



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Eduardo Ballmann de Campos

Análise de um vaso de pressão com selante metálico

Florianópolis

2024

Eduardo Ballmann de Campos

Análise de um vaso de pressão com selante metálico

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como parte da obtenção do título de Engenheiro em Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Hazim A. Al-Qureshi, PhD.

Florianópolis

2024

Campos, Eduardo Ballmann de
Análise de um vaso de pressão com selante metálico /
Eduardo Ballmann de Campos ; orientador, Hazim Ali Al-
Qureshi, 2024.
50 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia de Materiais,
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. vaso de pressão. 3.
micromecânica. 4. material compósito. I. Al-Qureshi, Hazim
Ali. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação
em Engenharia de Materiais. III. Título.

Eduardo Ballmann de Campos

Análise de um vaso de pressão com selante metálico

O presente trabalho em nível de graduação foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Dr. Henrique Akira Tajiri
Universidade Federal de Santa Catarina

Renan Belli Berman
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Engenharia de Materiais.

Coordenação do Curso de Engenharia de
Materiais

Prof. Hazim A. Al-Qureshi, PhD.
Orientador

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Sem o apoio e a colaboração de diversas pessoas, este projeto não teria sido possível. Primeiramente, agradeço à UFSC pela oportunidade de aprendizado e crescimento. Os conhecimentos adquiridos ao longo do curso foram essenciais para a elaboração deste TCC. Agradeço ao CNPQ, pela verba concedida, que possibilitou a realização de iniciação científica durante a graduação. Agradeço ao meu orientador, Prof. Hazim A. Al-Qureshi, PhD., pela orientação valiosa, paciência e incentivo durante todo o processo. Sua expertise e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço a banca pela disponibilidade para a avaliação deste TCC. Agradeço também à minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo amor e suporte incondicional. Vocês foram minha fonte de motivação e força em momentos desafiadores. Aos meus amigos e colegas de curso, agradeço pelas trocas de ideias, pelas discussões enriquecedoras e pelo apoio mútuo. Cada um de vocês contribuiu de maneira significativa para a minha jornada acadêmica.

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo da micromecânica para o dimensionamento da parede de vasos de pressão conjugados metal/compósito. O equacionamento foi desenvolvido como para um tubo de parede fina onde há uma distribuição de tensões entre um selante metálico e a camada de compósito. Foram avaliados os parâmetros de interesse e as propriedades necessárias dos materiais para que a metodologia seja válida de acordo com a geometria. O método de deposição por bobinagem do compósito foi avaliado e relacionado aos resultados de espessura obtidos. Os resultados do equacionamento foram comparados com estudos anteriores e foi verificada a eficácia da metodologia para uma previsão simplificada da espessura necessária da camada de compósito de acordo com a pressão aplicada no vaso.

Palavras-chave: vaso de pressão; micromecânica; material compósito

ABSTRACT

In this study, an investigation into micromechanics for the design of the walls of metal/composite pressure vessels was conducted. The equations were developed as for a thin-walled tube where there is a stress distribution between a metallic liner and the composite layer. The parameters of interest and the necessary material properties were evaluated to ensure that the methodology is valid according to the geometry. The composite winding deposition method was assessed and related to the thickness results obtained. The results from the equations were compared with previous studies, confirming the effectiveness of the methodology for a simplified prediction of the required thickness of the composite layer based on the pressure applied to the vessel.

Keywords: pressure vessel; micromechanics; composite material

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Valores do módulo de Young do compósito para a direção paralela à fibra e ortogonal à fibra. Valores obtidos para uma fibra de 1000MPa e uma resina de 100MPa utilizando a lei das misturas.	18
Figura 2 – Principais orientações de deposição de fibras em um material compósito. (a) fibras paralelas; (b) fibras orientadas aleatoriamente; (c) fibras em um plano; (d) fibras orientadas aleatoriamente em um plano	18
Figura 3 - Tipos de vaso de pressão;	20
Figura 4 - Comparação entre diferentes tipos de vasos de pressão em função da resistência mecânica sobre a massa	22
Figura 5 - Diagrama de bobinagem	24
Figura 6– Diagrama de bobinagem circunferencial	25
Figura 7 - Diagrama de bobinagem helicoidal	25
Figura 8 - Corte do tubo no plano $r\theta$ sobre pressão interna P_i e pressão externa P_e	27
Figura 9 - Distribuições das forças aplicadas sobre o tubo em um corte no plano $z\theta$	28
Figura 10 - Distribuições das forças aplicadas sobre o tubo em um corte no plano $r\theta$	29
Figura 11 – Diagrama das paredes do vaso de pressão simulado na parte cilíndrica.	35
Figura 12– Gráfico distribuição das tensões radial e longitudinal dentro da parede do vaso. Valores à esquerda representam a parte metálica de 1,4mm de espessura e a direita a parte do compósito de 3,82mm.	38
Figura 13– Gráfico da fração de tensões totais (tresca) dentro das diferentes camadas do vaso de pressão em função da espessura do selante metálico.	38
Figura 14 – Gráfico da espessura necessária de material compósito em função da espessura do selante metálico.	39
Figura 15 – Gráfico da relação do ângulo de bobinagem com a espessura da camada de compósito para a bobinagem circunferencial e helicoidal, além de suas somas.	39
Figura 16 – Gráfico da espessura necessária de material compósito em função da tensão de ruptura da fibra para um selante metálico de 1.4mm, pressão interna de 30MPa e raio de 71,6mm.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de diferentes fibras utilizadas na fabricação de compósito.....	35
Tabela 2 – Index de performance para diferentes materiais conjugados na parede do vaso de pressão.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FRP	Fiber-reinforced polymers (Polímeros reforçados por fibras)
LdM	Lei das misturas
COPV	Composite overwrapped pressure vessels (Vasos de pressão compostos revestidos)
CPV	Composite pressure vessel (Vaso de pressão compósito)
PEAD	Poliestireno de alta densidade

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	13
1.2	VASOS DE PRESSÃO	14
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	16
3.2	VASOS DE PRESSÃO	19
3.2.1	Vaso de pressão composto revestido (COPV)	20
3.2.2	Manufatura de COPV	21
3.2.2.1	<i>Camada de material selante</i>	<i>21</i>
3.2.2.2	<i>Camada de material compósito.....</i>	<i>23</i>
3.2.2.3	<i>Região do domo.....</i>	<i>26</i>
3.3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.3.1	Parâmetros de simulação.....	34
	REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

1.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são interessantes por sua capacidade de unir características aparentemente contraditórias: alta resistência, rigidez e leveza. Uma característica distintiva desses materiais é sua anisotropia. Essa peculiaridade permite que suas características sejam ajustadas de acordo com a orientação e a quantidade de camadas de fibras, que atuam como material de reforço (Al-Qureshi, 1984).

Por causa dessa capacidade de misturar diferentes propriedades de diferentes materiais é possível obter propriedades que não existem em um material homogêneo. Essas propriedades ímpares são extremamente interessantes para problemas específicos em muitas indústrias como a aeroespacial, a química e a civil. (Nepin, 2024)

A ideia de misturar dois materiais para formar um terceiro não é nova. Estudos arqueológicos mostram que em 1800 A.C. já eram misturados palha e barro para formar um tijolo mais resistente. Além disso, o próprio corpo humano é formado por ossos e músculos composto de uma mistura de materiais (Al-Qureshi, 1984).

Hoje em dia o uso de materiais como concreto armado permite a construção de edifícios que antes seriam impossíveis. Isso ocorre pelo aço melhorar a resistência do concreto à tração, possibilitando seu uso onde o concreto tradicional não seria adequado. Essa alteração de propriedades específicas de um material, permitindo a utilização das propriedades desejadas, mas melhorando aquelas que não suprem a necessidade, é o principal motivo que faz com que materiais compósitos sejam tão interessantes para aplicações de alto desempenho.

Na engenharia, materiais compósitos são definidos por uma ou mais fases descontínuas envoltas por uma fase contínua combinadas para formar um material útil (Al-Qureshi, 1984). Normalmente, a fase descontínua é mais resistente e chamada de filamento ou reforço, enquanto a fase contínua é chamada de matriz ou resina. Embora esta definição englobe uma quantidade massiva de combinações de materiais utilizados para diversas finalidades, é comum se referir a materiais compósitos com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas junto a uma redução do peso. Para alcançar essa melhora nestas propriedades mecânicas precisa-se de um material de baixa densidade, com alta tensão de escoamento (σ_e) e elevado módulo de Young

(E). Essas necessidades levaram ao desenvolvimento de *fiber-reinforced polymers* (FRP, polímeros reforçados por fibras) que podem ser manufaturados a partir de materiais como fibras de carbono, de vidros, de aramida e de boro, que devido a suas altas fragilidades e baixas resistências à flexão não podem ser utilizadas sozinhas.

Dessa forma, com a incorporação de uma resina polimérica, é possível alinhar várias fibras em uma ou mais direções de forma que a matriz transfira a carga para as fibras formando um material extremamente interessante para indústrias que exigem alto desempenho (Ngo, 2020).

1.2 VASOS DE PRESSÃO

O primeiro projeto documentado de vaso de pressão foi descrito por Leonardo da Vinci em 1495, no seu livro *Codex Madrid I* (Rodrigo, 2024). Eles são projetados para armazenar fluidos quando um recipiente convencional não seria capaz e seus parâmetros são escolhidos de acordo com a aplicação do vaso.

Como eles trabalham sob pressão, eles podem ser bem perigosos, então diferentes normas existem para regulamentar a fabricação e o uso destes vasos. A primeira norma que enquadrou os vasos de pressão foi concebida em 1911 pela ASTM como Código ASME para Caldeiras e Vasos de Pressão (B&PVC) (ABERKO, 2024).

Estes primeiros vasos de pressão dos séculos XIX e XX eram semelhantes aos atuais e tinham a principal função de armazenar vapor em plena revolução industrial. Hoje em dia eles são utilizados em diversas indústrias, armazenando uma grande variedade de fluidos que nem existiam no século XIX.

