



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Departamento de Engenharia Mecânica

Bacharel em Engenharia Mecânica

ALYSSON FELIPE LUIS ALVES DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NO PROJETO DE VASOS
DE PRESSÃO PARA ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE**

Recife

2023

ALYSSON FELIPE LUIS ALVES DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NO PROJETO DE VASOS
DE PRESSÃO PARA ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa

Recife

2023

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Danielle Castro da Silva CRB4/1457

S586u
2023

Silva, Alysson Felipe Luis Alves da

Utilização do método de elementos finitos no projeto de vasos de pressão para armazenamento de hidrogênio verde. / Alysson Felipe Luis Alves da Silva. --- Recife: O autor, 2023.
59f. il. Color.

Trabalho de Conclusão (Curso Superior Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

Inclui Referências.

Orientador: Professor Dr. José Ângelo Peixoto da Costa

1. Compósitos. 2. Elementos finitos. 3. Hidrogênio verde. 4. Vasos de pressão I. Título. II. Costa, José Ângelo Peixoto da (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NO PROJETO DE VASOS
DE PRESSÃO PARA ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE**

Trabalho aprovado. Recife, 25 jul. 2023.

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa
(professor orientador)

Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo
(examinador externo)

Prof. Dr. Frederico Duarte de Menezes
(examinador interno)

Recife

2023

À minha Família em especial minha mãe e irmã que sem elas eu jamais chegaria até aqui.

AGRADECIMENTOS

Não possuo palavras suficientes para agradecer todo o enorme esforço, carinho e amor que só uma mãe pode proporcionar ao seu filho. Obrigado por toda dedicação em proporcionar a mim e a minha irmã o melhor que se podia alcançar, para que pudéssemos desfrutar de tudo o que não pôde. Esse momento, com certeza, é um marco de toda essa dedicação.

Aos amigos de perto e de longe que com certeza fazem parte desse momento sempre vão estar no meu coração.

Em especial ao meu orientador, professor, coordenador, inspiração pessoal e profissional e amigo, por sempre colaborar e estar presente para ajudar em todas as situações, sem ele chegar até aqui com certeza teria sido mais doloroso.

A todos que participaram desses anos de forma direta ou indireta.

RESUMO

Ao longo dos anos, o planeta tem passado por grandes mudanças climáticas, em grande parte causadas pelo efeito estufa, que decorre da utilização em larga escala de combustíveis fósseis. Por isso, tornou-se cada vez mais urgente o avanço das tecnologias no setor energético renovável, a fim de minimizar os impactos ambientais causados pelo uso desses combustíveis. Nos últimos anos, o Hidrogênio Verde tem ganhado destaque como fonte de energia renovável. No entanto, diante dos muitos desafios para a sua utilização em massa como combustível, além da produção e transporte, encontra-se o armazenamento. Para ser eficaz, o hidrogênio necessita estar, de modo geral, em pressões em torno ou acima de 70 MPa, tornando assim os vasos de pressão projetados com materiais comumente utilizados, como o aço carbono, completamente inviáveis devido à grande espessura da parede, peso e alto custo. Além de ser um fator crucial na viabilidade do uso do hidrogênio, os vasos de pressão desempenham um papel estratégico ao lidar com as variações sazonais de outras fontes de energia renovável, como a energia solar e eólica. Esses recipientes são fundamentais do ponto de vista econômico e social, pois possibilitam a exportação do hidrogênio entre países para atender às necessidades energéticas da população em geral. Como resultado, a tecnologia de armazenamento é essencial para impulsionar a transição energética e alcançar um futuro mais sustentável. Nesse contexto, este trabalho visa estudar e simular vasos de pressão feitos de materiais compósitos usando a técnica de elementos finitos e o critério de falha de Tsai-Wu. Todo o estudo segue as normas vigentes, e foram utilizados os softwares SOLIDWORKS e ANSYS. Este trabalho demonstrou que os vasos de pressão *Composite Overwrapped Pressure Vessels* (COPV) têm um potencial significativo para armazenar hidrogênio verde em altas pressões. O critério de falha de Tsai-Wu mostrou-se adequado para projetos com materiais compósitos. Esses resultados fortalecem a importância dos COPV para o armazenamento de hidrogênio verde, respaldando o uso de tecnologias renováveis e impulsionando a busca por um futuro mais limpo e livre de emissões de carbono.

Palavras-chave: Compósitos; elementos finitos; hidrogênio verde; vasos de pressão.

ABSTRACT

Over the years, the planet has undergone significant climate changes, caused by the greenhouse effect resulting from the widespread use of fossil fuels. Therefore, the advancement of renewable energy technologies has become increasingly urgent to minimize the environmental impacts caused using these fuels. In recent years, Green Hydrogen has gained prominence as a renewable energy source. However, facing numerous challenges in its mass utilization as a fuel, including production, transportation, and storage, presents a significant obstacle. For it to be effective, hydrogen needs to be maintained at pressures around or above 70 MPa, rendering pressure vessels designed with commonly used materials like carbon steel completely unviable due to their large wall thickness, weight, and excessive cost. Moreover, besides being a crucial factor in the viability of hydrogen use, pressure vessels play a strategic role in dealing with seasonal variations of other renewable energy sources such as solar and wind energy. From an economic and social standpoint, these vessels are fundamental as they enable the export of hydrogen between countries to meet the energy needs of the general population. As a result, storage technology is essential to drive the energy transition and achieve a more sustainable future. In this context, this work aims to study and simulate pressure vessels made of composite materials using the finite element method and Tsai-Wu failure criterion. The entire study follows current standards, and the SOLIDWORKS and ANSYS software have been employed. This study has demonstrated that Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPV) have significant potential for storing green hydrogen at high pressures. The Tsai-Wu failure criterion has proven suitable for composite material designs. These results reinforce the importance of COPVs for green hydrogen storage, supporting the use of renewable technologies and propelling the pursuit of a cleaner, carbon-free future.

Keywords: Composites. Finite elements. Green hydrogen. Pressure vessels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Investimentos energéticos globais em fontes renováveis e combustíveis fósseis em bilhões de dólares.....	15
Figura 2 - Matriz energética mundial	16
Figura 3 - Matriz energética brasileira	19
Figura 4 - Classificações do hidrogênio e características do processo de produção.....	22
Figura 5 - Princípio da Eletrólise da água	24
Figura 6 - Representação dos Vasos de Pressão tipo I, II, III, IV e V	28
Figura 7 - Esquema do processo de fabricação enrolamento de fibras (Wet)...	31
Figura 8 - Padrões utilizados no enrolamento de fibras	32
Figura 9 - Classificação dos materiais compósitos	34
Figura 10 - Tipos de reforços para compósitos. (a) Reforço de partículas. (b) Reforço de fibras descontínuas. (c) Reforço de fibras contínuas. (d) Reforço de folhas.....	35
Figura 11 - Parâmetros de resistência de uma lâmina.....	37
Figura 12 - Geometria do liner. (a) Dimensões do liner retiradas da literatura. (b) 3D do liner desenhado no SolidWorks.....	41
Figura 13 - Malha do liner	43
Figura 14 - Superfície de referência extraída do liner para deposição das camadas de filamento no ACP	44
Figura 15 - Ângulo das camadas de enrolamento de aro (90°)	44
Figura 16 - Ângulos das camadas de enrolamento helicoidal (-11,54° e 11,54°)	45
Figura 17 - Esquema de projeto no Workbench	45
Figura 18 - Malha gerada do modelo de camadas em compósito com refinamento nas regiões de transição entre a parte cilíndrica e de domo	46
Figura 19 - Condições de contorno aplicadas A- Suporte fixo, B- Suporte com deslocamento e C- Pressão interna.....	46
Figura 20 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na seção transversal do vaso de pressão	47
Figura 21 - Resultado da região de drop-off	48
Figura 22 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na primeira camada do enrolamento helicoidal	48
Figura 23 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na camada intermediária do enrolamento helicoidal.....	49
Figura 24 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na última camada do enrolamento helicoidal	50
Figura 25 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na primeira camada do enrolamento de aro.....	51

Figura 26 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na camada intermediária do enrolamento de aro	51
Figura 27 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na última camada do enrolamento de aro	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedade da gasolina comum, metanol, etanol e hidrogênio.....	17
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de armazenamento de hidrogênio	25
Tabela 3 - Comparação entre os diferentes tipos de vasos de pressão	30
Tabela 4 - Propriedades da Fibra de Carbono Epóxi Prepreg	42

LISTA DE ABREVIATURAS

ACP	Ansys Composite Prepost
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWE	Eletrolise de Água Alcalina
CAD	Computer-aided design
CGH ₂	Hidrogênio Comprimido
CMCs	Compósitos de Matriz Cerâmica
COPV	Composite Overwrapped Pressure Vessel
CTD	Composites Technology Development Inc.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPT	Estado Plano de Tensão
FEA	Finite Element Analysis
GEE	Gases do Efeito Estufa
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
IEA	International Energy Agency
LH ₂	Hidrogênio Líquido
MEC	Células de Eletrólise Microbiana
O ₂	Oxigênio
PEM	Proton Exchange Membrane
PMCs	Compósitos de Matriz Polimérica
SMC	Compósito de Modelagem em Folha
SOE	Eletrólise de Dióxido Sólido
USD	United States Dollar

LISTA DE SÍMBOLOS

E_1	Módulo de elasticidade longitudinal às fibras
E_1	Módulo de elasticidade longitudinal às fibras;
E_2	Módulo de elasticidade transversal às fibras;
F_I	Tensores de forças relacionados às propriedades do compósito
F_{ij}	Tensores de forças relacionados às propriedades do compósito
G_{12}	Módulo de cisalhamento
G_{12}	Módulo de cisalhamento;
P_{burst}	Pressão de burst
X_c	Resistência à compressão na direção da fibra
X_t	Resistência à tração na direção da fibra
Y_c	Resistência à compressão na direção transversal da fibra
Y_t	Resistência à tração na direção transversal da fibra
r_0	Menor raio do vaso de pressão
$t_{helical}$	Espessura da camada de filamento helicoidal
t_{hoop}	Espessura da camada de filamento de aro
γ_{12}	Deformação cisalhante global
γ_{12}	Deformação cisalhante global;
ε_1^C	Deformação por compressão longitudinal às fibras;
ε_1^T	Deformação por tração longitudinal às fibras;
ε_2^C	Deformação por compressão transversal às fibras;
ε_2^T	Deformação por tração transversal às fibras;
σ_1	Tensão do laminado na direção da fibra
σ_1^C	Resistência à compressão na direção longitudinal às fibras

σ_1^T	Resistência à tração na direção longitudinal às fibras
σ_2	Tensão do laminado transversal à direção da fibra
σ_2^C	Resistência à compressão na direção transversal às fibras
σ_2^T	Resistência à tração na direção transversal às fibras
σ_f	Resistência a tração longitudinal do material
τ_{ij}	Tensão de cisalhamento do laminado
S	Tensão de cisalhamento limite
r	Raio da seção transversal do vaso de pressão

SUMÁRIO

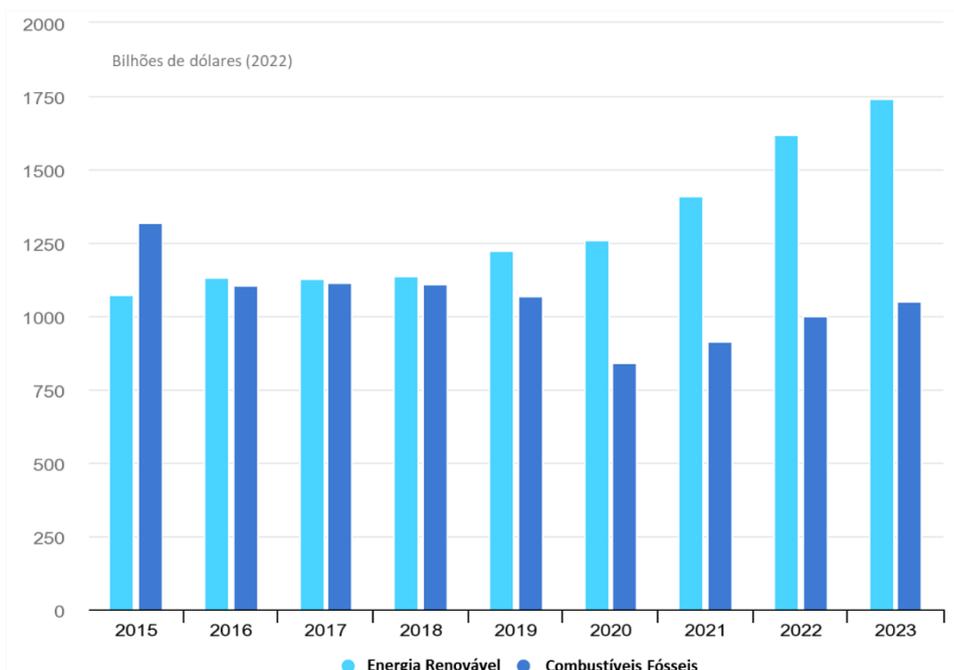
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	18
1.2 Objetivo Geral	19
1.3 Objetivos Específicos	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Hidrogênio	21
2.2 Hidrogênio Verde	22
2.3 Produção do Hidrogênio Verde	22
2.3.1 Eletrólise da Água	23
2.4 Armazenamento	24
2.4.1 Hidrogênio Líquido	25
2.4.2 Hidretos Metálicos	26
2.4.3 Armazenamento Geológico	27
2.4.4 Gás Comprimido	27
2.5 Vasos de Pressão	28
2.6 Enrolamento de Fibras (<i>Filament Winding</i>)	31
2.6.1 Dimensionamento do enrolamento de fibras	33
2.7 Materiais Compósitos	34
2.7.1 Teoria Clássica dos Laminados	36
2.8 Critério de Falha	36
2.8.1 Critério de Falha de Tsai-Wu	39
3 METODOLOGIA	41
3.1 Características do Liner	41
3.2 Camadas de Compósito	42
3.3 Finite Element Analysis	43
4 RESULTADOS E ANÁLISE	47
5 CONSIDERAÇÕES	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos séculos, o planeta Terra tem passado por uma série de transformações climáticas significativas. O aquecimento global, principalmente causado pelo aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. A atual compreensão dos efeitos causados pelo CO₂ e outros gases poluentes deixa clara a urgência em adotar medidas para mitigar as emissões e buscar soluções sustentáveis.

