação das propriedades de cisalhamento no plano da lâmina. Fonte: (DANIEL, 2007).	43
Figura 16 – Diagrama representando os componentes típicos de um extensômetro de resistência elétrica. Fonte: (HOFFMANN, 1989) adaptado.	45
Figura 17 – Ponte de Wheatstone, na qual R_1 , R_2 e R_3 são resistores, R_g o extensômetro elétrico e V_{in} e V_{out} a diferença de potencial de excitação e aferida respectivamente. Fonte: (Omega Engineering, 1994).	45
Figura 18 – Representação esquemática do processo de fabricação de amostras planas utilizando bobinagem sobre mandris cilíndricos. Fonte: (KASTENMEIER; SCHMID; EHRLICH, 2017).	48
Figura 19 – Processo de fabricação dos corpos de prova planos $[\pm 45^\circ]_n$. a) Deposição do filamento sobre o mandril cilíndrico; b) Remoção do laminado da superfície do mandril. Fonte: (PIMENTEL et al., 2024)	49
Figura 20 – Conjunto dos cinco vasos de pressão fabricados para o trabalho. Régua de 25 cm para escala.	50
Figura 21 – Geometria do vaso de pressão. Fonte: (LUTHADA, 2022) modificado.	51
Figura 22 – Mandril empregado na bobinagem. Figura a: Visualização da seção transversal do mandril empregado na fabricação dos vaso de pressão. Figura b: fotografia do mandril montado. Nas imagens A: flanges metálicas; B: Domo do mandril; C: porção cilíndrica do mandril.	51
Figura 23 – Bancada de carretéis fabricada para o controle do tensionamento de filamentos de bobinagem. Componente 1 no diagrama da figura 25.	52
Figura 24 – Freio de pó magnético de 6 Nm e controlador de correntes empregados no sistema de tensionamento.	53
Figura 25 – Configuração do sensor de tensão do filamento.	53
Figura 26 – Posicionamento dos sensores de tensão no equipamento de bobinagem filamentar: 1) Bancada de carretéis, 2) Carretel de fibras acoplado ao freio de pó magnético, 3) rolo, 4) sensor de tensão, 5) carro da máquina, 6) barras estáticas, 7) impregnador de resina de tipo tambor, 8) sensor de tensão, 9) olhal, 10) mandril.	54
Figura 27 – Representação esquemática do sistema de medição de tensão.	54
Figura 28 – Fotografia da bancada de testes hidrostáticos construída. A) Bomba hidrostática, B) Vaso de pressão, C) Transdutor de pressão, D) Sistema de aquisição de dados, E) Computador empregado na aquisição de dados.	55
Figura 29 – Representação esquemática da bancada de testes hidrostáticos e seu sistema de aquisição de dados.	56
Figura 30 – Disposição dos sensores extensômetros nos vasos de pressão empregados no teste hidrostático.	57

Figura 31 – Conexão elétrica dos sensores extensômetros com compensação de temperatura. Fonte: (INSTRUNET, 2023) modificado.	58
Figura 32 – Etapas do processo de aplicação do extensômetros a) Sensor sendo posicionado e erguido com o auxílio de uma fita; b) Aplicação do adesivo. Fonte: (VPG Micro-Measurements, 2017).	59
Figura 33 – Fluxograma do cálculo analítico das deformações específicas	60
Figura 34 – Tensionamento do filamento em função da corrente elétrica fornecida ao freio de pó magnético para bobinagens a velocidades constantes	61
Figura 35 – Tensionamento da fibra durante a bobinagem de uma camada helicoidal do vaso de pressão.	62
Figura 36 – Curvas de tensão e deformação medidas para as amostras de 0°	63
Figura 37 – Curvas de tensão e deformação das amostras de $\pm 45^\circ$	64
Figura 38 – Micrografias ampliadas em x400 do laminado das amostras de tração. a) Concentração relativamente alta de fibras com pequenos vazios a direita. b) Poros e maior concentração de resina na região esquerda da imagem. c) Limite entre camadas visível. Fonte: (PIMENTEL et al., 2024).	64
Figura 39 – Distribuição de espessura ao longo do comprimento do vaso de pressão. Dados de espessura obtidos de (de Knegt, 2024).	65
Figura 40 – Curvas de pressão deformação obtidas nos testes hidrostáticos.	66

Lista de tabelas

Tabela 1 – Código de descrição dos modos de falha para tetes tração. Fonte: (ASTM D3039/D3039M-17, 2017).	43
Tabela 2 – Propriedades dos filamentos de carbono (conforme declarado pelo fornecedor Texiglass)	47
Tabela 3 – Propriedades das resinas empregadas (conforme o declarado pelo fornecedor).	47
Tabela 4 – Dimensões gerais dos vasos fabricados.	50
Tabela 5 – Direção e números de sensores extensométricos aplicados nas amostras dos ensaios de tração.	56
Tabela 6 – Posicionamento e orientação dos sensores de deformação específica. Origem da coordenada x na flange dos vasos.	57
Tabela 7 – Tensões médias do filamento durante a bobinagem dos vasos de pressão.	63
Tabela 8 – Propriedades mecânicas aferidas para as lâminas unidirecionais	63
Tabela 9 – Massas dos vasos de pressão.	65
Tabela 10 – Deformação específica a 2 MPa dos vasos de pressão submetidos aos testes hidrostáticos.	67
Tabela 11 – Pressões no momento da falha para os três vasos de pressão submetidos a testes destrutivos.	67
Tabela 12 – Deformação específica calculada para a direção longitudinal (x)	68
Tabela 13 – Deformação específica calculada para a direção transversal (y)	68
Tabela 14 – Diferença percentual entre as deformações específicas obtidas pelos cálculos analíticos e o aferido experimentalmente para os três vasos de pressão a 2 MPa.	68
Tabela 15 – Deformações na direção longitudinal (x) comparadas com os resultados de simulação numérica. Fonte dos resultados da simulação: (de Knegt, 2024).	70
Tabela 16 – Deformações na direção transversal (y) comparadas com os resultados de simulação numérica. Fonte dos resultados da simulação: (de Knegt, 2024).	70

Lista de abreviaturas e siglas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
COPV	<i>Composite overwrapped pressure vessel</i> (Vaso de pressão revestido por compósitos)
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Controle Numérico Computadorizado)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização)

Lista de símbolos

α	Ângulo de bobinagem
α_c	Ângulo de bobinagem na seção cilíndrica
$\alpha(r)$	Ângulo de bobinagem em função do raio
\bar{z}_k	Posição (coordenada z) do plano médio do laminado
η	Diferença relativa entre dois valores
γ_4	Deformação de cisalhamento no plano 23
γ_5	Deformação de cisalhamento no plano 31
γ_6	Deformação de cisalhamento no plano 12
γ_{xy}	Deformação de cisalhamento no plano xy
ρ_f	Densidade das fibras de um material compósito
σ_1	Tensão normal na direção 1
σ_2	Tensão normal na direção 2
σ_c	Tensão na direção circunferencial do vaso de pressão
σ_l	Tensão na direção longitudinal do vaso de pressão
σ_x	Tensão normal na direção x
σ_y	Tensão normal na direção y
τ_4	Tensão de cisalhamento no plano 23
τ_5	Tensão de cisalhamento no plano 31
τ_6	Tensão de cisalhamento no plano 12
θ	Ângulo de orientação da lâmina em relação ao sistema de coordenadas do material
θ_k	Orientação (no sistema de coordenadas do laminado) da lâmina de número k em um laminado
ε	Deformação específica

ε_1	Deformação específica na direção 1
ε_2	Deformação específica na direção 2
ε_x	Deformação específica na direção x
ε_y	Deformação específica na direção y
A	Área da seção transversal de um condutor
d	Diâmetro da seção cilíndrica do vaso de pressão
E_1	Módulo de elasticidade longitudinal (na direção principal do material)
E_2	Módulo de elasticidade transversal
E_3	Módulo de elasticidade normal ao plano
F^{tu}	Resistência a tração de uma amostra de ensaio de tração
F_c	Esforços na direção circunferencial de um vaso de pressão cilíndrico
F_l	Esforços na direção longitudinal de um vaso de pressão cilíndrico
F_{1c}	Resistência a compressão na direção longitudinal do material
F_{1t}	Resistência a tração na direção longitudinal do material
F_{2c}	Resistência a compressão na direção transversal do material
F_{2t}	Resistência a tração na direção transversal do material
G_{12}	Módulo de cisalhamento no plano 12
G_{13}	Módulo de cisalhamento no plano 13
G_{23}	Módulo de cisalhamento no plano 23
k	Número na sequência de laminação de uma dada lâmina
N_x	Carregamento na direção x
N_y	Carregamento na direção y
P	Pressão interna
P	
P	Pressão interna do vaso de pressão
P^{max}	Carregamento máximo antes da falha de uma amostra de ensaio de tração

Q_{ij}	Componente da matriz de rigidez do material
R	Raio da seção cilíndrica do vaso de pressão
r_p	Raio da abertura polar do vaso de pressão
t	Espessura da seção cilíndrica do vaso de pressão
T	Matriz de transformação do sistema de coordenadas
t_k	Espessura da lâmina de número k em um laminado
V_{calc}	Valor calculado analiticamente para uma dada propriedade
V_{exp}	Valor aferido experimentalmente para uma dada propriedade
W_f	Peso das fibras de uma amostra de material compósito
W_f	Peso total de uma amostra de material compósito
z_k	Posição na coordenada z da lâmina de número k em um laminado
$[ABBD]$	Matriz de rigidez do laminado
$[Q]_{xy}$	Matriz de rigidez do material no sistema de coordenadas do laminado
$[Q]_{12}$	Matriz de rigidez do material no sistema de coordenadas do material
$[\bar{Q}]$	Matriz de rigidez do material no sistema de coordenadas do laminado
$[R]$	Matriz de Reuter
$[S]$	Matriz de conformidade (<i>compliance matrix</i>) do material
$[S]_{ij}$	termo da matriz de conformidade (<i>compliance matrix</i>) do material
ρ	Resistência elétrica específica de um material
ρ_c	Densidade média um material compósito
R	Resistência elétrica de um extensômetro
V_v	Razão volumétrica das fibras de um material compósito

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação	18
1.2	Objetivo geral	19
1.3	Objetivos específicos	19
1.4	Abordagem metodológica	20
1.5	Reconhecimento de Colaborações	20
1.6	Organização do trabalho	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E DEFINIÇÕES	22
2.1	O processo de bobinagem filamentar	22
2.2	Vasos de pressão reforçados por compósitos	24
2.3	Esforços em vasos de pressão de paredes finas	26
2.4	Materiais compósitos	28
2.4.1	Mecânica de materiais compósitos	29
2.4.2	Transformação do sistema de coordenada do material	32
2.4.3	Teoria clássica dos laminados	33
2.4.4	Notação de descrição de sequência de laminação	36
2.4.5	Caracterização experimental de materiais compósitos	37
2.4.5.1	Obtenção das proporções dos materiais constituintes	37
2.4.5.2	Caracterização experimental de propriedades mecânicas	39
2.4.5.2.1	Determinação das propriedades longitudinais e transversais da lâmina unidirecional	40
2.4.5.3	Determinação das propriedades de cisalhamento	42
2.5	Medição experimental de deformações	44
3	METODOLOGIA	47
3.1	Materiais constituintes dos compósitos	47
3.2	Caracterização da lâmina unidirecional	47
3.3	Fabricação dos vasos de pressão	49
3.4	Sistema de controle de tensão do filamento de bobinagem	52
3.5	Testes hidrostáticos	54
3.5.1	Bancada de testes hidrostáticos de vasos de pressão	55
3.6	Medição experimental de deformações específicas	56
3.7	Cálculos analíticos das deformações específicas no vaso de pressão	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	Comportamento do sistema de tensionamento	61

4.2	Caracterização dos corpos de prova planos	62
4.3	Caracterização dos vasos de pressão	64
4.3.1	Testes hidrostáticos	65
4.3.2	Resultados dos cálculos analíticos	67
5	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICES	78
	APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO DOS CÁLCULOS ANALÍTICOS EM PYTHON	79
	APÊNDICE B – RETORNO DO CÓDIGO DO APÊNDICE A CONTENDO OS RESULTADOS DO CÁLCULO ANALÍTICO	91
	APÊNDICE C – CASO DE VALIDAÇÃO DO CÓDIGO DE CÁLCULOS DE COMPÓSITOS	94
	APÊNDICE D – RETORNO DO CÓDIGO DE VALIDAÇÃO DOS CÁLCULOS	96

1 Introdução

As subseções a seguir introduzem a motivação, objetivos e abordagem empregados na realização desse trabalho. Além disso é apresentada a estrutura desse documento de modo resumido.

1.1 Motivação

O uso de materiais compósitos fabricados por bobinagem filamentar é amplamente difundido na fabricação de câmaras de combustão de foguetes, tanques de gás, tubos e conexões para uma variedade de aplicações de interesse da indústria aeroespacial (KASTENMEIER; SCHMID; EHRLICH, 2017). O comportamento mecânico de estruturas fabricadas por esse processo é tipicamente distinto do observado em estruturas laminadas. Esse fenômeno é consequência de fatores como:

- A diferença de geometria entre as amostras (placas planas) e a geometria das peças (superfícies curvas).
- As amostras contêm camadas com apenas um ângulo de enrolamento (ou apenas 0° , ou apenas 90° , ou apenas $\pm 45^\circ$), enquanto estruturas, de modo geral, contêm mais camadas com diferentes ângulos de enrolamento;
- As amostras são submetidas à ação de forças externas uniaxiais, enquanto as peças são submetidas à ação de forças multiaxiais; e
- As amostras planas e as peças diferem em seus processos de fabricação o que influi em suas propriedades físicas e mecânicas (RADULOVIĆ, 2008).

Apesar disso, o projeto e a análise de estruturas fabricadas por bobinagem filamentar com frequência requer a determinação das mesmas propriedades de engenharia usadas em laminados no geral (RADULOVIĆ, 2008), como uma aproximação inicial das características dos materiais. Desse modo o estudo da relação entre as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente por meio de ensaios de tração de amostras unidirecionais e o modo com que essas propriedades se mostram diferentes em estruturas mais complexas tem um importante papel em aumentar a confiança de análises de engenharia pertinentes a materiais compósitos bobinados (PETERS, 2011).

Um dos possíveis métodos para estudos desse tipo é a análise experimental de espécimes representativos da estruturas mais complexas para melhor entender os seus

comportamentos mecânicos. Esses estudos podem ser conduzidos por meio de testes hidrostáticos de vasos de pressão em escala ou da estrutura propriamente dita (PETERS, 2011; PARK et al., 2002).

1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente as deformações em vasos de pressão compostos fabricados por bobinagem filamentar, especificamente vasos de pressão sem forro impermeável de tipo V. Para isso, serão realizadas aferições extensométricas durante ensaios hidrostáticos de vasos bobinados. As medições serão então comparadas com previsões baseadas na teoria clássica dos laminados. Os dados obtidos servirão para avaliar a acurácia dos modelos teóricos e informarão análises futuras de componentes fabricados por bobinagem filamentar no contexto do Laboratório de Estruturas Aeroespaciais da UnB.

1.3 Objetivos específicos

O cumprimento do objetivo geral exigiu o preparo de uma variedade de soluções necessárias para a fabricação dos corpos de prova e vasos de pressão, além da instalação da instrumentação e sistemas de aquisição de dados usados nos testes experimentais propostos. Para tal, e visando embasar as decisões aqui tomadas, esse trabalho adotou como objetivos específicos as etapas:

1. Apresentar uma revisão de literatura sobre o processo de fabricação de materiais compósitos por meio de bobinagem filamentar e discutir brevemente a influência da tensão de bobinagem nas propriedades mecânicas de peças fabricadas por esse processo;
2. Projetar e implementar um sistema passivo de controle de tensão do filamento de bobinagem para garantir a devida compactação das fibras durante o processo de fabricação dos espécimes;
3. Revisar a literatura referente ao comportamento mecânico de laminados compósitos com o objetivo de avaliar analiticamente as deformações específicas em vasos de pressão fabricados por bobinagem filamentar;
4. Revisar a literatura pertinente aos métodos experimentais de extensometria relevantes e sobre os procedimentos de avaliação das constantes de engenharia necessários para os cálculos de deformações específicas;

5. Implementar um sistema de aquisição de dados de pressão e de extensometria para a realização dos testes hidrostáticos e ensaios de tração;
6. Fabricar vasos de pressão e as amostras planas de ensaios de tração por meio de bobinagem filamentar.
7. Caracterizar experimentalmente as propriedades mecânicas das amostras planas e aferir deformações nos vasos de pressão quando estes são submetidos a pressões hidrostáticas; e
8. Comparar as medições experimentais de deformação nos vasos de pressão com as estimativas obtidas por meio de cálculos analíticos baseados nas propriedades das amostras planas.

1.4 Abordagem metodológica

A metodologia do trabalho envolveu a fabricação de vasos de pressão reforçados por compósitos por meio de bobinagem filamentar, com controle passivo da tensão do filamento para assegurar a qualidade do laminado. Após a fabricação, os vasos foram submetidos a testes hidrostáticos, onde as deformações foram monitoradas experimentalmente com extensômetros elétricos. Em paralelo, foram realizados cálculos analíticos com base na teoria clássica dos laminados para prever as deformações, permitindo a comparação entre os resultados experimentais e analíticos.

1.5 Reconhecimento de Colaborações

Parte dessas atividades que serão apresentadas foram realizadas com a parceria de Gabriel B.P. de Knecht e Maria Fernanda S. Pimentel ao longo de programas de PIBIT. Alguns dos resultados obtidos nesses trabalhos são apresentados aqui com a permissão desses alunos e, quando já publicados, com a indicação de autoria correspondente.

Mais especificamente, Gabriel B.P. de Knecht realizou as medições de espessura nos vasos de pressão. Suas contribuições também foram de grande valia para a definição e o domínio de algumas das técnicas de fabricação aqui relatadas. A Maria Fernanda S. Pimentel realizou as análises de micrografia e o preparo das amostras correspondentes. O professor Artem Andrianov foi o responsável pela fabricação e projeto dos mandris e das trajetórias empregadas nos procedimentos de bobinagem filamentar. Todos esses também estavam envolvidos nos processos de fabricação dos vasos de pressão, das amostras planas e dos ensaios de tração.

1.6 Organização do trabalho

Visando a clareza na apresentação de informações, o trabalho é dividido em quatro partes principais:

Fundamentação teórica e definições: são discutidos os conceitos básicos referentes à teoria clássica dos laminados, medições experimentais de propriedades mecânicas, incluindo conceitos de extensometria, e cálculos de deformação em vasos de pressão.

Metodologia: onde são apresentados os procedimentos e materiais empregados na realização do trabalho. Sendo detalhados os métodos de fabricação dos corpos de prova e vasos de pressão, a implementação dos sensores de deformação e do sistema de controle e medição da tensão do filamento de bobinagem.

Resultados: onde é demonstrado o funcionamento do sistema de controle de tensão construído para a realização do projeto. São também apresentadas as propriedades aferidas experimentalmente das amostras unidirecionais. As medições e observações feitas durante os ensaios hidrostáticos. Em seguida, as deformações calculadas analiticamente usando as propriedades aferidas das amostras unidirecionais são apresentadas. hipóteses explanatórias para possíveis discrepâncias entre os resultados empíricos e analíticos são discutidas.

Conclusões: onde são resumidas as principais observações referentes aos resultados obtidos. Além disso, a seção apresenta possíveis próximos passos para elucidar as hipóteses levantadas pelo trabalho.

2 Referencial teórico e definições

As subseções a seguir tratam dos conceitos básicos referentes à teoria clássica dos laminados, medições experimentais de propriedades mecânicas, incluindo conceitos de extensometria, e cálculos de deformação em vasos de pressão.

2.1 O processo de bobinagem filamentar

Bobinagem filamentar consiste do enrolamento sob tensionamento de reforços fibrosos contínuos impregnados por resina na superfície de um mandril ([DANIEL, 2007](#)). Para isso, mechas de fibra contínua, que nesse trabalho são chamadas de filamento, são alimentadas dos seus carretéis para a máquina de bobinagem, onde são enrolados sobre um mandril num padrão geométrico predeterminado ([figura 1](#)). A localização do filamento é guiada por um olhal de entrega de fibras que pode possuir um número diverso de graus de liberdade de movimento a depender da arquitetura da máquina.



Figura 1 – Exemplo de padrão de deposição de fibras sobre a superfície de um mandril cilíndrico com domos elípticos. Fonte: ([ANDRIANOV et al., 2022](#)).

O ângulo relativo do filamento em relação ao eixo do mandril, denominado ângulo de enrolamento, pode ser ajustado em função da geometria do mandril e das resistências e rigidezes mecânicas desejadas do material final. O tamanho e a forma geral da peça acabada são determinados pela geometria do mandril e pela espessura do laminado ([LUTHADA, 2022](#)). Já a compactação das fibras e o volume de fibras em proporção a resina do laminado são função, dentre outros parâmetros, do tensionamento do filamento ([DANIEL, 2007](#); [AKKUS](#); [GENC, 2017](#); [BŁACHUT et al., 2023](#)).

Uma característica associada a componentes fabricados por esse processo é a formação de padrões geométricos recorrentes na disposição das fibras sobre a superfície do

mandril devido aos movimentos repetitivos e regulares do ciclo de bobinagem. Um exemplo desse padrão é ilustrado na figura 2. Dentro de qualquer padrão de diamante formado pelas fibras, dois triângulos divididos pela região de entrecruzamento dos filamentos têm fibras orientadas em $[-\alpha, +\alpha]$ ou $[+\alpha, -\alpha]$, em que α é o ângulo de bobinagem.

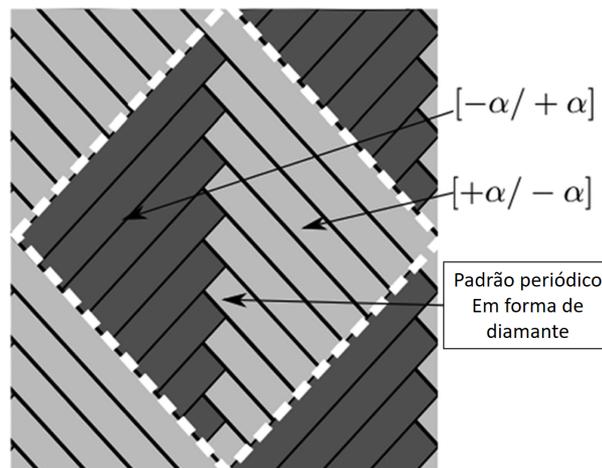


Figura 2 – Exemplo de um padrão de bobinagem em formato de diamante e da configuração de empilhamento das fibras. Fonte: (LISBÔA et al., 2020)

Localmente, a configuração das fibras pode alterar a distribuição de tensões e deformações, modificando o comportamento mecânico do componente. Visando investigar esse fenômeno, Tales V. Lisbôa (2020) avalia a influência de diferentes padrões de enrolamento formados pelo mesmo ângulo de bobinagem nas propriedades mecânicas de tubos cilíndricos submetidos a ensaios de compressão.

Nesse estudo, constata-se que a rigidez não varia significativamente entre amostras de padrões distintos, enquanto a forma das curvas de carga em função da deformação, a carga máxima suportada e a energia na ruptura dependem do padrão de bobinagem. Contudo, esse parâmetro afeta as dimensões gerais dos tubos estudados, em particular a espessura, tornando necessário o uso de um fator de correção para normalizar a rigidez entre os cilindros, de modo que as curvas não normalizadas destes ensaios aparentam indicar uma diferença de rigidez associada ao padrão dos filamentos.

Estudos como o de D. Cohen (1997) e P. Mertiny (2002) destacam a influência do tensionamento do filamento durante a bobinagem nas características do material fabricado. Cohen (1997) investiga o efeito de diferentes parâmetros de fabricação nas propriedades físicas e mecânicas de vasos de pressão, identificando a tensão de enrolamento como a variável com maior influência estatística na resistência do material com base na análise experimental de tubos submetidos a testes hidrostáticos.