Dentre as indústrias que mais utilizam os vasos de pressão, eles desempenham um papel fundamental em uma variedade de processos essenciais. Na indústria química, são empregados na produção de substâncias básicas e em reações de alta pressão, além de servirem para o armazenamento de gases. No setor alimentício, são cruciais para o processamento e conservação de alimentos, incluindo a esterilização e o empacotamento a vácuo. A indústria de gás e petróleo depende deles para armazenar e transportar combustíveis e gases, enquanto o setor energético os utiliza em centrais termelétricas e no armazenamento de biocombustíveis. Entre muitas outras.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver equações que preveem a pressão de ruptura de um vaso de pressão conjugado feito de uma camada interna metálica envolvida por uma camada externa de material compósito.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a viabilidade de utilizar equações micromecânicas utilizadas.

Verificar a importância da bobinagem do material compósito na espessura da parede.

Avaliar as diferenças de utilizar um conjugado metal/compósito comparado a um vaso de pressão puramente metálico.

Calcular o index de performance de diferentes materiais compósitos para o vaso de pressão.

Com base nos objetivos elencados, organizou-se este trabalho de maneira que a fundamentação teórica sobre materiais compósitos e vasos de pressão dessem base para o entendimento dos cálculos matemáticos realizados a partir de simulações computacionais, apresentados na metodologia, conforme as sessões adiante.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Como os *fiber-reinforced polymers* (FRP, polímeros reforçados por fibras) são formados por uma mistura de fibras e uma matriz de resina, suas propriedades são dependentes destes dois materiais. As fibras, têm uma geometria onde na direção longitudinal (\hat{i}), tem comprimento muito superior às transversais com pelo menos uma razão de 10:1 (Al-Qureshi, 1984). Quando alinhadas longitudinalmente e conectadas pela resina, cria-se um material que resiste a uma carga aproximada ao valor equivalente ao da soma de tod

as as fibras, pois ela se distribui através da resina para todas as fibras formando o equivalente a um corpo contínuo. Caso as fibras sejam carregadas transversalmente (plano ortogonal ao eixo \hat{i}), a distribuição da carga pelo material não ocorre ao longo das fibras e sim partilhado proporcionalmente entre as fibras e a matriz (Al-Qureshi, 1984).

Considerando que em sua maior parte as fibras têm propriedades mecânicas muito superiores às da resina, é interessante projetar o material para que as forças aplicadas sobre ele sejam majoritariamente na direção longitudinal, paralela às fibras, onde o valor das suas propriedades prevalece.

Estes diferentes resultados em propriedades de acordo com as configurações de carga é o que define os FRP como materiais anisotrópicos. Esse comportamento diferente entre a direção longitudinal e transversal pode ser estimado a partir de uma análise micromecânica tendo como parâmetro as características individuais de cada material e proporção entre eles. Esse método é chamado de lei das misturas (LdM) (Gurit, 2023).

Para um material perfeito, onde não há a presença de impurezas e vazios, que seja composto por apenas um tipo de fibra e de matriz, pode-se normalizar o volume destes em função do volume total do compósito, para encontrar uma representação de proporção dos componentes do material.

$$V_f + V_m = 1 \quad (1)$$

onde V_f é a fração volumétrica de fibra e V_m é a fração volumétrica da matriz.

A partir das frações volumétricas e das propriedades de seus componentes pode-se medir outras propriedades do compósito utilizando a lei das misturas. Por exemplo para o modulo de Young (E) na direção longitudinal:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2)$$

Enquanto na direção ortogonal as fibras o modulo de Young (E):

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \text{ ou } E_c = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + V_m E_f} = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + (1 - V_f) E_f} \quad (3)$$

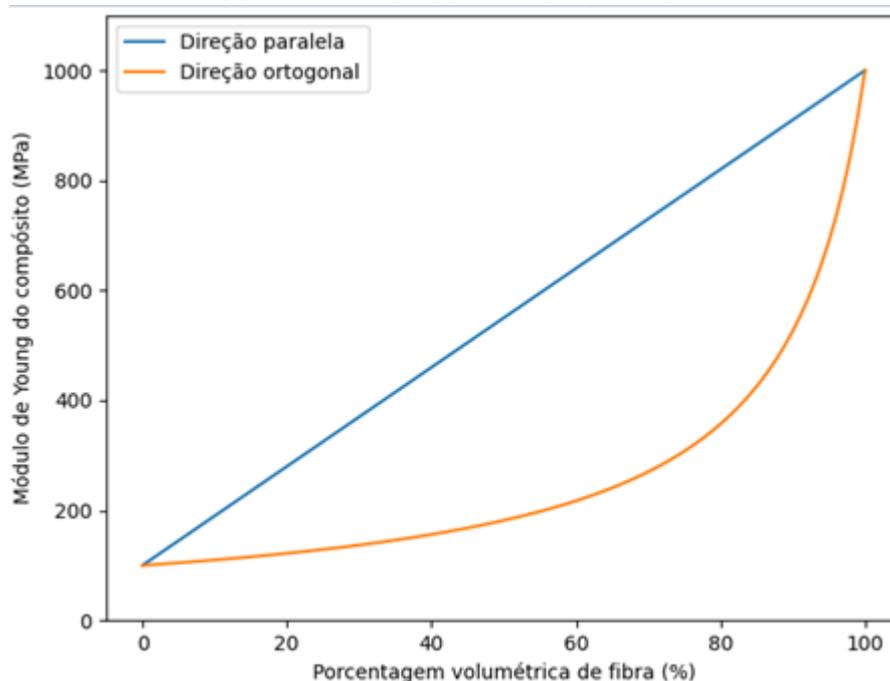
Para uma fração volumétrica V qualquer, onde os índices c , m e f representam o compósito, as fibras e a matriz respectivamente.

Assim, pode-se prever as propriedades do material compósito em função de seus componentes.

Para melhor compreender a diferença entre a resistência do material entre as diferentes direções, a Figura 1 representa um exemplo para um compósito onde a fibra teria um módulo de Young de 1000MPa e a resina de 100MPa. Enquanto as propriedades crescem linearmente com sua porcentagem volumétrica na direção paralelas às fibras, as propriedades na direção ortogonal mantêm um valor próximo aos 100MPa da resina, sendo necessário mais de 55,5% de fibras para chegar a 200MPa.

Na indústria é comum a utilização de 20 a 70% de fibra dependendo do uso e do método de manufatura (Composites, 2024). A proporção de fibra utilizada é de extrema importância, pois ela afeta diretamente no grau de anisotropia do material. Quanto maior a fração de fibra, mais importante é o design do material pois a força a ser aplicada precisa ter uma direção preferencial paralela às fibras ou a adição de fibras não melhora as propriedades mecânicas de forma relevante.

Figura 1 – Valores do módulo de Young do compósito para a direção paralela à fibra e ortogonal à fibra. Valores obtidos para uma fibra de 1000MPa e uma resina de 100MPa utilizando a lei das misturas.



Existem algumas formas contornar o problema da direção preferencial das fibras (Composites, 2024). Estas formas vêm diretamente da maneira que as fibras são posicionadas durante a manufatura do material compósito. As principais disposições são representadas pela Figura 2.

Figura 2 – Principais orientações de deposição de fibras em um material compósito. (a) fibras paralelas; (b) fibras orientadas aleatoriamente; (c) fibras em um plano; (d) fibras orientadas aleatoriamente em um plano

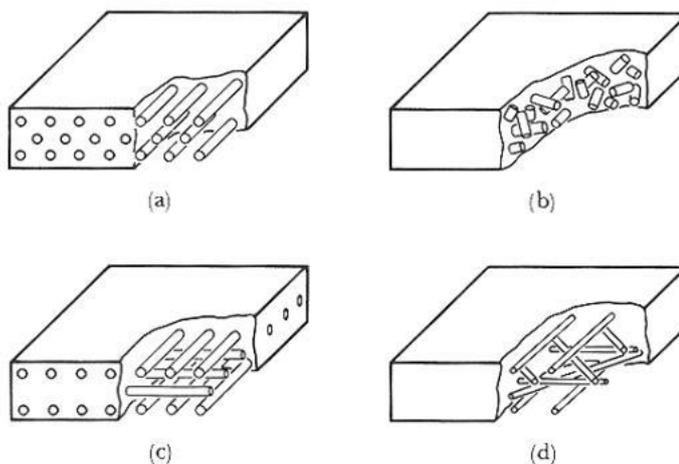


Figura 2, mostra diferentes orientações de fibras. Cada uma das configurações tem suas vantagens e desvantagens. As fibras paralelas entre si apresentam a maior anisotropia das configurações apresentadas. Elas têm uma resistência elevada na direção da fibra, mas uma baixa resistência na direção ortogonal à fibra.

Para diminuir a anisotropia do compósito, pode-se fazer um material com as fibras organizadas aleatoriamente. Isso faz com que o conjunto das fibras e matriz tenha as propriedades muito próximas de um material isotrópico. Esse tipo de configuração normalmente utiliza muito mais fibra que o necessário para as direções de força preferenciais e por isso não são vantajosos se for possível calcular os esforços aplicados no material.

As fibras organizadas de forma paralela e aleatória em um plano são as mais utilizadas na indústria. Elas permitem que se calcule um plano principal de tensão e se deposite as fibras para que elas suportem essa carga sem grande desperdício de fibra na fabricação.

3.2 VASOS DE PRESSÃO

De acordo com a NR-13 (CTPP, 2022) vasos de pressão são "recipientes estanques, de quaisquer tipos, formato ou finalidade, capazes de conter fluidos sob pressões manométricas positivas ou negativas, diferentes da atmosférica [...]". Eles são utilizados em diferentes indústrias como na do petróleo, desde a extração até seu refinamento, para armazenamento e distribuição; na da geração de energia sendo ela termoelétrica ou nuclear; além de diversas indústrias químicas e farmacêuticas (Pandey & Jain, 2018).

Vasos de pressão podem ser produzidos de diversos materiais. Dependendo da sua aplicação, estas podem exigir níveis diferentes de pressão e podem armazenar diferentes fluidos. Dessa maneira, de acordo com a NR-13 (CTPP, 2022), eles podem ser classificados com um nível de periculosidade e conseqüentemente diferentes requisitos técnicos.

Para melhorar as propriedades mecânicas de um vaso de pressão, sem alterar significativamente sua geometria, é necessário alterar as propriedades do material que o compõe. Com esse intuito, desde o final da década de 1970 (JOHNS

& KAUFMAN, 1967), começou-se a utilizar um revestimento de material compósito para diminuir o peso e facilitar o transporte dos vasos.