No âmbito das políticas globais, 196 países assinaram o Acordo de Paris em 12 de dezembro de 2015. O objetivo principal desse acordo é limitar o aumento da temperatura global a um patamar bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, buscando alcançar preferencialmente 1,5°C, comparando-se com os níveis pré-industriais, até o ano de 2050 (NATIONS, 2020). No gráfico abaixo é possível observar que no período 2015-2023 os investimentos globais em fontes renováveis aumentaram pouco mais de USD 500 Bi (2022) e desde o ano de 2016 se tornaram maiores que os investimentos em combustíveis fósseis (IEA, 2023).

Figura 1 - Investimentos energéticos globais em fontes renováveis e combustíveis fósseis em bilhões de dólares

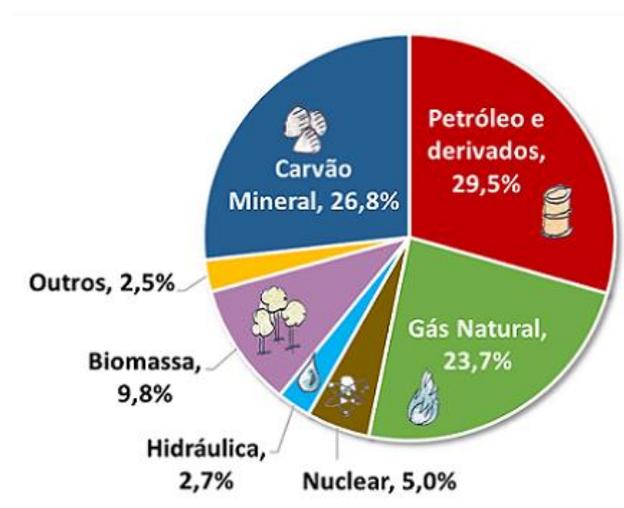


Fonte: Adaptado de IEA, 2023

Além do acordo de Paris, o Parlamento Europeu e o Conselho de Diretrizes Renováveis estabeleceram uma meta para 2030 de alcançar 32% de energia proveniente de fontes renováveis. Essa meta, além de contribuir para a sustentabilidade energética, é fundamental para atingir os objetivos globais de redução de emissões de carbono. Para cumprir esse desafio é necessário a “eletrificação da economia”, ou seja, a adoção generalizada de combustíveis descarbonizados, que minimizam ou eliminam a emissão de gases de efeito estufa. Ao substituir os combustíveis fósseis tradicionais por fontes renováveis, como a energia eólica, solar, hidrelétrica e biomassa, é possível garantir uma transição efetiva para uma matriz energética mais limpa e sustentável (IBERDROLA, 2022).

Atualmente, o mundo enfrenta o desafio de depender principalmente de fontes não renováveis na sua matriz energética, conforme ilustrado na Figura 2. A grande maioria dessas fontes é composta por derivados de petróleo, gás natural e carvão mineral, totalizando 80% da matriz energética global. Por outro lado, as fontes renováveis contribuem apenas com 15% do total e incluem energia solar, eólica, hidrelétrica, biomassa e geotérmica (EPE, 2022). Essa grande diferença ressalta a necessidade urgente de promover uma transição para uma matriz energética limpa, visando reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais negativos associados a eles.

Figura 2 - Matriz energética mundial



Fonte: EPE, 2022.

Com as metas estabelecidas para a limitação do aumento da temperatura global e aumento do uso de fontes de energias renováveis, o interesse pelo hidrogênio verde tem crescido significativamente, pois seu uso como combustível libera apenas água e energia térmica no processo de combustão, ou seja, zero emissões de carbono (MAŁACHOWSKA *et al.*, 2022). O hidrogênio possui três vezes mais energia por quilograma do que qualquer hidrocarboneto, que são os principais componentes do petróleo e do gás natural (ESSS, 2022). Com o avanço da tecnologia, o hidrogênio verde está se tornando cada vez mais economicamente atrativo e oferece diversos benefícios ambientais. No entanto, existem desafios a serem superados antes que seu uso generalizado como combustível seja possível. Um desses desafios é a baixa densidade de energia do hidrogênio, que é inferior a um terço por unidade de volume em comparação ao gás natural (ESSS, 2022). Isso significa que o hidrogênio precisa estar sob alta pressão para ocupar menos espaço e ser viável e eficiente como combustível no dia a dia. A Tabela 1 mostra dados comparativos entre diferentes combustíveis e o hidrogênio.

Tabela 1 - Propriedade da gasolina comum, metanol, etanol e hidrogênio.

Propriedade	Gasolina	Metanol	Etanol	Hidrogênio
Fórmula Química	Várias	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	H ₂
Oxigênio por massa [%]	0	50	34,8	0
Densidade* [kg/m ³]	740	790	790	0,08
Energia por volume [MJ/m ³]	31700	15900	21900	10
Energia por massa [MJ/kg]	2,95	3,12	3,01	3,51
Ponto de ebulição a 1 bar [°C]	25-215	65	79	-253
Emissões específicas de CO ₂ [g/MJ]	73,95	68,44	70,99	0

*Com uma temperatura de 20°C e pressão de 101325 Pa

Fonte: Adaptado de VANCOILLIE *et al.*, 2012.

Os vasos de pressão são componentes importantes para várias etapas do processo fabril das indústrias. As principais indústrias que se utilizam dos vasos de pressão são as refinarias de petróleo, petroquímicas, indústrias farmacêuticas, químicas, térmicas, setor energético etc. Por se tratar de processos de alta responsabilidade é necessária uma maior confiabilidade no projeto desses

componentes, pois essas indústrias trabalham em regime contínuo (24 horas por dia 7 dias na semana), os equipamentos são interligados, portanto a falha de apenas um desses pode ocasionar a parada de toda a planta e por consequência grandes prejuízos financeiros. Gases a alta pressão são perigosos por si só, porém parte dos fluidos utilizados nos processos fabris são tóxicos, inflamáveis ou explosivos, portanto a falha pode ocasionar acidentes com maiores proporções e com uma grande perda de vidas.

Na sua grande maioria, em casos de grande responsabilidade, os vasos de pressão são fabricados de forma individual, portanto seu projeto precisa ser pensado do zero e é necessário levar em consideração não só os componentes como válvulas, bocais e suportes, mas também o material, a fim de reduzir o custo e o peso do produto acabado e garantir uma alta confiabilidade.

Neste trabalho será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre hidrogênio verde e seu impacto e importância na transição energética para um futuro mais sustentável. Também será apresentada a diferença entre os tipos de vasos de pressão disponíveis para armazenamento do hidrogênio verde, assim como as equações, cálculos e simulação FEA de um desses recipientes.

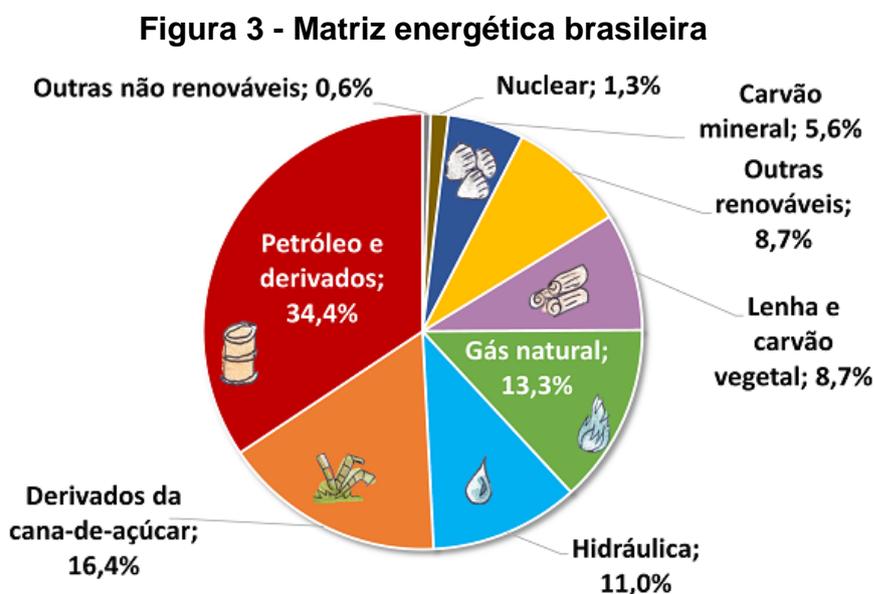
1.1 Motivação

A utilização em larga escala do hidrogênio verde possui muitos desafios, incluindo produção, transporte e armazenamento. No entanto, um dos principais desafios é o armazenamento, uma vez que o hidrogênio precisa ser mantido a altas pressões, em torno ou acima de 700 MPa, para ser efetivo. O armazenamento em vasos de pressão feitos de aço se torna inviável pois seriam necessárias espessuras de parede significativas para suportar essa pressão, o que resultaria em altos custos e peso para vasos dessa magnitude (GARDINER, 2020).

Para superar esse obstáculo, é essencial buscar materiais alternativos, como os materiais compósitos, para o armazenamento de hidrogênio verde. Dependendo do material é possível proporcionar uma grande vantagem em relação ao aço, pois pressões mais altas podem ser alcançadas com paredes mais finas, resultando em redução de custos e peso. Além disso, esses materiais podem ser projetados para

serem resistentes à corrosão, garantindo a segurança e a durabilidade dos recipientes de armazenamento (GARDINER, 2020).

Além de ser um ponto crucial na viabilidade do uso do hidrogênio, os vasos de pressão também fazem parte da estratégia em atender as sazonalidades de outras energias renováveis como a energia solar, eólica e, no caso da matriz energética brasileira (Figura 3), a hídrica, do ponto de vista econômico e social, podem proporcionar a exportação do hidrogênio entre países a fim de atender as necessidades energéticas da população de um modo geral, sendo assim a tecnologia do armazenamento é essencial para viabilizar a transição energética e para um futuro mais sustentável.



Fonte: EPE, 2022.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo projetar e simular vasos de pressão feitos de compósitos, utilizando elementos finitos, para armazenamento de hidrogênio verde.

1.3 Objetivos Específicos

1. Levantar bibliografias sobre hidrogênio verde e suas tecnologias.

2. Estudar e compreender os tipos de vasos de pressão utilizados no armazenamento de hidrogênio, assim como seus materiais de fabricação.
3. Estudar e compreender as formulações analíticas por trás dos critérios de falha quadráticos.
4. Estudar e compreender as formulações analíticas por trás do critério de falha de Tsai-Wu.
5. Projetar e simular vaso de pressão utilizando compósitos para armazenamento de hidrogênio verde.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo e mais leve da tabela periódica é um gás extremamente inflamável, inodoro, insípido, incolor, insolúvel em água e muito mais leve que o ar em condições normais (0 °C e 1 atm) nessas condições pode ser armazenado em vasos de pressão na forma de gás comprimido (FIGUEIREDO; CESAR, 2021) e também em estado líquido, onde seu volume é aproximadamente 700 vezes menor, comparando-se ao estado gasoso, todavia, para que a liquefação seja alcançada é necessário um sistema criogênico¹ já que o ponto de ebulição da substância é -253°C (BARTHÉLÉMY *et al.*, 2017).

Em sua forma molecular (H₂) o hidrogênio é dificilmente encontrado na natureza, sendo encontrado na sua grande maioria em combinação com outros elementos como a água ou hidrocarbonetos (FREITAS, 2022) não é uma fonte de energia elétrica primária, mas sim um vetor energético, portanto é necessário ser produzido, armazenado e transportado (ALMEIDA *et al.*, 2019).

O hidrogênio pode ser classificado de acordo com a fonte energética e tecnologia utilizada na sua produção como demonstrado na Figura 4. O hidrogênio verde é gerado a partir da eletrólise da água utilizando-se fontes de energias renováveis, o rosa é gerado também a partir da eletrólise da água, porém utilizando-se energia nuclear, o amarelo também a partir da eletrólise da água, mas utilizando um mix de fontes de energia com baixa emissão de carbono, o azul provem do gás natural com captura e armazenamento do carbono gerado a fim de evitar emissões de GEE, o turquesa provem da pirólise de combustíveis fósseis onde o subproduto gerado é o carbono sólido, o cinza é gerado a partir de gás natural com emissão de dióxido de carbono no processo, o marrom é gerado a partir da gaseificação de carvão lignite com emissão de dióxido de carbono no processo, já o hidrogênio preto é gerado a partir do carvão preto também com emissão de dióxido de carbono no processo (Global Energy Infrastructure, 2021).

¹ A criogenia é a área da físico-química que estuda o uso de temperaturas abaixo de -150°C

Figura 4 - Classificações do hidrogênio e características do processo de produção

	Terminologia	Tecnologia	Fonte de energia	Emissão de GEE
Produzido com eletricidade	Hidrogênio Verde	Eletrólise	Eólica Solar Hidráulica Geotérmica Ondas	Mínima
	Hidrogênio Rosa		Nuclear	
	Hidrogênio Amarelo		Fontes diversas	Média
Produzido com combustíveis fósseis	Hidrogênio Azul	Transformação do gás natural + CCUS Gaseificação + CCUS	Gás natural Carvão	Baixa
	Hidrogênio Turquesa	Pirólise	Gás natural	Carbono sólido (sub-produto)
	Hidrogênio Cinza	Transformação do gás natural		Média
	Hidrogênio Marrom	Gaseificação	Carvão marrom (lignite)	Alta
	Hidrogênio Preto		Carvão preto	

Fonte: Adaptado de Global Energy Infrastructure, 2021.