Já Mertiny (2002) avalia o comportamento de tubos compósitos fabricados sob diferentes tensões de bobinagem, submetendo-os a diversas condições de carregamento. Dessa forma, observa-se que, sob condições de carga dominadas pelas fibras, uma maior

tensão de enrolamento resulta em peças com maior resistência à falha, enquanto que, em situações onde a carga interage com resistências dominadas pela matriz, a falha é retardada por uma redução da tensão das fibras durante a bobinagem.

O trabalho de Andrianov *et al.* (2022) descreve o desenvolvimento de um sistema de bobinagem filamentar de baixo custo no contexto do Laboratório de Estruturas Aeroespaciais da UnB. Além disso, o trabalho apresenta a metodologia de bobinagem e de obtenção de trajetórias de deposição de fibras e avalia a qualidades das peças fabricadas por esse sistema. Os principais desafios observados incluem: problemas associados a variação na tensão da fibra durante a bobinagem; a alta porosidade nas peças finais; e a distribuição desigual da resina. Problemas esses que resultam em maior porosidade e variação de espessura das peças fabricadas.

Desde então, avanços foram feitos no equipamento de bobinagem filamentar empregado no Laboratório de Estruturas Aeroespaciais da UnB. Em particular uma nova versão da máquina de bobinagem foi construída. O novo sistema é mais rígido e maior do que o equipamento anterior permitindo a fabricação de uma variedade maior de componentes com maior precisão e repetibilidade. Essa nova máquina é empregada na bobinagem de todas as peças fabricadas no decorrer desse trabalho e informações acerca da sua construção e funcionamento são apresentadas no relatório do Andrianov *et al.* (2024).

2.2 Vasos de pressão reforçados por compósitos

Um vaso de pressão é definido como um contêiner que possui um diferencial de pressão entre o seu interior e o exterior, geralmente com a pressão interna sendo maior do que a externa. O fluido dentro do vaso pode passar por uma mudança de estado, como ocorre em caldeiras a vapor, ou pode se combinar com outros reagentes, como em reatores químicos (CHATTOPADHYAY, 2004). Essa definição abrange diversas estruturas, como cilindros de ar, tanques de combustíveis gasosos e câmaras de combustão.

Historicamente o desenvolvimento desses dispositivos foi influenciado pela necessidade de desenvolver estruturas mais leves e eficientes para aplicações veiculares. Esse processo levou ao desenvolvimento de cinco tipos principais de vasos de pressão que se distinguem pelo nível de participação de reforços compósitos nas suas integridades estruturais.

Os vasos de Tipo I possuem construção inteiramente metálica. Vasos de Tipo II possuem núcleos metálicos parcialmente reforçados por materiais compostos, com o núcleo metálico suportando uma parte significativa dos esforços internos. Já os vasos de Tipo III possuem forros metálico completamente coberto por reforços compostos. Os vasos de Tipo IV são similares aos Tipo III, mas utilizam forros de materiais poliméricos, com o reforço composto assumindo totalmente os esforços estruturais.

Por fim, os vasos de Tipo V são fabricados inteiramente em materiais compostos, com o laminado sendo responsável por suportar tanto as cargas estruturais causadas pela pressão interna quanto garantir a estanqueidade do recipiente. A figura 3 ilustra as diferenças entre os tipos de vaso de pressão.

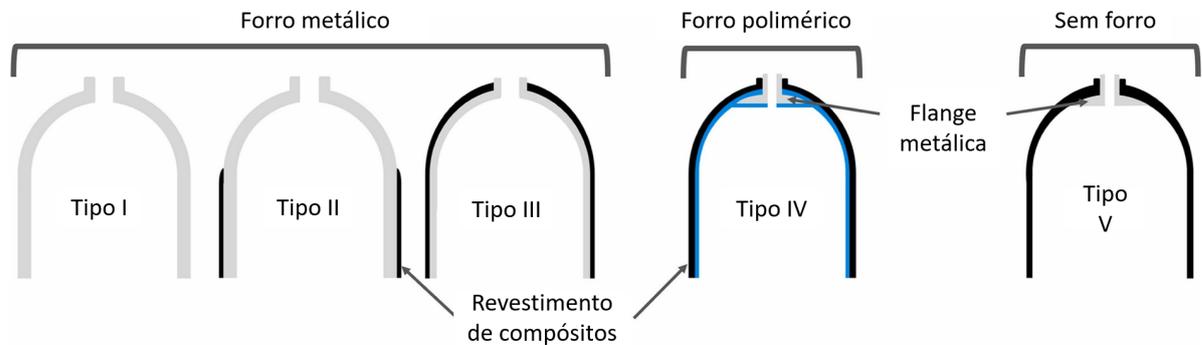


Figura 3 – Classificação dos tipos de vasos de pressão em função da presença de revestimento. Fonte: (B.; CHAND; J., 2021) (AIR; SHAMSUDDOHA; PRUSTY, 2023)

Os vasos de tipos II ao IV são chamados vasos de pressão revestidos por compósitos ou COPV (do termo inglês "*composite overwrapped pressure vessel*"). O envelope compósito nessas estruturas é uma combinação de reforços fibrosos e resina, com as fibras fornecendo a resistência à tração, garantindo a integridade estrutural, enquanto a resina distribui as cargas no compósito e mantém as fibras em suas posições.

Como materiais compósitos tipicamente não são estanque à gases, estes são aplicados sobre um forro, que serve como revestimento interno do recipiente. Barreiras desse tipo podem ser fabricadas de materiais como borracha, plásticos ou metais, e são projetadas para manter as taxas de vazamento e a pureza do fluido em níveis aceitáveis além de servirem como mandris durante o processo de bobinagem. A contribuição desse forro para integridade estrutural do vaso varia a depender da aplicação (PETERS, 2011).

A eficiência estrutural de vasos de pressão é comumente avaliada por meio de um índice de performance I_P , que relaciona a massa da estrutura com os volumes e pressões que esta comportam. Esse parâmetro é definido pela equação,

$$I_P = \frac{PV}{m}, \quad (2.1)$$

na qual P é a pressão máxima suportada, V o volume interno e m é a massa do vaso de pressão. A figura 4 apresenta intervalos típicos de valores de índices de performance de vasos de pressão para diferentes tipos de construção.

Ao observar a figura 4, o alto potencial de redução de peso associado à aplicação de compósitos em vasos de pressão é evidente, com os vasos de IV e V gerações sendo entre 85% e 90% mais leves do que os vasos de tipos I e II. Além disso, os vasos de tipo

V conseguem reduzir em até 25% da massa do tanque quando comparado aos tipos III e IV (AIR; SHAMSUDDOHA; PRUSTY, 2023). Essa característica tornam esses tanques altamente atraentes para aplicações aeroespaciais e militares.

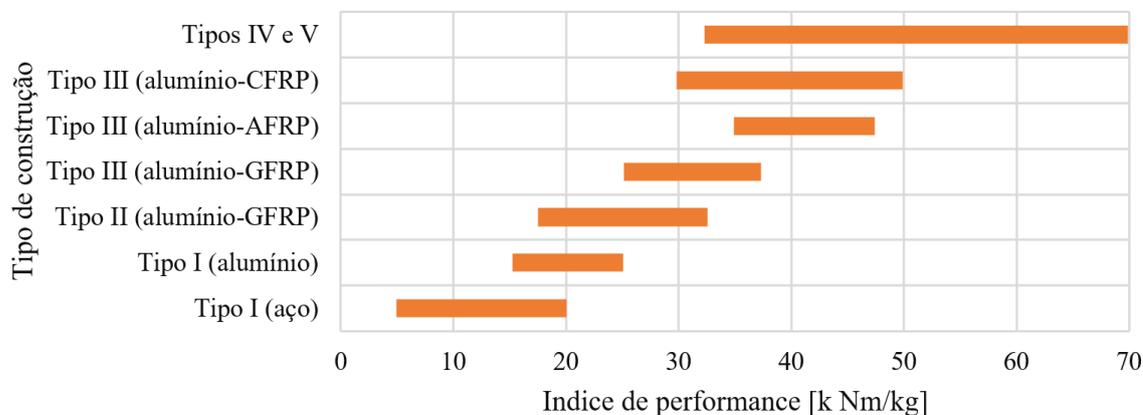


Figura 4 – Intervalos de índices de performance típicos para diferentes tipos de construção de vasos de pressão. Fonte (KUHNS; HIMMEL; MAIER, 2000).

Um estudo nessa área de pesquisa é apresentado por Park *et al.* (2002) que aborda a análise estrutural e o monitoramento de deformações em uma câmara de combustão de um motor do foguete KSR-III da Agência Espacial Coreana. Os autores se concentram na avaliação da integridade estrutural e no monitoramento de deformações sob diferentes condições de carga desse componente.

Com esse fim, os autores estudam a resistência do motor à pressão interna durante testes hidrostáticos. Durante esses ensaios, medições de deformações são feitas com sensores extensométricos elétricos. Essas medições permitem aferir a distribuição de deformações ao longo da estrutura.

Desse modo, constata-se que a presença de esforços fletores no domo induz um grande gradiente de deformação da fibra em sua região central. Além disso, a região central do domo e a extremidade da flange metálica dos vasos de pressão mostram as maiores deformações dos reforços fibrosos na superfície da estrutura.

2.3 Esforços em vasos de pressão de paredes finas

Para uma casca cilíndrica de paredes finas sujeita a uma pressão interna P essa pressão interna tem um efeito duplo: ela atua nos domos fechados da estrutura, produzindo uma tensão longitudinal nas seções transversais da casca e também tende a separar uma metade da casca da outra ao longo de um plano diametral, causando tensões circunferenciais (MEGSON, 2005). Essas duas formas de carregamento são ilustradas na figura 5.

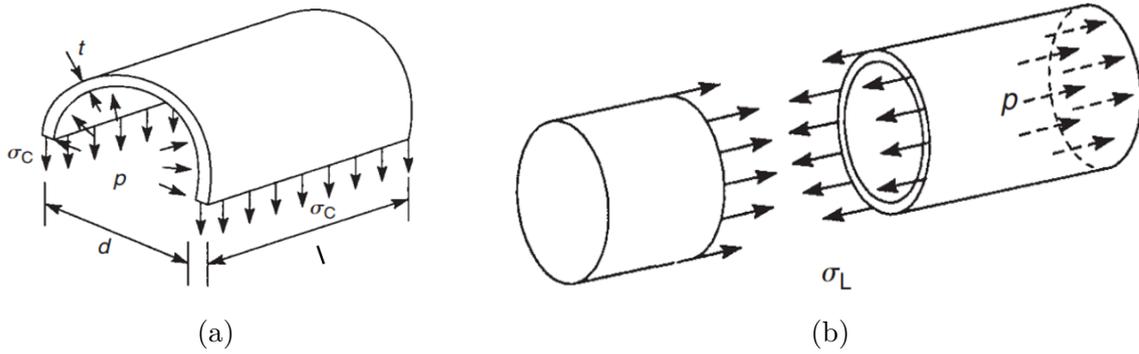


Figura 5 – Tensões circunferenciais (fig. a) e longitudinais (fig. b) em um vaso de pressão cilíndrico de paredes finas. Fonte: (MEGSON, 2005).

Nesse estado, o carregamento longitudinal, F_l , causado por uma pressão P em uma estrutura de diâmetro d é

$$F_l = P \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.2)$$

de modo que, para que a estrutura se encontre em equilíbrio, a tensão na direção longitudinal σ_l deve ser

$$\sigma_L \pi d t = P \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.3)$$

na qual σ_L é a tensão na direção longitudinal de um ponto arbitrário da casca cilíndrica e t a sua espessura. Dessa equação é possível determinar que

$$\sigma_x = \sigma_L = \frac{P d}{4 t}, \quad (2.4)$$

onde a tensão na direção x , σ_x , tem sua direção definida pelo sistema de coordenadas do material da casca, conforme o apresentado na figura 6.

Do mesmo modo, a força na direção circunferencial, F_c , pode ser expressa pela equação,

$$F_c = P \cdot A_c, \quad (2.5)$$

na qual A_c é a área do segmento do cilindro, projetada na direção circunferencial. Desse modo modo que a equação de equilíbrio por unidade de comprimento é dada por

$$2\sigma_c \cdot (t l) = P \cdot (l d), \quad (2.6)$$

sendo σ_c a tensão na direção circunferencial de um ponto arbitrário da seção casca cilíndrica e l e d o comprimento e o diâmetro da seção, respectivamente. Assim, é possível concluir que

$$\sigma_y = \sigma_c = \frac{P d}{2 t}. \quad (2.7)$$

As equações da teoria clássica dos laminados relacionam as deformações com esforços por unidade de comprimento em vez das tensões internas da estrutura. Desse modo,

para realizar essa conversão N_x e N_y (figura 6) são obtidos multiplicando as tensões apresentadas pela espessura da parede por suas espessuras, resultando em

$$N_x = \sigma_x \cdot t = \frac{Pr}{2}, \text{ e} \quad (2.8)$$

$$N_y = \sigma_y \cdot t = PRr, \quad (2.9)$$

onde N_x é o esforço na direção longitudinal do vaso de pressão e N_y é o esforço na direção do aro do cilindro, ambos em unidades de força por comprimento e r é o raio do cilindro. Esses esforços podem então ser usados para determinar as deformações do laminado por meio da teoria clássica dos laminados apresentada na seção 2.4.3.

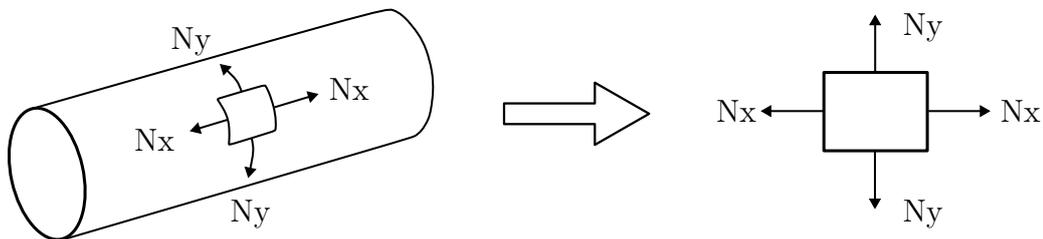


Figura 6 – Estado plano de carregamentos na superfície do cilindro. Fonte: (MEGSON, 2005)

2.4 Materiais compósitos

Compósitos são caracterizados pela combinação de dois ou mais materiais de propriedades distintas que, quando devidamente combinados, resultam em um material com propriedades aprimoradas (BARBERO, 2018). O resultado dessa combinação apresenta um conjunto de fases distintas na escala microscópica. Uma das fases é geralmente descontínua, mais rígida e mais forte, sendo chamada de reforço, enquanto a fase menos rígida e mais fraca é contínua e é denominada matriz. Além disso, a interação química entre fases pode resultar na formação de uma fase intermediária entre a matriz e o reforço (DANIEL, 2007).

As fases do material influem de formas diversas nas propriedades do material a depender da aplicação. No caso de compósitos estruturais de alto desempenho o reforço, tipicamente um material fibroso, é o principal responsável por determinar a rigidez e resistência do material. Já a fase da matriz fornece proteção e suporte para as fibras, além de realizar a distribuição das cargas internas entre os reforços (DANIEL, 2007).

Reforços fibrosos são preferidos em aplicações que demandam alto desempenho estrutural pois a maioria dos materiais apresentam resistências mecânicas superiores quando processados em forma de fibras se comparados com suas formas maciças. A causa desse fenômeno varia a depender do tipo do material, porém tende a ser causado pela combinação de três principais fatores (BARBERO, 2018):

- Redução no número de defeitos nas fibras quando comparado com a forma maciça do material;
- Alinhamento das cadeias poliméricas na direção das fibras no caso de fibras orgânicas como é o caso do Kevlar; e
- E o alinhamento das cadeias cristalinas na direção das fibras no caso de materiais cristalinos como o grafite.

No que se refere ao processo de análise estrutural, a anisotropia é a distinção principal observada nesses materiais. Enquanto a rigidez de elementos isotrópicos é caracterizada inteiramente por apenas um módulo Young (E) e por um coeficiente de Poisson (ν), compósitos apresentam propriedades que dependem da orientação dos reforços em relação ao sistema de coordenadas empregado.

Essas características implicam que equações que descrevem o comportamento de estruturas isotrópicas não são adequadas para a análise de compósitos. Nesse contexto, as próximas subseções visam apresentar os conceitos básicos pertinentes à mecânica desses materiais relevantes ao desenvolvimento desse trabalho.

2.4.1 Mecânica de materiais compósitos

Laminados compósitos são tipicamente formados por camadas ortotrópicas denominadas lâminas. Essas lâminas são constituídas de fibras unidirecionais ou tramadas. Para cálculos estruturais em escalas macroscópicas pode-se assumir que a lâmina se comporta como um material ortotrópico, homogêneo, e elasticamente linear. Para esse caso, as relações constitutivas nas coordenadas do material (figura 7) são dadas por

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

para a qual os componentes de estresse são ilustrados na figura 7, e os termos S_{ij} são componentes da matriz de conformidade.

Para uma lâmina fina, a consideração de estado plano de tensões é tipicamente assumida, de modo que:

$$\sigma_3 = \tau_{23} = 0, \quad (2.11)$$

que ao ser aplicado na equação 2.10 resulta em

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2, \text{ e} \quad (2.12)$$

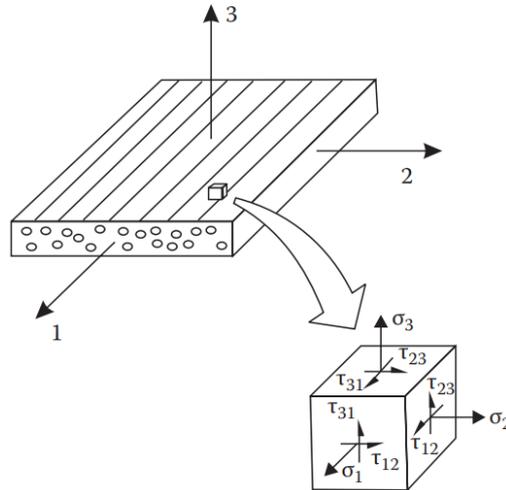


Figura 7 – Definição das direções principais de uma lâmina ortotrópica e dos componentes de tensão correspondentes. Fonte: (CARLSSON; ADAMS; PIPES, 2014).

$$\gamma_{23} = \gamma_{13} = 0. \quad (2.13)$$

Dessa forma, a equação 2.10 pode ser reduzida para apresentar apenas os elementos relevantes para o seu estado plano de tensões:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Observa-se que os termos S_{ij} podem ser relacionados às constantes de engenharia E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} , ν_{21} das equações de tensão e deformação clássicas por meio das relações:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad (2.15)$$

$$S_{12} = \frac{-\nu_{12}}{E_1} = \frac{-\nu_{21}}{E_2}, \quad (2.16)$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2}, \text{ e} \quad (2.17)$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_2}. \quad (2.18)$$

Essas constantes são propriedades médias da lâmina de material compósito. A grandeza E_1 é o módulo de rigidez elástica longitudinal também chamada módulo de Young e ν_{12} o coeficiente de Poisson que são definidos em termos de tensão e deformação pelas relações:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_2}{E_1}, \text{ e} \quad (2.19)$$

$$\nu_{12} = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (2.20)$$

De modo semelhante, E_2 e ν_{21} são o módulo de rigidez elástica e o coeficiente de Poisson da direção transversal, respectivamente, sendo definidos pelas relações:

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}, \text{ e} \quad (2.21)$$

$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (2.22)$$

Já G_{12} é a rigidez a cisalhamento no plano 12 e é definido por:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}}, \quad (2.23)$$

na qual τ_{12} é a tensão cisalhante no plano 12 e γ_{12} a deformação de cisalhamento correspondente.

Com frequência, é conveniente rescrever a equação 2.14 para expressar as tensões em termos das deformações para assumir a forma:

Para expressar as tensões função das deformações, a 2.14 pode ser manipulada para obter-se a re

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

Na qual a matriz $[Q]$ é chamada de matriz de rigidez da lamina e pode ser calculada por meio da inversão da matriz $[S]$ que resulta em:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}, \quad (2.25)$$

$$Q_{12} = \nu_{12} \frac{E_1}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} = \nu_{21} \frac{E_1}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}, \quad (2.26)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}, \text{ e} \quad (2.27)$$

$$Q_{66} = G_{12}. \quad (2.28)$$

É importante notar que os coeficientes de Poisson ν_{12} e ν_{21} não são propriedades independentes, estando relacionados pela equação

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1}. \quad (2.29)$$

Desse modo, para uma lâmina ortotrópica submetida a carregamentos planares, quatro propriedades de engenharia são o suficiente para descrever a sua resposta estrutural: E_1 , E_2 , G_{12} e ν_{12} ou ν_{21} . Contudo, considerações adicionais precisam ser feitas para casos no qual a lâmina compósita é carregada por esforços que não coincidem em sentido com o sistema de coordenadas do material, tema que será discutido a seguir.

2.4.2 Transformação do sistema de coordenada do material

As equações apresentadas anteriormente estão limitadas aos casos nos quais as tensões ou deformações são aplicadas nas direções principais do material. Como essa direção não necessariamente se encontra alinhada com direções de interesse para a análise é necessária a transformação dos sistemas de coordenadas das deformações, tensões e propriedades mecânicas para orientações em que são mais úteis.

No caso de uma lâmina cujos eixos principais do material (1,2) estão orientados num ângulo θ em relação a um sistema de coordenadas x,y, as tensões e deformações podem ser transformadas entre os sistemas de coordenadas utilizando as equações

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T(\theta)] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}, \text{ e} \quad (2.30)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T(\theta)] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

na qual $[T(\theta)]$ é a matriz de matriz de rotação do sistema de coordenadas em relação à um ângulo θ ilustrado na figura 8.

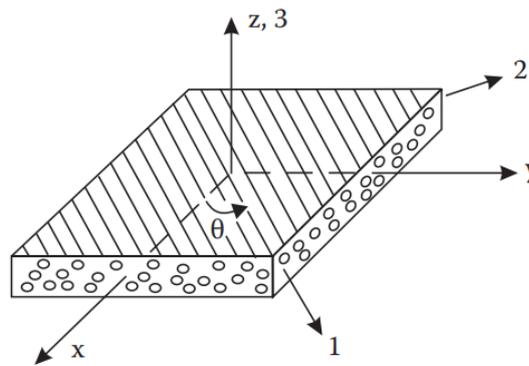


Figura 8 – Rotação positiva (anti-horária) dos eixos principais do material (direções 1 e 2) em relação a dois eixos x e y arbitrários. Fonte: (CARLSSON; ADAMS; PIPES, 2014).

A matriz $[T]$ é definida pela equação:

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

onde m é igual ao $\cos \theta$ e n equivale ao $\sin \theta$. Para fins de consistência no uso de vetores entre diferentes equações de cálculos de compósitos é preferível remover a divisão por dois

no termo da deformação por cisalhamento dos vetores de deformações específicas. Com esse fim, a matriz de Reuter é definida por

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

que pode ser introduzida na equação 2.32 para obter a relação

$$\varepsilon = [R] [T] [R]^{-1} \bar{\varepsilon}, \quad (2.34)$$

na qual $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}]^T$ e $\bar{\varepsilon} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}]^T$.

Uma vez estabelecida a transformação das tensões e deformações para o sistema de coordenadas do material, é conveniente fazer o mesmo para as equações de tensão e deformação apresentadas na seção anterior. Para isso, define-se a equação

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

na qual \bar{Q}_{ij} são os componentes da matriz de rigidez transformada que pode ser obtida utilizando das transformações de sistema de coordenadas descritas anteriormente para obter a relação:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Essa equação pode ser escrita em sua forma reduzida de modo a definir a matriz de rigidez transformada $[\bar{Q}]$:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Essa definição é importante para os cálculos da matriz de rigidez de painéis compostos por múltiplas lâminas, que são apresentados na seção a seguir.

2.4.3 Teoria clássica dos laminados

Estruturas de compósitos reais possuem mais do que uma camada porque a direção transversal de uma lâmina unidirecional isolada apresenta baixa resistência e rigidez. Por conseguinte, tende-se a empilhar várias lâminas em diferentes orientações de modo a obter uma estrutura capaz de suportar os diferentes tensionamentos aos quais uma estrutura

pode ser submetida (CARLSSON; ADAMS; PIPES, 2014). Esse conjunto de camadas compõe um laminado.