Hoje existe uma classificação que divide os vasos de pressão em cinco tipos de acordo com seus materiais como demonstrado na Figura 3. Para os tipos II a IV, uma camada de fibra envolve um material selante durante o processo de manufatura. Estes vasos são chamados de *composite overwrapped pressure vessels* (COPV, vasos de pressão compostos revestidos) e podem ser produzidos com uma diversa gama de materiais. Outros tipos de vasos de pressão são os do tipo I, fabricados com somente metais; e o tipo V, conhecido como CPV (*composite pressure vessel, vaso de pressão compósito*), que usam um mandril metálico removível para fornecer o formato do vaso, mas que não fazem parte do produto final, resultando em um vaso composto unicamente do material compósito.

Figura 3 - Tipos de vaso de pressão;



Fonte: Adaptado de Infinity Composites

3.2.1 Vaso de pressão composto revestido (COPV)

Um vaso de pressão composto revestido (COPV) é composto por duas partes, uma camada interna de material metálico ou polimérico, e uma camada de compósito. Estes tipos de vasos são atraentes em comparação ao design tradicional (Figura 4) devido a uma grande melhora na relação entre propriedades mecânicas e o peso (Duell, Wilson, & Kessler, 2008)

Esta característica desejada, adquirida pela baixa densidade do material compósito, traz consigo algumas dificuldades na hora da manufatura. Elas exigem um maior conhecimento do comportamento mecânico da estrutura e um design mais complexo devido à interação dos comportamentos entre as camadas (McLaughlan, Forth, & Grimes-Ledesma, 2011).

Os COPV's podem ser divididos em duas partes, a camada interna composta pelo selante e a externa composta pelo material compósito. O selante tem duas funções nos vasos: ele se comporta como mandril para a deposição da fibra durante a manufatura e; funciona como barreira para evitar o vazamento do fluido pressurizado. Além disso, dependendo do material utilizado, ele pode ser responsável por suportar parte da carga da estrutura. A camada externa de material compósito tem a principal função de suportar a carga gerada pela pressão aplicada sobre o vaso.

3.2.2 Manufatura de COPV

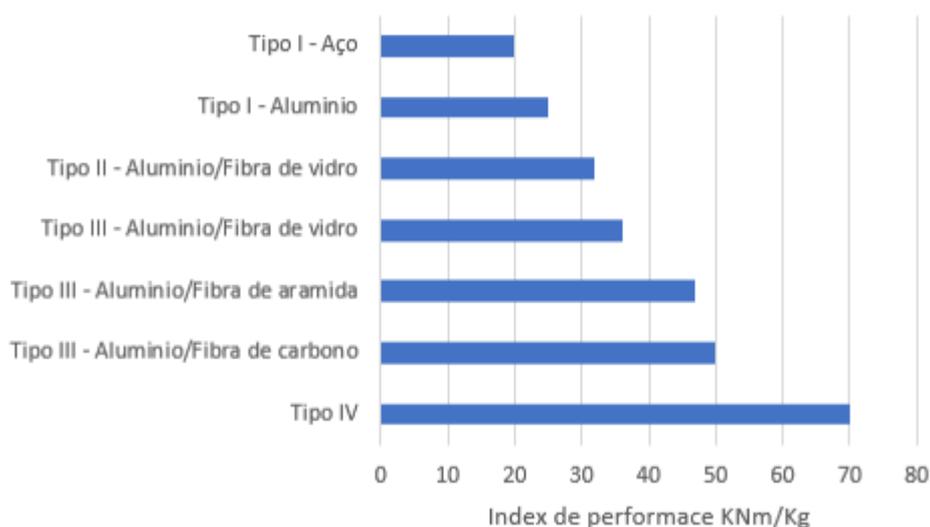
A manufatura de COPV é complexa e exige um processo dividido em várias etapas. Mesmo assim, o processo pode ser explicado simplificadamente como o recobrimento de um material com a função de selante por uma camada de material compósito com função estrutural.

Esta sessão tem o intuito de explicar as nuances de cada parte do processo de manufatura destes vasos de pressão.

3.2.2.1 Camada de material selante

O material selante pode ser fabricado de diversos materiais como ligas de aço, de alumínio e de titânio para tubos do tipo III ou ainda feitos de materiais poliméricos como polietileno de alta densidade (PEAD) para os tubos do tipo IV.

Figura 4 - Comparação entre diferentes tipos de vasos de pressão em função da resistência mecânica sobre a massa



Fonte: Adaptado de Kuhn, Himmel e Maier, 1970

Estes materiais podem ter a função de auxiliar o material compósito a resistir à carga aplicada pela pressão (*load-sharing*), como o caso do titânio, ou não (*non-load-sharing*), como o caso dos polímeros (McLaughlan, Forth, & Grimes-Ledesma, 2011).

Além disso, ele cumpre múltiplas outras funções do processo de fabricação até o produto finalizado, sendo a principal delas a sua utilização como mandril para a deposição do material compósito. Para que um material seja adequado para isto é necessário que ele seja compatível quimicamente com a resina utilizada, que tenha estabilidade térmica e dimensional durante a cura do compósito e que tenha capacidade de aguentar seu peso junto ao do material compósito depositado antes do processo de cura (Bhong, et al., 2023).

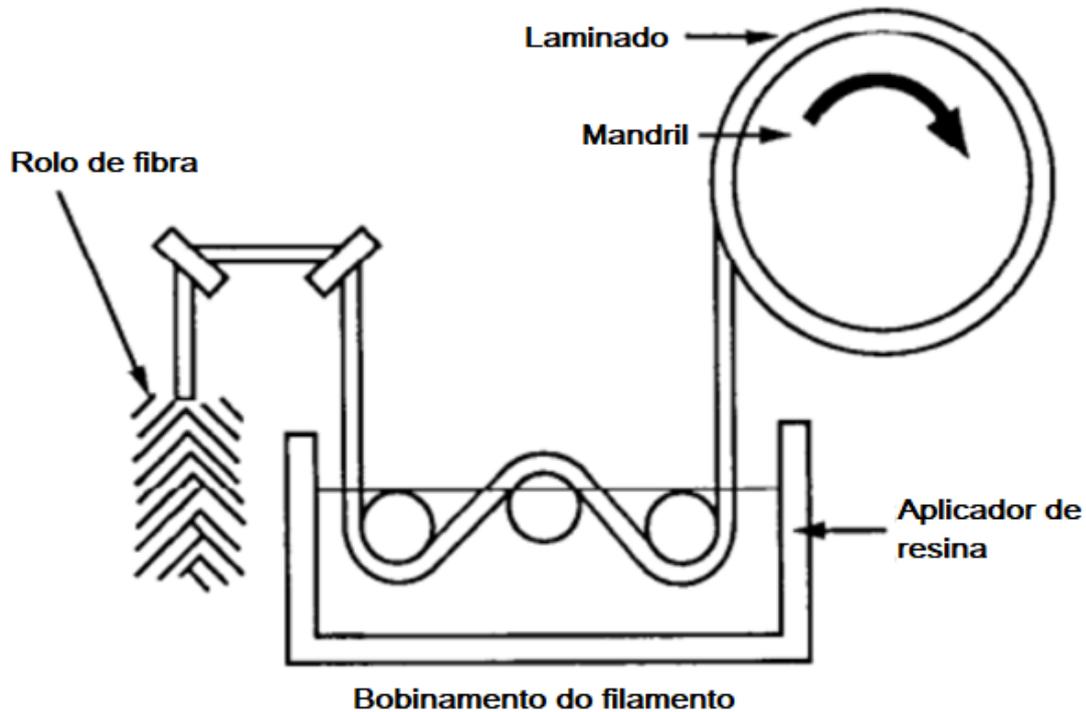
Após a escolha do material do selante, ainda se necessita de conformá-lo para que assuma a geometria desejada como mandril e conseqüentemente a geometria final do interior do vaso. Para isso, alguns processos são recomendados dependendo do material escolhido e do maquinário disponível, tais como estampagem profunda, extrusão inversa e repuxamento manual para materiais metálicos ou extrusão e injeção para materiais poliméricos.

3.2.2.2 Camada de material compósito

A camada mais externa dos vasos de pressão é composta por um material compósito que vem da união de uma fibra com alta resistência mecânica como a fibra de vidro, de carbono ou kevlar, misturada com uma resina polimérica como epóxi, poliéster e poliuretano (McLaughlan, Forth, & Grimes-Ledesma, 2011), como para os FRP. Devido às propriedades anisotrópicas dos materiais compósitos e a seu custo elevado, tem-se como objetivo depositar as fibras de uma maneira que minimize a quantidade necessária de material em função da tensão que o vaso consegue suportar.

Para a fabricação da camada externa de material compósito usada em COPV existem três principais métodos, cada um utilizando um tipo específico de bobinagem. Eles são a bobinagem circunferencial, helicoidal e polar (Al-Qureshi, 1984). De acordo com Al-Qureshi (1984), embora produzam diferentes padrões de bobinagem, todas elas funcionam a partir de um ou múltiplos fios da fibra impregnados na resina que são depositadas sobre um mandril (), sendo elas adjacentes entre si para evitar o escorregamento. Caso as fibras sejam alimentadas através de um banho de resina, o método é chamado de *wet winding* (bobinagem molhada) ou se já forem pré-impregnadas de *dry winding* (bobinagem seca).