2.2 Hidrogênio Verde

Para que o hidrogênio seja classificado como verde, é necessário que seu processo de produção seja alimentado exclusivamente por fontes de energia renovável, como eólica, solar, hídrica, biomassa, entre outras. Essas fontes são livres de emissões de carbono, o que torna o hidrogênio verde um combustível renovável. Ao garantir que a produção do hidrogênio ocorra de forma sustentável e sem impactos ambientais negativos, é possível aproveitar seus benefícios como uma alternativa limpa e viável para impulsionar a transição energética global.

2.3 Produção do Hidrogênio Verde

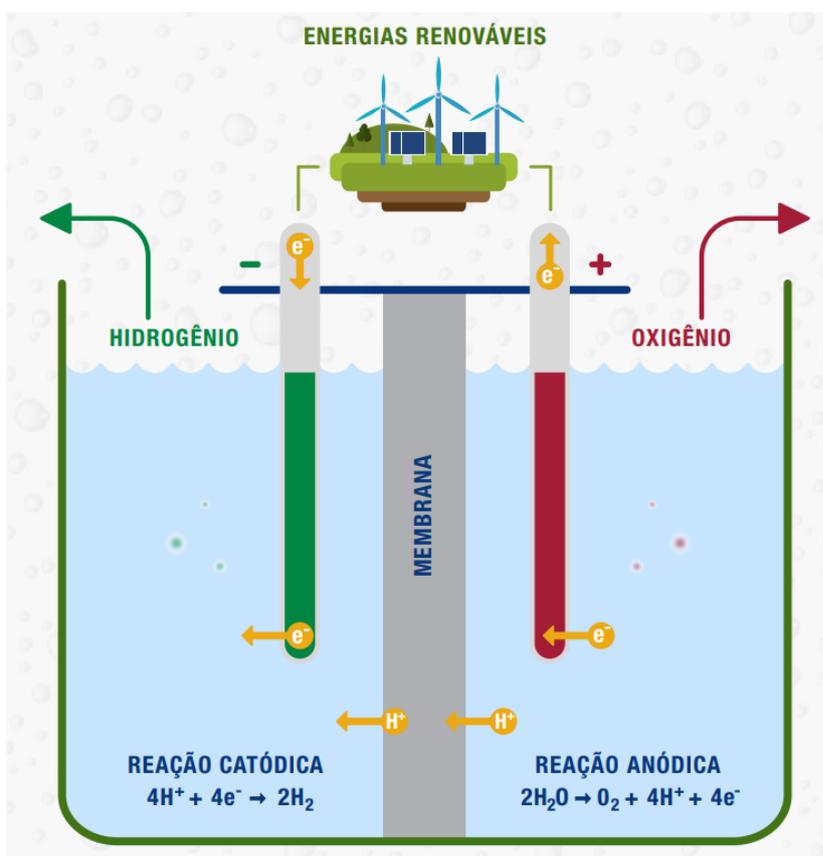
Conforme discutido no tópico 2.2, o hidrogênio é considerado verde apenas quando produzido com fontes renováveis. Portanto, existem diversos métodos de produção que, ao final do processo, resultam em um combustível limpo. Esses métodos podem ser categorizados em duas abordagens principais: métodos biológicos e métodos não biológicos (ALMEIDA *et al.*, 2019). Entre os métodos

biológicos, podemos destacar alguns, como os processos fotossintéticos, a biofotólise da água, os métodos fermentativos e a utilização da bactéria *Púrpura Não Sulfurosa*. Por outro lado, os métodos não biológicos incluem a obtenção de hidrogênio combinada ao tratamento de águas residuais, o uso de ácidos orgânicos por consórcios fotoheterotróficos e a eletrólise (ALMEIDA *et al.*, 2019). Vale ressaltar que a eletrólise é um dos métodos mais vantajosos, pois reutiliza água como matéria-prima e gera oxigênio puro como subproduto (KUMARA; HIMABINDU, 2019)

2.3.1 Eletrólise da Água

O processo de eletrólise ocorre em um sistema eletroquímico, no qual necessita possuir minimamente dois eletrodos que ficam imersos em um condutor eletrolítico (ou eletrólito), neste caso, a água e sais minerais, no qual a molécula (H_2O) é o reagente que é dissociado em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) sob a influência da eletricidade, esse processo é conhecido como reação de oxirredução e é demonstrado na Figura 5 (ALMEIDA *et al.*, 2019; IBERDROLA, 2022; KUMARA; HIMABINDU, 2019; YUE, *et al.*, 2021).. A eletrólise da água pode ser classificada em quatro tipos com base em seu eletrólito, condições de operação e agentes iônicos, embora os princípios de operação sejam os mesmos em ambos os casos. Os quatro tipos de métodos de eletrólise são: Eletrólise de água alcalina (AWE), Eletrólise de óxido sólido (SOE), Células de eletrólise microbiana (MEC) e Eletrólise de água por PEM (*Proton Exchange Membrane* ou Membrana Trocadora de Prótons em tradução livre) (ALMEIDA *et al.*, 2019; IBERDROLA, 2022; KUMARA; HIMABINDU, 2019; YUE, *et al.*, 2021).

Figura 5 - Princípio da Eletrólise da água



Fonte: IBERDROLA, 2022

2.4 Armazenamento

O hidrogênio é um dos combustíveis mais promissores do futuro, devido à sua elevada densidade energética baseada em sua massa. Comparativamente a gasolina contém apenas 12 kWh de energia por quilo já o hidrogênio contém 33,33 kWh (YUE, *et al.*, 2021) porém para armazenar a mesma quantidade desses combustíveis o hidrogênio necessita de um volume maior, ou seja, seu conteúdo energético por unidade de volume é muito menor comparando-se com outros hidrocarbonetos em condições de baixa pressão (ABE, *et al.*, 2019; BARBOSA, 2020; YUE, *et al.*, 2021).

Existem três métodos de armazenamento do hidrogênio, hidrogênio líquido, estado sólido e gás comprimido (TARHAN; ÇIL, 2021), a Tabela 2 abaixo apresenta algumas vantagens e desvantagens de cada método.

Atualmente as principais tecnologias de armazenamento existentes são: hidrogênio líquido (LH_2) em tanques criogênicos, no estado sólido, por adsorção em

hidretos metálicos, e gás comprimido, armazenamento geológico, e o mais comum e objetivo deste trabalho, o armazenamento na forma de gás comprimido (CGH_2) em vasos de pressão (ABE, *et al.*, 2019; BARBOSA, 2020; YUE, *et al.*, 2021).

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de armazenamento de hidrogênio

TIPO DE ARMAZENAMENTO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Hidrogênio Líquido	<ul style="list-style-type: none"> - Boa compressão - Baixa pressão - O sistema de baixa pressão possui baixo custo - Método de armazenamento mais seguro, pois requer uma menor pressão - A principal vantagem se faz pela alta densidade e alta eficiência de armazenamento 	<ul style="list-style-type: none"> - 30% de energia perdida no processo de liquefação - Ebulição em alguns dias - É necessário um sistema de resfriamento
Estado sólido	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial de boa densidade em pressões e temperaturas moderadas - Grande quantidade de hidrogênio pode ser armazenada em um pequeno volume 	<ul style="list-style-type: none"> - Peso e volume do material de armazenamento
Gás Comprimido	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnologia bem consolidada, principalmente em tamanhos relativamente pequenos - Possui a facilidade de uma rápida carga e descarga dos tanques 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa a média compressão (15% de perdas) - Descarga do hidrogênio a - alta pressão - Segurança - Devido à baixa densidade do hidrogênio, baixa temperatura ou alta pressão são necessárias para o armazenamento

Fonte: Autor, com base em TARHAN; ÇIL, 2021

2.4.1 Hidrogênio Líquido

Uma forma reduzir o volume de armazenamento do hidrogênio e obter uma alta densidade é convertê-lo em sua forma líquida (VALENTI, 2016; YUE, *et al.*, 2021), que consiste em liquefazê-lo, resfriando-o até temperaturas abaixo do ponto de ebulição (-253°C em pressão atmosférica), o que resulta em uma densidade

volumétrica de até 70,8 kg/m³ (ABE, *et al.*, 2019; BARBOSA, 2020; VALENTI, 2016; YUE, *et al.*, 2021). No entanto, o processo de liquefação demanda tempo e energia, havendo uma perda considerável do conteúdo energético do material (YUE, *et al.*, 2021), com perdas ocorrendo de 20 a 25% (BARBOSA, 2020), 30% (ABE, *et al.*, 2019; FREITAS, 2022) e 40% (YUE, *et al.*, 2021), porém a perda de energia varia drasticamente de acordo com os parâmetros físico-químicos de entrada e saída do hidrogênio durante o processo (VALENTI, 2016). A utilização desse tipo de armazenamento é bastante específica, sendo encontrada basicamente em aplicações de alta tecnologia como nas indústrias petroquímicas, farmacêuticas, alimentícias e aeroespacial (VALENTI, 2016; YUE, *et al.*, 2021).

2.4.2 Hidretos Metálicos

Os hidretos metálicos são considerados sistemas de armazenamento químico nos quais o hidrogênio é retido em estado sólido através de um processo de adsorção e dessorção. Esses sistemas são compostos por materiais específicos, tais como metais, compostos intermetálicos ou ligas, que possuem a capacidade de adsorver hidrogênio em condições de pressão moderada e baixas temperaturas, formando compostos metal-hidrogênio sólidos reversíveis, também conhecidos como hidretos metálicos (RUSMAN; DAHARI, 2016; TARASOV *et al.*, 2021). A adsorção ocorre de forma exotérmica, onde o resfriamento beneficia e facilita a reação, já a dessorção é endotérmica, o que favorece a separação do hidrogênio da estrutura metálica e a volta do gás ao seu estado inicial antes da adsorção (BARBOSA, 2020; RUSMAN; DAHARI, 2016). Uma das principais vantagens decorrentes do uso de hidretos metálicos como meio de armazenamento é a dispensa de altas pressões e temperaturas baixas para seu adequado funcionamento, o que faz ser considerado a forma de armazenamento mais segura. No entanto, a principal desvantagem associada à utilização de hidretos metálicos está relacionada à sua baixa densidade energética, os mais eficientes apresentam cerca de 8% de hidrogênio em relação à sua massa, o que resulta em maior volume e peso quando comparados a outras alternativas de armazenamento (BORGES, 2022).

2.4.3 Armazenamento Geológico

A principal opção para o armazenamento de hidrogênio em larga escala a médio e longo prazo é o armazenamento geológico ou subterrâneo, que consiste basicamente em injetar gás hidrogênio no subsolo e mantê-lo sob pressão para uso futuro (ELBERRY, 2021; YUE, *et al.*, 2021). Existem alguns principais tipos de estruturas que podem ser usadas como reservatório geológico para o gás hidrogênio, como aquíferos, depósitos esgotados de gás natural e petróleo, cavernas de sal e minas abandonadas (ELBERRY, 2021; MAŁACHOWSKA *et al.*, 2021). Este tipo de armazenamento apresenta alguns desafios, como a durabilidade das tubulações podendo haver o desgaste do material pela interação com o hidrogênio, os custos com a compressão inicial necessária para a injeção e retirada do material, possíveis reações químicas com o hidrogênio que podem causar contaminação ou perda de parte do gás, a necessidade de uma quantidade mínima de gás no interior da estrutura para manter a pressão do reservatório, algumas dúvidas em relação ao volume, localização e profundidade do poço e alguns obstáculos legais, sociais e ambientais referentes às legislações do país e à aceitação pública (BARBOSA, 2020; ELBERRY, 2021; MAŁACHOWSKA *et al.*, 2021; YUE, *et al.*, 2021).

2.4.4 Gás Comprimido

Os avanços tecnológicos ocorridos no século XIX impulsionaram o desenvolvimento de recipientes de pressão metálicos, particularmente com o propósito de armazenar dióxido de carbono para bebidas. O armazenamento de hidrogênio em recipientes de ferro forjado, operando a uma pressão de 12 MPa, é registrado por volta de 1880 para uso militar. Paralelamente, no final da década de 1880, foram desenvolvidos recipientes de pressão feitos de aço sem costura, fabricados por meio de conformação de chapas ou tubos, na Europa. Nos anos 60, nos Estados Unidos, foram introduzidos recipientes de pressão compostos de alta pressão para aplicações militares e aeroespaciais. A partir dos anos 80, os recipientes de pressão passaram a ser utilizados em uma ampla variedade de aplicações no mercado, não se restringindo apenas ao setor militar e apresentando uma maior diversidade de materiais. As aplicações mais comuns envolvem uma pressão de

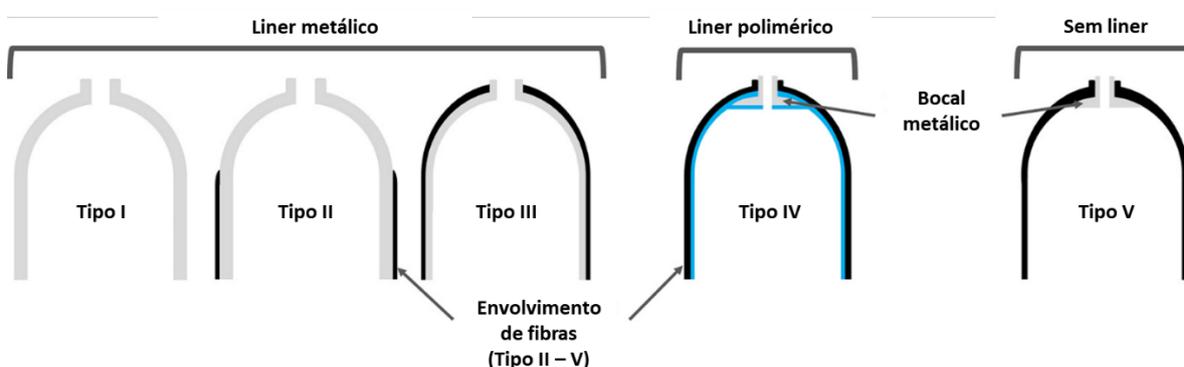
trabalho entre 25 e 30 MPa, e recentemente, já no século XXI, foram introduzidos os recipientes *COPV*², de 35 MPa a 70 MPa, que foram introduzidos para o armazenamento de hidrogênio (BARTHÉLÉMY *et al.*, 2017).