É aparente que o comportamento global de um laminado é uma função das propriedades e da sequência de empilhamento das camadas individuais. Esse comportamento pode ser descrito por meio da teoria clássica das lâminas, um modelo que prevê o comportamento do laminado com base nos pressupostos:

- A espessura do laminado é muito pequena em comparação com as suas outras dimensões;
- As camadas do laminado estão perfeitamente unidas;
- As linhas perpendiculares à superfície do laminado permanecem rectas e perpendiculares à superfície após a deformação (ausência de deformações por cisalhamento nos plano transversais ao laminado);
- As lâminas e o laminado são linearmente elásticas; e
- As tensões e deformações na direção da espessura são desprezáveis.

Estas hipóteses são válidas para laminados não danificados e sujeitos a pequenas deformações (NETTLES, 1994, pg. 11). A teoria clássica das lâminas estabelece assim as relações constitutivas dos laminados, que em sua forma matricial são escritas como

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

Nessa equação, a matriz 6×6 define a matriz constitutiva do material e pode ser representada como "[ABBD]". Os termos N_x , N_y e N_{xy} são resultantes dos esforços por unidade de comprimento no plano da placa laminada e V_x e V_y os esforços cortantes por unidade de comprimento, todos com unidades de [N/m]. E M_x , M_y e M_{xy} representam os momentos fletores em termos de momento por unidade de comprimento, cuja a unidade é o [N]. A orientação e convenção de sinais desses esforços são ilustrados na figura 9.

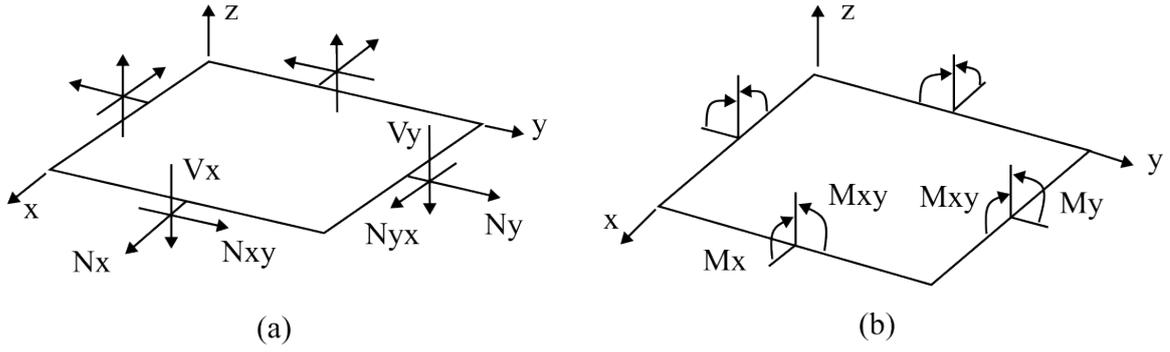


Figura 9 – Resultantes dos esforços (figura a) e momentos (figura b) em uma placa plana. Observa-se que todas as forças e momentos são desenhados como positivos por convenção. Fonte: (BARBERO, 2018).

E os termos A_{ij} , B_{ij} e D_{ij} são definidos pelas equações:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k; \quad i, j = 1, 2, 6, \quad (2.39)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k \bar{z}_k; \quad i, j = 1, 2, 6, \text{ e} \quad (2.40)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left(t_k \bar{z}_k^2 + \frac{t_k^3}{12} \right); \quad i, j = 1, 2, 6. \quad (2.41)$$

Observa-se que essas equações expressam os termos da matriz constitutiva do material como proporcionais aos somatórios das propriedades das lâminas transformadas para o sistema de coordenadas do laminado $[\bar{Q}]_k$. Nessas equações, t_k é a espessura da lâmina de número k na sequência de laminação, \bar{z}_k é a coordenada z do plano médio da lâmina k em relação ao plano médio do laminado e Z_k é a coordenada z do plano superior lâmina k , conforme o apresentado na figura 10.

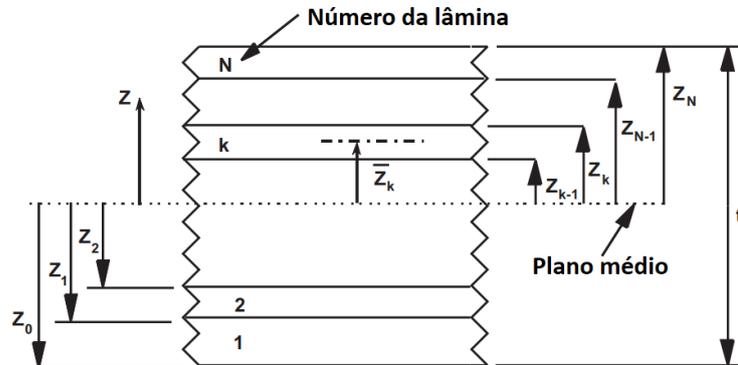


Figura 10 – Geometria de um laminado de N lâminas. Fonte: (BARBERO, 2018).

Invertendo a matriz constitutiva $[ABDD]$ apresentada na equação 2.38 é possível obter analiticamente as deformações sofridas por um laminado submetido à um carga-

mento por meio da relação:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix}, \quad (2.42)$$

na qual o termo matricial $[ABBD]^{-1}$ é a matriz de rigidez do laminado.

2.4.4 Notação de descrição de sequência de laminação

Existe uma variedade de abordagens para descrever a sequência de empilhamento das camadas de um laminado. A notação utilizada neste trabalho segue a utilizada por A.T. Nettles (1994) e por Daniel e Ishai (2007). Nesse sistema, define-se uma direção principal para o laminado, que é assumido como sendo o ângulo de zero graus do material. Em seguida, os ângulos das camadas são indicados entre colchetes na ordem que estão empilhados no laminado indo da sua superfície inferior para a superior. Por exemplo o código $[0, +15]$ indica um laminado de duas camadas, uma a 0° em relação a direção de referência e a outra, acima da primeira, a 15° .

Adicionalmente, o símbolo " \pm " é usado para indicar lâminas que alternam o seu ângulo entre positivos e negativos, em um padrão conhecido como *angle-ply*. Subscritos numéricos são usados para indicar a repetição interna de padrões de laminação. Por exemplo, $[+15, -15, +15, -15, 90]$ equivale a $[(\pm 15)_2, 90]$.

Para laminados simétricos, primeiramente, é indicada a orientação da camada mais externa, os ângulos das camadas seguintes são indicados separados por vírgula até se atingir o plano médio. Essa lista de ângulos é contida entre colchetes ou parenteses e ao final um subscrito "S" é usado para indicar a simetria do laminado. Caso o número de camadas seja ímpar, a lâmina central será indicada ao fim do código de laminação com uma barra sobre o seu ângulo.

Um subscrito "T" pode ser usado ao final do código do laminado para tornar explícito que se trata da notação contendo a sequência total de lâminas em oposição a notação resumida destinada a laminados simétrico. Por exemplo, o laminado

$$[0, +45, -45, 90, 90, -45, +45, 0]_T,$$

por ser simétrico, pode ser representado de modo reduzido como $[0, +45, -45, 90]_S$. A figura 11 apresenta alguns exemplos do uso dessa notação.

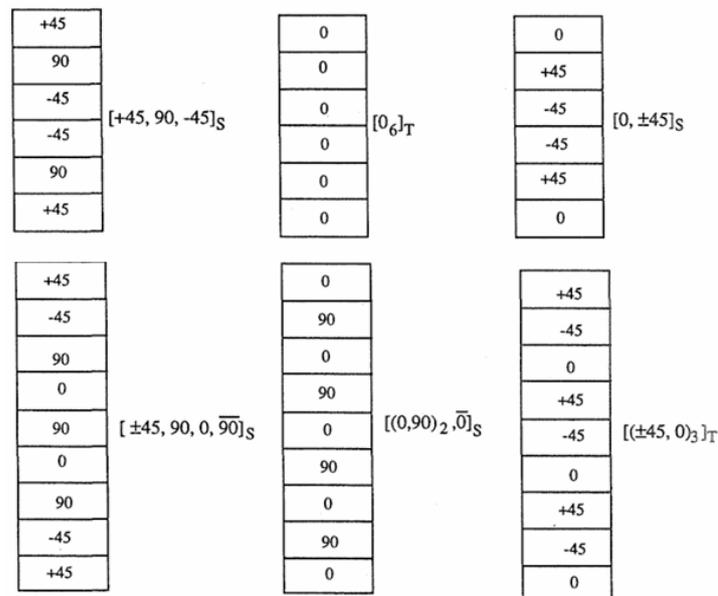


Figura 11 – Exemplos de sequencias de empilhamento de alguns laminados e suas respectivas notações. Fonte: (NETTLES, 1994).

2.4.5 Caracterização experimental de materiais compósitos

O objetivo de testes mecânicos de um material de engenharia é fornecer os dados necessários para a análise, projeto e fabricação de componentes estruturais que venham a utilizar o material. A caracterização de materiais compósitos é particularmente desafiadora, uma vez que uma série de fatores que não precisam ser considerados em materiais convencionais se tornam criticamente importante nos testes em compósitos.

Por exemplo, compósitos são altamente anisotrópicos, com propriedades variando a depender da direção em que são medidas resultando na necessidade de aferir um maior número de propriedades mecânicas. O conteúdo de fibras, resina e poros possuem influências significativas nas propriedades do material. E as propriedades físicas e mecânicas estão fortemente correlacionadas com condições de fabricação do material (PETERS, 2011; DANIEL, 2007). Em função disso, métodos especializados são necessários para a caracterização desses materiais, alguns desses procedimentos são descritos nas subseções a seguir.

2.4.5.1 Obtenção das proporções dos materiais constituintes

A razão volumétrica de fibra, pode ser obtida por uma variedade de técnicas. Nos casos mais simples, havendo menos de 1% de porosidade, é possível utilizar das densidades da matriz e do reforço para estimar o conteúdo de fibras do compósito por meio da equação:

$$V_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m}, \quad (2.43)$$

na qual ρ_c , ρ_m , ρ_f são, respectivamente, as propriedades do compósito da matriz e da fibra.

Para casos nos quais esse procedimento não é válido, métodos que envolvem a remoção da matriz, seja por queima ou dissolução em ácido, seguidas da aferição do peso das fibras podem ser utilizados. Procedimentos deste tipo são descritos pelas ASTM D2584 de 2016 e ASTM D3171 de 2022.

Já o conteúdo de poros pode ser obtido analisando os volumes dos materiais constituintes em relação ao volume da amostra, podendo ser avaliados utilizando digestão ácida da amostra pelo procedimento descrito pela ASTM D2734 1994, que permite obter a razão volumétrica da porosidade com a relação.

$$V_v = 1 - \frac{W_f/\rho_f + (W_c - W_f)/\rho_m}{W_c/\rho_c}, \quad (2.44)$$

na qual W_f e W_c são os pesos das fibras e do compósito, respectivamente, ρ_f , ρ_m e ρ_c as densidades da fibra, da matriz e do compósito, nessa ordem. Esse método, porém, além de exigir o uso de produtos químicos, também é muito sensível à precisão das medições, uma vez que diferenças muito pequenas em pesos estão sendo analisadas.

Em função disso, métodos baseados em análise de imagens de micrografia tendem a ser preferidos para a análise de conteúdo de poros. Esse método consiste em avaliar a área ocupada em uma seção transversal por poros e estimar a proporção volumétrica da amostra que esses poros representam. Este mesmo procedimento pode ser utilizado para determinar a razão volumétrica da fibra de reforço contando o número de filamentos por unidade de área.

Um processo semelhante, porém menos laborioso se dá pelo estudo de imagens de microscopia em escala de cinza de amostras do compósitos. Nessas imagens as razões volumétricas da porosidade, da matriz e do reforço fibroso correspondem a razão do número de pontos da imagem com valores de cinza associados a cada material, dividido pelo número total de pontos da imagem (figura 12).

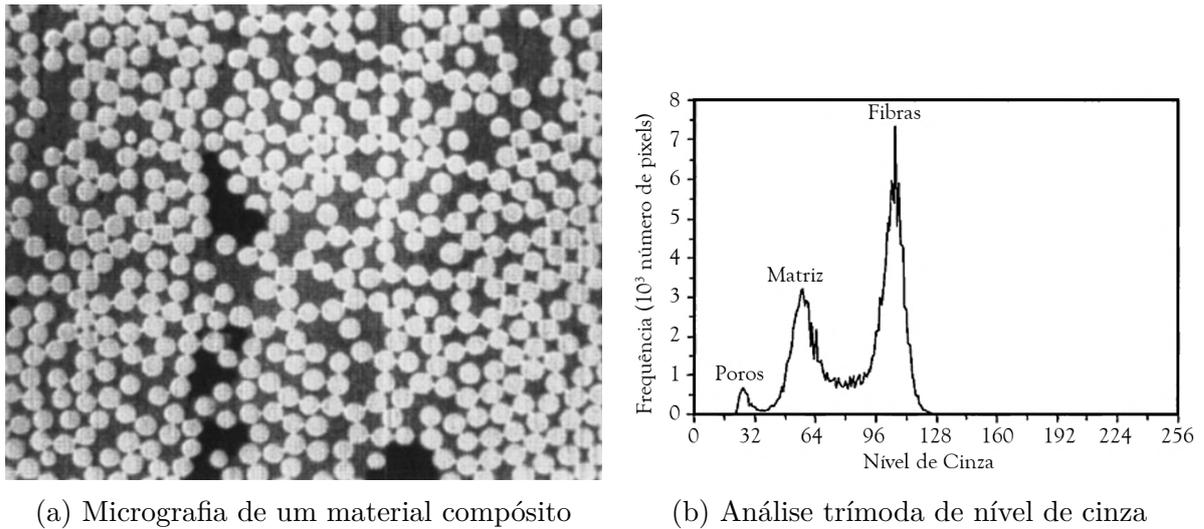


Figura 12 – Método óptico de análise de constituintes de materiais compósitos. Fonte: (DANIEL, 2007).

2.4.5.2 Caracterização experimental de propriedades mecânicas

A abordagem generalista na caracterização mecânica de materiais compósitos baseia-se no estudo das propriedades da lâmina unidirecional. Uma vez caracterizada a lâmina, é possível estimar o comportamento mecânico dos laminados formados pelo mesmo material por meio da teoria dos laminados (PETERS, 2011). Para descrever completamente a resposta ao carregamento e a resistência de uma lâmina unidirecional, são necessárias:

- Quatro propriedades de rigidez:
 1. Módulo de elasticidade longitudinal, E_1 ;
 2. Coeficiente de Poisson, ν_{12} ;
 3. Módulo de elasticidade transversal, E_2 ; e
 4. Módulo de cisalhamento no plano, G_{12} .
- E cinco resistências mecânicas:
 1. Resistência a tração longitudinal, F_{1T} ;
 2. Resistência a compressão longitudinal, F_{1C} ;
 3. Resistência a tração transversal, F_{2T} ;
 4. Resistência a compressão transversal, F_{2C} ; e
 5. Resistência ao cisalhamento no plano, F_6 .

Os ensaios de tração de amostras planas para a obtenção das propriedades listadas, com exceção das resistências a compressão, são descritos nas subseções a seguir.

Já a obtenção das propriedades de compressão é desafiadora devido à tendência de falha prematura por flambagem global ou esmagamento nas extremidades das amostras (DANIEL, 2007). Esses ensaios requerem, portanto, equipamentos especializados ao mesmo tempo que essas propriedades têm menor relevância para a maioria das análises de vasos de pressão, onde as resistências à tração são mais significativas para os modos de falha. Portanto, os procedimentos para determinar as propriedades de resistência à compressão F_{1C} e F_{2C} não são abordados neste trabalho.

2.4.5.2.1 Determinação das propriedades longitudinais e transversais da lâmina unidirecional

As propriedades longitudinais da lâmina podem ser obtidas por meio de ensaios de carregamento uniaxial de laminados unidirecionais. As amostras para esses ensaios de tração consistem de cupons com laterais retas e seção transversal constante, podendo ou não apresentar abas de vidro/epóxi chanfradas e coladas com adesivo (figura 13).

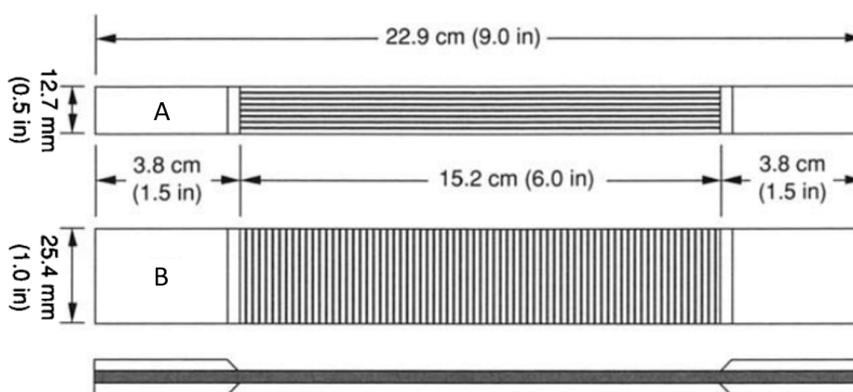


Figura 13 – Geometria das amostras empregadas na determinação de propriedades de tensão da lâmina unidirecional. A amostra "A" apresenta reforços longitudinais ($[0^{\circ}]_n$) enquanto a "B" reforços transversais ($[90^{\circ}]_n$). Fonte: (DANIEL, 2007).

Os ensaios realizados com esse tipo de amostra são descritos pela ASTM D3039/D3039M de 2017. O cupom longitudinal geralmente tem uma largura de 1,27 cm, enquanto o cupom transversal mede 2,54 cm de largura. As espessuras recomendadas variam de 0,5 a 2,5 mm, sendo que o cupom longitudinal normalmente possui seis camadas, enquanto o transversal conta com pelo menos oito camadas. Ambas as amostras têm um comprimento total de 22,9 cm e um comprimento de aferição de 15,2 cm. Durante o teste, as amostras são submetidas a carregamento de tração uniaxial até que a falha ocorra.

Um registro contínuo de carga e deformação específica é obtido por meio de um sistema de aquisição de dados digitais. As deformações axiais e transversais são medidas por uma roseta extensométrica bidirecional fixada na superfície da amostra (DANIEL, 2007). Com esses dados é possível então determinar as resistências a tração da amostra

(F^{tu}) por meio de:

$$F^{tu} = \frac{P^{max}}{A}, \quad (2.45)$$

na qual F^{tu} é a resistência a tração da amostra em [MPa], A é a área de sua seção transversal em [mm²] e P^{max} o carregamento máximo antes da falha em [MPa].

Já os módulos de elasticidade podem ser inferidos por meio da equação

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon, \quad (2.46)$$

com:

- E = Módulo de elasticidade tensional em GPa;
- $\Delta\sigma$ = diferença da tensão aplicada entre dois pontos de deformação; e
- $\Delta\varepsilon$ = diferença de deformação específica entre dois pontos.

Esses dois pontos para qual as tensões e deformações são aferidos devem estar contidos em valores de carregamentos inferiores à 50 % da tensão última apresentada na equação 2.45.

Por fim para ensaios nos quais as deformações transversais também são medidos o coeficiente de Poisson da amostra é calculado por meio da equação

$$\nu = -\Delta\varepsilon_t / \Delta\varepsilon_l, \quad (2.47)$$

na qual:

- ν é o coeficiente de Poisson;
- $\Delta\varepsilon_t$ é a variação da deformação específica transversal entre dois pontos da curva de carregamento; e
- $\Delta\varepsilon_l$ é a variação da deformação específica longitudinal entre dois pontos da curva de carregamento.

Observa-se que a propriedade do material sendo calculada depende da orientação das fibras da amostra. Por exemplo a realização desses ensaios em uma amostra com as fibras alinhadas longitudinalmente permite calcular diretamente as propriedades E_1 , ν_{12} e F_L^1 . Enquanto em uma amostra de fibras transversais seriam aferidos E_2 , ν_{21} e F_T^1 .

A ASTM 3039 também apresenta instruções acerca do registro do modo de falha das amostras nos ensaios de tração. Deve-se apresentar o tipo, área e posição dos modos de falha observados durante os ensaios de tração. Essa indicação é feita por meio de um código de falha de três caracteres, no qual:

- o primeiro caractere apresenta o tipo de falha observado, por exemplo "delaminação nas arestas" ou "falha explosiva";
- o segundo caractere apresenta a posição da falha ao longo do comprimento da amostra em relação a elementos do equipamento de testes, por exemplo "no sensor", "na garra" dentre outros; e
- o terceiro caractere informa o local da falha em relação a sua largura, por exemplo "no meio", "na lateral" entre outros.

A figura 14 ilustra exemplos do uso do código de falha para alguns modos de falhas comumente observados em ensaios de tração. Já os caracteres empregados no código para os modos de falha mais comuns são apresentados na figura 1.

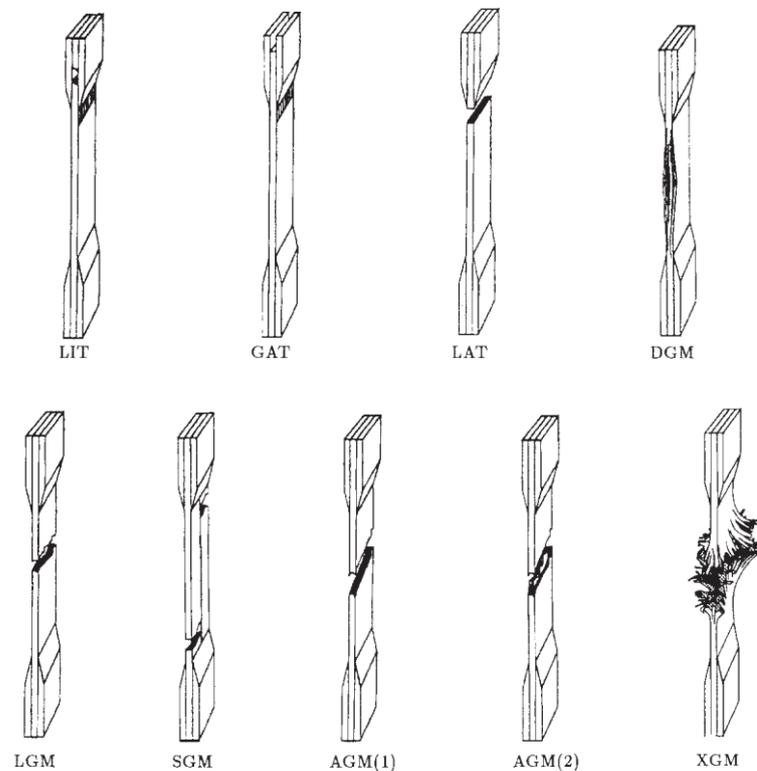


Figura 14 – Principais modos de falha observados em testes de tração e seus códigos correspondentes. Fonte: (ASTM D3039/D3039M-17, 2017).

2.4.5.3 Determinação das propriedades de cisalhamento

A caracterização completa de um compósito unidirecional bidimensional requer também a determinação das propriedades da lamina sob cisalhamento no plano das fibras. Entre as abordagens existentes são particularmente difundidos os testes de amostras laminadas em $[\pm 45]_{n_s}$ apresentados na norma ASTM D3518M de 2018.

Tabela 1 – Código de descrição dos modos de falha para tetes tração. Fonte: (ASTM D3039/D3039M-17, 2017).

Primeiro caractere		Segundo caractere		Terceiro caractere	
Tipo	Código	Posição	Código	Local	Código
Inclinada	A	Dentro da garra/aba	I	Em baixo	B
Delaminação	D	Na garra/aba	A	Em cima	T
Garra/aba	G	A 1 largura da garra	W	A esquerda	L
Lateral	L	No sensor	G	A direita	R
Multi-modal	M	Múltiplas áreas	M	No meio	M
Longitudinal	S	Várias	V	Vários	V
Explosiva	X	Desconhecido	U	Desconhecido	U
Outra	O				

Nesse procedimento, um teste de tração uniaxial de um laminado de $\pm 45^\circ$ é realizado de modo semelhante ao apresentado para a norma ASTM 3039 discutida anteriormente, embora com restrições específicas na sequência de empilhamento e espessura. Em seguida utilizando expressões derivadas da teoria de placas laminadas, a tensão de cisalhamento no plano no sistema de coordenadas do material é calculada diretamente a partir da carga axial aplicada. A tensão de cisalhamento relacionada é determinada a partir dos dados de deformação específica longitudinal e transversal obtidos por sensores extensométricos (figura 15). Esses dados são usados para criar uma curva de tensão-deformação de cisalhamento na direção das fibras.