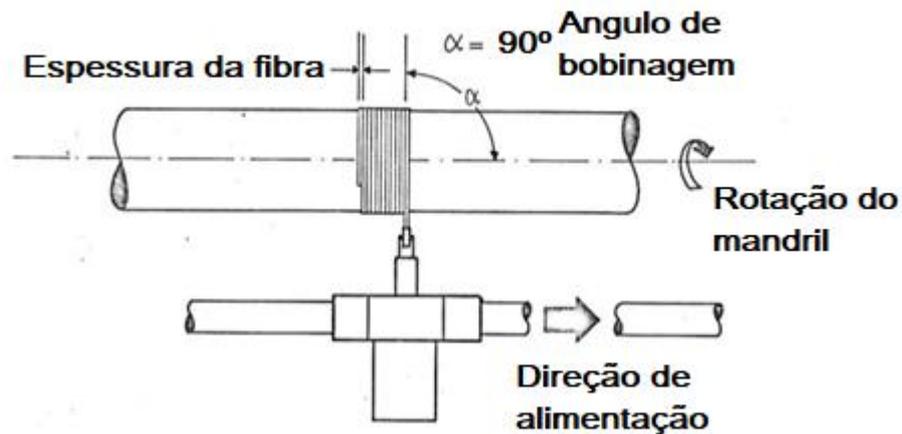
Figura 5 - Diagrama de bobinagem



Fonte: Adaptado de Shen, 1995

Dos tipos de bobinagem, a circunferencial ocorre com o depósito das fibras sobre um ângulo de 90° em relação ao ângulo de rotação do mandril (Figura 6). Devido ao ângulo, a fibra não pode ser depositada dessa forma na região do domo, que acabaria deslizando da sua posição inicial perdendo sua funcionalidade. Vasos de pressão do tipo II utilizam este método de depósito de fibras de forma que só se interessam em envolver a parte cilíndrica do vaso, resultando em uma melhora de desempenho somente na direção circunferencial.

Figura 6– Diagrama de bobinagem circunferencial

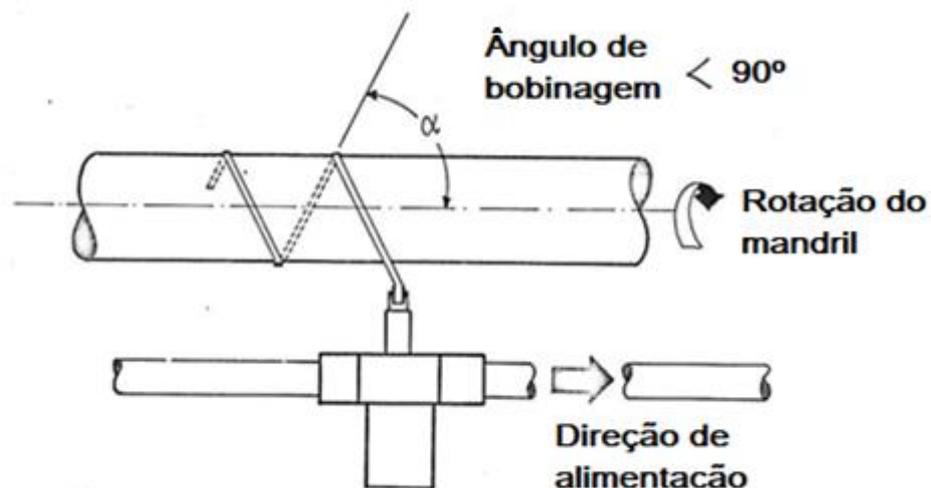


Fonte: Adaptado de Al-Qureshi, 1984

Na bobinagem helicoidal, os filamentos impregnados são depositados sobre um mandril em um ângulo entre 25° e 80° em relação ao eixo de rotação, sendo comumente utilizado o ângulo de $54,7^\circ$ (Al-Qureshi, 1984). Este ângulo de $54,7$ vem da relação de forças aplicadas nas direções radiais e longitudinais e será explicado na sequência, no capítulo referente a materiais e métodos.

Os filamentos dispostos até percorrerem todo comprimento do mandril, depositando as fibras adjacentes entre si. Como as fibras são incorporadas ao redor do domo a geometria do mesmo deve ser um ponto fundamental do design do vaso para manter as fibras alinhadas.

Figura 7 - Diagrama de bobinagem helicoidal



Fonte: Adaptado de Al-Qureshi, 1984

Independentemente do tipo de bobinagem, após a deposição das fibras ocorre um processo de cura do material compósito. Ele deve idealmente ser realizado em um ambiente com temperatura controlada para garantir as propriedades mecânicas desejadas, assim como uma correta junção entre a camada de selante e a de compósito. Este processo adequado de cura é de extrema importância nas propriedades finais do material. Diferenças locais de temperatura geram tensões residuais que alteram as propriedades do material de forma indesejada.

3.2.2.3 Região do domo

Para a região do domo ter uma distribuição uniforme de fibras, garantindo seu alinhamento durante o processo de bobinagem helicoidal, comumente se utiliza uma geometria isotensoidal (tensão uniforme). Além disso, utiliza-se uma geometria geodésica (menor caminho entre dois pontos), resultando em um domo geodésico-isotensoidal. Isto significa que há uma distribuição homogênea de tensão sobre o domo e que as fibras percorrem em linha reta sobre a superfície. Estes dois fatores juntos são pré-requisitos para que não ocorra deslizamento das fibras no domo e seu contorno, assim como facilita a colocação de uma boca de entrada/saída para o vaso de pressão (Al-Qureshi, 1984).

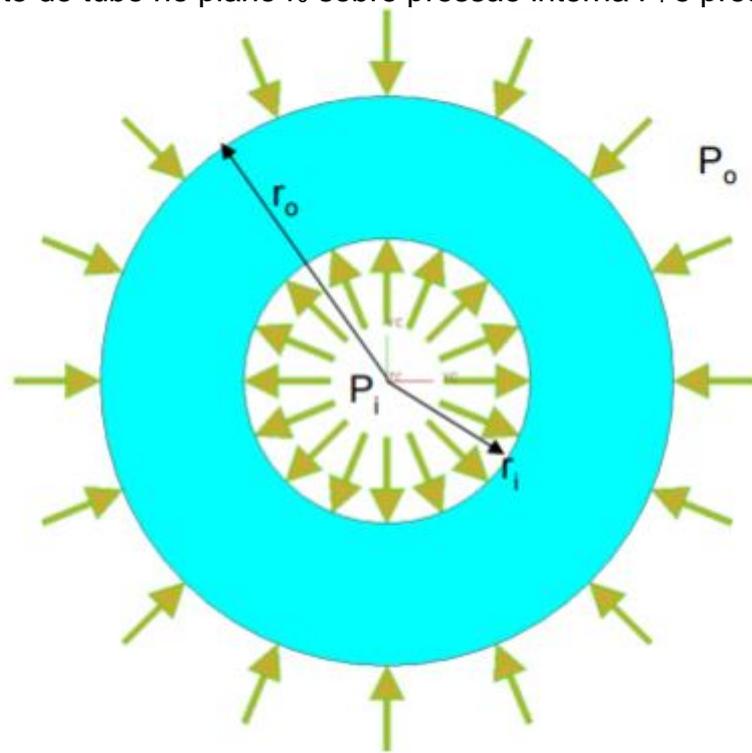
1.2.3 Equacionamento dos vasos de pressão

No século XIX Gabriel Lamé, matemático, físico e engenheiro, partiu das equações de estado sólido dos materiais e desenvolveu uma fórmula para encontrar a distribuição de tensões ao longo da parede do tubo. Essa dedução, conforme (Timoshenko & Goodier, 1970), partiu das hipóteses que:

- A pressão é homogênea sobre toda a superfície
- São ignorados efeitos de extremidade
- Os momentos de inércia podem ser desprezados
- A superfície interna e externa é perfeitamente cilíndrica

Considerando a Figura 8:

Figura 8 - Corte do tubo no plano $r\theta$ sobre pressão interna P_i e pressão externa P_e .



Fonte: Kuhn, Himmel e Maier, 1970

$$u_r = c_1; u_\theta = 0; u_z = c_2 \quad (4)$$

$$\epsilon_r = \frac{du_r}{dr}; \epsilon_\theta = \frac{u_r}{r}; \epsilon_z = \frac{du_z}{dz} \quad (5)$$

$$\gamma_{r\theta} = \gamma_{zr} = \gamma_{\theta z} = 0 \quad (6)$$

A partir da lei de Hooke, considerando nulas as tensões de cisalhamento

$$\sigma_r = \frac{E_m(1-\nu)}{1-\nu-2\nu^2}\epsilon_r + \frac{\nu E_m}{1-\nu-2\nu^2}(\epsilon_\theta + \epsilon_z) \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E_m(1-\nu)}{1-\nu-2\nu^2}\epsilon_\theta + \frac{\nu E_m}{1-\nu-2\nu^2}(\epsilon_r + \epsilon_z) \quad (8)$$

$$\sigma_z = \frac{E_m(1-\nu)}{1-\nu-2\nu^2}\epsilon_z + \frac{\nu E_m}{1-\nu-2\nu^2}(\epsilon_\theta + \epsilon_r) \quad (9)$$

A partir da solução das equações diferenciais, aplicando as condições de contorno, chega-se na solução geral para tubos grossos.

$$A = \frac{r_i^2 P_i - r_e^2 P_e}{r_e^2 - r_i^2} \quad (10)$$

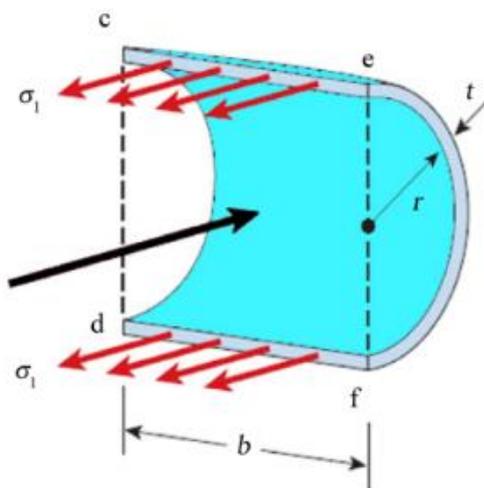
$$B = \frac{(P_i - P_e)r_i^2 r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (11)$$

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2} = \frac{r_i^2 P_i - r_e^2 P_e}{r_e^2 - r_i^2} - \frac{(P_i - P_e)r_i^2 r_e^2}{r^2(r_e^2 - r_i^2)} \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = A + \frac{B}{r^2} = \frac{r_i^2 P_i - r_e^2 P_e}{r_e^2 - r_i^2} + \frac{(P_i - P_e)r_i^2 r_e^2}{r^2(r_e^2 - r_i^2)} \quad (13)$$