2.5 Vasos de Pressão

Os vasos de pressão citados neste trabalho são os vasos de prateleira, que são bastante utilizados para transporte de substâncias como acetileno, hidrogênio, oxigênio etc., diferentemente de vasos para indústria que são mais complexos e possuem diversos adereços e dispositivos de segurança, além de proporções bem maiores.

O tipo de vaso de pressão a ser utilizado é selecionado de acordo com a aplicação final e demanda uma ponderação entre confiabilidade e baixo custo (BARTHÉLÉMY *et al.*, 2017), atualmente podem ser classificados considerando o material e estrutura de construção e podem ser tipo I, II, III, IV e V (Figura 6).

Figura 6 - Representação dos Vasos de Pressão tipo I, II, III, IV e V



Fonte: Adaptado de AIR; SHAMSUDDOHA; PRUSTY, 2023.

Os recipientes tipo I são metálicos, geralmente de aço ou alumínio, são os mais consolidados no mercado mundial havendo uma grande expertise e experiência na sua construção e utilização. No armazenamento de hidrogênio, os recipientes de aço

² *Composite Overwrapped Pressure Vessel (COPV)* em tradução livre Vaso de Pressão Envolto em Compósito, é um recipiente projetado com revestimento não estrutural fino e envolto em um composto de fibra.

são suscetíveis à fragilização por hidrogênio, que por consequência podem causar falhas por fadiga, que ocorre devido à pressurização e despressurização cíclica dos tanques durante a utilização. Já o alumínio não sofre com fragilização por hidrogênio, porém se faz necessário um bom acabamento de superfície para evitar que haja qualquer tipo de fissura por fadiga (AZEEM *et al.*, 2022).

Os recipientes tipo II são revestidos nas laterais cilíndricas retas, enquanto as cúpulas permanecem desprotegidas. As cúpulas são projetadas para suportar a pressão sem a necessidade de envolvimento de fibras. Geralmente, materiais como fibra de vidro, aramida ou fibra de carbono são utilizados para o revestimento na direção circunferencial. Em casos em que haja perda ou remoção de parte do revestimento composto, o corpo metálico compartilha parte da carga de pressão, além de manter a contenção do gás. Comparativamente, o custo desses recipientes é aproximadamente 50% mais elevado em relação aos recipientes tipo I, porém possuem um peso cerca de 35% menor (AZEEM *et al.*, 2022).

Os recipientes tipo III são totalmente revestidos com compósitos, inclusive as cúpulas, e normalmente são fabricados em alumínio sem costura. A maior parte da resistência do recipiente, entre 75% e 90%, é atribuída ao envoltório composto, o que resulta em uma redução significativa na espessura do corpo metálico e, por consequência, em uma considerável diminuição do peso final. O restante do corpo metálico proporciona a resistência remanescente e desempenha o papel de uma barreira rígida para o gás armazenado. (ALCANTAR, 2017; AZEEM *et al.*, 2022).

Os recipientes tipo IV são fabricados com materiais poliméricos e revestidos com compósitos. O revestimento empregado nesses recipientes deve possuir a capacidade de se deformar ou se alongar de forma simultânea ao composto durante o processo de pressurização, e ser capaz de retornar a um estado estável, livre de enrugamentos, após a redução da pressão no corpo. É relevante ressaltar que pequenas lacunas de resina entre as fibras podem se tornar porosas devido a um estiramento excessivo localizado, o que possibilita a passagem do fluido contido. As fibras que compõem o corpo de material composto desempenham um papel fundamental no suporte das cargas estruturais e de pressão, ao passo que o revestimento de resina tem como objetivo mantê-las em posição ideal (AZEEM *et al.*, 2022; ZHANG, 2020).

Os recipientes tipo V foram introduzidos pela *Composites Technology Development Inc.* (CTD) por meio de tanques de oxigênio para bombeiros que são 10% mais leves e menores comparados aos equipamentos padrões (AZEEM *et al.*, 2022). Esses tanques apresentam construção totalmente em compósito, com fibras compostas enroladas. No entanto, os vasos de pressão tipo V estão em um estágio de desenvolvimento, fato esse evidenciado pela pequena quantidade de literatura e pesquisas disponíveis (AIR; SHAMSUDDOHA; PRUSTY, 2023; AZEEM *et al.*, 2022; JUNIOR; PAPAELIAS, 2021).

Cada formato de cilindro possui suas próprias vantagens e características distintas. No entanto, em muitas aplicações, a prioridade é reduzir o peso dos cilindros (AZEEM *et al.*, 2022). Em resumo, os vasos tipo I são adequados para pressões de 200/300 bar (20/30 MPa), com um limite máximo de 500 bar (50 MPa). Eles possuem baixa eficiência energética e são mais adequados para uso industrial (AZEEM *et al.*, 2022; BARTHÉLÉMY *et al.*, 2017; HASSAN *et al.*, 2021). Os recipientes tipo II não possuem limites de pressão definidos (AZEEM *et al.*, 2022; BARTHÉLÉMY *et al.*, 2017; HASSAN *et al.*, 2021). Os recipientes tipo III e IV podem suportar pressões cíclicas de 450 bar (45 MPa) e pressão estática de 700 a 1000 bar (70 a 100 MPa) e possuem a melhor capacidade gravimétrica (AZEEM *et al.*, 2022; HASSAN *et al.*, 2021). Os tipo V são vasos ainda em desenvolvimento, portanto os limites de pressão levam em consideração alguns fatores e principalmente a gama de materiais para sua fabricação e sua aplicação final (AIR; SHAMSUDDOHA; PRUSTY, 2023; HASSAN *et al.*, 2021). A Tabela 3 apresenta uma comparação entre os diferentes tipos de vasos de pressão.

Tabela 3 - Comparação entre os diferentes tipos de vasos de pressão

Tipo	I	II	III	IV	V
Limite de pressão	≤ 50 MPa	Sem Limite	≤ 45 MPa	≤ 100 MPa	Sob consideração
Preço	++	+	-	-	
Capacidade gravimétrica	-	±	+	++	
Popularidade e maturidade	****	**	*	*	

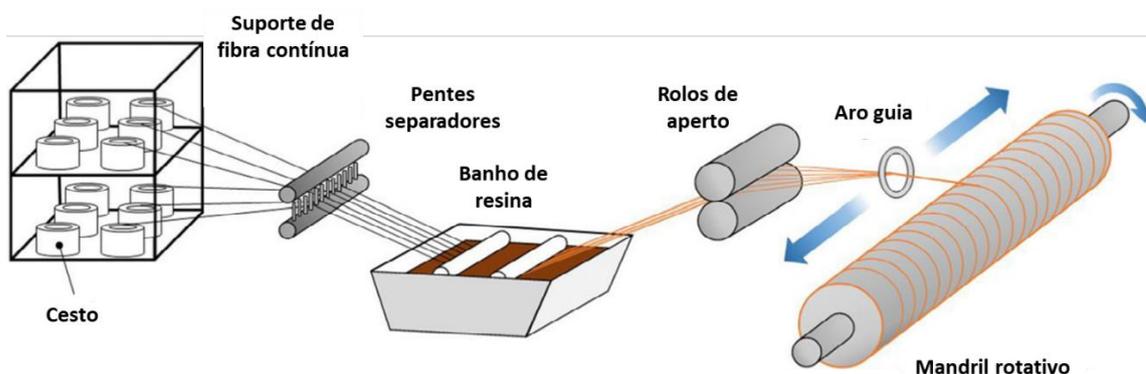
Fonte: Autor, com base em HASSAN *et al.*, 2021

2.6 Enrolamento de Fibras (*Filament Winding*)

Além da fabricação do corpo interno (*liner*) os vasos de pressão também passam por um processo de enrolamento de filamentos de fibra. Este processo é chamado de enrolamento de fibras.

O enrolamento de fibras (Figura 7) é o principal processo para fabricar estruturas cilíndricas compostas de baixo custo (ABDALLA *et al.*, 2007). Esse método permite criar estruturas cilíndricas, com propriedades mecânicas específicas (QUANJIN *et al.*, 2018a). Após o processo de cura, as fibras assumem a forma do mandril. Esse processo permite a produção de produtos complexos e assimétricos, como pás de turbina, fuselagens de aeronaves e estojo de mísseis. Sua principal vantagem é a automação e a capacidade de produzir diferentes orientações de fibra (QUANJIN *et al.*, 2018b). Um dos principais parâmetros que afetam as propriedades mecânicas é a tensão das fibras (QUANJIN *et al.*, 2018a). Em seu trabalho BŁACHUT *et al.*, 2022, demonstra que manter a tensão das fibras em níveis mais altos durante o processo de fabricação melhora a eficiência gravimétrica. Contudo, tensões mais altas trazem riscos significativos para a execução da operação, como danos e aumento dos riscos de deslizamento de fibras, e deformação do *liner* nos casos de vasos tipo IV e V.

Figura 7 - Esquema do processo de fabricação enrolamento de fibras (*Wet*)



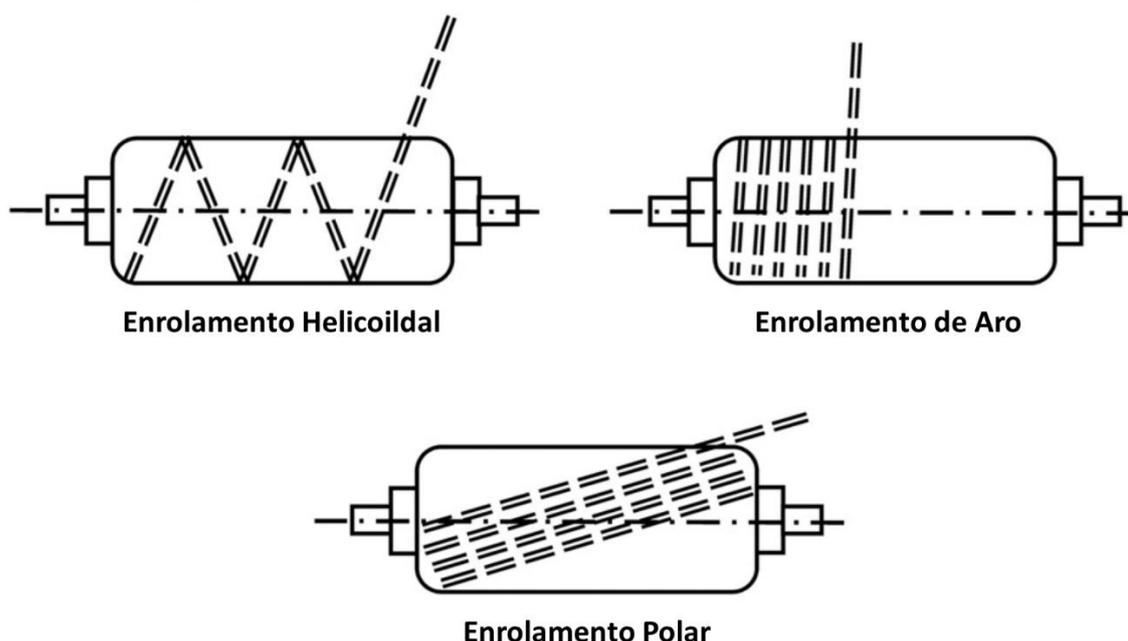
Fonte: Adaptado de SHRIGANDHI; KOTHAVALA, 2021.

As fibras utilizadas nesse processo podem ser *Wet* ou *Prepreg*. As fibras *Wet* necessitam do estágio do banho de resina, enquanto as fibras *Prepregs* já são

comercializadas com a resina impregnada, portanto necessitam de um estágio a menos quando utilizadas.

A tecnologia do enrolamento de fibras é utilizada desde o século XX (LOSSIE; VAN BRUSSEL, 1994), e consiste em três padrões, ou técnicas, básicos de enrolamento das fibras (Figura 8), enrolamento helicoidal, enrolamento de aro e enrolamento polar (SOFI; NEUNKIRCHEN; SCHLEDJEWSKI, 2018).

Figura 8 - Padrões utilizados no enrolamento de fibras



Fonte: Adaptado de SOFI; NEUNKIRCHEN; SCHLEDJEWSKI, 2018

A técnica do enrolamento helicoidal consiste na disposição dos filamentos em uma trajetória helicoidal unidirecional, com um ângulo de enrolamento α . Em seguida, ocorre uma mudança de direção no final do mandril, com um ângulo de $-\alpha$ (SOFI; NEUNKIRCHEN; SCHLEDJEWSKI, 2018). O trecho inicial, onde os filamentos são enrolados com o ângulo α , é chamado de primeira passagem, enquanto o trecho de retorno na direção oposta, com o ângulo $-\alpha$, é denominado segunda passagem e o conjunto de duas passagens é denominado circuito (ROUSSEAU; PERREUX; VERDIERE, 1999). Repetem-se vários circuitos até atingir a espessura desejada (SOFI; NEUNKIRCHEN; SCHLEDJEWSKI, 2018). Os valores do ângulo podem variar entre 5° e 80° dependendo da especificação do produto (HERNANDEZ-MORENO *et al.*, 2008; SOFI; NEUNKIRCHEN; SCHLEDJEWSKI, 2018).