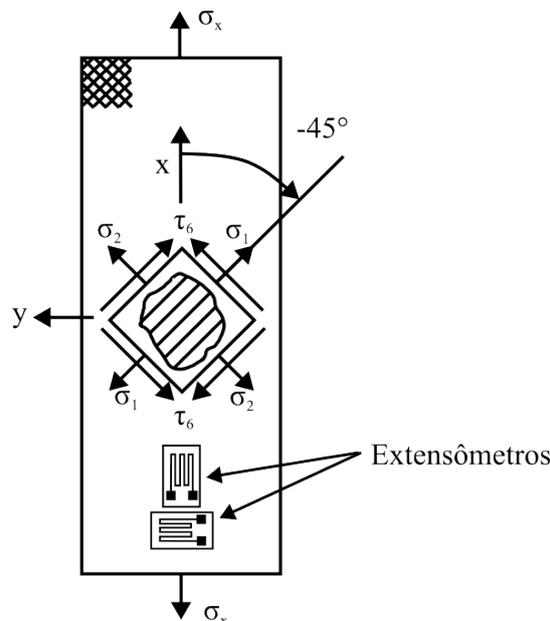


Figura 15 – Um corpo de prova de lâmina com ângulo de $[\pm 45]_{n.s}$ deg sob tração uniaxial para determinação das propriedades de cisalhamento no plano da lâmina. Fonte: (DANIEL, 2007).

Desse modo, o corpo de provas é submetido à um carregamento unidirecional $\bar{\sigma}_x$

de modo que as tensões resultantes nas direções perpendiculares às fibras são dadas por

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \tau_{xy}, \quad (2.48)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \tau_{xy}, \text{ e} \quad (2.49)$$

$$\tau_6 = \frac{\sigma_x}{2}, \quad (2.50)$$

na qual σ_1 e σ_2 são as tensões resultantes na direção das lâminas e τ_{xy} é a tensão de cisalhamento na orientação do carregamento.

Já as deformações no plano das lâminas são dadas por

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2}, \text{ e} \quad (2.51)$$

$$\gamma_6 = \varepsilon_x - \varepsilon_y, \quad (2.52)$$

na qual ε_x e ε_y são as deformações axiais e transversais do corpo de prova e podem ser medidas por meio de dois sensores extensométricos. Desse modo é possível determinar a rigidez à cisalhamento da lâmina por meio da inclinação inicial da curva do carregamento τ_6 versus a deformação γ_6 . Ou seja a rigidez G_{12} pode ser obtida por

$$G_{12} = \frac{\sigma_x}{2(\varepsilon_x - \varepsilon_y)}, \quad (2.53)$$

que pode ser reescrita dividindo os numeradores e denominadores da equação por ε_x :

$$G_{12} = \frac{E_x}{2(1 + \nu_{xy})}. \quad (2.54)$$

Essa forma da equação coloca em evidência que a rigidez de cisalhamento G_{12} pode ser obtida por meio do coeficiente de rigidez axial E_x e do coeficiente de Poisson ν_{xy} do laminado $[\pm 45]_{n,s}$ empregado na amostra. Embora essa abordagem permite a obtenção de uma boa estimativa da rigidez ao cisalhamento, o método superestima a resistência ao cisalhamento devido as interações entre as lâminas da amostra (DANIEL, 2007).

2.5 Medição experimental de deformações

Para medir deformações e deslocamentos dos corpos de prova de teste, os três transdutores mais comuns utilizados são extensômetros de resistência elétrica, extensômetros e transformadores diferenciais lineares de deslocamento. Métodos ópticos também são usados, mas em menor escala. Os extensômetros de resistência elétrica são versáteis, confiáveis e precisos o que os tornam o sensor mais conveniente para um grande número de aplicações (DALLY, 1993). Uma ilustração representado um extensômetro típico é mostrado na figura 16.

Esses sensores consistem de grelhas finas de folhas metálicas (figura 16) que podem ser fixados por meio de adesivos à superfície de um componente ou estrutura. Quando

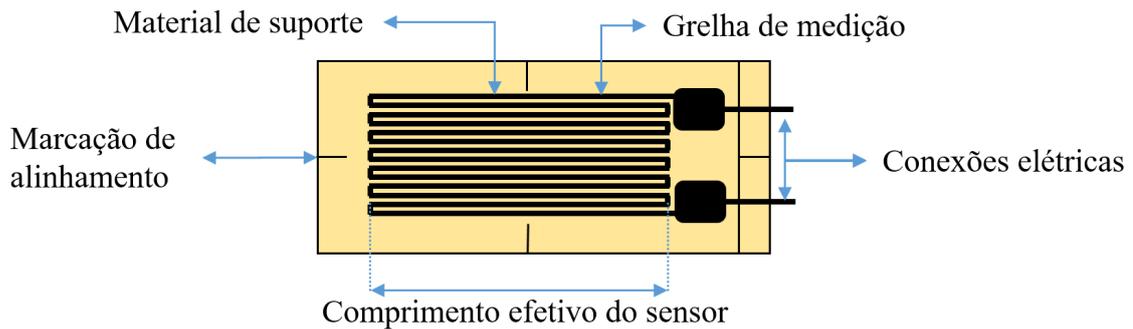


Figura 16 – Diagrama representando os componentes típicos de um extensômetro de resistência elétrica. Fonte: (HOFFMANN, 1989) adaptado.

esta é submetida a um carregamento, as deformações resultantes são transferidas ao sensor (DALLY, 1993; Omega Engineering, 1994). Como consequência a resistência elétrica da grelha metálica altera-se proporcionalmente à deformação induzida pela carga como expresso pela equação:

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon, \quad (2.55)$$

na qual S_g é o fator de medida (*gauge factor*) do sensor, R a sua resistência elétrica inicial e ε a deformação específica sofrida pelo extensômetro.

O sinal $\Delta R/R$ pode ser convertido para uma leitura de voltagem no intuito de simplificar a leitura por conversores e amplificadores de sinal. Para esse fim, a ponte de Wheatstone é o circuito mais utilizado em função de sua elevada sensibilidade e flexibilidade de aplicações (DALLY, 1993).

Esse circuito, em sua versão mais simples, consiste de quatro resistores configurados em um arranjo de forma de diamante (figura 17) em dois arranjos em série-paralelo no qual dois dos terminais são conectados à uma fonte de excitação e dois à um medidor de diferença de potencial elétrico.

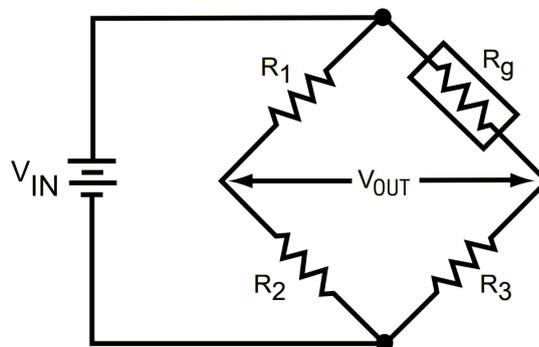


Figura 17 – Ponte de Wheatstone, na qual R_1 , R_2 e R_3 são resistores, R_g o extensômetro elétrico e V_{in} e V_{out} a diferença de potencial de excitação e aferida respectivamente. Fonte: (Omega Engineering, 1994).

Desse modo, a diferença de potencial elétrico a ser aferida pela medição de V_{out} é

dada pela equação

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{R_3}{R_3 + R_g} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right], \quad (2.56)$$

de modo que V_{out} e a variação da resistência R_g são proporcionais.

Idealmente, a mudança da resistência elétrica do sensor seria causada apenas pela deformação a ser medida, porém tanto a resistência quanto a sensibilidade do extensômetro são afetadas por variações de temperatura. Essa alteração se deve, principalmente, à expansão térmica do sensor e do espécime estudado que se aquecem de modo localizado em função da dissipação de potência causada pela resistência elétrica do extensômetro. Esse efeito é mais crítico quando o material estudado apresenta baixa condutividade térmica, como é o caso dos materiais poliméricos e compósitos.

Como consequência, a compensação dos fenômenos térmicos se torna uma necessidade para essas aplicações. Com esse objetivo, observa-se que na equação 2.56 que caso a resistência R_g e R_1 variem igualmente a leitura V_{out} seria constante. É possível então substituir R_1 por um sensor sofrendo o mesmo fenômeno a ser compensado em R_g de modo a eliminar sua influência sobre a medição. No caso, para eliminar a influência de fenômenos térmicos, um segundo sensor pode ser fixado à uma superfície de mesmo coeficiente de expansão e dissipação térmica do objeto à ser estudado ([Omega Engineering, 1994](#)).

3 Metodologia

Este capítulo descreve os procedimentos adotados para alcançar os principais objetivos do trabalho. Inicialmente, são obtidas as propriedades da lâmina compósita unidirecional por meio de ensaios de tração. Essas propriedades são utilizadas para realizar cálculos analíticos das deformações específicas esperadas em vasos de pressão. A etapa seguinte envolve a medição das deformações específicas efetivamente causadas por uma pressão hidrostática em vasos de pressão fabricados por bobinagem filamentar. Soluções técnicas adicionais também são relatadas.

3.1 Materiais constituintes dos compósitos

Filamentos contínuos de fibra de carbono à base de poliácrlonitrila *Teijin Carbon HTS45 E23 12K* (Tabela 2) e a resina epóxi adquiridas pelo fornecedor Huntsman (Tabela 3) foram utilizados para a fabricação dos corpos de prova e vasos de pressão discutidos nesse trabalho.

Tabela 2 – Propriedades dos filamentos de carbono (conforme declarado pelo fornecedor Texiglass)

Parâmetro	Mínimo	Nominal	Máximo
Massa por unidade de comprimento			
ρ_f [tex]	720	800	880
Densidade			
ρ [g/cm ³]	1.77	1.80	1.83
Resistência à tração			
F_{1f} , [MPa]	4050	4500	4950
Módulo de elasticidade			
E_{1f} [GPa]	228	240	252

Tabela 3 – Propriedades das resinas empregadas (conforme o declarado pelo fornecedor).

Designação	Composição da resina	Viscosidade a 25°C [mPa · s]	Ciclo de cura
LY5052	Araldite LY5052 e Aradur 5052	600 - 700	8-16 h a 25°C

3.2 Caracterização da lâmina unidirecional

As propriedades mecânicas das lâminas unidirecionais são obtidas pelo procedimentos de ensaio de tração ASTM D3039/D3039M-2017 e D3518/D3518M-2018 descritos

na seção 2.4.5.2. Os ensaios de tração aqui relatados são conduzidos em uma máquina de ensaios de tração Instron com velocidade de avanço das garras de 2 mm/min. As deformações específicas são aferidas com extensômetros elétricos, o procedimento para tal é descrito na seção 3.6.

As amostras planas são fabricadas por meio da bobinagem de um mandril cilíndrico seguida da transferência das fibras para um molde plano de acordo com o apresentado no trabalho de Kastenmeier *et al.* (2017). Além disso, essa decisão também é baseada nos resultados de Pimentel *et al.* (2024), que demonstram que amostras planas assim fabricadas apresentaram melhores propriedades mecânicas quando submetidas a testes de carregamento na direção das fibras, além de menor presença de porosidades e defeitos quando comparadas com amostras fabricadas em mandris planos como o sugerido pela ISO 1268 de 2001.

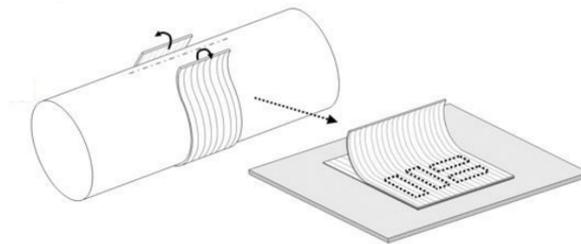


Figura 18 – Representação esquemática do processo de fabricação de amostras planas utilizando bobinagem sobre mandris cilíndricos. Fonte: (KASTENMEIER; SCHMID; EHRLICH, 2017).

Para o preparo das amostras com fibras unidirecionais ($[0^\circ]$ e $[90^\circ]$) um laminado é fabricado enrolando o filamento de carbono em seis camadas sucessivas em um mandril cilíndrico de 151 mm de diâmetro coberto com um tecido de liberação de Nylon (*peelply*). A velocidade angular do mandril na bobinagem é de 15,8 rev/min, e a um passo da bobinagem de 5 mm.

Semelhantemente, as amostras $[\pm 45^\circ]$ são fabricadas depositando seis camadas alternadas de filamento sobre uma camada de tecido de liberação de nylon. Após a bobinagem da última camada, os laminados são cobertos com outra camada do tecido de liberação com o intuito de fixar as fibras da superfície em suas posições durante o corte e transferência do laminado não curado do mandril para o molde plano.

O corte das fibras no mandril é feito com uma micro retífica equipada com um disco de corte fino. Uma vez liberado da superfície do mandril, o laminado é estendido sobre um molde plano de vidro e coberto com um tecido respirador para absorver os gases e excessos de resina liberados pelo material durante a cura. A figura 19 ilustra a bobinagem e remoção das fibras do mandril. Por fim o laminado é envelopado por uma

bolsa plástica e uma bomba de ar é usada para compactar a placa sob o envelope de vácuo até o fim do ciclo de cura.



Figura 19 – Processo de fabricação dos corpos de prova planos $[\pm 45^\circ]_n$. a) Deposição do filamento sobre o mandril cilíndrico; b) Remoção do laminado da superfície do mandril. Fonte: (PIMENTEL et al., 2024)

Em seguida, os corpos de prova são cortados das placas planas com o uso de uma máquina de fresa CNC equipada com uma retífica rotativa com discos diamantados composto por carboneto sólido revestido com AlTiN. Para a determinação das deformações específicas foram aplicados extensômetros de resistência elétrica nessas amostras. O procedimento de instalação desses sensores é apresentado na seção 3.6. Já o número total de corpos de provas usados nos ensaios de tração e as direções e números de extensômetros aplicados são apresentados na tabela 5. As amostras sem os extensômetros foram usadas para a avaliação da resistência mecânica das placas.

3.3 Fabricação dos vasos de pressão

Cinco vasos de pressão idênticos são empregados nos estudos descritos nesse trabalho. Esses cinco espécimes foram utilizados com os propósitos listados a seguir:

- Vaso 1: empregado em testes preliminares da bancada de ensaios hidrostáticos;
- Vaso 2: cortado para a realização de medições de espessuras ao longo do comprimento (mostrado já seccionado na figura 20); e
- Vasos 3, 4 e 5: empregados na realização dos testes hidrostáticos destrutivos e medição das deformações específicas em função da pressão interna.

Os vasos são fabricados cobrindo mandris por fibra de carbono em três camadas polares *angle-ply*. Esse padrão de bobinagem consiste da deposição alternada de filamentos



Figura 20 – Conjunto dos cinco vasos de pressão fabricados para o trabalho. Régua de 25 cm para escala.

em um ângulo α . Em seguida uma camada de 90° é bobinada sobre a porção cilíndrica do vaso de pressão. Desse modo, a estrutura resultante é composta por um laminado $[\pm\alpha]$ nos domos elípticos e $[\pm\alpha, 90^\circ]$ na parte cilíndrica. O ângulo α varia ao longo do comprimento do vaso em função do raio da geometria na posição e é definido pelo raio da abertura polar. Essa relação é expressa pela equação

$$\sin(\alpha(r)) = \frac{r_{pf}}{r}, \quad (3.1)$$

onde $\alpha(r)$ é o ângulo de bobinagem na seção de raio r , e r_{pf} é o raio da abertura do domo elíptico. A geometria do vaso é ilustrada na figura 21 e suas dimensões gerais na tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões gerais dos vaso fabricados.

Parâmetro	R_c	r_{pf}	b_{er}	l_c
Dimensão [mm]	60	21	42	88

Os mandris são fabricados por impressão 3D utilizando PETG como filamento, suas dimensões externas correspondem ao apresentado para os vasos de pressão na tabela 4. A sua estrutura é dividida em três partes, dois domos e uma porção cilíndrica, para facilitar a impressão. Além disso duas flanges metálicas são empregadas como pontos de conexão dos vasos de pressão. Esses componentes, são fixados entre si por meio de um adesivo a base de silicone. A figura 22 apresenta a arquitetura desse mandril.

Observa-se que esse componente apresenta baixas impermeabilidades e rigidezes mecânicas, de modo que mesmo permanecendo no interior dos vasos de pressão, não é esperado que o mandril afete significativamente suas propriedades mecânicas. Essa expectativa se baseia na diferença elevada entre rigidez do PETG (em média 3 GPa) e da fibra de carbono (140 GPa).

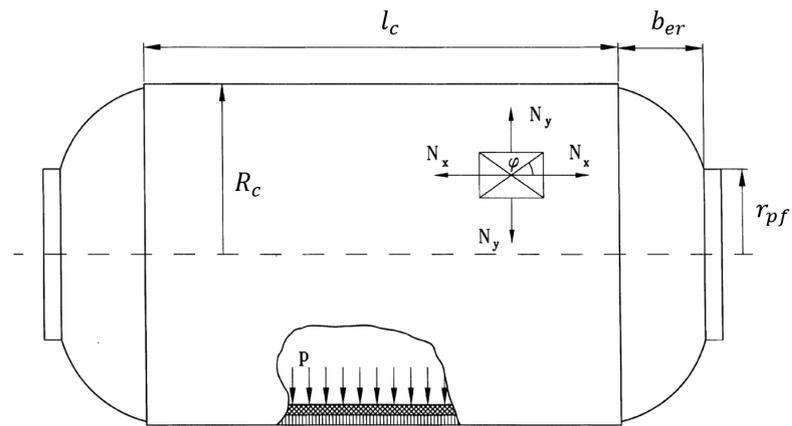


Figura 21 – Geometria do vaso de pressão. Fonte: (LUTHADA, 2022) modificado.

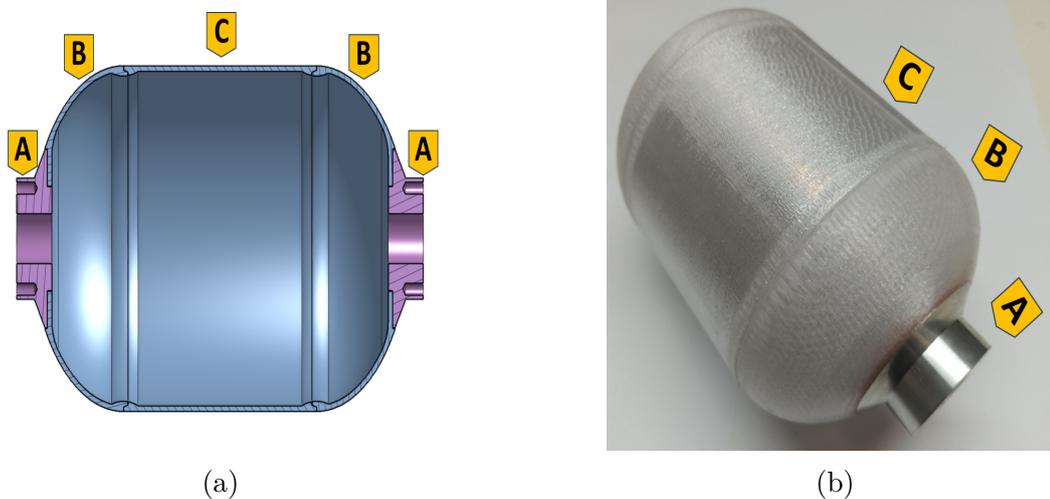


Figura 22 – Mandril empregado na bobinagem. Figura a: Visualização da seção transversal do mandril empregado na fabricação do vaso de pressão. Figura b: fotografia do mandril montado. Nas imagens A: flanges metálicas; B: Domo do mandril; C: porção cilíndrica do mandril.

Os vasos são bobinados sob tensões de filamento controladas passivamente apresentadas na seção de resultados pertinentes ao sistema de controle de tensão (tabela 7). O sistema de tensionamento desenvolvido para a realização desse procedimento é apresentado na seção 3.4. As equações da trajetória de deposição das fibras é detalhada no artigo de Andrianov *et al.* (2022).

A fim de determinar a distribuição de espessuras, uma seção longitudinal do segundo vaso de pressão é cortada utilizando uma esmerilhadeira. Em seguida, a espessura da seção é medida em diversos pontos, a intervalos regulares, com um micrômetro de parafuso. As espessuras aferidas por meio dessas medições são apresentadas na figura 39.

3.4 Sistema de controle de tensão do filamento de bobinagem

Para o controle do tensionamento do filamento durante o processo de bobinagem é empregada uma bancada de aço para servir de apoio aos eixos do carretel (figura 23). Essa bancada consiste em uma estrutura metálica contendo seis eixos suportados por pares de mancais de tipo face. Cada eixo possui duas extremidades livres. Uma dedicada ser acoplada a carretéis de filamento bobinagem enquanto a outra é conectada a um sistema de frenagem.

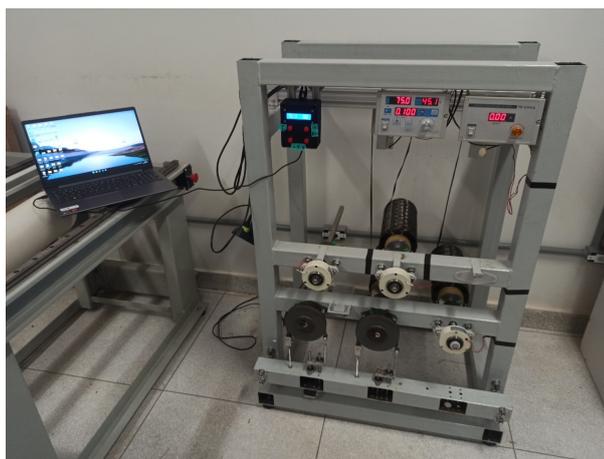


Figura 23 – Bancada de carretéis fabricada para o controle do tensionamento de filamentos de bobinagem. Componente 1 no diagrama da figura 25.

Esse arranjo permite controlar o tensionamento da fibra ajustando o torque aplicado ao eixo pelo freio, além de eliminar a necessidade de desmontar o eixo para a troca dos carretéis e dos sistemas de frenagem. Em sua configuração final os eixos foram conectados à três sistemas de frenagem eletromecânicos e três sistemas de frenagem puramente mecânicos.

O sistema de frenagem eletromecânico consiste de um freio de pó magnético de 24 V conectado a uma fonte controladora de corrente (Figura 24). Nesse tipo de mecanismo a corrente elétrica aplicada ao freio aumenta o torque de frenagem que é transmitido ao eixo. É possível então ajustar o tensionamento da fibra regulando a corrente elétrica de saída da fonte controladora. A bancada também conta com sistemas de monitoramento da tensão do filamento.

Como sensor tensão do filamento é empregado um dispositivo composto por três polias alinhadas, duas das quais fixadas a uma estrutura estacionária, enquanto a central é suportada por uma célula de carga. O filamento a ter a tensão aferida passa alternadamente entre as polias submetendo a célula de carga a um carregamento, como ilustrado pela Figura 25.

Nesse arranjo, a leitura da célula de carga corresponde à força resultante exercida pelo filamento na segunda polia e é igual a $2 \cdot T \cdot \cos \theta / 2$, com T sendo tensão do filamento

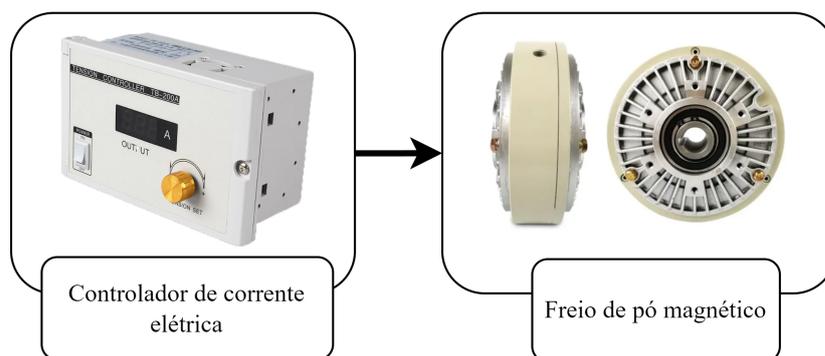


Figura 24 – Freio de pó magnético de 6 Nm e controlador de correntes empregados no sistema de tensionamento.