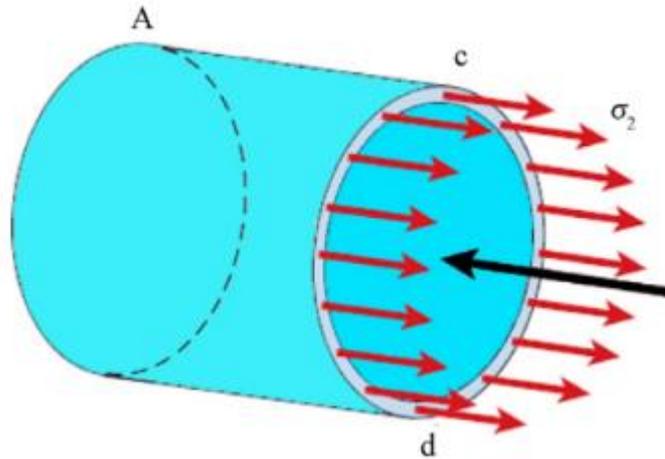
Considerando um vaso de paredes finas com uma espessura $r/t \geq 10$ com uma espessura t onde $r_e = r_i + t$, pode-se realizar uma aproximação à solução de Lamé (Ibrahim, Ryu, & Saidpour, 2015). Essa aproximação consiste em considerar a distribuição da tensão em função do raio constante e fazer uma análise do estado sólido conforme a Figura 9 e Figura 10:

Figura 9 - Distribuições das forças aplicadas sobre o tubo em um corte no plano $z\theta$



Fonte: Ibrahim, Ryu e Saidpour, 2015

Figura 10 - Distribuições das forças aplicadas sobre o tubo em um corte no plano $r\theta$



Fonte: Ibrahim, Ryu e Saidpour, 2015

Na Figura 9,

$$\sigma_h(2bt) = 2(P_i - P_e)br \quad (14)$$

$$\sigma_h = \frac{(P_i - P_e)r}{t} \quad (15)$$

Na Figura 10,

$$\sigma_r(2\pi rt) = (P_i - P_e)\pi r^2 \quad (16)$$

$$\sigma_r = \frac{(P_i - P_e)r}{2t} \quad (17)$$

Assim:

$$\sigma_r = 2\sigma_h \quad (18)$$

A partir dessa relação de forças é possível encontrar o ângulo de deposição das fibras (α) onde as fibras sejam tensionadas uniformemente (Al-Qureshi, 1984).

Para a direção radial (r) e longitudinal (h) e a direção da fibra f , temos:

Para a direção radial:

$$F_r = \sigma_r A_r = (\sigma_f A) \cos(\alpha) \quad (19)$$

como $A = A_r \cos(\alpha)$:

$$\sigma_r = \sigma_f \cos^2(\alpha) \quad (20)$$

Para a direção longitudinal:

$$F_h = \sigma_h A_h = (\sigma_f A) \sin(\alpha) \quad (21)$$

E como $A = A_h \sin(\alpha)$:

$$\sigma_h = \sigma_f \sin^2(\alpha) \quad (22)$$

Assim, a partir das equações 18, 20 e 22:

$$\sigma_r = 2\sigma_h \Rightarrow \sigma_f \cos^2(\alpha) = 2\sigma_f \sin^2(\alpha) \quad (23)$$

$$\frac{\sigma_f \cos^2(\alpha)}{\sigma_f \sin^2(\alpha)} = 2 = \tan^2(\alpha) \quad (24)$$

$$\alpha = 54,75^\circ \quad (25)$$

3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

O vaso de pressão convencional pode ser considerado como de parede fina com a espessura menor que 10% do raio interno (Al-Qureshi, 1984). A partir disso, as equações de Lamé podem ser simplificadas e a variação da tensão dentro das paredes pode ser negligenciado e descrito pelas equações:

$$\sigma_L = Pr/2t ; \sigma_r = Pr/t \quad (26)$$

Onde σ_L e σ_r são a tensão longitudinal e radial respectivamente, P a pressão, r o raio do tubo e t a espessura da parede.

Por causa das propriedades anisotrópicas dos compósitos a análise pode ser realizada de duas formas: uma análise macroscópica baseada nas equações de Hook e uma análise microscópica baseada na organização dos filamentos.

Para uma análise macroscópica, condições de contorno são necessárias. Considerando um vaso pressurizado só internamente, a tensão interna no raio (r_1) é igual ao inverso da pressão interna e zero no raio externo (r_3).

$$\sigma_r = -p \quad \text{para } r = r_1 \quad (27)$$

$$\sigma_r = 0 \quad \text{para } r = r_3 \quad (28)$$

E de acordo com a continuidade da distribuição da tensão radial, o vetor de deslocamento (\vec{u}) e a tensão radial ($\vec{\sigma}_r$) são:

$$\vec{u}(r_2^-) = \vec{u}(r_2^+) \quad (29)$$

$$\vec{\sigma}_r(r_2^-) = \vec{\sigma}_r(r_2^+) \quad (30)$$

E na direção longitudinal:

$$2\pi \int_{r_1}^{r_3} \sigma_z r dr = P\pi r_1^2 \quad (31)$$

Resolvendo as equações acima aplicando as condições de contorno resulta em uma solução para a distribuição de estresse no material conjugado. De qualquer forma, este resultado encontrado pode ainda ser complexo e é mais bem adaptado para a sua resolução por meios computacionais. Dessa forma, o restante deste trabalho utiliza a organização dos filamentos como descrito por Al-Qureshi (1984) que é mais simples e mais facilmente implementado.

Para a análise da distribuição das tensões no compósito é considerado que apenas as fibras recebem a carga, sendo o único propósito da resina de manter as fibras fixas no lugar. O comportamento do metal foi considerado como completamente elástico para a pressão de trabalho após uma primeira pressurização. A primeira pressurização do vaso é feita para aplicar uma carga compressiva que deforma plasticamente o metal, induzindo estresse residual nas paredes do vaso após a depressurização. A espessura do metal foi considerada suficiente onde não ocorra flambagem. (SCI, 1997).

O compósito foi considerado homogêneo, linearmente elástico, e com anisotropia ortotrópica. A pressão aplicada durante a bobinagem da fibra no metal foi considerada zero. A falha foi analisada para a parte cilíndrica do vaso, considerando que a espessura da camada de compósito do domo é maior devido à bobinagem e a não existência de tensões de cisalhamento e flexão devido à geometria (Al-Qureshi, 1984).

Na estrutura conjugada, o metal e o compósito dividem a carga. Considerando que a carga carregada pela resina como negligenciável, pode-se escrever as equações para a carga total do caso para os eixos principais como:

$$\sigma_L t = \sigma_{\alpha L} t_{\alpha} + \sigma_m t_m \quad (32)$$

$$\sigma_r t = \sigma_{\alpha r} t_{\alpha} + \sigma_h t_h + \sigma_m t_m \quad (33)$$

onde $t = t_{\alpha} + t_h + t_m$ é a espessura total. Subscritos α , h , e m representam respectivamente a fibra bobinada na direção helicoidal, na direção radial, e a parte metálica, para a espessura (t) e tensão (σ). Subscritos L e r representam as direções longitudinal e radial respectivamente.

Para esta análise da estrutura representa pelas equações 32 e 33, considera-se que as duas partes do conjugado são independentes. Dessa forma foram desprezados os efeitos da fibra como limitadora na deformação do selante metálico.

Assim foi considerada que a deformação das camadas é continua como descrito pela equação 29.

Assumindo que a mesma fibra é utilizada para a bobinagem longitudinal e circunferencial, onde σ_f é a tensão máxima suportada pela fibra, e M é um fator de correção para os defeitos durante o processo de manufatura chamado de “fator de processamento” (Al-Qureshi, 1984), sendo ele aproximadamente 0.8. Considerando que as fibras são tensionadas uniformemente:

$$\sigma_\alpha = \sigma_c = M\sigma_f \quad (34)$$

O reforço é aplicado para ângulos inferiores à 54.75° (K.T., 1983) em relação ao eixo de rotação. Ao variar o ângulo de bobinagem (α) para várias proporções das diferentes bobinagens, longitudinais ($\sigma_{\alpha L}$) e circunferenciais ($\sigma_{\alpha r}$), diferentes relações de força podem ser descritas por:

$$\sigma_{\alpha L} = \sigma_\alpha \cos^2 \alpha = M\sigma_f \cos^2 \alpha \quad (35)$$

$$\sigma_{\alpha r} = \sigma_\alpha \sin^2 \alpha = M\sigma_f \sin^2 \alpha \quad (36)$$

Isolando a espessura da equação 32 e substituindo a 35

$$t_\alpha = (\sigma_L t - \sigma_m t_m) / M\sigma_f \cos^2 \alpha = P_{eq} r / 2M\sigma_f \cos^2 \alpha \quad (37)$$

onde P_{eq} é a pressão equivalente na transição entre metal e compósito.

A partir das equações 32 e 33, se considerada somente a parte que representa o compósito e considerado o efeito da parte metálica como esta pressão equivalente na superfície entre as duas camadas, temos:

$$\sigma_L t = \sigma_{\alpha L} t_\alpha \quad (38)$$

$$\sigma_r t = \sigma_{\alpha r} t_\alpha + \sigma_h t_h \quad (39)$$

Substituindo as equações 36 e 37 na 39

$$\sigma_r t = 2\sigma_L t = \sigma_\alpha \sin^2 \alpha t_\alpha + \sigma_h t_h \quad (40)$$

$$\sigma_r t = P_{eq} r = \frac{P_{eq} r \sin^2 \alpha}{2 \cos^2 \alpha} + \sigma_h t_h \quad (41)$$

$$t_h = \frac{P_{eq} r}{M \sigma_f (1 - 1/2 t g^2 \alpha)} \quad (42)$$

Para minimizar o uso de fibras se busca otimizar a disposição das diferentes orientações de bobinagem para que a relação de cargas $2\sigma_L = \sigma_r$ seja mantida. Sendo assim, para um conjugado de metal e compósito, a pressão de ruptura pode ser escrita como:

$$P_{max} = \frac{M \sigma_f (t_\alpha + t_h) + \sigma_m t_m}{r} \quad (43)$$

Da equação 13, se considerado σ_m como o limite de elasticidade do metal e $M \sigma_f$ a tensão de ruptura do compósito, é possível encontrar um valor máximo de pressão (P_{max}) que aproxima a pressão máxima suportada pelo vaso para uma dada espessura (t). Assim, dada uma pressão máxima desejada, é possível calcular a partir desta equação a espessura necessária de material compósito.