A técnica enrolamento de aro é considerada um caso especial do enrolamento helicoidal, pois consiste basicamente nos mesmos fundamentos, porém com um ângulo de 90°. É utilizada juntamente com outras técnicas para reforçar a resistência circunferencial do corpo e geralmente só é aplicada na parte cilíndrica dos vasos de pressão (SOFI; NEUNKIRCHEN; SCHLEDJEWSKI, 2018).

O enrolamento polar é adequado para cilindros com uma proporção entre comprimento e diâmetro (L/D) menor que 2, ou seja, quando o diâmetro é igual ou menor que metade do comprimento do vaso. Sua aplicação é limitada pela relação entre as aberturas polares e o comprimento da peça. Nessa técnica o ângulo varia entre 0° e 5° e a fibra é posicionada de forma tangencial em relação às aberturas polares do mandril (SOFI; NEUNKIRCHEN; SCHLEDJEWSKI, 2018).

2.6.1 Dimensionamento do enrolamento de fibras

O ângulo α do enrolamento helicoidal é definido pela Equação (1) onde r é o raio da seção paralela e r_0 é o menor raio presente na geometria, ou seja, o raio do bocal (SHARMA; CHUGH; NEOGI, 2021; WU, 2022).

$$\sin \alpha = \frac{r_0}{r} \quad (1)$$

As espessuras das camadas são definidas pelas Equações (2) e (3), onde P_{burst} é a pressão de *burst* que é a máxima pressão que o vaso pode suportar antes vir a falhar e σ_f é a resistência a tração longitudinal do material. (PARK; JANG; KIM, 2021; SHARMA; CHUGH; NEOGI, 2021).

$$t_{helical} = \frac{P_{burst} \cdot r}{2 \cdot \sigma_f \cdot \cos^2(\alpha)} \quad (2)$$

$$t_{hoop} = \frac{P_{burst} \cdot r \cdot \left(1 - \frac{\tan^2 \alpha}{2}\right)}{2 \cdot \sigma_f \cdot \cos^2(\alpha)} \quad (3)$$

2.7 Materiais Compósitos

Um material compósito é caracterizado como um produto resultante da combinação de dois ou mais materiais distintos, cada um com propriedades físico-químicas diferentes (HASAN; ZHAO; JIANG, 2019). No mínimo dois materiais constituem um compósito, sendo a matriz e o reforço, uma fase contínua e uma descontínua, respectivamente, essa combinação resulta em um material final com propriedades notavelmente diferentes dos constituintes iniciais (HASAN; ZHAO; JIANG, 2019; LEITE, 2014). Para os casos em que há uma composição de três ou mais constituintes o material é chamado de compósito híbrido (ZUO; SRINIVASAN; VASSILOPOULOS, 2021; SAFRI *et al.*, 2018).

A Figura 9 mostra a classificação dos materiais compósitos, que podem ser divididos em quatro grupos (RAJAK *et al.*, 2019).



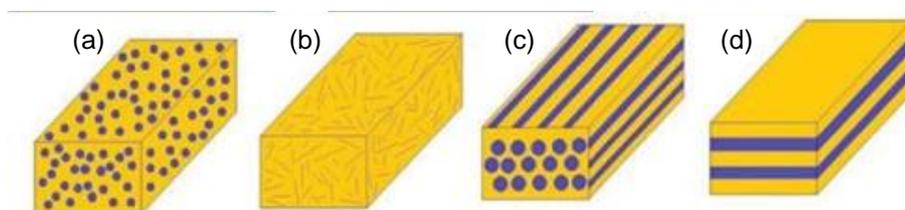
Fonte: Autor, com base em RAJAK *et al.*, 2019.

Os nano-compósitos, que são feitos em escala nano com métodos de fabricação especiais, possuem propriedades óticas muito boas e são materiais bastante atrativos na indústria biomédica (RAJAK *et al.*, 2019).

A classificação baseada no reforço (Figura 10) é dividida entre reforço de partículas (a), reforço de fibras, descontínuas e contínuas, (b) e (c) respectivamente, e reforço de folhas (d). O reforço de partículas é utilizado em aplicações que são

necessários altos níveis de resistência ao desgaste, um ótimo exemplo desse tipo é o concreto. O reforço de fibras geralmente possui alta resistência, rigidez, e resistência a produtos químicos, temperatura e desgaste e os materiais mais comuns das fibras são vidro, carbono, basalto e Kevlar. Já o reforço de folhas, também chamados de compósito de moldagem em folha (SMC), é um material reforçado com fibras de vidro que apresentam uma boa relação resistência-peso e são moldados por compressão (RAJAK *et al.*, 2019).

Figura 10 - Tipos de reforços para compósitos. (a) Reforço de partículas. (b) Reforço de fibras descontínuas. (c) Reforço de fibras contínuas. (d) Reforço de folhas.



Fonte: Adaptado de MISTRY; GOHIL, 2018.

A classificação baseada na matriz é dividida entre matriz de polímero (PMCs), cerâmica (CMCs) e metal (MMCs) (RAJAK *et al.*, 2019).

Os PMCs possuem fácil manuseio e simples processo de fabricação, o que os tornam materiais atrativos economicamente (RAJAK *et al.*, 2019), além de possuírem boas propriedades mecânicas de modo geral, serem ecológicos, recicláveis e possuírem uma boa relação superfície-volume (RAVICHANDRAN *et al.*, 2020).

Os CMCs também são chamados de compósitos inversos devido a deformação da matriz cerâmica ser menor que a deformação das fibras, diferente do que acontece com os compósitos de matriz polimérica e metálica (RAJAK *et al.*, 2019). Em geral, os CMCs apresentam uma resistência ao desgaste superior, além de boa tenacidade à fratura, estabilidade em altas temperaturas e excelente resistência a choques térmicos. (SUN *et al.*, 2022).

Os Materiais Compósitos de Matriz Metálica (MMC) apresentam diversas vantagens significativas. Esses materiais são conhecidos por sua alta resistência em relação ao peso, o que significa que podem suportar grandes cargas mecânicas sem adicionar peso desnecessário. Os MMCs exibem propriedades mecânicas e térmicas

aprimoradas em comparação com os metais puros, o que os torna ideais para aplicações exigentes em indústrias de grande responsabilidade como o setor aeroespacial. Os principais materiais utilizados como matriz nos MMCs são o alumínio, o magnésio e o titânio, esses metais oferecem uma combinação ideal de propriedades, como baixa densidade, alta resistência e boa resistência à corrosão (CHAWLA; CHAWLA, 2006; KUMAR *et al.*, 2021; SHARMA; MAHANT; UPADHYAY, 2020).

2.7.1 Teoria Clássica dos Laminados

A teoria clássica dos laminados define o comportamento mecânico de estruturas compostas que possuem espessura de fina a moderada. Supõe que as camadas são perfeitamente unidas, ou seja, não há deslocamento relativo entre elas. As propriedades do material são constantes. O material possui um comportamento tensão deformação linear-elástico. Linhas retas e perpendiculares ao plano médio permanecem retas e perpendiculares quando há deformação por tração e flexão. A lâmina de compósito está em estado de tensão plana. As deformações no plano e a curvatura são consideradas pequenas em relação às outras dimensões da estrutura (ANSYS, 2018; DINIZ, 2017).

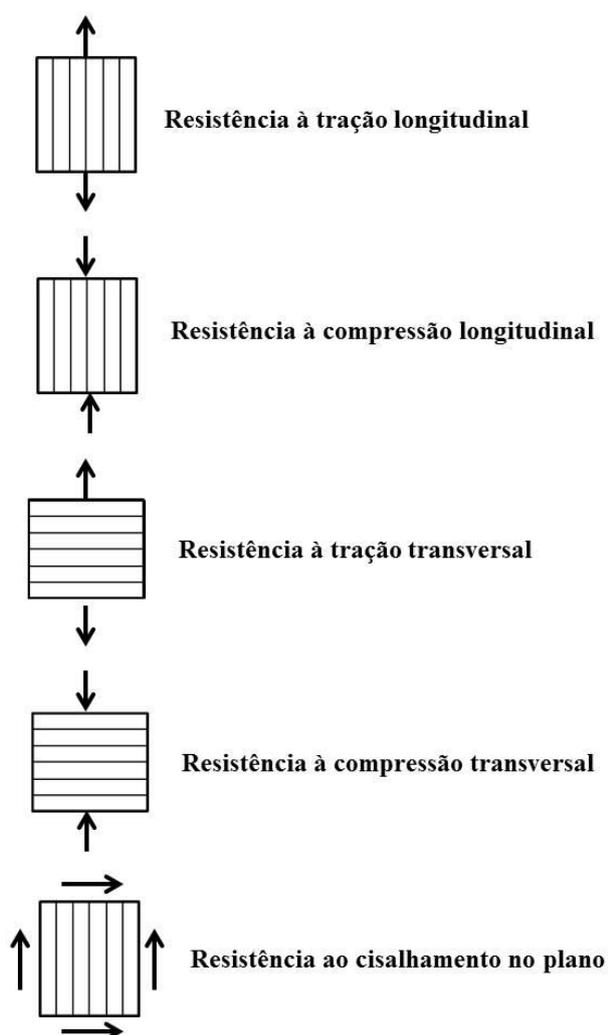
2.8 Critério de Falha

Ao estudar o comportamento mecânico de materiais compósitos, é possível abordar duas perspectivas: a micromecânica e a macromecânica (DE SOUZA, 2002). A micromecânica envolve a homogeneização dos materiais, permitindo calcular as propriedades elásticas do compósito com base nas propriedades elásticas dos materiais constituintes. Para isso, é necessário conhecer os volumes relativos de cada material presente no compósito. Por outro lado, a macromecânica considera as propriedades mecânicas médias macroscópicas do material, que podem ser obtidas por meio de ensaios em corpos-de-prova ou por meio de aproximações com as propriedades termomecânicas dos materiais, as quais são determinadas pela micromecânica. Com essa abordagem, é possível estimar o comportamento da lâmina

de compósito sob diferentes conjuntos de carregamentos combinados (SIQUEIRA, 2009).

A determinação e a junção do desenvolvimento das microtrincas não podem ser realizados de maneira suficientemente confiável e direta para aplicação convencional. Portanto, são necessários experimentos, que se baseiam em um conjunto limitado de cinco parâmetros de resistência (Figura 11), associados ao estado plano de tensões (EPT) (SIQUEIRA, 2009).

Figura 11 - Parâmetros de resistência de uma lâmina



Fonte: DINIZ, 2017.

Os parâmetros de resistência da Figura 11 exemplificam uma lâmina com comportamento elástico linear (DINIZ, 2017).

A Equação (4 (a e b) apresenta as relações elásticas para um carregamento uniaxial longitudinal (DINIZ, 2017):

$$\sigma_1^T = E_1 \varepsilon_1^T \quad (4a)$$

$$\sigma_1^C = E_1 \varepsilon_1^C \quad (4b)$$

Para um carregamento transversal uniaxial as relações elásticas são apresentadas pela Equação (5 (a e b) (DINIZ, 2017):

$$\sigma_2^T = E_2 \varepsilon_2^T \quad (5a)$$

$$\sigma_2^C = E_2 \varepsilon_2^C \quad (5b)$$

Já para o carregamento de cisalhamento a (6 (DINIZ, 2017):

$$\tau_{12} = G_{12} \gamma_{12} \quad (6)$$

Onde:

σ_1^T = resistência à tração na direção longitudinal às fibras;

σ_1^C = resistência à compressão na direção longitudinal às fibras;

σ_2^T = resistência à tração na direção transversal às fibras;

σ_2^C = resistência à compressão na direção transversal às fibras;

τ_{12} = resistência ao cisalhamento no plano;

G_{12} = módulo de cisalhamento;

γ_{12} = deformação cisalhante global;

E_1 = módulo de elasticidade longitudinal às fibras;

E_2 = módulo de elasticidade transversal às fibras;

ε_1^T = deformação por tração longitudinal às fibras;

ε_2^T = deformação por tração transversal às fibras;

ε_1^C = deformação por compressão longitudinal às fibras;

ε_2^C = deformação por compressão transversal às fibras;

Nos critérios de falha quadráticos, todas as componentes de tensão e deformação são combinadas em uma única expressão. Parte dos critérios utilizados para compósitos reforçados com fibras pertencem a um grupo de critérios interativos chamados de critérios quadráticos e sua forma geral é um polinômio de segunda ordem ((7) (ANSYS, 2018).

$$f = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{44}\tau_{23}^2 + F_{55}\tau_{13}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 \quad (7)$$

Onde σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões normais, τ_{12} , τ_{13} e τ_{23} são as tensões de cisalhamento e F_1 , F_2 , F_3 , F_{11} , F_{22} , F_{33} , F_{44} , F_{55} , F_{66} , F_{12} , F_{23} e F_{13} são tensores de forças relacionados às propriedades do compósito. Os tensores de forças podem ser obtidos com as relações elásticas das (4b), (5a), (5a) e (6).

Para o caso do estado plano de tensão (EPT) o polinômio da (7) se reduz para (Equação (8)) (ANSYS, 2018;):

$$f = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 \quad (8)$$

Os critérios de falha quadráticos são diferentes de acordo com o método no qual os coeficientes F_{ij} e F_l são definidos. Para o estado plano de tensões σ_1 é a tensão do laminado na direção da fibra, σ_2 a tensão do laminado na direção transversal da fibra e τ_{12} é a tensão de cisalhamento do laminado (SOLIDWORDS, 2022).