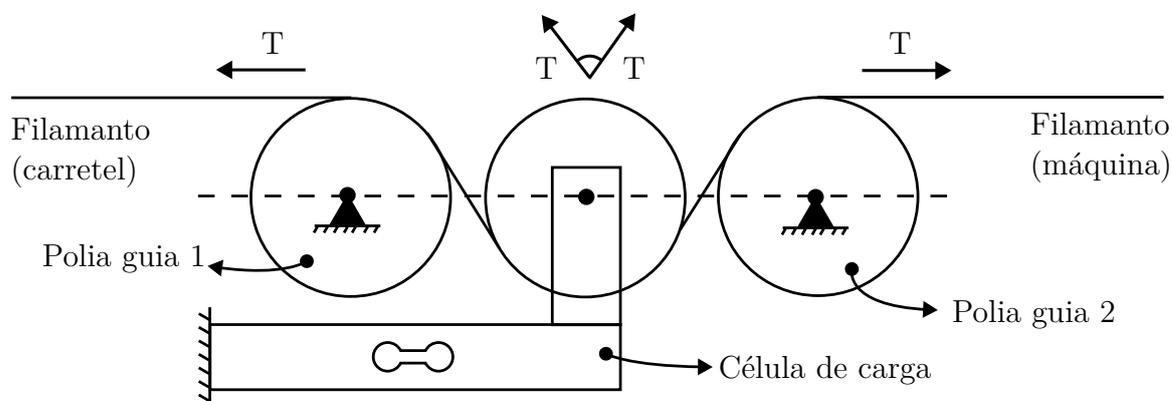


Figura 25 – Configuração do sensor de tensão do filamento.

e θ o ângulo de entrada e saída da fibra na polia da célula de carga. Como $2 \cdot \cos \theta/2$ é uma constante, T pode ser obtido diretamente por meio da leitura da célula de carga após calibrar o sistema com pesos conhecidos.

A medição da tensão do filamento é feita em dois pontos distintos do equipamento: um logo após a saída da fibra do carretel e o outro logo antes da fibra ser depositada sobre o mandril (figura 26). Esse arranjo permite observar o ganho de tensão no filamento causado pelo atrito presente na máquina, e as variações de tensão causadas pela trajetória de deposição de fibra.

O sistema eletrônico de aquisição de dados (figura 27) é composto por uma célula de carga conectada a um conversor analógico-digital HX711. A célula de carga mede a força aplicada e gera um sinal analógico correspondente. Esse sinal é então enviado ao HX711, que amplifica e converte o sinal analógico em um digital. Esses dados digitais são lidos por um Arduino Nano, um micro controlador de baixo custo, que processa as leituras e as converte para o formato desejado.

Essa leitura pode então ser aferida por meio de um monitor LCD conectado ao controlador, ou enviado em tempo real a um computador por comunicação serial USB.

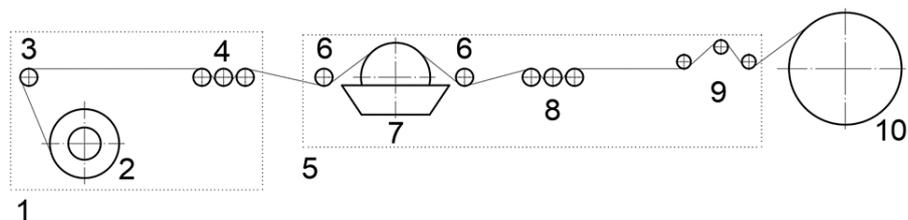


Figura 26 – Posicionamento dos sensores de tensão no equipamento de bobinagem filar: 1) Bancada de carretéis, 2) Carretel de fibras acoplado ao freio de pó magnético, 3) rolo, 4) sensor de tensão, 5) carro da máquina, 6) barras estáticas, 7) impregnador de resina de tipo tambor, 8) sensor de tensão, 9) olhal, 10) mandril.

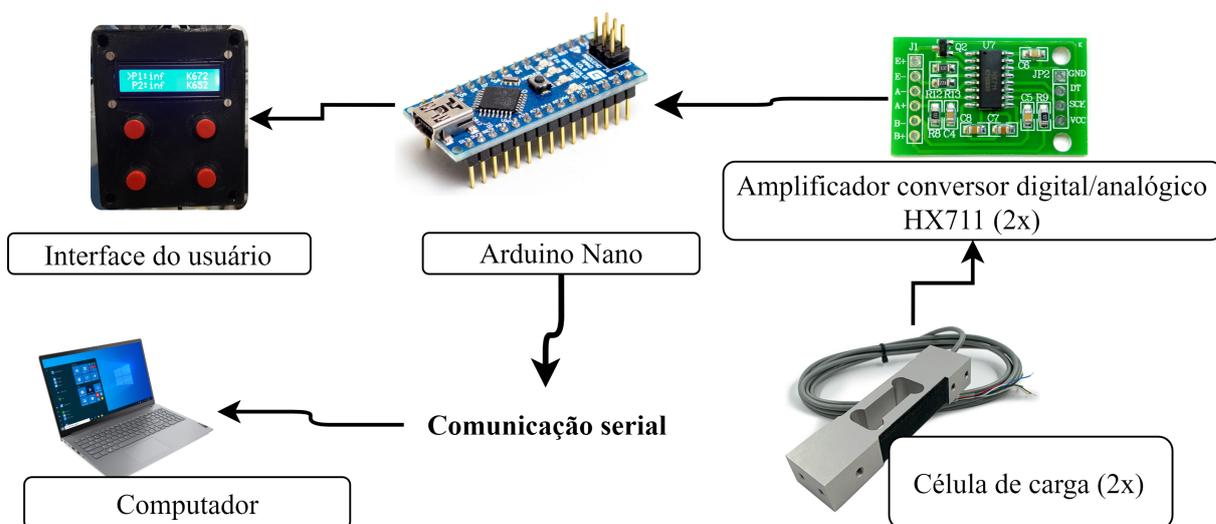


Figura 27 – Representação esquemática do sistema de medição de tensão.

Esse sistema fornece medições precisas do tensionamento do filamento por um custo reduzido. A bancada de carretéis que contem o primeiro ponto de medição de tensão e o sistema de regulagem do tensionamento do filamento (item 1 na figura 23) é apresentada na figura 25.

3.5 Testes hidrostáticos

Os testes hidrostáticos dos vasos de pressão consistem de aumentar a suas pressões internas utilizando água como fluido de trabalho e aferir as pressões e deformações resultantes. As subseções a seguir tratam dos equipamentos e métodos empregados nesse procedimento e do tratamento dos dados obtidos. Para aferir a pressão máxima suportada pelos vasos eleva-se a pressão interna até o momento da falha, que se dá por meio da queda de pressão com um vazamento.

3.5.1 Bancada de testes hidrostáticos de vasos de pressão

Com o intuito de medir experimentalmente a resposta de vasos de pressão a carregamentos uma bancada de testes hidrostáticos é empregada (figura 28). O sistema consiste de um vaso de pressão conectado a uma bomba hidráulica manual e um sensor de pressão hidrostática e sensores extensométricos conectados à superfície do vaso de pressão em seis posições, conforme o indicado na Figura 30 e na Tabela 6.

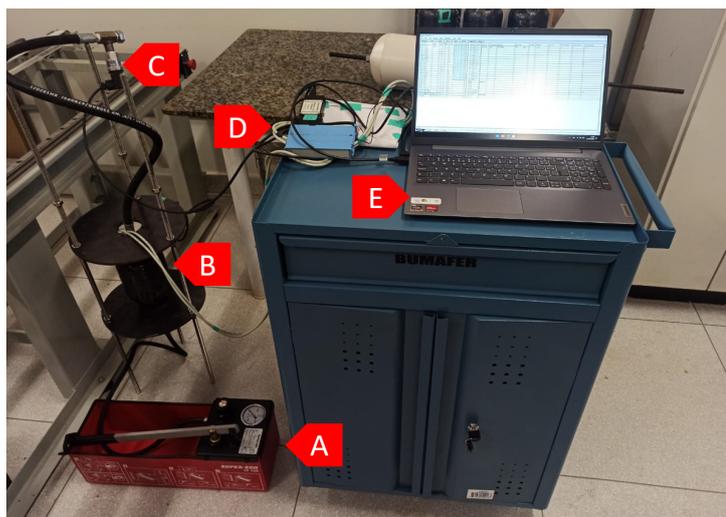


Figura 28 – Fotografia da bancada de testes hidrostáticos construída. A) Bomba hidrostática, B) Vaso de pressão, C) Transdutor de pressão, D) Sistema de aquisição de dados, E) Computador empregado na aquisição de dados.

Todos os circuitos foram montados em uma placa de conexões modelo *i512 Wiring Box* da empresa *InstruNet Data Acquisition* e conectados ao sistema de aquisição de dados modelo *i600* do mesmo fabricante. Esse controlador é por sua vez conectado a um computador e tem suas leituras gravadas pelo programa *Instrunet World Plus*. A figura 29 mostra a representação esquemática dos componentes da bancada de testes hidrostáticos e do sistema de aquisição de dados instalado.

Os sensores de pressão empregados na bancada são transdutores de pressão compactos da Danfoss de série MBS 1750 com sinais de saída de 4-20 mA proporcionais à pressão de 0 a 100 bar. As medições de deformações específicas são realizadas utilizando extensômetros elétricos, com os procedimentos e materiais empregados para tal sendo descritos na seção 3.6

Uma vez coletados os dados de pressão e deformação específicas em função do tempo, estes podem ser transformados para o formato mais útil de deformação específicas em função da pressão. Esse arranjo dos dados permite melhor entender a resposta da estrutura à um determinado carregamento, além de simplificar a comparação de resultados de análises estruturais com o observado experimentalmente.

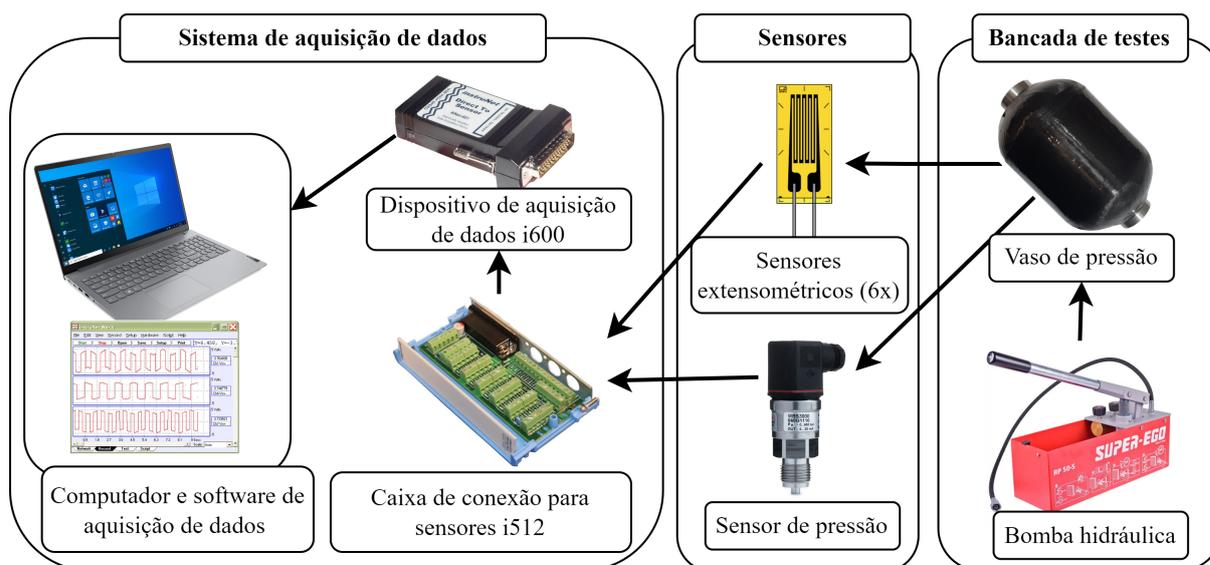


Figura 29 – Representação esquemática da bancada de testes hidrostáticos e seu sistema de aquisição de dados.

3.6 Medição experimental de deformações específicas

Para a aferição das deformações específicas durante os ensaios de tração são utilizados extensômetros elétricos unidirecionais de 350Ω da fabricante Excel Sensores, com 3,0 mm por 1,5 mm de dimensões de grelhas. As orientações e números de sensores aplicados são apresentas na tabela 5.

Tabela 5 – Direção e números de sensores extensométricos aplicados nas amostras dos ensaios de tração.

Tipo de Amostra (direção das fibras)	Número de amostras		Direção dos extensômetros
	Total	Com sensores	
Amostras 0°	15	5	x
Amostras 90°	15	4	x e y
Amostras 45°	15	5	x e y

O mesmo modelo de extensômetro elétricos é aplicados em seis pontos da superfície dos vasos de pressão, conforme o representado na figura 30. A posição e orientação desses sensores é detalhada na tabela 6.

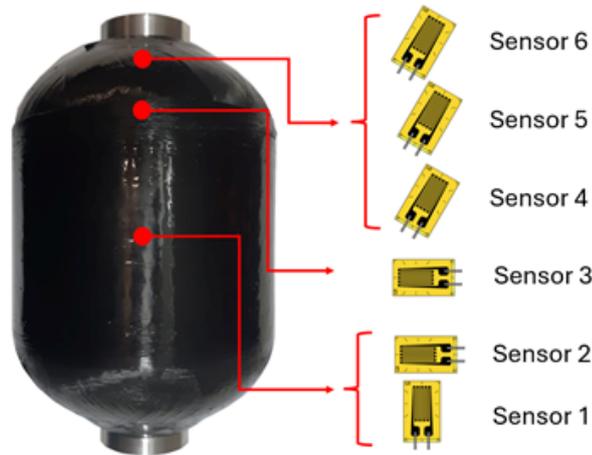


Figura 30 – Disposição dos sensores extensômetros nos vasos de pressão empregados no teste hidrostático.

Tabela 6 – Posicionamento e orientação dos sensores de deformação específica. Origem da coordenada x na flange dos vasos.

Sensor	Posição	Orientação
1	Centro do vaso ($x = 94,1 \pm 0,4 \% \text{ mm}$)	Perpendicular às fibras (0°)
2	Centro do vaso ($x = 87,0 \pm 1,7 \% \text{ mm}$)	Na direção das fibras (90°)
3	Fim da seção cilíndrica ($x = 45,8 \pm 4,3 \% \text{ mm}$)	Na direção das fibras (90°)
4	Domo ($x = 30,8 \pm 7,1 \% \text{ mm}$)	Na direção das fibras (α)
5	Domo ($x = 17,75 \pm 7,4 \% \text{ mm}$)	Na direção das fibras (α)
6	Domo ($x = 6,73 \pm 3,7 \% \text{ mm}$)	Na direção das fibras (α)

Devido ao fato que materiais compósitos poliméricos são maus condutores de calor, pode haver o aumento de temperatura nos sensores podendo causar erros em suas leituras (HBK, c2024). Em função disso, são empregados extensômetros de 350Ω excitados por uma tensão elétrica de $3,3 \text{ V}$, em uma combinação de relativa baixa tensão e elevada resistência elétrica, com o intuito de minimizar a emissão de calor do transdutor.

Além disso, um sensor inativo é fixado à um pedaço isolado de material compósito de fibra de carbono/epóxi e adicionado ao circuito como forma de compensação térmica, conforme o explicado na seção 2.5. Como as propriedades térmicas de ambos os sensores são as mesmas, as medições são compensadas para variações de temperatura durante a medição. A figura 31 apresenta como esse circuito é montado na caixa de conexões da Instrunet.

O processo de aplicação desses sensores em fibra de carbono começa com a remoção

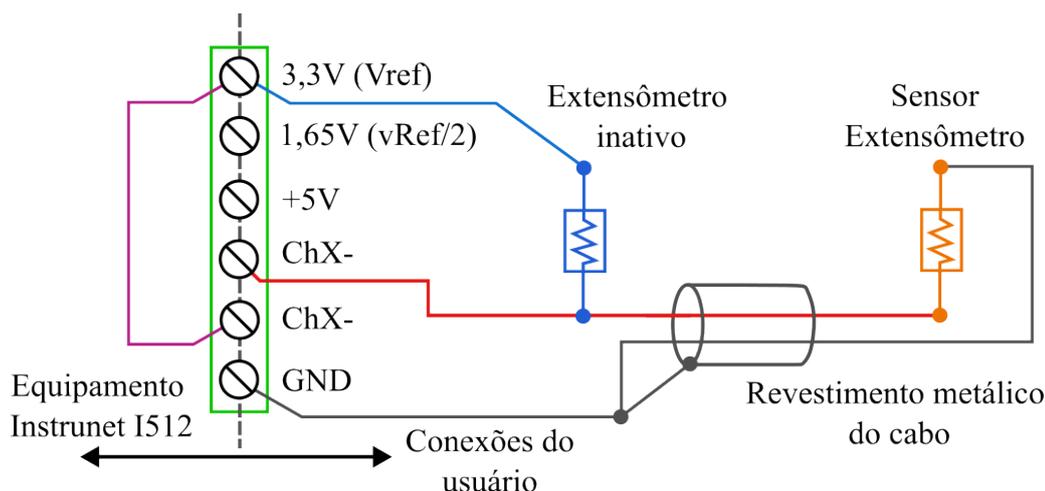


Figura 31 – Conexão elétrica dos sensores extensômetros com compensação de temperatura. Fonte: (INSTRUNET, 2023) modificado.

de óleos da superfície usando pedaços de algodão embebidos de álcool isopropílico. Em seguida, a superfície é lixada com lixas de papel de grão 320 e, novamente, limpa com álcool isopropílico até que os pedaços de algodão usados não apresentem mais sujeiras após o contato com a superfície. Um solvente leve, no caso do álcool isopropílico, é escolhido para a limpeza da superfície no intuito de evitar ataques químicos ao polímero do material compósito (Omega Engineering, 1994).

O sensor é então posicionado e alinhado visualmente sob uma lupa com as fibras do laminado. Em seguida uma fita adesiva de Kapton é usada para cobrir o extensômetro e fixar um de seus lados à superfície do componente a ser estudado. O lado livre do extensômetro é levantado com o auxílio de uma pinça e da fita, expondo a superfície abaixo do sensor (figura 32). O adesivo à base de cianoacrilato é aplicado nesta superfície exposta. Em seguida, o sensor é colocado ao empurrar a fita do lado fixado para o lado livre.

Posteriormente, o sensor é pressionado com um polegar por cerca de cinco minutos durante a fase de cura inicial do adesivo para evitar a entrada de bolhas de ar entre o extensômetro e a superfície do material. Após a secagem completa do adesivo, a fita Kapton é retirada. A área é novamente limpa com álcool isopropílico e uma camada de silicone transparente é aplicada para protegê-la contra umidade e possíveis choques mecânicos. Por fim, conectores elétricos são fixados ao sensor e os terminais são soldados aos cabos que o conectarão ao sistema de aquisição.

O ponto zero de leitura de cada sensor é calibrados após o preparo de cada experimento no qual deformações específicas são aferidas enquanto o fator de medida S_g é informado individualmente para cada sensor pelo fornecedor. Procedimentos para a determinação de erros instrumentais (discutidos ao fim da seção 4.3.2 devem ser implementados em estudos futuros).

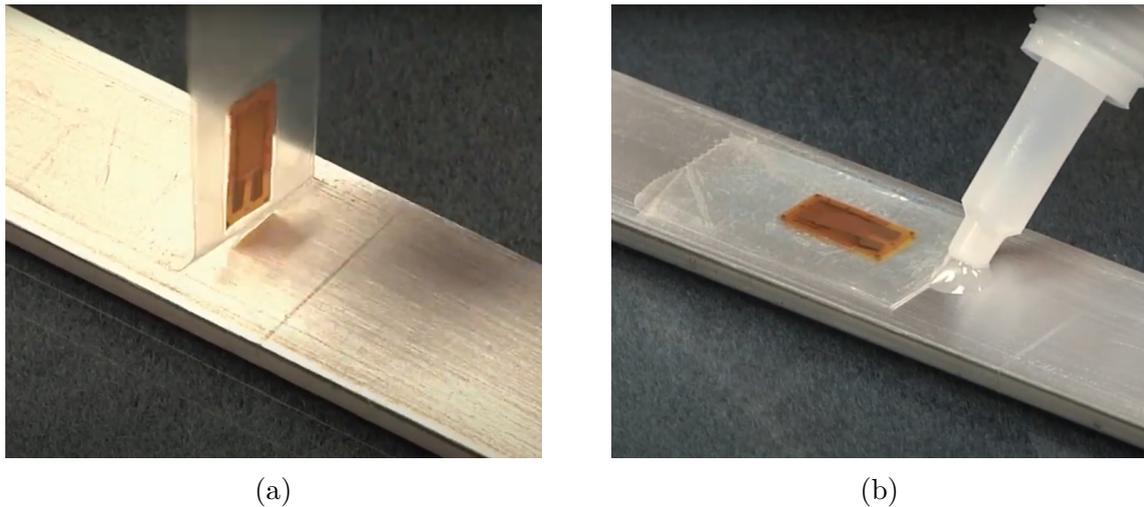


Figura 32 – Etapas do processo de aplicação do extensômetros a) Sensor sendo posicionado e erguido com o auxílio de uma fita; b) Aplicação do adesivo. Fonte: (VPG Micro-Measurements, 2017).

3.7 Cálculos analíticos das deformações específicas no vaso de pressão

As deformações específicas são calculadas analiticamente por meio da teoria dos laminados apresentada na seção 2.4.3. É considerado um laminado simétrico $[\pm\alpha_3, 90^\circ]_s$, com espessuras de 0.165 mm e 0,47 mm para as camadas orientadas em α e 90° respectivamente. Essas espessuras são obtidas de medições do vaso seccionado discutido na seção 3.3 e são apresentadas na figura 39.

As propriedades mecânicas atribuídas para essas lâminas são as aferidas experimentalmente, por meio dos ensaios de tração apresentados na seção 4.2. O ângulo de orientação das lâminas α é calculado utilizando a equação 3.1, considerando $r_{pf} = 24$ mm e $r = 60$ mm, de modo que:

$$\alpha(r) = \sin^{-1} \left(\frac{R_{pf}}{r} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{24}{60} \right) \equiv 23,58^\circ. \quad (3.2)$$

Uma vez definidas as propriedades mecânicas das lâminas, suas espessuras e orientações é possível determinar a matriz constitutiva do laminado $[ABBD]$ (eq. 2.38) por meio da equação 2.39, que permite obter a rigidez da estrutura por meio da matriz inversa $[ABBD]^{-1}$. Os esforços são calculados considerando a teoria dos vasos de pressão de paredes finas apresentadas na seção 2.3. Para essas estimativas é considerado que a porção cilíndrica do vasos estudado possui um raio de 58 mm (em função da espessura do mandril). Assim, por meio da equação 2.8, obtém-se os esforços do estado plano de tensões na região central do vaso.

Por fim as deformações específicas podem ser calculadas pela equação 2.42. A figura 33 apresenta um fluxograma dos cálculos realizados para estimar as deformações por meios

analíticos. Esses resultados são apresentados e comparados com as deformações aferidas experimentalmente na seção de resultados. Todos os cálculos estão implementados na linguagem de programação Python e são apresentados na integra no apêndice A, Enquanto o apêndice B apresenta os resultados dos cálculos conforme retornados pelo programa. Já o apêndice C e D contém um caso de validação do código apresentado baseado em um exemplo do livro do Barbero (2018).