3.3.1 Parâmetros de simulação

A partir das equações discutidas, uma simulação do vaso de pressão foi realizada para diferentes configurações de geometria e materiais. A parte do mandril foi considerada como composta de uma liga de alumínio de classe aeroespacial (Al6061). Para o material compósito de revestimento foram simuladas diferentes composições fibra de vidro tipo-E, fibra de carbono e fibra de aramida, em conjunto com uma resina epóxi.

As propriedades utilizadas para os materiais utilizado está de acordo com a Tabela 1

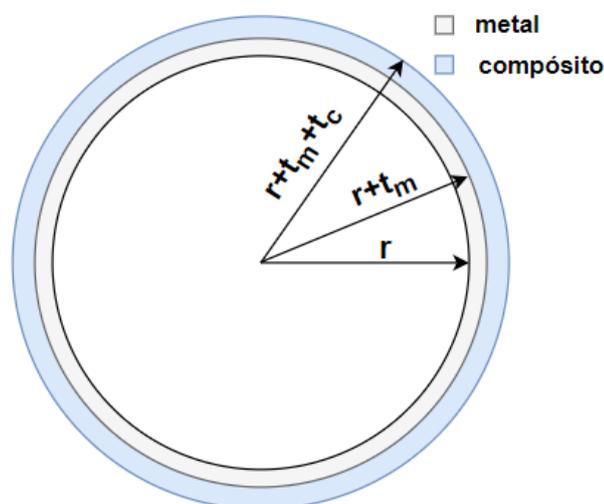
Tabela 1 - Propriedades de diferentes fibras utilizadas na fabricação de compósito.

Reforço	Origem	Massa Volúmica (g cm ⁻³)	Resistência à tração (Gpa)	Módulo de Young (Gpa)	Alongamento na Rotura (%)
Fibra de Carbono	PAN (poliacrilonitrila)	1,8	3,53 – 7,06	230 - 540	0,7 – 2,0
Fibra de Carbono	Petróleo	1,8	0,85 – 2,2	42 - 820	0,2 – 2,1
Fibra de Vidro E	Sintética	2,53 – 2,55	1,5 – 3,7	72 – 76	2,5 – 4,9
Fibra de Vidro S	Sintética	2,48 – 2,49	3,5 – 4,59	86 – 91	2,9 – 5,8
Aramida	Sintética	1,38 – 1,47	2,75	70,5 – 112,4	2,4 – 3,6
Linho	Vegetal	1,5 – 3	0,2 – 0,77	13 – 55	1,8 – 8
Sisal	Vegetal	1,45	0,47 – 0,64	9,4 – 22	2 – 7
Cânhamo	Vegetal	1,47	0,31 – 0,90	30 – 70	1,6 – 4

Fonte: (Fibrenamics, 2024)

Para todas as simulações o valor do raio utilizado é igual ao raio interno para o selante metálico e igual ao raio interno mais a espessura do selante metálico para a parte de compósito. Dessa forma é possível considerar o conjugado metal/compósito como equivalente a dois vasos concêntricos independentes conforme a Figura 11

Figura 11 – Diagrama das paredes do vaso de pressão simulado na parte cilíndrica.



Assim, a análise é focada para três valores de raio. Para $r_1 = r$, sendo o raio interno; $r_2 = r + t_m$, sendo a transição entre os dois materiais e; $r_3 = r + t_m + t_c$, sendo o raio externo. Mantidas as condições de contorno, é possível considerar o conjunto como o equivalente de um vaso puramente metálico para $r_1 \leq r \leq r_2$ e puramente compósito para $r_2 < r \leq r_3$.

Considerando os vasos como independentes é possível calcular, para dada espessura e raio, a pressão suportada pela configuração do selante metálico. Assim, com esse resultado calcular a espessura de material compósito necessária para criar um vaso que suporte a pressão máxima desejada.

Para o equacionamento descrito é considerado que o efeito da adição de uma camada de compósito não interfere nos cálculos da parte de selante metálico. Esta simplificação significaria que a parte metálica poderia se deformar livremente em função da pressão aplicada, o que não é verdade fisicamente. O selante metálico tendo um módulo de Young inferior a fibra teria sua deformação limitada pela deformação da fibra. Este fenômeno seria equivalente a uma pressão externa criada pela fibra na parede do selante metálico e reduz a espessura necessária da parte de compósito.

Como esta interdependência da camada metálica e de compósito é complexa, ela foi ignorada. Considerando que os resultados de espessura encontrados pelo equacionamento descrito serão um pouco mais elevados do que se esta relação fosse considerada, faz sentido considerar essa diferença como um fator de segurança para o vaso de pressão.

O equacionamento da solução segue a seguinte ordem para o cálculo da espessura da camada de compósito:

1. Calcular a pressão que a camada de selante metálico é capaz de suportar P_{metal} onde r é o raio interno r_1 ;

$$P_{metal} = \frac{\sigma_m t_m}{r_1} \quad (44)$$

2. Calcular a pressão equivalente na transição metal/compósito (P_{eq});

$$P_{eq} = P_{max} - P_{metal} \quad (45)$$

3. Calcular a espessura (t_α) para $P = P_{eq}$ e $r = r_2$;

$$t_\alpha = \frac{P_{eq}(r + t_m)}{2M\sigma_f \cos^2 \alpha} \quad (46)$$

4. Calcular a espessura (t_h) para $P = P_{eq}$ e $r = r_2$;

$$t_h = \frac{P_{eq}(r + t_m)}{M\sigma_f(1 - 1/2 \operatorname{tg}^2\alpha)} \quad (47)$$

3 Resultados e Discussão

Para validar o equacionamento da simulação, os resultados da simulação foram comparados com um trabalho anterior de Walter K. Takahashi (K.T., 1983) onde um vaso de pressão similar foi testado em laboratório. Para o trabalho realizado por Walter o mandril foi feito por uma camada metálica de alumínio de classe aeroespacial (Al6061) por extrusão inversa e coberto de uma camada de compósito de epóxi/fibra de vidro tipo-E. A camada de compósito foi bobinada em um ângulo de 13° e a combinação das camadas foram projetadas para suportar 30MPa em um teste hidrostático.

Tendo como base os mesmos parâmetros utilizados no experimento em laboratório, a fibra tem um valor de resistência à tração de 981 MPa na direção de bobinagem (valor inferior encontrado na bibliografia para o mesmo material) e a liga de alumínio de 98 MPa. O mandril foi simulado para uma espessura de 1,4mm e busca-se encontrar a camada de compósito com uma espessura total de 2,88mm, como utilizada no laboratório.

Utilizando as equações para a espessura da camada foi encontrado um valor de 1,34mm para a bobinagem helicoidal e 2,48mm para a bobinagem circunferencial, totalizando 3,82mm. Esse valor encontrado corresponde a uma espessura de 32% superior ao valor utilizado em laboratório. Vale-se ressaltar que a falha em laboratório ocorreu devido ao rompimento da solda no selante metálico e não a uma falha da camada de compósito. Devido a isso não foi possível verificar a pressão necessária para o rompimento da camada de compósito em laboratório.

A Figura 12 mostra a relação da distribuição de carga dentro das paredes do vaso para um mandril metálico de 1,4mm. É visível que a carga dentro da parte metálica (à esquerda da linha vertical) é menor que dentro da parte de compósito (à direita da linha vertical), isso ocorre em função da rigidez do metal ser menor. Essa relação de estresse representada na Figura 12, Figura 13 e Figura 14 mostra que para

a mesma pressão de ruptura de 30MPa, a espessura necessária para um vaso de pressão puramente metálico seria de 21,5mm.

Figura 12– Gráfico distribuição das tensões radial e longitudinal dentro da parede do vaso. Valores à esquerda representam a parte metálica de 1,4mm de espessura e a direita a parte do compósito de 3,82mm.

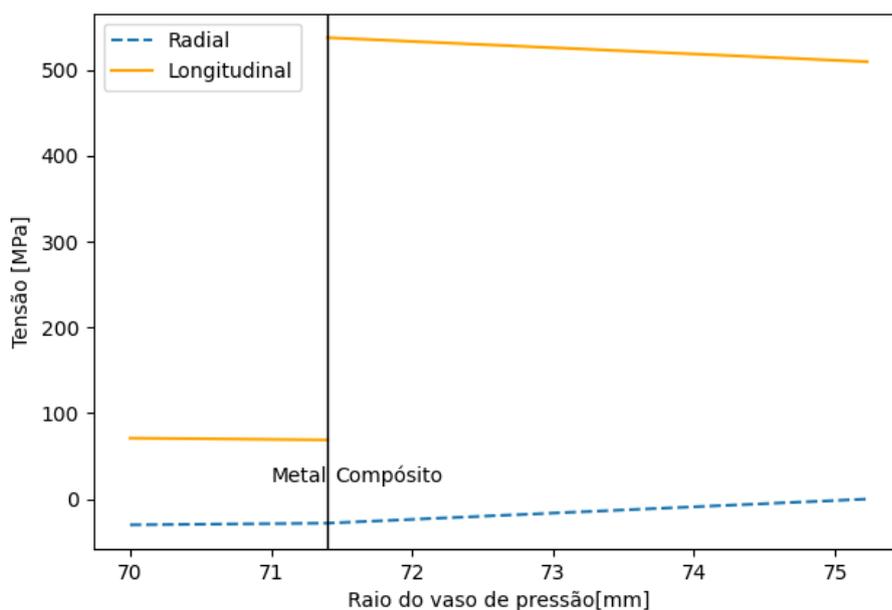


Figura 13– Gráfico da fração de tensões totais (tresca) dentro das diferentes camadas do vaso de pressão em função da espessura do selante metálico.