2.8.1 Critério de Falha de Tsai-Wu

O critério de falha de Tsai-Wu é considerado mais geral do que outros critérios amplamente reconhecidos, sendo o mais aceito e amplamente utilizado para materiais ortotrópicos. No contexto do estado plano de tensões, os coeficientes F_{ij} e F_l citados na seção anterior são (ANSYS, 2018; DE SOUZA, 2002; SIQUEIRA, 2009; XU; ZHENG; LIU, 2009):

$$F_{11} = \frac{1}{X_t X_c} \quad (9a)$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c} \quad (9b)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (9c)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad (9d)$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad (9e)$$

$$F_{12} = -0.5\sqrt{F_{11}F_{22}} \quad (9f)$$

Onde:

X_c = Resistência à compressão na direção da fibra;

X_t = Resistência à tração na direção da fibra;

Y_c = Resistência à compressão na direção transversal da fibra;

Y_t = Resistência à tração na direção transversal da fibra;

S = Tensão de cisalhamento limite.

Portanto a Equação (10) se torna (ANSYS, 2018; DE SOUSA, 2002; PERES, 2019; SIQUEIRA, 2009; XU; ZHENG; LIU, 2009):

$$f = \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} \quad (10)$$

3 METODOLOGIA

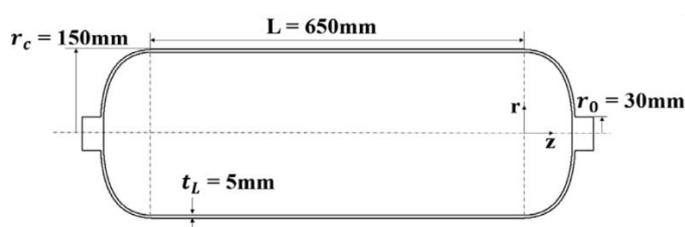
A abordagem adotada neste trabalho segue as formulações apresentadas na literatura e se resume em quatro etapas para o estudo de um vaso de pressão tipo IV:

1. Seleção e desenho CAD da geometria do *liner*;
2. Cálculos e considerações em relação as camadas de material compósito que envolvem o *liner* em compliance com a norma ASME *Section X*;
3. Simulação utilizando FEA (*Finite Element Analysis*);
4. Análise de falhas utilizando critério de Tsai-Wu.

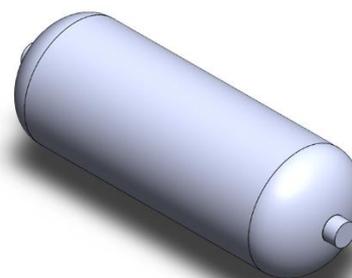
3.1 Características do Liner

A geometria do *liner* (Figura 12a) foi selecionada de PARK; JANG; KIM, 2021 para facilitar a verificação do modelo e desenhada em 3D (Figura 12b) utilizando o SOLIDWORKS®. Os materiais utilizados foram os padrões disponíveis no software ANSYS®. Polietileno para o *liner* e alumínio para ambos os bocais.

Figura 12 - Geometria do *liner*. (a) Dimensões do *liner* retiradas da literatura. (b) 3D do *liner* desenhado no SolidWorks.



(a)



(b)

Fonte: (a) PARK; JANG; KIM, 2021. (b) Autor, 2023.

3.2 Camadas de Compósito

O material compósito selecionado neste trabalho foi a Fibra de Carbono Epóxi *Prepreg*, presente na biblioteca de materiais compósitos do software e suas propriedades estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades da Fibra de Carbono Epóxi *Prepreg*

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Módulo de Young na Direção da Fibra	E_1	121 GPa
Módulo de Young na Direção Transversal	E_2	8,6 GPa
Módulo de Cisalhamento	G_{12}	4700 MPa
Coefficiente de Poisson	ν	0,27
Tensão normal no sentido da Fibra	σ_f	2231 MPa

Fonte: Autor, 2023.

Para aumentar a resistência do vaso de pressão serão utilizadas duas técnicas de enrolamento de fibras apresentadas na seção 2.6, enrolamento helicoidal e enrolamento de aro. As camadas de compósito podem ser dimensionadas de acordo com as (1), (2) e (3). Da (1) obtêm-se um ângulo $\alpha = 11,54^\circ$ e das Equações (2) e (3), considerando uma pressão de trabalho de 70 MPa e uma pressão de *burst* de 157,50 MPa (equivalente a 2,25 vezes a pressão de trabalho) para atender à ASME *Section X* (PARK; JANG; KIM, 2021), tem-se $t_{helical} = 5,51$ mm e $t_{hoop} = 10,37$ mm, respectivamente. Para fins de simplificação da simulação as regiões de cúpula terão a mesma espessura de camada que as regiões cilíndricas.

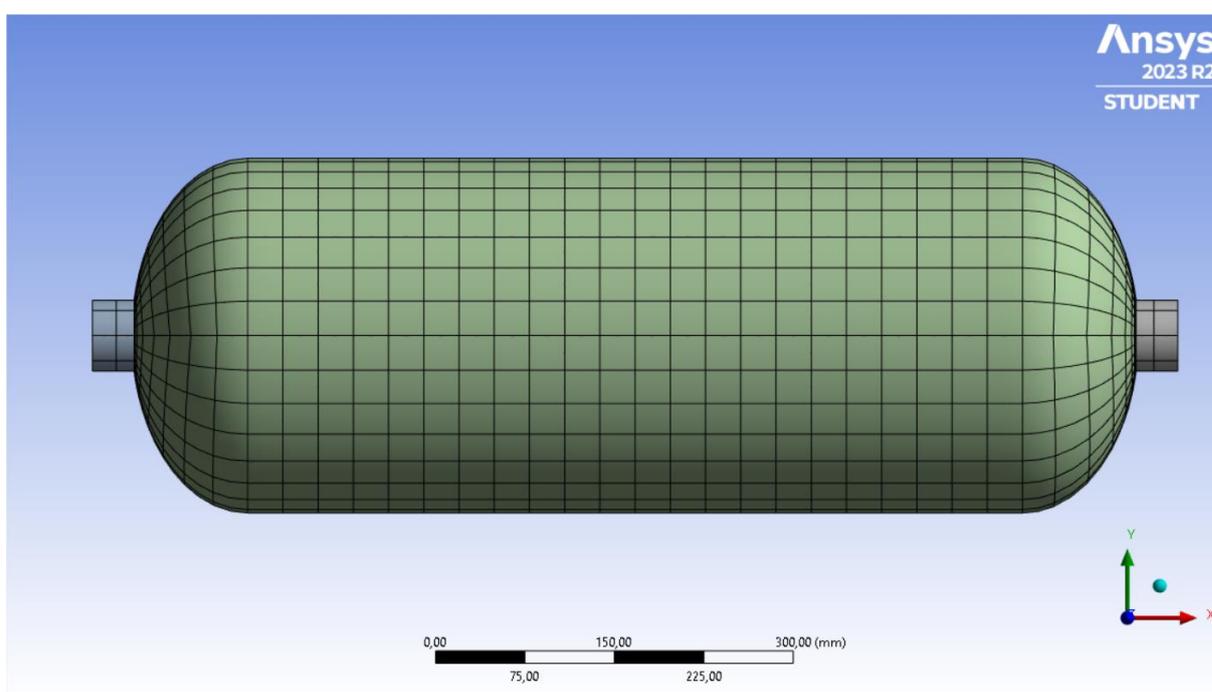
Considerando que a espessura de cada camada de material depositada é de 0,4 mm tem-se 14 camadas no estágio helicoidal e 26 camadas no estágio *hoop*, portanto $t_{helical} = 5,6$ mm e $t_{hoop} = 10,4$ mm. Será feito uma alternância de camadas iniciando com cinco camadas de *hoop* e em seguida mantendo o padrão duas camadas de helicoidal e três camadas de *hoop*. Totalizando assim oito camadas de *hoop* e sete camadas de helicoidal, conforme mostrado na seção 3.3 abaixo. Nas regiões de transição entre a parte cilíndrica e de domo há um *drop-off* que nada mais é que o preenchimento dos espaços vazios resultantes do empilhamento de camadas.

Neste trabalho o preenchimento foi feito com uma resina epoxy padrão do ansys com um limite de escoamento de 54,6 MPa.

3.3 Finite Element Analysis

Logo após a importação da geometria 3D (Figura 12) para o Ansys, foram atribuídos os materiais apropriados para cada estrutura. A malha resultante pode ser observada na Figura 13 com um total de 10584 nós e 1620 elementos.

Figura 13 - Malha do *liner*



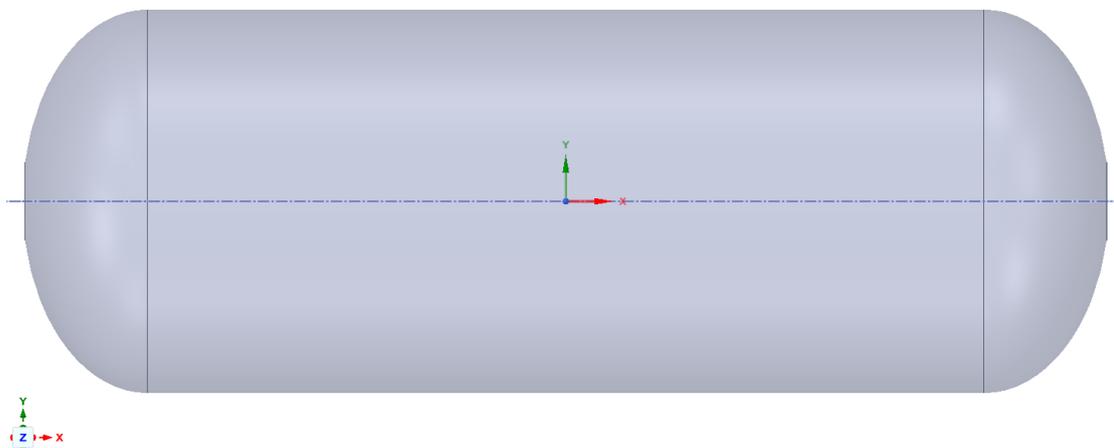
Fonte: Autor, 2023.

A criação das camadas de compósito é realizada através do ACP (Ansys Composite PrepPost). Para isso, é essencial criar uma geometria de superfície (Figura 14) que será importada na região do revestimento onde as camadas do material compósito serão aplicadas.

Figura 14 - Superfície de referência extraída do liner para deposição das camadas de filamento no ACP

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

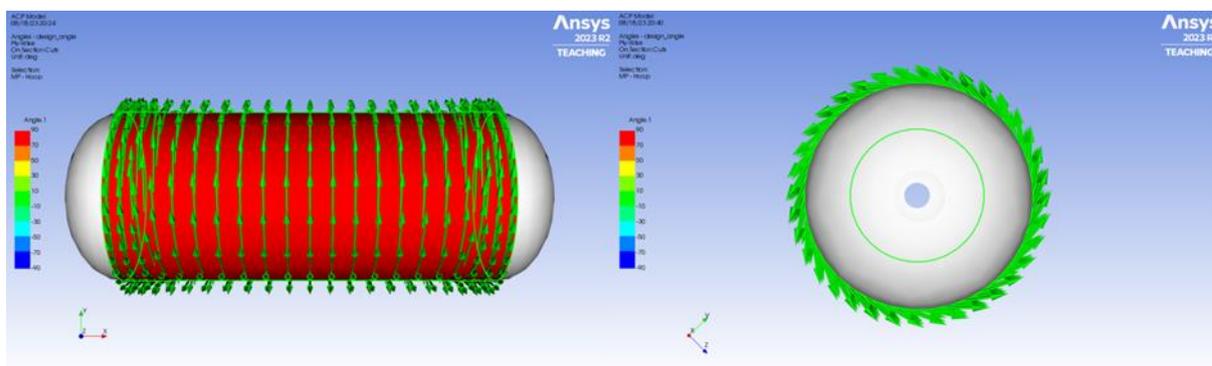
Ansys
2023 R2
STUDENT



Fonte: Autor, 2023.

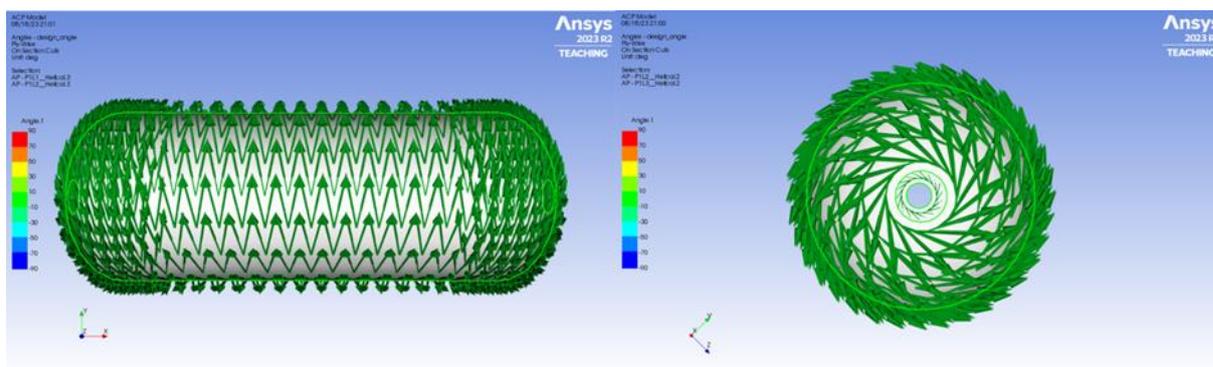
Os ângulos das camadas são ilustrados na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** e Figura 16. Por questões de simplificação do modelo a camada do enrolamento helicoidal foi considerada constante em todo o corpo.