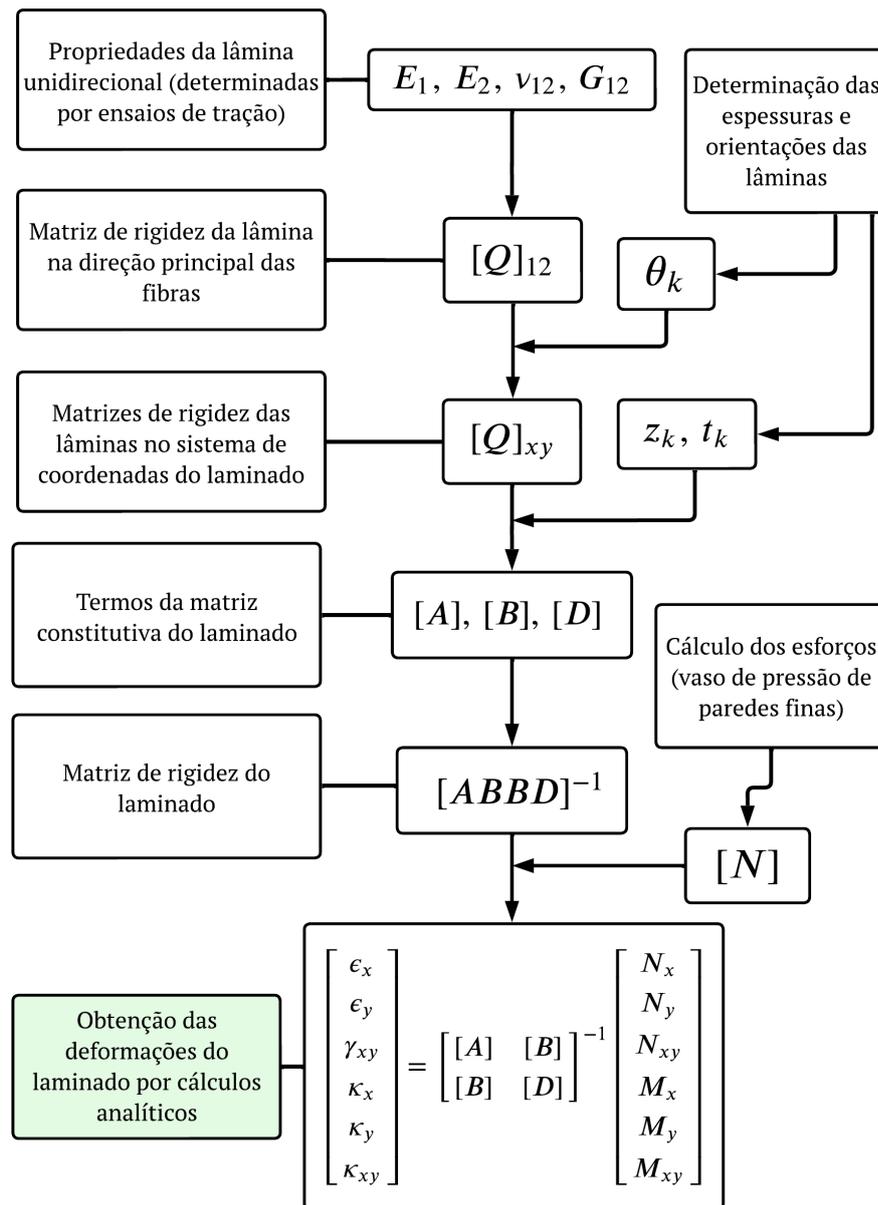


Figura 33 – Fluxograma do cálculo analítico das deformações específicas

4 Resultados e discussão

Os resultados obtidos são apresentados em quatro subseções principais. A primeira trata do comportamento do sistema de tensionamento, relatando seu funcionamento e exemplificando a aplicação com as tensões de bobinagem utilizadas na fabricação dos vasos de pressão. Em seguida, é abordada a caracterização dos corpos, discutindo-se as propriedades mecânicas aferidas por meio dos ensaios de tração uniaxial das amostras planas.

Na sequência são expostos os resultados pertinentes aos vasos de pressão, apresentando as dimensões aferidas após a fabricação, as pressões máximas suportadas antes da falha e as deformações medidas durante os testes hidrostáticos. Por fim, as deformações observadas são comparadas com estimativas analíticas baseadas nas propriedades das amostras planas, e hipóteses são levantadas para explicar possíveis causas das discrepâncias identificadas.

4.1 Comportamento do sistema de tensionamento

Ao avaliar o tensionamento do carretel para diferentes correntes elétricas para uma velocidade de bobinagem constante é possível obter os tensionamento do filamento para diferentes ajustes de corrente elétrica do controlador do freio de pó magnético. Esses dados são apresentados na figura 34.

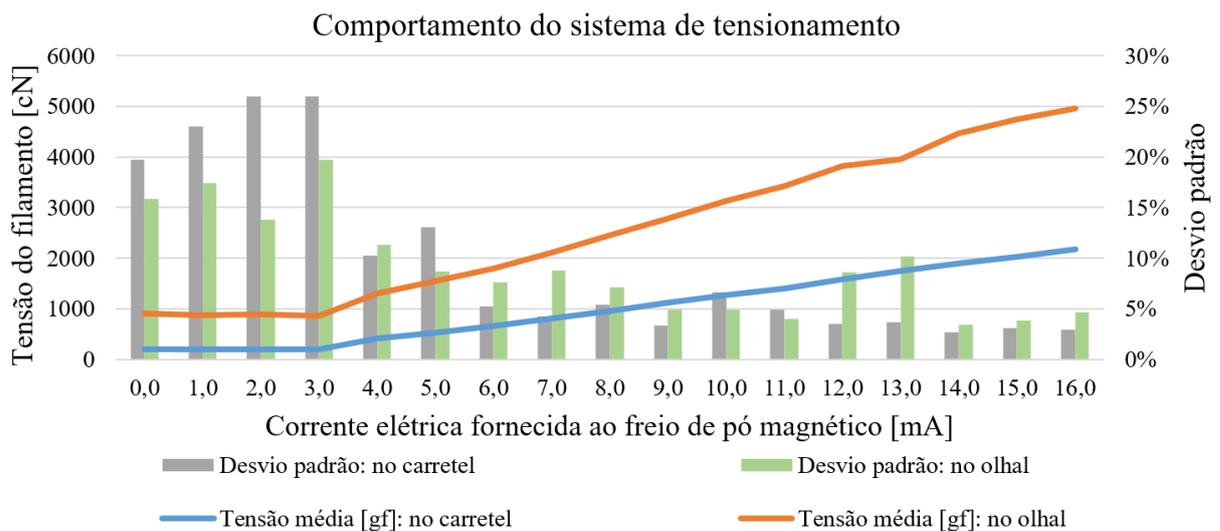


Figura 34 – Tensionamento do filamento em função da corrente elétrica fornecida ao freio de pó magnético para bobinagens a velocidades constantes

Observa-se que o sistema de tensionamento apresenta uma resposta quase linear

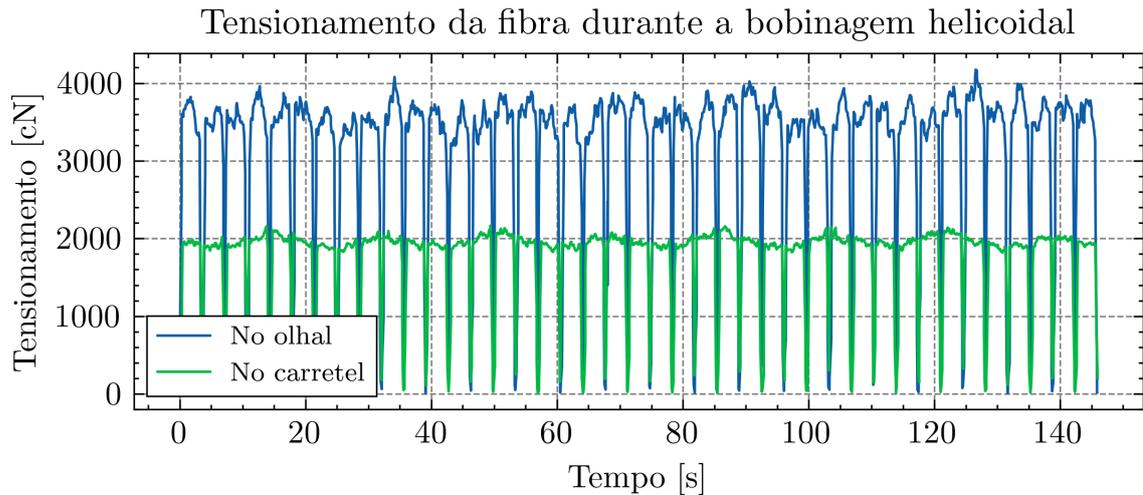


Figura 35 – Tensionamento da fibra durante a bobinagem de uma camada helicoidal do vaso de pressão.

ao aumento de sua corrente elétrica, com a tensão do filamento no carretel sofrendo incrementos de cerca de 150 cN para cada ajuste de 1 mA na corrente aplicada sobre o freio. Nota-se, porém, que esse efeito só foi observado para tensões superiores a 4 mA.

Além disso, o desvio padrão do tensionamento é, em média, de 50 cN no carretel e 183 cN no olhal. Em função disso o desvio padrão percentual decai para valores mais elevados de tensionamento como é possível observar na figura 34. Essas informações podem então ser usadas para escolher e controlar a tensão de bobinagem para outros processos.

A Figura 35 permite observar que o sistema de tensionamento é capaz de manter o carregamento do filamento estável em valores médios de 3143 cN e 1733 cN no olhal e carretel respectivamente. Apesar disso, ocorrem quedas acentuadas da tensão no momento no qual a máquina de bobinagem deposita as fibras na região próxima das aberturas polares do vaso de pressão. Esse comportamento é associado à variação de velocidade de deposição das fibras e pode ser minimizado implementando sistemas de tensionamento mais sofisticados ou adaptando a trajetória de bobinagem.

Os passos tomados para minimizar essas oscilações, por meio do ajuste da trajetória e velocidade do olhal, são apresentados no artigo de Andrianov *et al.* (2024). As tensões médias observadas ao longo do processo de bobinagem dos vasos de pressão fabricados para os testes hidrostáticos são apresentadas na Tabela 7.

4.2 Caracterização dos corpos de prova planos

A tabela 8 apresenta as rigidezes aferidas nas amostras submetidas aos testes de tração que tiveram sensores extensométricos aplicados.

Observa-se que a maior variação associada ao desvio padrão da medição da pro-

Tabela 7 – Tensões médias do filamento durante a bobinagem dos vasos de pressão.

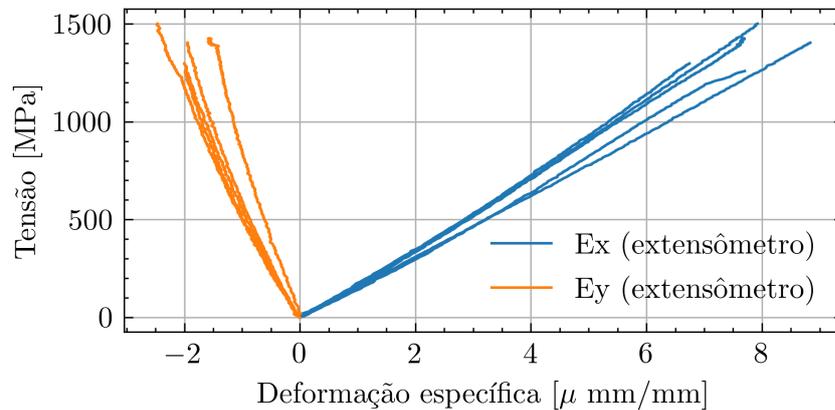
Vaso de pressão	Tensão média de bobinagem [cN]	
	No carretel	No olhal
Vaso 2	1733	3143
Vaso 3	1838	3520
Vaso 4	1588	3006
Vaso 5	1728	3050

Tabela 8 – Propriedades mecânicas aferidas para as lâminas unidirecionais

Propriedade	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	ν_{12}	ν_{21}	G12 [GPa]
Média	146	5,5	0,28	0,01	5,1
Desvio Padrão	16 (11%)	0,9 (16%)	0,05 (16%)	-	0,5 (9%)

priedade de rigidez a tração transversal se deve a elevada fragilidade das amostras de $[90^\circ]$. Como consequência, a determinação dessas propriedades é dependente de medições realizadas a baixas deformações e sob maior influência de fatores como pré-tensionamento e alinhamento das garras da máquina de ensaios.

As curvas de tensão e deformação registradas para as amostras unidirecionais com ângulo de fibras de 0° (figura 36) permite observar que as deformações em função do carregamento são quase lineares até o momento da falha. Os principais modos de falha observados nos ensaios são o SGM e SGR (figura 1). Amostras de 90° , por sua vez falharam pelo modo LGM.

Figura 36 – Curvas de tensão e deformação medidas para as amostras de 0° .

Já as curvas de tensão e deformação para as amostras com as fibras em $[\pm 45^\circ]$ apresentam uma região de comportamento elástico até deformações específicas de cerca de 0,5% seguida de uma longa área de deformação plástica (figura 37).

Por meio de análises de micrografia das amostras planas mede-se a razão volumétrica de fibras como sendo de 54,4%. A figura 38 apresenta micrografias representativas da microestrutura obtidas de amostras extraídas das placas utilizadas para fabricar os corpos de prova dos ensaios de tração. Pimentel *et al.* (2024) observa que o método de fabrica-

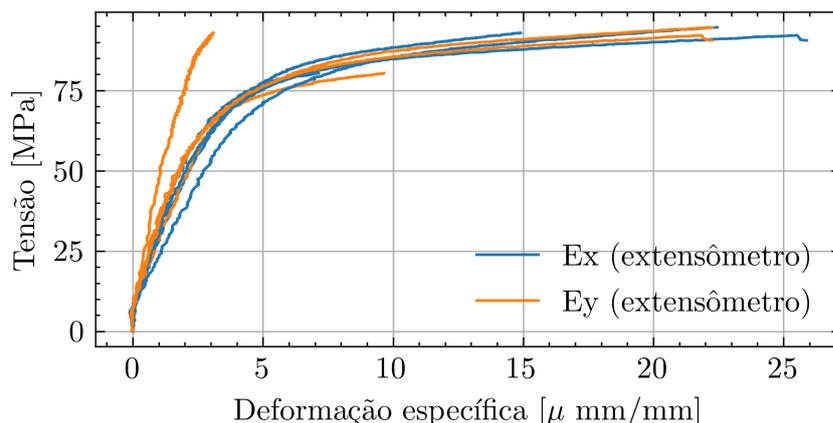


Figura 37 – Curvas de tensão e deformação das amostras de $\pm 45^\circ$.

ção aqui empregado resulta em amostras de maior qualidade quando comparadas com as obtidas por técnicas de fabricação previamente utilizadas no Laboratório de Estruturas Aeroespaciais da UnB, como a bobinagem sobre mandris planos.

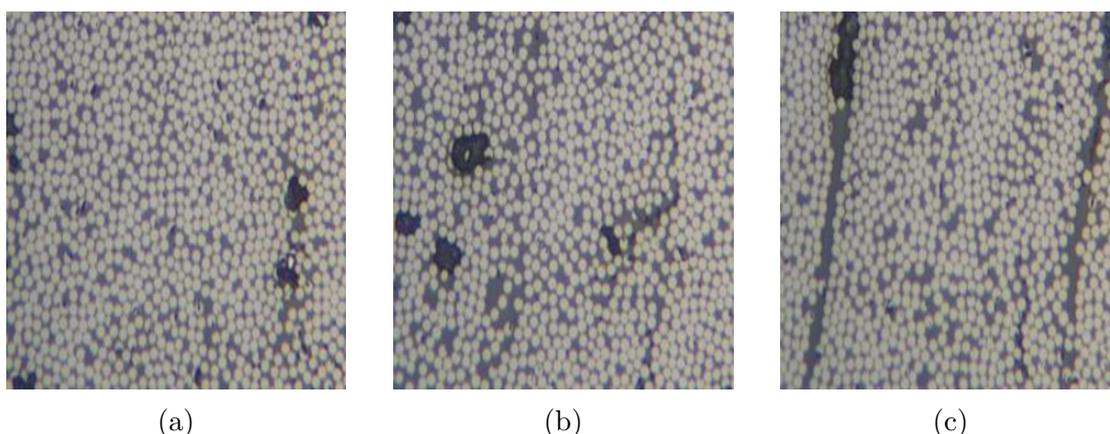


Figura 38 – Micrografias ampliadas em x400 do laminado das amostras de tração. a) Concentração relativamente alta de fibras com pequenos vazios a direita. b) Poros e maior concentração de resina na região esquerda da imagem. c) Limite entre camadas visível. Fonte: (PIMENTEL et al., 2024).

4.3 Caracterização dos vasos de pressão

As espessuras aferidas para o vaso de pressão cortado são apresentadas na figura 39. É possível observar que antes da transição do domo para a seção cilíndrica, as camadas *angle-ply* apresentam uma espessura de 1,01 mm, enquanto a camada de reforços circunferenciais adiciona mais 0,46 mm de espessura ao laminado. Essas observações são usadas para determinar as espessuras das lâminas nos cálculos analíticos. A figura 9 apresenta a massa dos vasos de pressão fabricados

A tabela 9 apresenta as massas dos vasos de pressão fabricados. Nela é possível observar que o processo de fabricação empregado é capaz de produzir componentes com

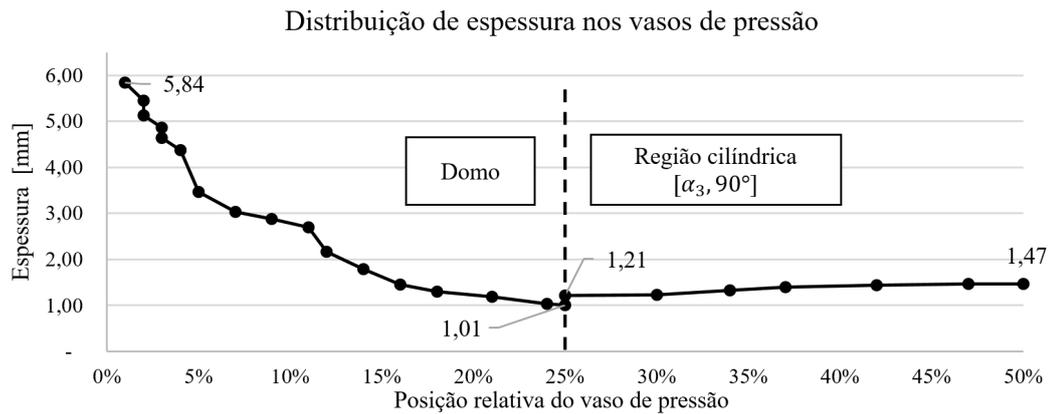


Figura 39 – Distribuição de espessura ao longo do comprimento do vaso de pressão. Dados de espessura obtidos de (de Knecht, 2024).

baixa variação de massa, com um desvio padrão para a massa do envelope compósito dos três vasos sendo de somente 1,6 %. Esse resultado indica que o conteúdo de resina e, portanto, a razão volumétrica das fibras entre os vasos é similar.

Tabela 9 – Massas dos vasos de pressão.

Massa considerada	Massa [g]			Média	Desvio padrão
	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5		
Total	431	428	433	431	0,5 %
Sem o mandril	244	241	246	244	0,8 %
Sem o mandril/flange	126	123	128	126	1,6 %

4.3.1 Testes hidrostáticos

A figura 40 apresenta a resposta dos vasos de pressão aos carregamentos aplicados durante os testes hidrostáticos. Verifica-se que as deformações se deram de modo quase linear em função da pressão aplicada com exceção das curvas pressão deformação observadas no ponto 4 que apresenta um aumento gradual da inclinação junto ao aumento da pressão.

Ao analisar a diferença de valores das deformações em função da pressão utilizando a pressão de 2 MPa como ponto de referência, como apresentado na tabela 10, observa-se que, com exceção das deformações medidas pelos sensores aplicados na posição cinco do vaso de pressão, as curvas de pressão e deformação entre os vasos apresentam um desvio padrão igual ou inferior a 17 %.

A diferença entre leituras é mais elevada para os sensores aplicados na posição cinco. Esse fenômeno, provavelmente, se deve ao elevado gradiente de deformação observado na transição entre o domo e a porção cilíndrica do vaso de pressão (PARK et al., 2002), tornando a leitura mais sensível ao posicionamento do extensômetro na superfície do vaso de pressão. Somam-se também como fatores que contribuem com essa variação

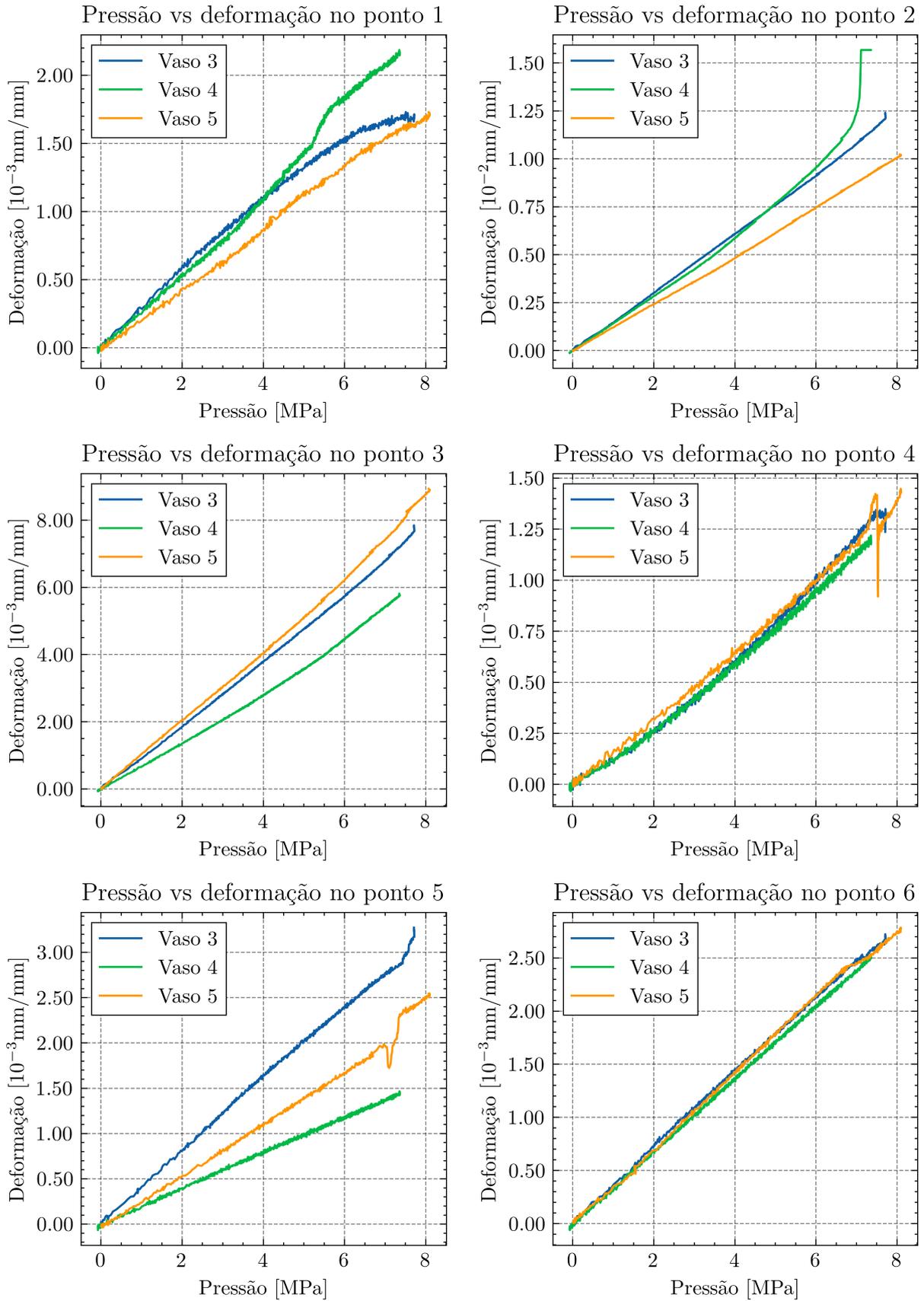


Figura 40 – Curvas de pressão deformação obtidas nos testes hidrostáticos.

Tabela 10 – Deformação específica a 2 MPa dos vasos de pressão submetidos aos testes hidrostáticos.