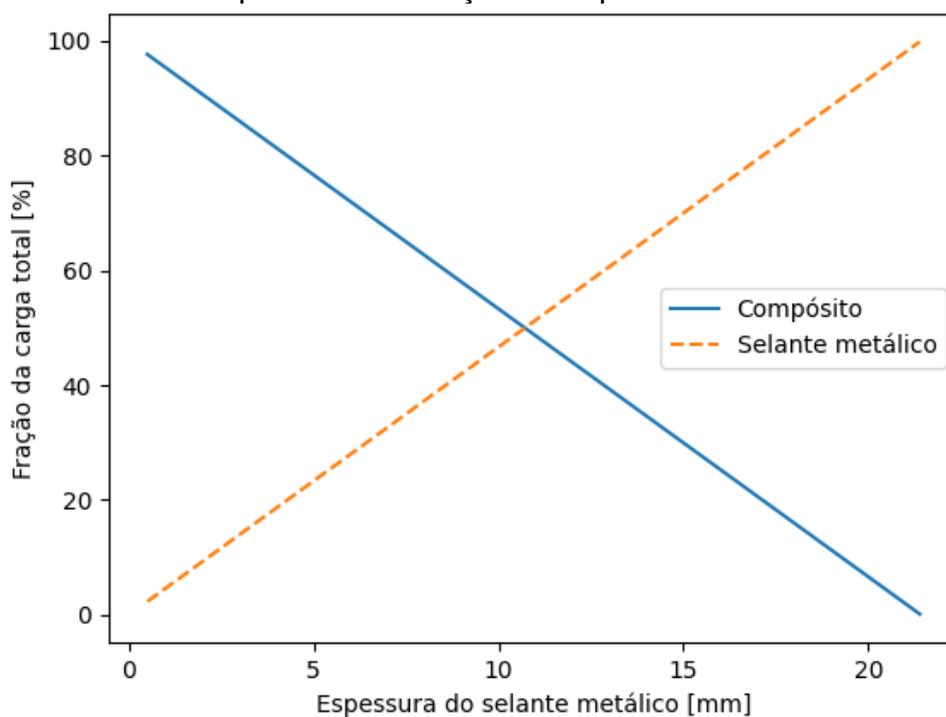
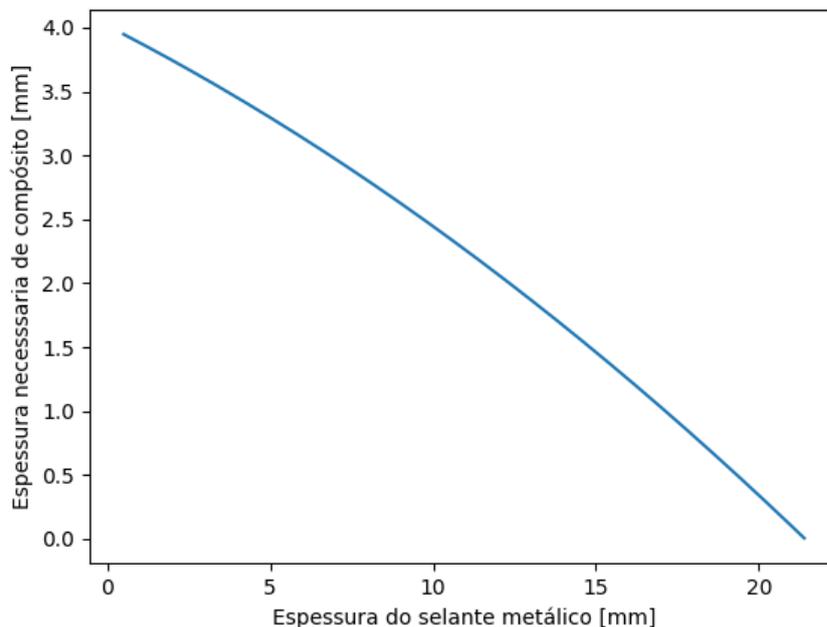
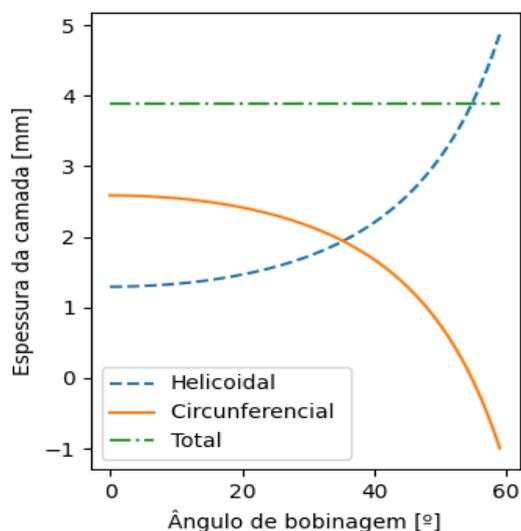


Figura 14 – Gráfico da espessura necessária de material compósito em função da espessura do selante metálico.



O ângulo de bobinagem tem também um grande impacto sobre a espessura das diferentes camadas, mas mantendo constante o total de compósito como apresentado na Figura 15. Esse resultado é facilmente compreensível para o ângulo de 0° , ou seja, as duas camadas sendo ortogonais entre si. Neste ângulo a espessura da camada circunferencial é o dobro da camada helicoidal para a distribuição de carga $2\sigma_L = \sigma_r$.

Figura 15 – Gráfico da relação do ângulo de bobinagem com a espessura da camada de compósito para a bobinagem circunferencial e helicoidal, além de suas somas.

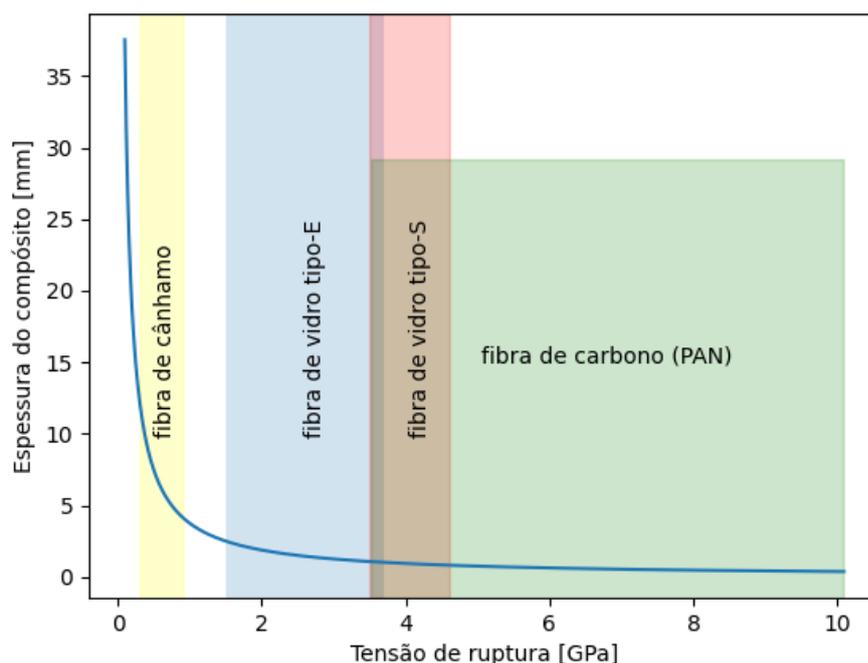


Conforme se aumenta o ângulo de bobinagem, a camada helicoidal passa a contribuir para a resistência na direção radial, mas é necessária uma espessura maior dela para compensar a perda na direção longitudinal. Esse processo continua até o ângulo de $54,7^\circ$ onde a camada helicoidal tem uma distribuição de forças exatamente igual a 2:1 entre as tensões. Neste ângulo, somente ela é necessária para manter o equilíbrio das tensões radiais e longitudinais e a camada circunferencial é nula. Para ângulos superiores a $54,7^\circ$ a camada helicoidal passa da proporção necessária, fortalecendo a camada radial acima do necessário para conseguir suportar a tensão na direção longitudinal. Para manter a igualdade das equações, seria necessária uma espessura negativa na direção circunferencial. Resultado que não tem nenhum sentido físico.

Este resultado indica que a espessura necessária de material compósito é independente do ângulo de bobinagem se a relação de tensões for mantida. Assim é possível comparar diferentes resultados de vasos de pressão construídos de forma similar a partir somente do raio, da espessura total de material compósito e do selante metálico utilizado, junto à propriedade desses materiais.

Dessa forma, pode-se comparar os resultados de diferentes materiais para a fabricação do vaso de pressão como na Figura 16.

Figura 16 – Gráfico da espessura necessária de material compósito em função da tensão de ruptura da fibra para um selante metálico de 1.4mm, pressão interna de 30MPa e raio de 71,6mm.



Dessa análise do compósito, a partir de sua tensão de ruptura, pode-se observar uma grande diminuição na espessura necessária para valores de tensão inferiores a 2,0GPa onde ela tem valor de 1.88mm. Acima desse valor a espessura necessária diminui lentamente sendo necessário 3,6GPa para chegar a uma espessura inferior a 1,0mm.

Ao se diminuir os valores da tensão de ruptura da fibra, a espessura necessária da parede cresce rapidamente. Para uma fibra hipotética de mesma tensão de ruptura que a liga de alumínio utilizada para os cálculos de 98MPa, a espessura necessária da camada de compósito seria de 38,3mm além dos 1,4mm da camada metálica. Esta camada seria mais espessa que para um tubo puramente metálico calculado anteriormente de 21,5mm.

Este resultado é lógico, considerando que a fibra tem uma direção preferencial para o carregamento enquanto o metal sendo ele isotrópico pode ser carregado simultaneamente na direção longitudinal e radial sem detrimento da outra. Para a fibra é necessário que ocorra uma distribuição das forças em que duas partes da tensão total da fibra resistem à força na direção radial enquanto uma parte resiste na direção longitudinal. Isso significa que um material isotrópico, como o caso do selante metálico, que suporta a tensão radial, suportaria igualmente a tensão longitudinal. Enquanto uma fibra precisaria de um acréscimo de espessura para suportar a tensão total.

Ao se observar os resultados do gráfico da Figura 16, encontra-se que a tensão necessária para obter os mesmos 21,5mm de um vaso de pressão puramente metálico seria de 196MPa considerando ainda a presença do selante metálico de 1,4mm. Esse valor de tensão de ruptura ainda é inferior ao encontrado em uma fibra vegetal, como representado pela fibra de cânhamo. Então para as fibras normalmente utilizadas comercialmente é previsto espessuras consideravelmente inferiores.