Figura 15 - Ângulo das camadas de enrolamento de aro (90°)



Fonte: Autor, 2023.

Figura 16 - Ângulos das camadas de enrolamento helicoidal (-11,54° e 11,54°)

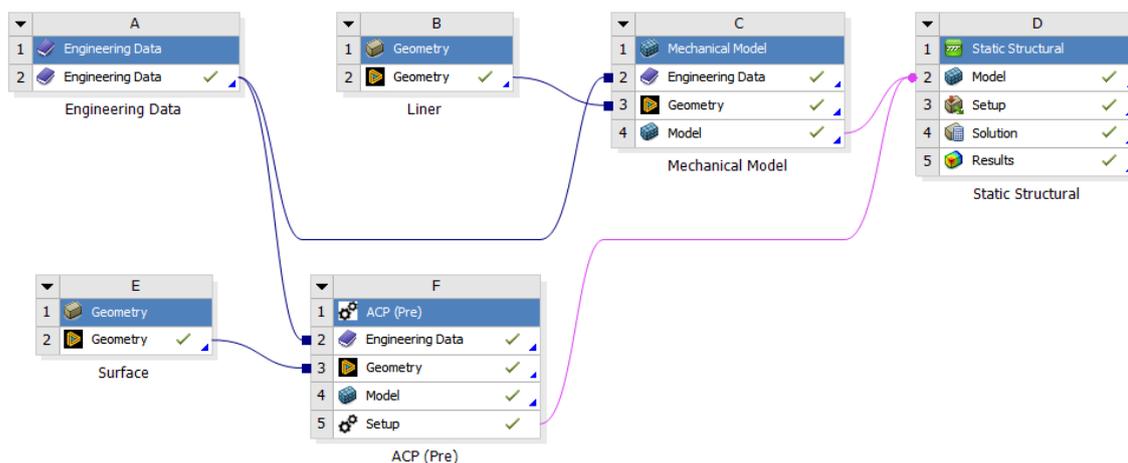


Fonte: Autor, 2023.

Após a criação das camadas mostradas nas figuras acima um modelo mecânico é importado para o *structural steel* juntamente com o *liner*, como mostrado no esquema de projeto na Figura 17, e a malha é gerada camada por camada como mostrado na

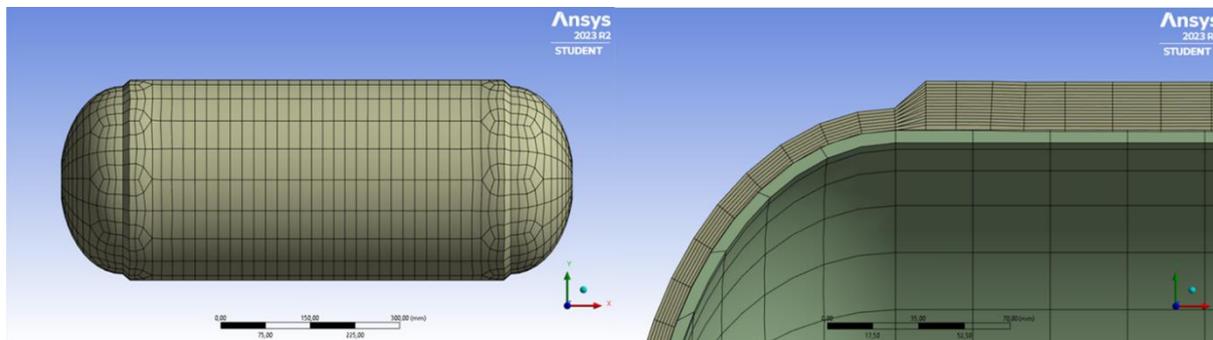
Figura 18 com um total de 18560 nós e 17260 elementos. Totalizando assim, juntamente com o *liner*, 29144 nós e 18880 elementos.

Figura 17 - Esquema de projeto no Workbench



Fonte: Autor, 2023.

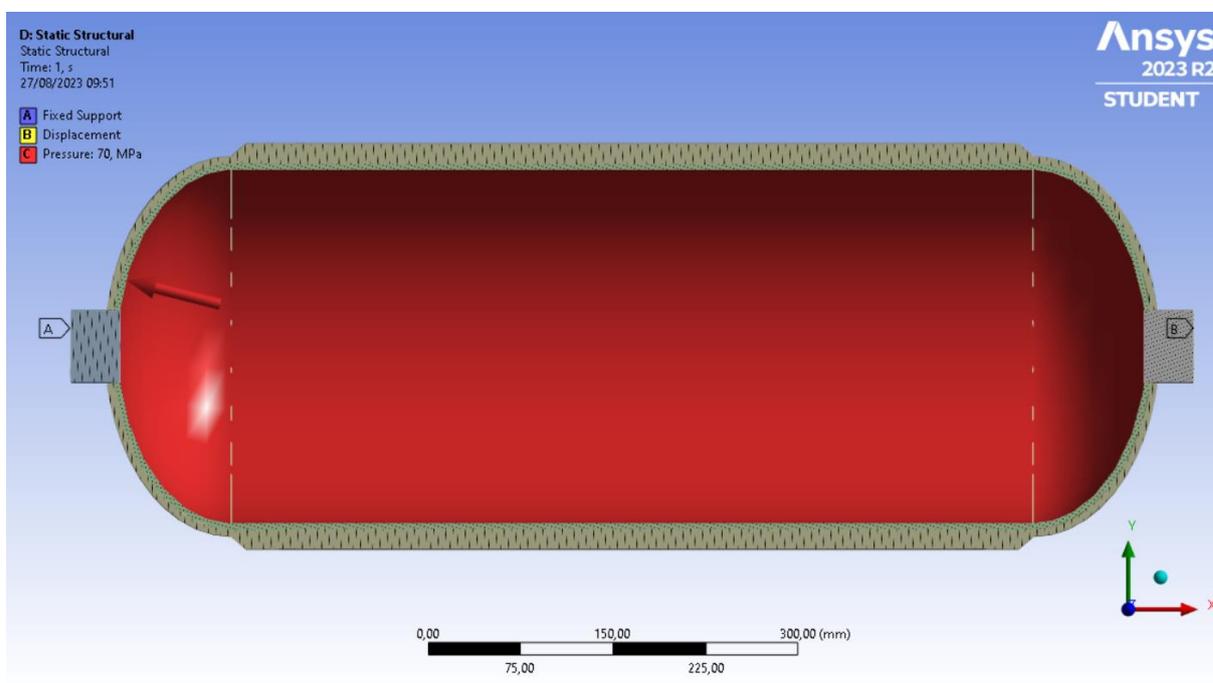
Figura 18 – Malha gerada do modelo de camadas em compósito com refinamento nas regiões de transição entre a parte cilíndrica e de domo



Fonte: Autor, 2023

O modelo completo e as condições de contorno são mostradas na Figura 19. Onde há um *fixed support* e um *displacement* com movimento livre no eixo x e com uma pressão interna aplicada de 70 MPa.

Figura 19 - Condições de contorno aplicadas A- Suporte fíco, B- Suporte com deslocamento e C- Pressão interna.

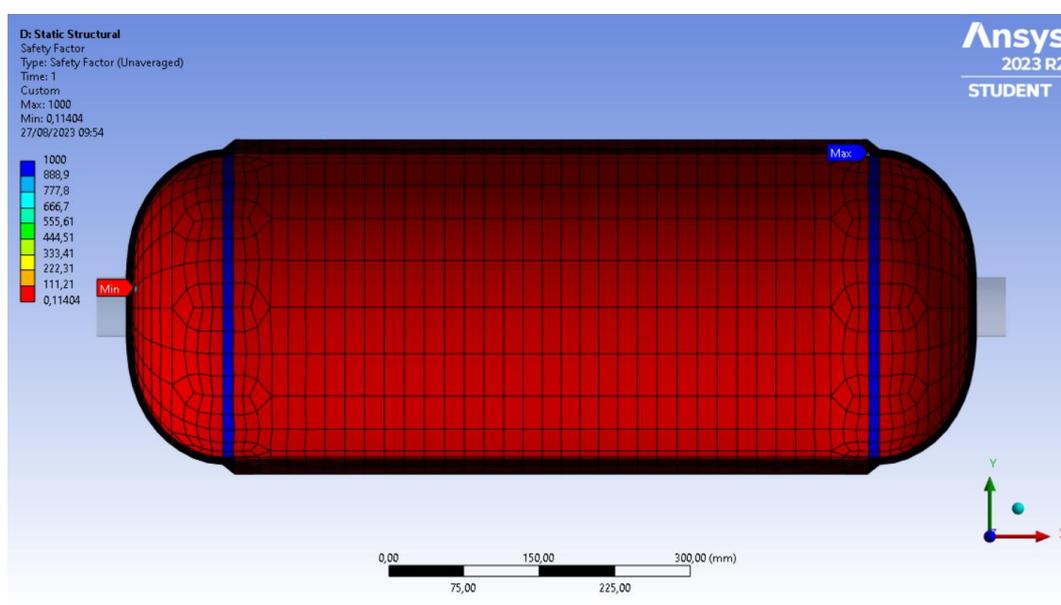


Fonte: Autor, 2023

4 RESULTADOS E ANÁLISE

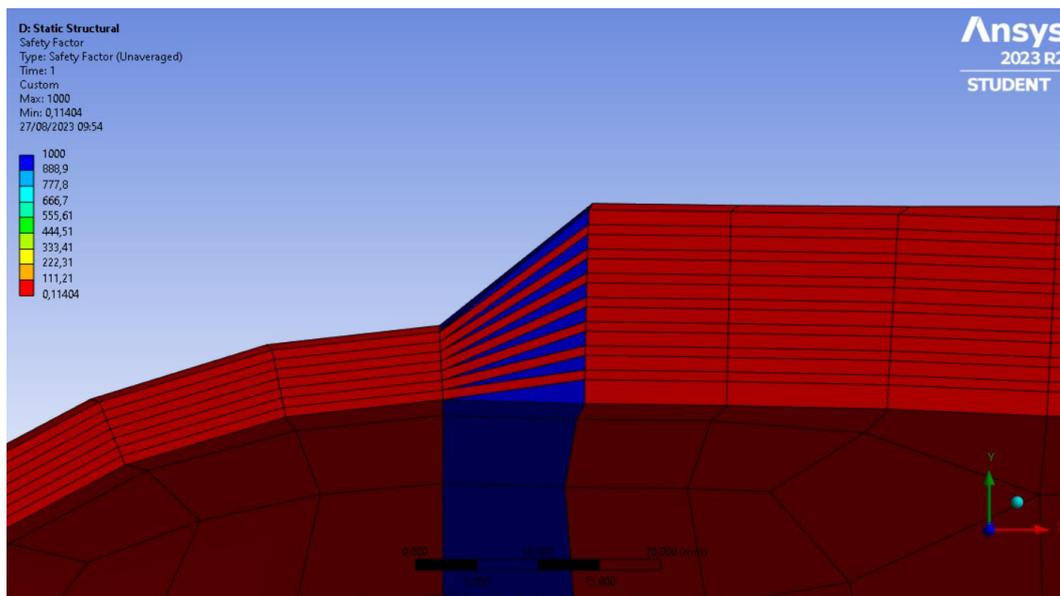
Para que o critério de Tsai-Wu seja satisfeito o valor do coeficiente de segurança precisa ser menor ou igual a 1 (SIQUEIRA, 2009). A Figura 20 mostra o resultado geral da simulação de elementos finitos para todas as camadas. É possível observar que o critério de Tsai-Wu é atingido em todo o corpo exceto na região de *drop-off* (Figura 21). Ou seja, a região não atende ao critério apresentado.

Figura 20 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na seção transversal do vaso de pressão



Fonte: Autor, 2023.

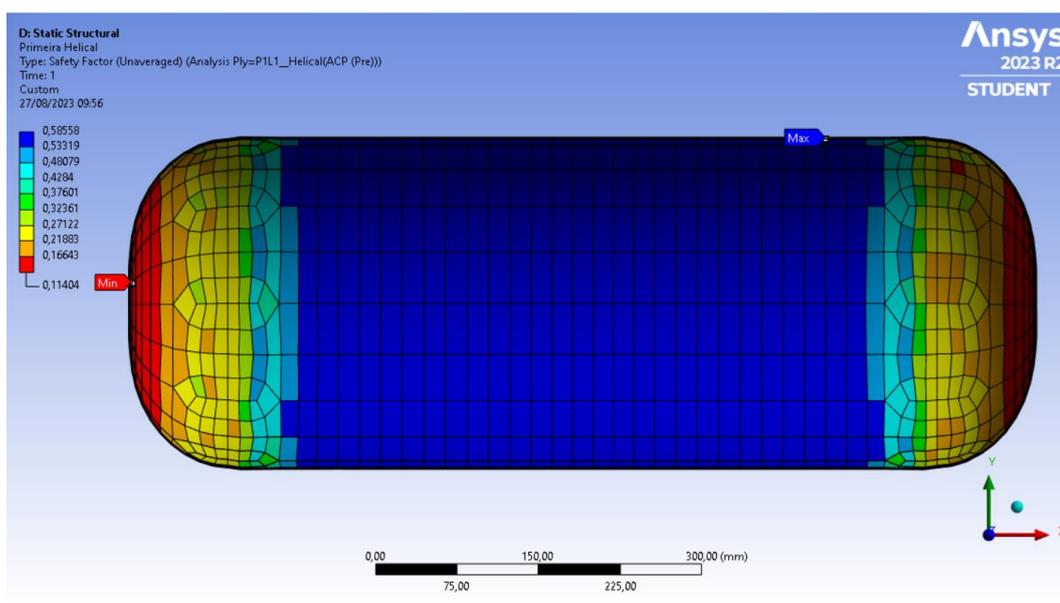
Figura 21 - Resultado da região de drop-off



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 22 apresenta o resultado da simulação para o fator de segurança na primeira camada do enrolamento helicoidal e está com a escala de cores ajustada. É possível observar que a região que está menos propensa a não atender ao critério é a região cilíndrica onde apresenta um valor máximo de 0,5855 e na região de domo têm-se um valor mínimo de 0,1140.