Local da medição	Deformação específica a 2 MPa				Desvio padrão
	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5	Média	
Sensor 1	$5,87 \cdot 10^{-4}$	$5,31 \cdot 10^{-4}$	$4,30 \cdot 10^{-4}$	$5,16 \cdot 10^{-4}$	13%
Sensor 2	$3,01 \cdot 10^{-3}$	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$2,42 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	9%
Sensor 3	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$2,05 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	17%
Sensor 4	$2,64 \cdot 10^{-4}$	$2,62 \cdot 10^{-4}$	$3,21 \cdot 10^{-4}$	$2,82 \cdot 10^{-4}$	10%
Sensor 5	$8,13 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-4}$	$5,27 \cdot 10^{-4}$	$5,77 \cdot 10^{-4}$	30%
Sensor 6	$7,32 \cdot 10^{-4}$	$6,82 \cdot 10^{-4}$	$6,87 \cdot 10^{-4}$	$7,00 \cdot 10^{-4}$	3%

entre medições os erros experimentais associados à incerteza dos sensores (a ser discutido na seção 4.3.2), além do fato que a distribuição de tensões não é perfeitamente uniforme ao longo da superfície do vaso de pressão (ALAM et al., 2020).

Nos testes destrutivos, verifica-se que os vasos de pressão fabricados são capazes de suportar em média 7,73 MPa de pressão, momento no qual se observa vazamentos de água na região de transição da seção cilíndrica para o domo. Observa-se também, que todos os vasos falharam em um intervalo de 0,4 MPa para mais ou para menos da tensão média (5% do valor médio) com um desvio padrão de 3,9%, como é apresentado na tabela 11. Esse resultado indica que os processos de fabricação empregados são capazes de produzir estruturas com desempenhos mecânicos consistentes.

A baixa variação das pressões nos momentos de falha, quando comparada com as variações entre as medições de deformações específicas, pode estar vinculada a fatores como: menores erros experimentais associados à esse resultado (sendo o resultado apenas da medição da pressão); e o fato de que esse parâmetro é fortemente associado ao volume de resina e qualidade do forro (no caso o mandril plástico) que não variam muito entre os vasos).

Tabela 11 – Pressões no momento da falha para os três vasos de pressão submetidos a testes destrutivos.

	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5	Média	Desvio padrão
Pressão no momento da falha [MPa]	7,72	7,36	8,10	7,73	3.9%

4.3.2 Resultados dos cálculos analíticos

As deformações específicas na direção longitudinal e transversal calculadas analiticamente são apresentadas nas tabelas 12 e 13. Esses resultados são comparadas com o observado nos testes hidrostáticos na tabela 14. As deformações específicas longitudinais e transversais calculadas para o centro do vaso de pressão equivalem as medições dos sensores 1 e 2 respectivamente.

As diferenças percentuais apresentadas nessas tabelas são calculados por meio da equação

$$\eta = \left| \frac{V_{exp} - V_{calc}}{V_{exp}} \right|, \quad (4.1)$$

na qual η é a diferença relativa entre os valores, V_{exp} o valor aferido experimentalmente e V_{calc} é o valor calculado analiticamente.

Tabela 12 – Deformação específica calculada para a direção longitudinal (x)

Pressão em MPa	Deformação específica		Diferença percentual
	Resultado analítico	Média experimental	
2,0	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$5,16 \cdot 10^{-4}$	36 %
4,0	$6,65 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	35 %
6,0	$9,98 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	36 %

Tabela 13 – Deformação específica calculada para a direção transversal (y)

Pressão em MPa	Deformação específica		Diferença percentual
	Resultado analítico	Média experimental	
2,0	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	50 %
4,0	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$5,59 \cdot 10^{-3}$	51 %
6,0	$4,15 \cdot 10^{-3}$	$8,70 \cdot 10^{-3}$	52 %

A diferença relativa entre as deformações específicas aferidas experimentalmente e os cálculos analíticos feitos considerando as propriedades das lâminas unidirecionais obtidas por ensaios de tração foi de de 35 % para as deformações na direção longitudinal do vaso de pressão (x) e de 51 % para as deformações na direção transversal (y) da superfície do vaso. A menor discrepância entre as deformações específicas analíticas e experimentais é observada no vaso 5, como sendo 34 % e 43 % de diferença percentual nas direções x e y respectivamente (tabela 14).

As diferenças percentuais observadas entre os resultados analíticos as deformações específicas aferidas nos três COPV quando submetidos a pressão de 2 MPa são apresentadas na tabela 14. Observou-se que os cálculos analíticos apresentaram uma tendência à subestimar as deformações específicas para todas as pressões e direções avaliadas.

Tabela 14 – Diferença percentual entre as deformações específicas obtidas pelos cálculos analíticos e o aferido experimentalmente para os três vasos de pressão a 2 MPa.

Direção	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5	Média
Longitudinal (x)	43 %	37 %	23 %	34 %
Transversal (y)	54 %	51 %	43 %	49 %

Diversas variáveis podem estar associadas as elevadas diferenças de valores observadas entre os resultados analíticos e experimentais. Uma possibilidade é a ocorrência de

diferenças nas propriedades físicas e mecânicas entre os laminados utilizados nos ensaios de tração e no envelope compósito do vaso de pressão, com a variação na razão volumétrica de fibras entre esses espécimes possivelmente influenciando de forma significativa os resultados. Essa hipótese pode ser explorada em estudos futuros por meio da investigação da distribuição da razão volumétrica das fibras no laminado do vaso de pressão para quantificar o quanto esse parâmetro diverge do observado nas amostras planas.

Além disso, o padrão de deposição das fibras sobre o mandril pode influenciar significativamente as propriedades do material. É demonstrado que diferentes padrões de trama impactam as características mecânicas de materiais compósitos. Por exemplo, laminados fabricados com reforços fibrosos têxteis apresentam propriedades mecânicas distintas quando comparados a materiais equivalentes produzidos com lâminas unidirecionais (NAIK; GANESH, 1992; AKKERMAN, 2005). Esse efeito é atribuído à forma como a organização das fibras afeta suas interações e alinhamentos na microestrutura do material e é especialmente perceptível em laminados com poucas camadas (DANIEL, 2007, pg. 193).

Desse modo, erros associados à aproximação da camada *angle-ply* bobinada, que possui reforços fibrosos entrelaçados, como sendo equivalente à um laminado $[\pm\alpha]$, como descrito pela teoria clássica dos laminados, podem justificar parte da discrepância entre os resultados. Essa hipótese pode ser averiguada em estudos subsequentes obtendo as propriedades de engenharia por meio de ensaios de tração de amostras planas *angle-ply* e comparando esses resultados com o obtido das amostras fabricadas por camadas unidirecionais.

Além disso permanece necessária a determinação de propriedades físicas adicionais dos vasos de pressão, em particular a razão volumétrica das fibras por meio de análises de micrografias para julgar a representatividade das amostras unidirecionais.

Em seu trabalho, Gabriel G. B. de Knecht (2024) avalia por meio do método dos elementos finitos as deformações dos vasos de pressão. As dimensões e propriedades mecânicas empregadas nessas simulações são as mesmas consideradas nesse trabalho. Os resultados apresentados em seu relatório permitem observar que as análises numéricas apresentaram a mesma tendência dos cálculos analíticos de subestimar as deformações específicas sofridas pelos vasos de pressão.

Um comparativo entre as deformações específicas obtidas empiricamente, analiticamente e por meio dessas simulações numéricas são apresentadas nas tabelas 15 e 16. Sendo constatada uma menor discrepância (cerca de 19%) entre o resultado analítico e as simulações do que o observado entre os resultados analíticos e os empíricos para as deformações específicas na direção transversal do vaso (tabela 16).

Esse padrão não se repetiu na direção longitudinal (tabela 15), onde são observadas

diferenças percentuais de 64%. Esses resultados são compatíveis com a hipótese de que as rigidezes do compósito nos vasos de pressão são inferiores ao observado nos ensaios de tração já que as simulações também previram deformações inferiores.

Essas simulações não consideram a influência da área das flanges nas cargas da estrutura, uma vez que só foi modelado o envelope compósito. Em função disso as forças na direção longitudinal da seção cilíndrica são menores do que o que se observa no caso concreto, ajudando a explicar as maiores diferenças de deformações nessa direção.

A Erika K. Tomida (2023) chega à mesma conclusão ao avaliar os erros de uma simulação similar em seu trabalho. Esse problema pode ser corrigido aplicando os esforços desprezados na aresta da abertura polar como uma condição de contorno adicional durante o processo de modelagem numérica.

Tabela 15 – Deformações na direção longitudinal (x) comparadas com os resultados de simulação numérica. Fonte dos resultados da simulação: (de Knecht, 2024).

Pressão [MPa]	Deformação específica			Diferença percentual [Sim. vs ana.]
	Simulação	Analítico	Experimental	
2,0	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$5,16 \cdot 10^{-4}$	64 %
4,0	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$6,65 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	64 %
6,0	$3,55 \cdot 10^{-4}$	$9,98 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	64 %

Tabela 16 – Deformações na direção transversal (y) comparadas com os resultados de simulação numérica. Fonte dos resultados da simulação: (de Knecht, 2024).

Pressão [MPa]	Deformação específica			Diferença percentual [Sim. vs Ana.]
	Simulação	Analítico	Experimental	
2,0	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	19 %
4,0	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$5,59 \cdot 10^{-3}$	17 %
6,0	$3,56 \cdot 10^{-3}$	$4,15 \cdot 10^{-3}$	$8,70 \cdot 10^{-3}$	17 %

Outra possibilidade é a participação de efeitos não considerados pela abordagem analítica empregada. Um desses fenômenos é a transferência de momentos fletores ou cortantes, presentes nos domos, para a porção cilíndrica da estrutura. Para vasos suficientemente longos esses esforços podem ser desprezados, porém medições adicionais são necessários para verificar a validade dessa consideração no caso estudado. Tal fenômeno é presente nos resultados de Knecht (2024) e Park *et al.* (2002), onde é possível observar que as deformações não são constantes ao longo da seção cilíndrica como a teoria dos vasos de pressão de parede fina indicaria.

Uma abordagem para testar essa hipótese é aferir as deformações em múltiplos pontos ao longo da seção cilíndrica de um vaso de pressão longo. Assim, é possível verificar a influência da proximidade dos domos na distribuição das deformações. Alternativamente, o estudo pode ser repetido em um vaso de pressão esférico para simplificar o estado de tensões no material e reduzir incertezas durante a análise dos resultados.

Além desses fatores, a natureza manual dos procedimentos realizados, desde a fabricação dos espécimes e vasos até o alinhamento e posicionamento dos sensores de deformação, contribui para a introdução de erros experimentais que se somam as incertezas associadas à toda medição empírica.

Assim, o entendimento completo da influência de diferentes fenômeno na variação entre os resultados, seja nas diferenças entre as deformações específicas entre os vasos de pressão ou na diferença entre os resultados analíticos e experimentais é dependente da análise de propagação de incertezas. Para tal, permanece necessário quantificar os erros experimentais associados:

- à medição de deformações específicas com os sensores extensométricos, que inclui tanto os erros associados a leitura do sensor quanto ao seu posicionamento e alinhamento durante a fixação nos vasos de pressão e amostras dos ensaios de tração;
- à medição de pressão, associada ao transdutor de pressão; e
- ao cálculo das propriedades das lâminas unidirecionais, que inclui tanto os erros associados à fabricação das amostras, como a variação de dimensões e alinhamento das fibras quanto os erros associados aos instrumentos e procedimentos dos ensaios de tração, como o alinhamento das garras, incertezas associadas a máquina de ensaios de tração, etc.

Para estudos futuros, é relevante priorizar a definição de procedimentos adicionais de calibração dos sensores empregado. Isso permitirá a análise das incertezas associadas às medições do equipamento empregado no Laboratório de Estruturas Aeroespaciais. Tais métodos devem não só aumentar o nível de confiança nos resultados experimentais, mas também facilitar a identificação de possíveis erros sistemáticos nos processos a serem empregados.

5 Conclusões

O sistema de controle e monitoramento proposto é bem sucedido em permitir o ajuste e o registro da tensão do filamento durante o processo de bobinagem, sendo eficaz em regular e manter estáveis os valores médios de tensão do filamento. No entanto, observam-se quedas acentuadas de tensionamento durante a bobinagem das aberturas polares dos vasos de pressão. Para minimizar essas oscilações, pode-se considerar a implementação de sistemas de tensionamento mais sofisticados ou ajustes na trajetória de bobinagem.

Os resultados dos testes hidrostáticos destrutivos indicam que os vasos de pressão fabricados pelos métodos propostos apresentaram uma repetibilidade aceitável, suportando em média 7,73 MPa antes de falharem, com um desvio padrão de 3,9% entre os resultados. Este desempenho sugere que o procedimento de fabricação empregado é capaz de produzir peças com resistências mecânicas consistentes.

Já a variação entre as medições de deformações específicas entre os vasos se mostraram dependentes dos pontos de aferição, com o menor desvio padrão tendo sido observado entre os sensores colocados próximos a flange dos tanques com 3% e a maior de 30% no centro do domo. De modo semelhante, observam-se baixas variações de deformações específicas entre os vasos, com a maior parte dos pontos observados apresentando não mais que 17% de desvio padrão nas leituras das deformações específicas. A exceção desse padrão ocorre na região de transição da seção cilíndrica para os domos onde foi observada variações mais elevadas entre as leituras.

As propriedades físicas e mecânicas das amostras unidirecionais são apresentadas. Os cálculos analíticos baseados nesses valores, considerando a teoria de vasos de pressão de paredes finas e a teoria clássica dos laminados, estimam deformações específicas significativamente inferiores às observadas experimentalmente. Com 36% de diferença entre as deformações estimadas analiticamente e as aferidas pelos sensores extensométricos na direção longitudinal da superfície do COPV a pressões de 2 MPa. Na direção transversal essa diferença foi de cerca de 50%.

Essas constatações sugerem uma tendência ao superdimensionamento das propriedades mecânicas nos ensaios de tração quando comparadas as propriedades dos COPV, porém estudos adicionais são necessários para averiguar a natureza e as causas dessas discrepâncias.

Entre as hipóteses levantadas para a justificativa dessa distinção entre os resultados, destaca-se: 1) a possível diferença de propriedades mecânicas e físicas (como a razão volumétrica da fibra) entre os laminados unidirecionais empregados nos ensaios de tração

e as camadas helicoidais de ângulos alternados que constituem o envelope compósitos dos tanques estudados; 2) a possibilidade da presença de esforços não considerados pela modelo de vasos de pressão cilíndricos de paredes finas; 3) a introdução e propagação de erros experimentais ao longo dos cálculos.

Essas hipóteses não são mutualmente exclusivas e possivelmente contribuíram em diferentes proporções nas discrepâncias entre os resultados empíricos e experimentais observados. São necessários portanto estudos futuros para explorar o tema em mais detalhes. Com esse intuito recomenda-se investigar em mais detalhes as características físicas e mecânicas do material do envelope compósito dos vasos de pressão, com o objetivo de quantificar diferenças de propriedades entre os vasos e as amostras planas unidirecionais.

Para tal fim, pode-se avaliar, por microscopia, amostras dos vasos de pressão para aferir sua razão volumétrica de fibra e como essa varia ao longo da superfície do envelope. Além disso, recomenda-se medir diretamente as espessuras das lâminas que compõe o vaso ao invés de estima-las com base na espessura total do laminado uma vez que essas provavelmente não são regulares entre as camadas do material. É possível também utilizar dos ensaios de tração para informar e calibrar simulações numéricas de amostras unidirecionais sob tração, no intuito de refinar os modelos a serem empregados em simulações mais complexas.

Outra etapa importante consiste em aferir, por meio de ensaios de tração, as propriedades mecânicas de amostras fabricadas por camadas de tipo *angle-ply* entrelaçadas, como as observadas em peças fabricadas por bobinagem filamentar. Esses resultados podem então ser analisados por meio da teoria clássica das lâminas para julgar as propriedades da lamina unidirecional. Essencialmente realizando o processo inverso do feito nesse trabalho. Desse modo, espera-se investigar a influência do padrão de deposição das fibras nas propriedades mecânicas do material. Sugere-se também que utilize-se do mesmo mandril empregado nos vasos de pressão para fabricar as amostras planas visando garantir uma maior equivalência dos parâmetros de bobinagem.

De posse dos dados das propriedades mecânicas do laminado *angle-ply* e adquirido um melhor entendimento dos carregamentos agindo sobre os vasos de pressão, também é possível avaliar a obtenção das propriedades das lâminas diretamente dos dados dos ensaios hidrostático. Essa análise é possível, uma vez que os ensaios permitem obter tensões e deformações específicas do laminado em múltiplas direções e portanto suas propriedades de engenharia equivalentes. No entanto, para garantir a precisão dos resultados, é importante a boa compreensão dos carregamentos e que os ensaios de tração das amostras *angle-ply* sejam utilizados para validar as conclusões obtidas.

Por fim, ressalta-se que os dados coletados durante esse estudo serão úteis para o ajuste e validação de análises e simulações numéricas a serem realizadas no laboratório de estruturas aeroespaciais no futuro. Observa-se, também, que a infraestrutura e técnicas

implementadas ao longo do desenvolvimento desse trabalho expandem as linhas de estudo possíveis ao Laboratório de estruturas Aeroespaciais da UnB.

Referências

- AIR, A.; SHAMSUDDOHA, M.; PRUSTY, B. G. A review of Type V composite pressure vessels and automated fibre placement based manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, v. 253, p. 110573, mar. 2023. ISSN 1359-8368. Citado 3 vezes nas páginas 8, 25 e 26.
- AKKERMAN, R. Laminate mechanics for balanced woven fabrics. *Composites Part B: Engineering*, v. 37, n. 2, p. 108–116, abr. 2005. ISSN 1359-8368. Citado na página 69.
- AKKUS, N.; GENÇ, G. Influence of pretension on mechanical properties of carbon fiber in the filament winding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 91, n. 9, p. 3583–3589, ago. 2017. ISSN 1433-3015. Citado na página 22.
- ALAM, S. et al. Design and development of a filament wound composite overwrapped pressure vessel. *Composites Part C: Open Access*, v. 2, p. 100045, out. 2020. Citado na página 67.
- ANDRIANOV, A. *Fabricação de Estruturas Compósitas Axissimétricas Por Bobinagem Filamentar Para Aplicação Em Sistemas Aeroespaciais*. [S.l.], 2024. Citado na página 24.
- ANDRIANOV, A. et al. Experimental evaluation of the tow tension fluctuations during filament winding of a pressure vessel. *Proceedings of the 7th Brazilian Conference on Composite Materials*, v. 1, p. 428–434, 2024. Citado na página 62.
- ANDRIANOV, A. et al. A Low-Cost Filament Winding Technology for University Laboratories and Startups. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 5, p. 1066, jan. 2022. ISSN 2073-4360. Citado 4 vezes nas páginas 8, 22, 24 e 51.
- ASTM D2584-18. *Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*. [S.l.]: ASTM International, www.astm.org, 2016. Citado na página 38.
- ASTM D2734-94. *Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics*. [S.l.]: ASTM International, www.astm.org, 1994. Citado na página 38.
- ASTM D3039/D3039M-17. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. [S.l.]: Amendment, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 8, 11, 40, 42, 43 e 47.
- ASTM D3171-22. *Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*. [S.l.]: ASTM International, www.astm.org, 2022. Citado na página 38.
- ASTM D3518/D3518M-18. *Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate*. [S.l.]: ASTM International, www.astm.org, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 47.
- B., R.; CHAND, D.; J., D. A comprehensive review on the performance analysis of composite overwrapped pressure vessels. *Engineering and Applied Science Research*, v. 49, p. 272–287, set. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 25.

- BARBERO, E. J. *Introduction to Composite Materials Design*. [S.l.]: CRC Press, Taylor & Francis, 2018. ISBN 978-1-138-19680-3. Citado 5 vezes nas páginas 8, 28, 35, 60 e 94.
- BŁACHUT, A. et al. Influence of fiber tension during filament winding on the mechanical properties of composite pressure vessels. *Composite Structures*, v. 304, p. 116337, jan. 2023. ISSN 0263-8223. Citado na página 22.
- CARLSSON, L. A.; ADAMS, D. F.; PIPES, R. B. *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*. [S.l.]: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4398-4859-3. Citado 4 vezes nas páginas 8, 30, 32 e 34.
- CHATTOPADHYAY, S. *Pressure Vessels: Design and Practice*. [S.l.]: CRC Press, 2004. ISBN 978-0-203-49246-8. Citado na página 24.
- COHEN, D. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 28, n. 12, p. 1035–1047, jan. 1997. ISSN 1359-835X. Citado na página 23.
- DALLY, J. W. *Instrumentation for Engineering Measurements: Solutions Manual*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Incorporated, 1993. ISBN 978-0-471-58311-0. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- DANIEL, I. M. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. [S.l.]: Oxford University Press, 2007. ISBN 978-0-19-809838-6. Citado 11 vezes nas páginas 8, 9, 22, 28, 36, 37, 39, 40, 43, 44 e 69.
- de Knegt, G. B. P. *Estudo de Comportamento Estrutural Do Vaso de Pressão e Do Motor de Foguete Com Tubeira Integrada*. [S.l.], 2024. Citado 5 vezes nas páginas 10, 11, 65, 69 e 70.
- HBK. *Strain Gauge Installation on Fiber-Reinforced Plastics*. c2024. Disponível em: <<https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/strain-measurement-basics/strain-gauge-fundamentals/tips-and-tricks-strain-gage-installation-on-fiber-reinforced-plastics>>. Citado na página 57.
- HOFFMANN, K. *An Introduction to Measurement Using Strain Gages*. [S.l.]: Hottinger Baldwin, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 45.
- INSTRUNET. *Strain Gage Measurement with USB Data Acquisition Hardware & Software*. 2023. Disponível em: <https://instrunet.com/data_acquisition/force/strain_gage.html#sgmqb>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 58.
- ISO 1268-1. *"Fibre-reinforced plastics — Methods of producing test plates"*. [S.l.]: ISO International, www.iso.org, 2001. Citado na página 48.
- KASTENMEIER, A.; SCHMID, V.; EHRLICH, I. Specimen Preparation and Material Characterization of Filament Wound Composite Tubes. v. 4, n. 3, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 9, 18 e 48.
- KUHN, M.; HIMMEL, N.; MAIER, M. Design and analysis of full composite pressure vessels. *Advances in Composite Materials and Structures*, v. 7, p. 63–72, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 26.

- LISBÔA, T. V. et al. The role of winding pattern on filament wound composite cylinders under radial compression. *Polymer Composites*, v. 41, n. 6, p. 2446–2454, 2020. ISSN 1548-0569. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 23.
- LUTHADA, P. The Introduction to the Filament Winding Process. dez. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 9, 22 e 51.
- MEGSON, T. H. G. *Structural and Stress Analysis*. [S.l.]: Elsevier, 2005. ISBN 978-0-08-045534-1. Citado 4 vezes nas páginas 8, 26, 27 e 28.
- MERTINY, P.; ELLYIN, F. Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 33, n. 12, p. 1615–1622, dez. 2002. ISSN 1359-835X. Citado na página 23.
- NAIK, N. K.; GANESH, V. K. Prediction of on-axes elastic properties of plain weave fabric composites. *Composites Science and Technology*, v. 45, n. 2, p. 135–152, jan. 1992. ISSN 0266-3538. Citado na página 69.
- NETTLES, A. T. *Basic Mechanics of Laminated Composite Plates*. 1994. Citado 4 vezes nas páginas 8, 34, 36 e 37.
- Omega Engineering. *Practical Strain Gage Measurements*. 1994. Citado 4 vezes nas páginas 9, 45, 46 e 58.
- PARK, J.-S. et al. Structural Analysis and Strain Monitoring of the Filament Wound Motor Case. *Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER*, v. 36, out. 2002. Citado 4 vezes nas páginas 19, 26, 65 e 70.
- PETERS, S. T. *Composite Filament Winding*. [S.l.]: ASM International, 2011. ISBN 978-1-61503-852-7. Citado 5 vezes nas páginas 18, 19, 25, 37 e 39.
- PIMENTEL, M. F. S. et al. Mechanical characterization of carbon/epoxy laminates manufactured by filament winding. *Proceedings of the 7th Brazilian Conference on Composite Materials*, v. 1, p. 428–434, 2024. Citado 6 vezes nas páginas 9, 10, 48, 49, 63 e 64.
- RADULOVIĆ, J. Characterization of filament wound polymeric composite materials. *Scientific Technical Review*, LVIII, n. 1, p. 66–65, 2008. Citado na página 18.
- TOMITA, E. K. Influência do raio de abertura polar sobre o comportamento estrutural de envelope compósito com domos elípticos. fev. 2023. Citado na página 70.
- VPG Micro-Measurements (produtor do vídeo). *Tutorial: Strain Gage Installation*. 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=yQx1uaBWehc>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 59.