Vale-se ressaltar que a análise feita não seria precisa para vasos de pressão com paredes de espessura significativas como neste caso. Como visto anteriormente, a simplificação utilizada somente é válida quando a espessura da parede é inferior a 10% do raio. Assim recomenda-se que para a geometria estudada, com o raio de 71,6mm e 1,4mm de selante metálico, que se utilize um compósito com uma tensão de ruptura superior a 700MPa.

Dos resultados demonstrados na Figura 16 é possível calcular o index de performance do vaso de pressão para diferentes materiais compósitos. Para isso é calculada a espessura necessária da parede de acordo com a tensão de ruptura da fibra e com isso, junto a densidade, é calculada o index. Para o caso estudado a formulação é descrita como:

$$Index = \frac{P}{\pi \left(\rho_f (r_3^2 - r_2^2) + \rho_m (r_2^2 - r_1^2) \right)} \quad (48)$$

Onde P é a pressão suportada pelo vaso; ρ_f e ρ_m são a densidade da fibra e do metal respectivamente; r_1 é o raio interno, r_2 é o raio de transição metal/compósito, e r_3 é o raio externo.

Considerando o vaso de pressão de raio interno de 70mm e pressão de 30MPa, um selante metálico de 1,4mm de uma liga de alumino aeroespacial com $\rho_m = 2,81\text{g/cm}^3$ e as propriedades das fibras como descritas na Tabela 2, temos:

Tabela 2 – Index de performance para diferentes materiais conjugados na parede do vaso de pressão

Material da fibra	Densidade (Kg/m ³)	Resistência a tração (Pa)	Espessura de metal (m)	Espessura de compósito (m)	Index de performance (Pa·m/Kg)
Fibra de vidro tipo-E	$2,54 \cdot 10^{-15}$	$2,5 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,502 \cdot 10^{-3}$	$8,63 \cdot 10^6$
Fibra de vidro tipo-S	$2,48 \cdot 10^{-15}$	$4,0 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,938 \cdot 10^{-3}$	$10,72 \cdot 10^6$
Fibra de carbono	$1,8 \cdot 10^{-15}$	$5,0 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,751 \cdot 10^{-3}$	$12,72 \cdot 10^6$
Fibra vegetal	$1,47 \cdot 10^{-15}$	$0,6 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$6,256 \cdot 10^{-3}$	$5,13 \cdot 10^6$
Sem fibra (puramente metálico)	$2,81 \cdot 10^{-15}$	$0,098 \cdot 10^9$	$21,5 \cdot 10^{-3}$	-	$0,97 \cdot 10^6$

Vendo os resultados para os indexes apresentados na Tabela 2, vemos a aplicação de uma camada de compósito reduz consideravelmente a espessura, mas sobretudo melhora consideravelmente a resistência da parede do vaso em relação ao

seu peso. A melhora de mais de 5x na redução do peso, mesmo para a fibra menos resistente, como a vegetal, demonstra a principal vantagem de um material compósito.

4. Conclusão

O sistema de equações micromecânicas se mostrou potencialmente eficaz para prever a espessura necessária para o conjugado compósito/metal. Os resultados simulados foram 32% superiores aos valores encontrados em laboratório em estudos anteriores. Este resultado diferente possivelmente advém da simplificação utilizada, onde a parte metálica é calculada primeiramente e seus resultados são utilizados para definir a espessura necessária de compósito.

A simplificação utilizada se mostrou interessante para a geometria trabalhada, com raio de 71,6mm, para materiais compósitos com uma tensão de ruptura superior a 700MPa para manter válida a hipótese de paredes finas.

A partir dos resultados é possível prever a espessura necessária de material compósito de acordo com os parâmetros do vaso de pressão, sendo eles o raio interno, a espessura de selante metálico, a tensão de escoamento do selante metálico e a tensão de ruptura do material compósito.

Foi-se constatado também que a espessura da camada de compósito é independente do ângulo de bobinagem até 54.7° se utilizado uma mistura de bobinagens circunferencial e helicoidal que mantenham uma distribuição de carga $2\sigma_L = \sigma_r$. Para ângulos de bobinagem acima de 54.7° esta distribuição de carga não pode ser mantida e seria preciso aumentar a espessura além do necessário para ângulos inferiores.

É importante ressaltar que a matriz é considerada como perfeita, sem defeitos e com um volume próximo de 100% de fibra. É assumido que não ocorre falhas na interface da matriz com a fibra e que a distribuição das cargas ocorre perfeitamente entre as fibras. Estas considerações do trabalho não existem em uma situação real. Por isso seria necessário verificar se o fator de processamento (M) considerado é suficiente para compensar esses fatores ou se ele precisa ser modificado.

O uso de materiais compósitos para auxiliar no suporte da carga e diminuição do peso se mostrou eficaz, como representado pelo index de performance calculado. O uso de uma fibra de vidro tipo-E, que é mais barata e acessível no Brasil (ALMACO, 2022), mostrou melhora da espessura total de 21,5mm para 2,9mm em comparação

a um vaso puramente metálico. Além disso se obtém uma redução no peso para 11% do valor de um vaso metálico para a mesma pressão.

REFERÊNCIAS

- ABERKO. (2024). *Historia e criação da norma para vasos de pressão ASME: The American Society of Mechanical Engineers*. Fonte: <https://www.vasodepressao.com.br/norma-asme-vasos-de-pressao>
- Alhashmy, H. (2012). Fabrication of Aluminium Matrix Composites (AMCs) by Squeeze Casting Technique Using Carbon Fiber as Reinforcement.
- ALMACO. (2022). *Indicadores de desempenho ALMACO - Agosto 2022*. Fonte: <https://almaco.org.br/wp-content/uploads/2023/08/Indicadores-de-desempenho-ALMACO-Agosto-2022.pdf>
- Al-Qureshi, H. A. (1984). *Composite Materials: Fabrication and Analysis*. ITA.
- ArtVac. (s.d.). *História da Embalagem e sua evolução até hoje*. Fonte: <https://artvac.com.br/historia-da-embalagem-e-sua-evolucao-ate-hoje/>
- Barreto, R., Martinez, O., Shakhmatov, A., Stachowiak, J., Howie, W., & Badrak, R. (2020). Corrosion-Fatigue Assessment of Martensitic Stainless Steel and High Strength Low Alloy Steel Sucker Rod Materials in Harsh Environments. *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference*.
- Bhong, M., Khan, T. K., Devade, K., Sreekanth, S., Krishna, B., Eftikhaar, H., . . . Gupta, N. (2023). Review of composite materials and applications. *Materials Today: Proceedings*.
- Composites, E. (2024). *Basic Numbers and Calculations for Composites*. Fonte: <https://explorecomposites.com/articles/design-for-composites/basic-numbers-and-calculations-for-composites/>
- CTPP, C. T. (2022). *NR-13 – CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO*. Brasília.
- Duell, J., Wilson, J., & Kessler, M. (2008). Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85, pp. 782-788. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.08.001>
- Duell, J., Wilson, J., & Kessler, M. (2008). Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 782-788.
- Fibrenamics*. (7 de 10 de 2024). Fonte: <https://www.fibrenamics.com/intelligence/reports/materiais-compositos-o-que-sao-e-quais-as-suas-propriedades>

- Gurit. (20 de 08 de 2023). *Gurit*. Fonte: Gurit: <https://www.gurit.com/wp-content/uploads/2022/12/guide-to-composites-1.pdf>
- Ibrahim, A., Ryu, Y., & Saidpour, M. (2015). Stress Analysis of Thin-Walled Pressure Vessels. *Modern Mechanical Engineering*.
- Infinity Composites. (12 de 10 de 2022). *Vasos de pressão de compósito e estruturas*. Fonte: Infinity Composites: <https://www.infinitecomposites.com/>
- JOHNS, R., & KAUFMAN, A. (1967). Filament-overwrapped metallic cylindrical pressure vessels. *Journal of Spacecraft and Rockets*, pp. 872-877.
- K.T., W. (1983). Comportamento de vasos de pressão de material conjugado e selante metálico sob pressão interna . *COBEM, 7º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*.
- Kuhn, M., Himmel, N., & Maier, M. (1970). Design and analysis of full composite pressure vessels. *WIT Transactions on Engineering Sciences*.
- McLaughlan, P., Forth, S., & Grimes-Ledesma, L. (2011). *Composite overwrapped pressure vessels, a primer*.
- Nepin. (2024). *Conheça os Materiais compósitos e as suas aplicações na indústria*. Fonte: <https://www.nepin.com.br/blog/solucoes-industriais/conheca-os-materiais-compositos-e-as-suas-aplicacoes-na-industria/>
- Ngo, T.-D. (2020). Introduction to Composite Materials. *Composite and Nanocomposite Materials*.
- Pandey, J., & Jain, A. (2018). A Review on “Performance Analysis of Pressure Vessel with various stiffener”.
- Pandit, S., & Sinha, M. (2012). Design and Burst Pressures Analysis of CFRP Composite Pressure Vessel for Various Fiber Orientations Angles.
- PINTO-COELHO, R. M., & HAVENS, K. (2016). Crise nas Águas cap.2. Em *Gestão de recursos hídricos em tempos de crise* (p. 240). Porto Alegre: Artmed.
- Rahul, B., Chand, D., & Dharani, J. (2021). A comprehensive review on the performance analysis of composite overwrapped pressure vessels. *Engineering and Applied Science Research*, pp. 272-287.
- Rodrigo, A. (2024). *Vasos de Pressão: Entendendo a Definição, os Padrões de Segurança e a História por Trás desses Componentes Essenciais*. Fonte: EngitechBR: <https://engitechbr.com/2023/09/09/vasos-de-pressao-entendendo-a-definicao-os-padroes-de-seguranca-e-a-historia-por-tras-desses-componentes-essenciais/>

- SCI. (1997). *SCI Special Report Number 77250, Composite Pressure Vessels for Aerospace and Commercial Applications*. California.
- Shen, F. (1995). A filament-wound structure technology overview. *Materials Chemistry and Physics*, pp. 96-100.
- Timoshenko, S., & Goodier, J. (1970). *Theory of Elasticity*. Mc-Graw-Hill.
- YENA. (s.d.). *A BRIEF INTRODUCTION TO PRESSURE VESSELS*. Fonte: YENA Engineering: <https://yenaengineering.nl/a-brief-introduction-to-pressure-vessels/>