Apêndices

APÊNDICE A – Implementação dos cálculos analíticos em Python

```

"""calculo_20bar.ipynb

# Apendice A:
## Implementacao dos calculos analiticos
Implementacao dos calculos de mecanica dos materiais compostos
apresentados

Implementado em Python 3.12.5/Notebook Jupyter

Dependencias:
- numpy
- matplotlib.pyplot
- pandas
- IPython.display

## Definicao das funcoes
"""

# Importando as funcoes relevantes
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from IPython.display import display

# %% Definicao de funcoes globais

def create_properties_dict(item, caminho_tabela="Composite material
                             properties.csv"):
    '''
    Creates a dictionary containing the properties of the item with the
    same index in the csv table.
    '''
    # Abrindo tabelas para extrair dados
    CompositeTable = pd.DataFrame()
    CompositeTable = pd.read_csv(caminho_tabela, sep=';')

    v23 = CompositeTable.loc[item, "nu_23"] # [Adimensional]
    E2 = CompositeTable.loc[item, "E_2 [Gpa]"] # [GPa]
    G23 = E2 / (2*(1+v23))

```

```

properties_dict = {
    'E1': CompositeTable.iloc[item]["E_1 [Gpa]"], # [GPa]
    'E2': E2, # CompositeTable.iloc[item]["E_2 [Gpa]"], # [GPa]
    'v12': CompositeTable.iloc[item]["nu_12"], # [Adimensional]
    'v21': v23,
    'v23': v23, # CompositeTable.iloc[item]["nu_23"], # [
        Adimensional]
    'G12': CompositeTable.iloc[item]["G_12 [Gpa]"], # [GPa]
    'G13': CompositeTable.iloc[item]["G_12 [Gpa]"], # [GPa]
    'G23': G23, # [GPa]
    'F1t': CompositeTable.iloc[item]["F_1t [Mpa]"]/1000, # [GPa]
    'F1c': CompositeTable.iloc[item]["F_1c [Mpa]"]/1000, # [GPa]
    'F2t': CompositeTable.iloc[item]["F_2t [Mpa]"]/1000, # [GPa]
    'F2c': CompositeTable.iloc[item]["F_1c [Mpa]"]/1000, # [GPa]
    'F6': CompositeTable.iloc[item]["F_6 [Mpa]"]/1000, # [GPa]
    'Material name': CompositeTable.iloc[item]["Material"],
    'Material type': CompositeTable.iloc[item]["Material type"],
    'Density per area': None,
    'Cost per area': None
}

return properties_dict

# Definindo as funcoes globais para os calculos de compositos
def compute_A(theta, unit = 'graus'):
    '''
    PURPOSE
    - Compute the matrix a whitch Relates laminate xy coordinates to 12
    - It is eq.5.40 on the Barbero book
    INPUTS
    - theta: angle between laminate and lamina
    OUTPUTS
    - T : Transformation Matrix a (eq.5.26)
    '''
    if unit == 'graus':
        theta = np.deg2rad(theta)
    m = np.cos(theta)
    n = np.sin(theta)
    A = np.array([
        [m,n],
        [-n,m]
    ])
    return A

def compute_T(theta, unit = 'graus'):
    '''
    PURPOSE

```

```

- Compute the matrix T which Relates laminate deformation to the
      lamina
      deformation
- It is eq.5.40 on the Barbero book
- Deformation_x = T * Deformation_1
- Stress_x = T^-1 * Stress_1

INPUTS
- theta : angle between laminate and lamina in degrees
      OUTPUTS
- T      : Transformation Matrix T (eq.5.40)'''

if unit == 'graus':
    theta = np.deg2rad(theta)
m = np.cos(theta)
n = np.sin(theta)
T = np.array([
    [m**2 , n**2 , 2*m*n],
    [n**2 , m**2 , -2*m*n],
    [-m*n , m*n , m**2 - n**2]
])
return T

def compute_Q(properties_dict):
    '''PURPOSE
- Compute the matrix Q which is the inverse of the compliance
      matrix
- It is eq.5.21 on the Barbero book
- The matrix S is Q^-1

INPUTS
- E1      : Youngs modulus on 1 direction
- E2      : Youngs modulus on 2 direction
- poison12 : Poison Ration on the 12 direction
- G12     : Shear modulus 1 direction
      OUTPUTS
- Q : Matrix Q (eq.5.21)'''

    delta = (
        1 - (properties_dict['v12']**2) * properties_dict['E2'] /
        properties_dict['E1']
    )
    Q = np.zeros((3,3))
    Q[0,0] = properties_dict['E1'] / delta
    Q[1,1] = properties_dict['E2'] / delta
    Q[2,2] = properties_dict['G12']
    Q[0,1] = properties_dict['v12'] * properties_dict['E2'] / delta

```

```

Q[1,0] = Q[0,1]
return Q

def compute_QI(properties_dict):
    '''
    PURPOSE
    - Compute the matrix QI which is the inverse of the intralaminar
      compliance matrix
    - It is eq.5.22 on the Barbero book
    - The matrix SI is  $QI^{-1}$ 
    -  $\sigma_{4 e 5} = QI * \gamma_{4 e 5}$ 
    INPUTS
    - G13      : Intralaminar shear modulus on 13 plane
    - E2       : Youngs modulus on 2 direction
    - poisson23 : Poison Ration on the 12 direction
    OUTPUTS
    - Q* : Matrix Q* (eq.5.21)
    '''
    QI = np.zeros((2,2))
    QI[0,0] = properties_dict['G23']
    QI[1,1] = properties_dict['G13']
    return QI

# %% Criando classes para armazenar as propriedades e funcoes associadas
# aos laminados e laminas
class Ply:
    reuter_matrix = np.array([
        [1,0,0],
        [0,1,0],
        [0,0,2]
    ])
    def __init__(self,material,orientation):
        self.material_id = material
        self.orientaton = orientation
        self.units = {'Orientation unit':'graus'}
        if type(material) == dict:
            self.properties = material
        else:
            self.properties = create_properties_dict(self.material_id)
        self.T_matrix = compute_T(self.orientaton,self.units['
            Orientation unit'])
        self.A_matrix = compute_A(self.orientaton,self.units['
            Orientation unit'])

        self.Q = compute_Q(self.properties)
        self.QI = compute_QI(self.properties)
        self.QT = np.dot(

```

```

        np.dot(compute_T(-orientation),self.Q ),
        compute_T(-orientation).T
    )
self.QIT = np.dot(
    np.dot(self.A_matrix,self.QI),
    self.A_matrix.T
)

def get_transformed_properties(self):
    return None

class Lamina(Ply):
    def __init__(self,material,orientation,thickness,lamina_coordinate):
        # Coordenada do centro da lamina em realcao ao plano central do
        # lamminado
        self.Zk = lamina_coordinate
        # Espessura da lamina
        self.thickness = thickness
        if self.Zk >= 0:
            # Possicao do topo da lamina para calcular deformacao maxima
            self.Zn = self.Zk + (self.thickness)/2
        else:
            self.Zn = self.Zk - (self.thickness)/2
        Ply.__init__(self,material,orientation)
        # Partial Extensional stiffness matrix A0:
        self.A0 = self.QT * self.thickness
        # Partial Bending extension coupling stiffness matrix B:
        self.B0 = 1*self.QT * self.thickness * self.Zk
        # Partial Bending stiffness matrix D:
        self.D0 = self.QT*(self.thickness*self.Zk**2 + (self.thickness**
            3)/12)
        # Partial Transverse shear stiffness:
        self.H0 = -(5/4) * self.QIT * (self.thickness - (4/self.
            thickness**2) *
            (self.thickness*self.Zk**2 + (self.thickness
                **3)/12)
            )

    def get_A0(self):
        return self.A0
    def get_B0(self):
        return self.B0
    def get_D0(self):
        return self.D0
    def get_H0(self):
        return self.H0

    def compute_deformation_and_stress(self,laminate_deformation):

```

```

# Cuidado deve ser tomado em laminados de lamina unica
# pois estou considerando zk como sendo o meio da lamina
# epsilon_x, epsilon_y, gamma_xy:
self.deformation = laminate_deformation[:3]-self.Zn*
                    laminate_deformation[3:]
self.stress = np.dot(self.QT, self.deformation) # sigma_x,
                    sigma_y, gamma_xy

self.material_deformation = np.dot(
    np.dot(self.reuter_matrix, compute_T(self.orientaton)),
    np.dot(np.linalg.inv(self.reuter_matrix), self.deformation)
)

self.material_stress = np.dot(self.Q, self.material_deformation)

# self.material_stress = np.dot(compute_T(self.orientaton),self.
#                               stress)

# # sigma_1, sigma_2, sigma_6
pass

def compute_safety_factors(self):
    self.compute_tsai_wu_sf()
    pass

def compute_tsai_wu_sf(self):
    '''
    PURPOSE
    - Computing the safety factor for a composit lamina using the
      Tsai-Wu
    theory.
    - Method discribed by Daniel's Engineering Mechanics of
      Composite
    Materials. Section 6.9

    INPUTS
    - STRENGHT=[F1t,F1c,F2t,F2c,F6]'           Material strenght
    - TENSION=[sigma1,sigma2,sigma6]'         Tensions in the material
                                           axis

    OUTPUTS
    - Sfa = Actual state of stress
    - Sfr = Reversed in sign state of stress
    '''
    f1 = (1/self.properties['F1t'])-(1/self.properties['F1c'])
    f11 = 1/(self.properties['F1t']*self.properties['F1c'])
    f2 = (1/self.properties['F2t'])-(1/self.properties['F2c'])
    f22 = 1/(self.properties['F2t']*self.properties['F2c'])
    f66 = 1/(self.properties['F6']**2)

```

```

f12 = -(np.sqrt(f11*f22))/2

# From equation 6.56 on Daniel's Mechanics of Composite
# Materials:
a = (
    f11*(self.material_stress[0]**2) +
    f22*(self.material_stress[1]**2) +
    f66*(self.material_stress[2]**2) +
    2*f12*self.material_stress[0]*self.material_stress[1]
)

b = f1*self.material_stress[0] + f2*self.material_stress[1]
# Actual state of stress
Sfa = (-b + np.sqrt(b**2 + 4*a))/(2*a)

# Reversed in sign state of stress
Sfr = (-b - np.sqrt((b**2) + 4*a))/(2*a)

self.sf_tsai_wu = {"Sfa":Sfa,"Sfr":Sfr}

return self.sf_tsai_wu

def print_lamina_deformation(self):
    print("Deformation:")
    print(self.deformation)
    print("Estresse:")
    print(self.stress)

class Laminate:
    def __init__(self,lamina_list):
        self.lamina_stack = []
        self.t = 0
        self.create_lamina_list_with_coordinates(lamina_list)

        for lamina in self.lamina_list:
            self.lamina_stack.append(
                Lamina(lamina[0],lamina[1],lamina[2],lamina[3]))

        self.compute_ABD()

    def create_lamina_list_with_coordinates(self, lamina_list):
        # Add the coordinate to the laminate matrix
        L = lamina_list
        tt = sum(i[2] for i in L)
        for i in range(len(L)):
            if i == 0:

```



```
def compute_loading(self):
    self.load_vector = np.dot(self.ABD, self.load_vector)

def print_load_vector(self):
    print('Load vector:')
    print(' N_x:', self.load_vector[0])
    print(' N_y:', self.load_vector[1])
    print(' N_xy:', self.load_vector[2])
    print(' M_x:', self.load_vector[3])
    print(' M_y:', self.load_vector[4])
    print(' M_xy:', self.load_vector[5])

def print_deformation_vector(self):
    print('Deformation vector:')
    print('      u_x:', self.deformation_vector[0])
    print('      u_y:', self.deformation_vector[1])
    print(' gamma_xy:', self.deformation_vector[2])
    print('      k_x:', self.deformation_vector[3])
    print('      k_y:', self.deformation_vector[4])
    print('      k_xy:', self.deformation_vector[5])

"""---
## Calculos de deformacao do vaso de pressao
"""

# Criando o laminado
R_c = 60 # mm
r_pf = 21 # mm
b_ef = 42 # mm
b_er = 42 # mm
l_c = 88 # mm

alpha_c = np.deg2rad(23.578) # np.asin(r_pf/R_c)
alpha_c_deg = np.rad2deg(alpha_c)

# Definicao das propriedades
E1 = 146.94
E2 = 5.53
v12 = 0.286
G12 = 5.14
v21 = E2*(v12/E1)
v23 = 0.4 # (Estimado)

properties = {
    'E1': E1, # [GPa]
```

```

'E2': E2, # CompositeTable.iloc[item]["E_2 [Gpa]", # [GPa]
'v12':v12, # [Adimensional]
'v21':v21, # [Adimensional]
'v23':v23, # [Adimensional]
'G12':G12, # [GPa]
'G13':G12, # [GPa]
'G23':E2 / (2*(1+v23)), # [GPa]
'F1t':1200, # [GPa]
'F1c':800, # [GPa] (estimado)
'F2t':11.8, # [GPa]
'F2c':14, # [GPa] (estimado)
'F6':47.961, # [GPa]
'Material name':"Pressure vessel carbon",
'Material type':"Carbon",
'Density per area':None,
'Cost per area':None
}

mt = properties
t_angleply = 0.165 #1.2/7 # [mm]
t_hoop = 0.47 # 0.125 # mm

L = [
    [mt,+alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,-alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,+alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,90,t_hoop],
    [mt,-alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,+alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,-alpha_c_deg,t_angleply],
]

laminata = Laminata(L)
A_matrix = laminata.ABD[0:3,0:3]
a_matrix = laminata.abd[0:3,0:3]

# Imprimindo as matrizes de rigidez e conformidade
print("Lamina stiffness related to x-y axes, [GPa]:")
i=1
for lamina in laminata.laminata_stack:
    print("QT "+ str(i) +":")
    print(lamina.QT.round(3))
    i=i+1

print()
print("ABBD matrix:")
print(laminata.ABD.round(4))

```

```

print()

print("abbd matrix:")
print(laminate.abd.round(4))
print()

A_matrix = laminate.ABD[0:3,0:3]
print("A matrix:")
print(A_matrix.round(4))
print()

a_matrix = laminate.abd[0:3,0:3]
print("a matrix:")
print(a_matrix.round(4))

# Calculo de deformacoes:
pressure = 2e-3 # GPa # 4e6 # Pa
# N_x = (pressure * np.pi * R_c**2)/(2 * np.pi * R_c) # N/m
R = 58 # mm
N_x = (pressure * R)/(2) # [10e3 Nm] tensao longitudinal
N_y = pressure * R # [10e3 Nm]

load_vector = np.array([N_x,N_y,0,0,0,0]) # [N_x, N_y, N_xy, M_x, M_y,
                                     M_xy]

laminate.aply_load(load_vector)
ex = laminate.deformation_vector[0]
ey = laminate.deformation_vector[1]

force_vector = np.array([N_x,N_y,0])
deformations = np.dot(a_matrix,force_vector)

print()
print("="*50)
print("Para pressao igual a 20 bar:")
print("Pressao:",pressure, "GPa")
print("Forca:",load_vector)
print()
print('Deformacoes [e_x, e_y, e_xy]:')
print(deformations)

# Deformacoes em funcao de varias pressoes
print("="*50)
print("Deformacoes em funcao de varias pressoes")
print("Pressao em MPa| Deformacoes [e_x, e_y, e_xy]")
for pressure in np.linspace(0,10e-3,20):

```

```

mt = properties
t_angleply = 0.165 #1.2/7 # [mm]
t_hoop = 0.47 # 0.125 # mm

L = [
    [mt,+alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,-alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,+alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,90,t_hoop],
    [mt,-alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,+alpha_c_deg,t_angleply],
    [mt,-alpha_c_deg,t_angleply],
]

laminata = Laminata(L)
A_matrix = laminata.ABD[0:3,0:3]
a_matrix = laminata.abd[0:3,0:3]

# pressure = 2e-3 # GPa # 4e6 # Pa
# N_x = (pressure * np.pi * R_c**2)/(2 * np.pi * R_c) # N/m
R = 58 # mm
N_x = (pressure * R)/(2) # [10e3 Nm] tensao longitudinal
N_y = pressure * R # [10e3 Nm]

load_vector = np.array([N_x,N_y,0,0,0,0]) # [N_x, N_y, N_xy, M_x,
                                     M_y, M_xy]

laminata.aply_load(load_vector)
ex = laminata.deformation_vector[0]
ey = laminata.deformation_vector[1]

force_vector = np.array([N_x,N_y,0])
deformations = np.dot(a_matrix,force_vector)
# print("Pressao:",pressure, "GPa")
# print("Forca:",load_vector)
# print()
# print('Deformacoes [e_x, e_y, e_xy]:')
# print(deformations)

print(pressure.round(4)*1000,'|' , deformations.round(4))

```

APÊNDICE B – Retorno do código do apêndice A contendo os resultados do cálculo analítico

```

Lamina stiffness related to x-y axes, [GPa]:
QT 1:
[[107.333  18.952  42.106]
 [ 18.952  10.877   9.896]
 [ 42.106   9.896  22.505]]
QT 2:
[[107.333  18.952 -42.106]
 [ 18.952  10.877  -9.896]
 [-42.106  -9.896  22.505]]
QT 3:
[[107.333  18.952  42.106]
 [ 18.952  10.877   9.896]
 [ 42.106   9.896  22.505]]
QT 4:
[[ 5.547  1.586  0.  ]
 [ 1.586 147.394  0.  ]
 [ 0.     0.     5.14 ]]
QT 5:
[[107.333  18.952 -42.106]
 [ 18.952  10.877  -9.896]
 [-42.106  -9.896  22.505]]
QT 6:
[[107.333  18.952  42.106]
 [ 18.952  10.877   9.896]
 [ 42.106   9.896  22.505]]
QT 7:
[[107.333  18.952 -42.106]
 [ 18.952  10.877  -9.896]
 [-42.106  -9.896  22.505]]

ABBD matrix:
[[108.867  19.5079  0.  0.  0.  -6.7043]
 [ 19.5079  80.0432  0.  0.  0.  -1.5756]
 [ 0.  0.  24.6961 -6.7043 -1.5756  0.  ]
 [ 0.  0.  -6.7043 26.9557  4.7648 -0.  ]
 [ 0.  0.  -1.5756  4.7648  4.002  -0.  ]
 [ -6.7043 -1.5756  0.  -0.  -0.  5.6864]]

```

```
abbd matrix:
[[ 0.0103 -0.0023 -0.      -0.      0.      0.0115]
 [-0.0023 0.0131 -0.      0.      -0.      0.0009]
 [-0.      -0.      0.0435 0.0099 0.0054 -0.      ]
 [-0.      0.      0.0099 0.0492 -0.0547 -0.      ]
 [ 0.      -0.      0.0054 -0.0547 0.3171 0.      ]
 [ 0.0115 0.0009 -0.      -0.      0.      0.1897]]
```

```
A matrix:
[[108.867 19.5079 0.      ]
 [ 19.5079 80.0432 0.      ]
 [ 0.      0.      24.6961]]
```

```
a matrix:
[[ 0.0103 -0.0023 -0.      ]
 [-0.0023 0.0131 -0.      ]
 [-0.      -0.      0.0435]]
```

```
=====
Para pressao igual a 20 bar:
Pressao: 0.002 GPa
Forca: [0.058 0.116 0.      0.      0.      0.      ]
```

```
Deformacoes [e_x, e_y, e_xy]:
[ 3.32621636e-04 1.38341751e-03 -4.67398556e-19]
```

```
=====
Deformacoes em funcao de varias pressoes
Pressao em MPa | Deformacoes [e_x, e_y, e_xy]
0.0 | [0. 0. 0.]
0.5 | [ 0.0001 0.0004 -0.      ]
1.1 | [ 0.0002 0.0007 -0.      ]
1.6 | [ 0.0003 0.0011 -0.      ]
2.1 | [ 0.0004 0.0015 -0.      ]
2.6 | [ 0.0004 0.0018 -0.      ]
3.2 | [ 0.0005 0.0022 -0.      ]
3.7 | [ 0.0006 0.0025 -0.      ]
4.2 | [ 0.0007 0.0029 -0.      ]
4.7 | [ 0.0008 0.0033 -0.      ]
5.3 | [ 0.0009 0.0036 -0.      ]
5.8 | [ 0.001 0.004 -0.      ]
6.3 | [ 0.0011 0.0044 -0.      ]
6.8 | [ 0.0011 0.0047 -0.      ]
7.4 | [ 0.0012 0.0051 -0.      ]
7.9 | [ 0.0013 0.0055 -0.      ]
8.4 | [ 0.0014 0.0058 -0.      ]
8.9 | [ 0.0015 0.0062 -0.      ]
```

```
9.5 | [ 0.0016  0.0066 -0.    ]  
10.0 | [ 0.0017  0.0069 -0.    ]
```

APÊNDICE C – Caso de validação do código de cálculos de compósitos

O código abaixo utiliza do algoritmo utilizado para os cálculos analíticos desse trabalho para recria, com sucesso, o exemplo de número 6.1 do livro do Barbero (2018).

```
# Definicao das propriedades
E1 = 19.981 #146.94
E2 = 11.389
v12 = 0.274
G12 = 3.789
v21 = E2*(v12/E1)
v23 = 0.385 # (Estimado)

properties = {
    'E1':E1, # [GPa]
    'E2': E2, # CompositeTable.iloc[item]["E_2 [Gpa]", # [GPa]
    'v12':v12, # [Adimensional]
    'v21':v21, # [Adimensional]
    'v23':v23, # [Adimensional]
    'G12':G12, # [GPa]
    'G13':G12, # [GPa]
    'G23':E2 / (2*(1+v23)), # [GPa]
    'F1t':1200, # [GPa]
    'F1c':800, # [GPa] (estimado)
    'F2t':11.8, # [GPa]
    'F2c':14, # [GPa] (estimado)
    'F6':47.961, # [GPa]
    'Material name':"Pressure vessel carbon",
    'Material type':"Carbon",
    'Density per area':None,
    'Cost per area':None
}

# Exemplo 6.1 do Barbero
mt = properties #28
t = 0.635 # mm
theta = 55
L = [
    [mt,+theta,t],
    [mt,-theta,t],
]
```

```
laminate = Laminate(L)
# np.set_printoptions(precision=3)

print('Exemplo 6.1 do Barbeiro:')

print('\n')
print('INPLANE STIFFNESS:')

print("\nPly 0 QT:")
display(laminate.laminate_stack[0].QT)

print("\nA:")
display(laminate.A)

print("\nB:")
display(laminate.B)

print("\nD:")
display(laminate.D)

print('\n')
print('OUT OF PLANE STIFFNESS:')

print("\nPly 0 QI:")
display(laminate.laminate_stack[0].QI)

print("\nPly 0 QIT:")
display(laminate.laminate_stack[0].QIT)
```

APÊNDICE D – Retorno do código de validação dos cálculos

Exemplo 6.1 do Barbeiro:

INPLANE STIFFNESS:

Ply 0 QT:

```
array([[12.4016496 ,  5.70964889,  1.21713152],
       [ 5.70964889, 15.47166068,  3.00026153],
       [ 1.21713152,  3.00026153,  6.23855472]])
```

A:

```
array([[15.75009499,  7.25125409,  0.          ],
       [ 7.25125409, 19.64900906,  0.          ],
       [ 0.          ,  0.          ,  7.92296449]])
```

B:

```
array([[0.          ,  0.          ,  0.49077786],
       [0.          ,  0.          ,  1.20978046],
       [0.49077786,  1.20978046,  0.          ]])
```

D:

```
array([[2.11694402,  0.97462898,  0.          ],
       [0.97462898,  2.64099056,  0.          ],
       [0.          ,  0.          ,  1.06491245]])
```

OUT OF PLANE STIFFNESS:

Ply 0 QI:

```
array([[4.11155235,  0.          ],
       [0.          ,  3.789          ]])
```

Ply 0 QIT:

```
array([[ 3.89511647, -0.15155003],
       [-0.15155003,  4.00543587]])
```

H:

```
array([[2.0611658 ,  0.          ],
       [0.          ,  2.11954315]])
```