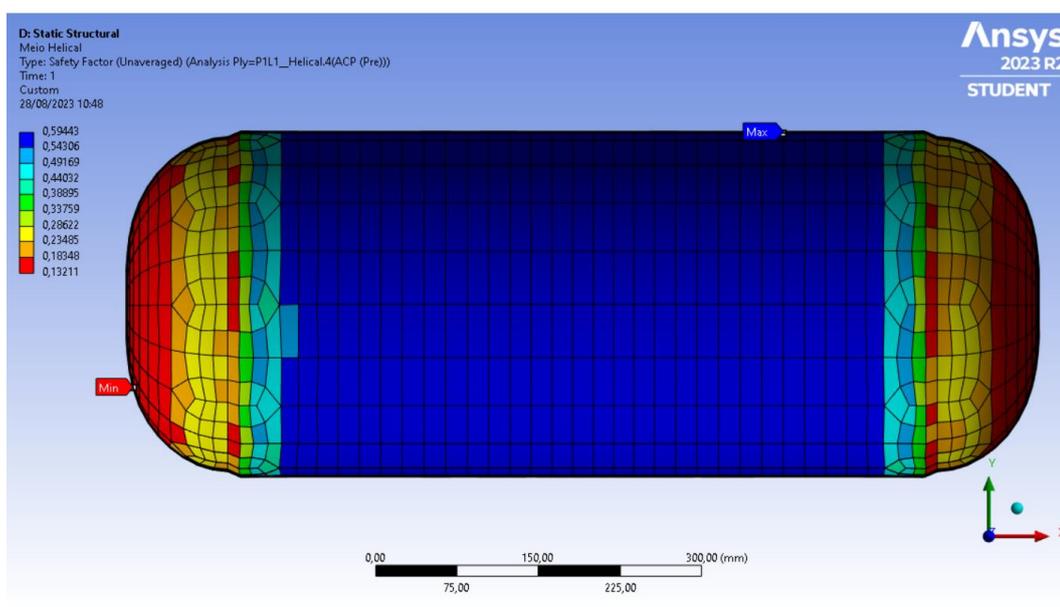
Figura 22 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na primeira camada do enrolamento helicoidal



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 23 apresenta o resultado do fator de segurança na camada intermediária na mesma condição da camada anterior. Os valores de máximo e mínimo do fator de segurança são 0,5944 e 0,1321, respectivamente.

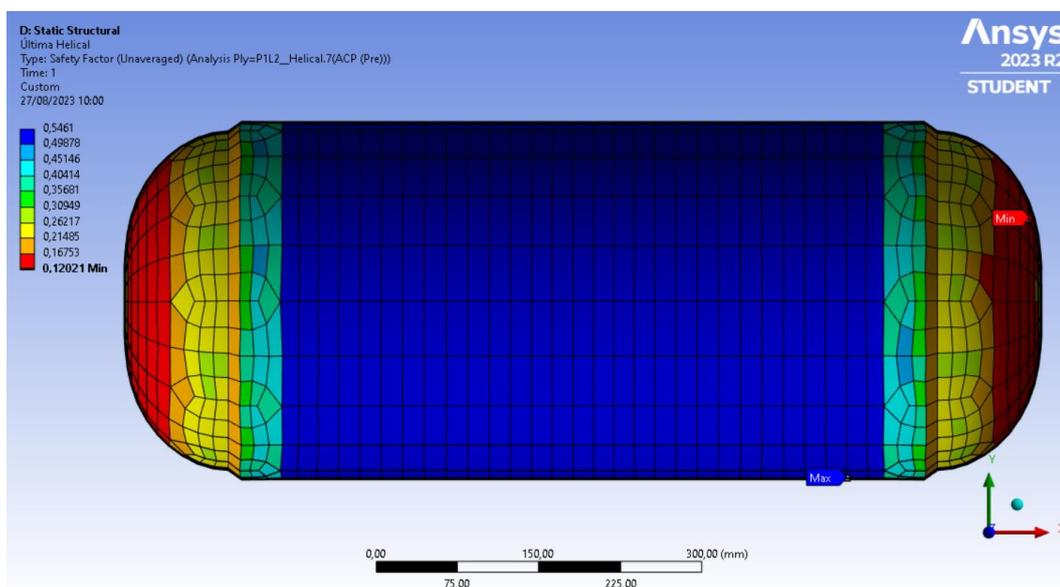
Figura 23 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na camada intermediária do enrolamento helicoidal



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 24 apresenta a última camada do enrolamento helicoidal nas mesmas condições das camadas anteriores. Os resultados máximo e mínimo obtidos são 0,5461 e 0,1202, respectivamente.

Figura 24 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na última camada do enrolamento helicoidal

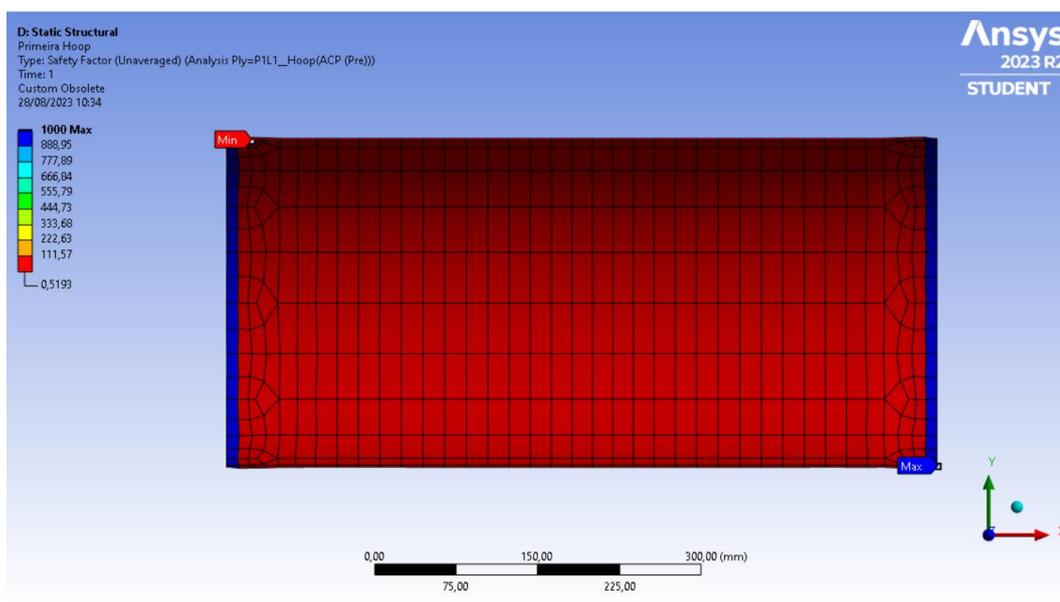


Fonte: Autor, 2023.

Particularmente, a região cilíndrica se destaca como aquela com maior vulnerabilidade, com um valor máximo de fator de segurança registrado (desconsiderando a região de *drop-off*) em 0,5855. Em contraste, a região do domo exibe o menor fator de segurança, com um valor mínimo registrado em 0,1140. Estes números destacam as áreas críticas que merecem atenção especial no projeto e análise do vaso de pressão, ressaltando a importância do reforço do enrolamento de aro na região cilíndrica.

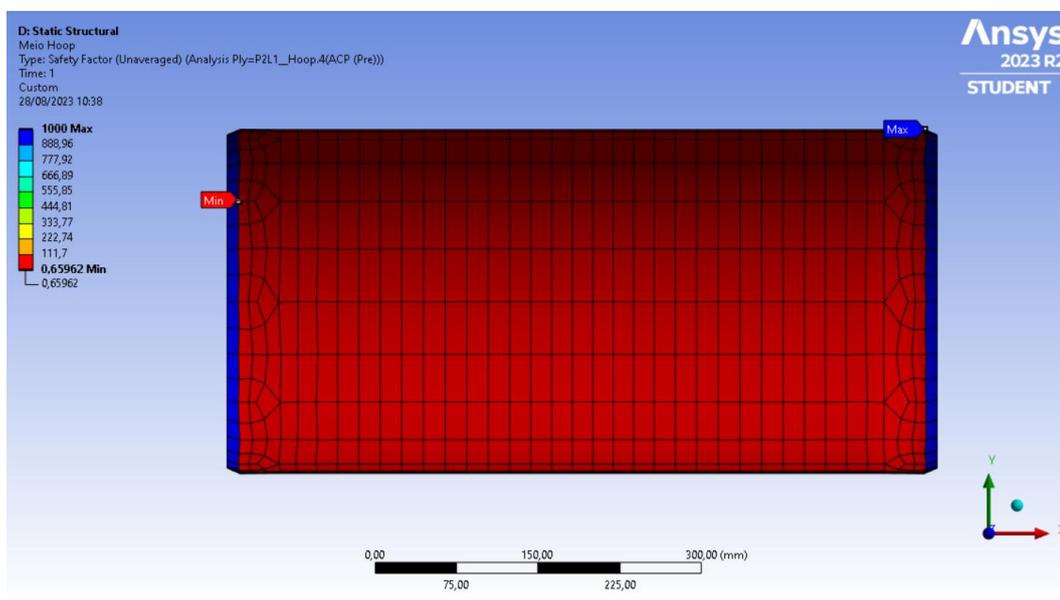
As Figura 25, Figura 26 e Figura 27 o mesmo esquema de resultados apresentados para o enrolamento helicoidal, mas dessa vez para o enrolamento de aro. É possível observar que o critério de falha de Tsai-Wu é atendido completamente na região cilíndrica. No entanto, é importante notar que a região de *drop-off*, por se tratar de uma área preenchida apenas com resina epoxy, apresenta particularidades. Nesse contexto, o critério de falha apresentado não é a ferramenta de análise ideal para esta região. A ausência de fibras na região de *drop-off* torna necessário considerar outras métricas ou critérios de avaliação que não foram abordados neste trabalho.

Figura 25 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na primeira camada do enrolamento de aro



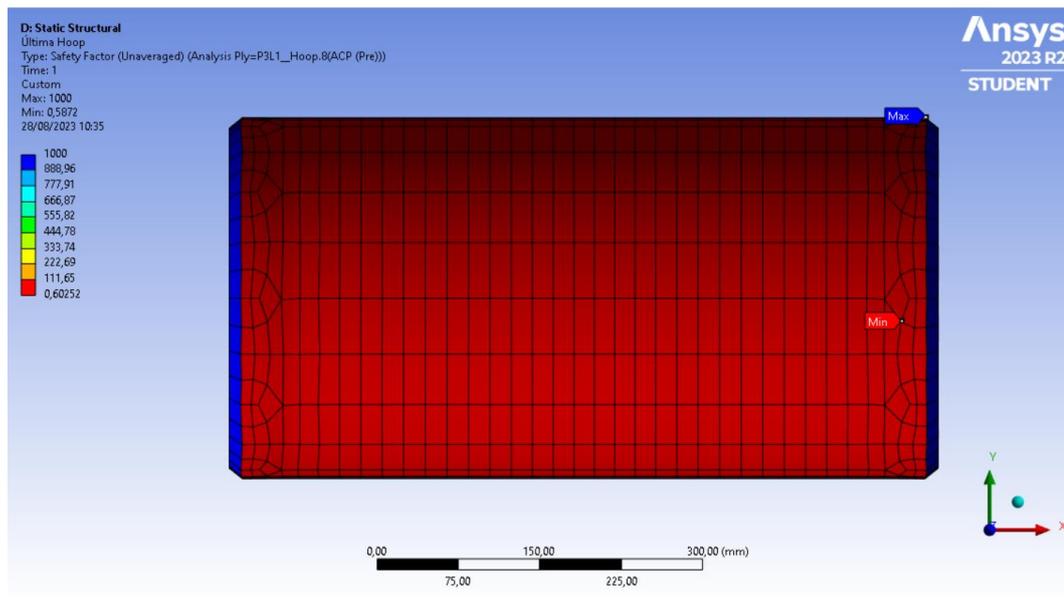
Fonte: Autor, 2023.

Figura 26 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na camada intermediária do enrolamento de aro



Fonte: Autor, 2023.

Figura 27 - Resultado do Fator de Segurança de Tsai-Wu na última camada do enrolamento de aro



Fonte: Autor, 2023.

5 CONSIDERAÇÕES

Com base nos resultados deste estudo, podemos afirmar que os vasos de pressão COPV apresentam um enorme potencial para o armazenamento de hidrogênio verde em altas pressões. O avanço contínuo nas pesquisas tanto na produção quanto no armazenamento de hidrogênio aponta para uma transição global em direção a fontes de energia renováveis.

Outro ponto importante destacado no trabalho é o poderoso papel do software Ansys no avanço da tecnologia de armazenamento de hidrogênio verde. O software mostrou ser uma ferramenta de grande relevância para a análise e simulação de sistemas de armazenamento, contribuindo significativamente para o desenvolvimento e aperfeiçoamento dessa tecnologia.

Em resumo, este estudo reforça a importância dos vasos de pressão COPV no contexto da transição para fontes de energia sustentáveis, ao mesmo tempo em que aplica o uso do critério de falha de Tsai-Wu para projetos com materiais compósitos. Além disso, o Ansys se destaca como uma ferramenta indispensável no avanço da tecnologia de armazenamento de hidrogênio verde, impulsionando ainda mais os esforços em prol de um futuro energético mais limpo e sustentável. Com essas informações, a adoção de tecnologias de energia renovável, como o hidrogênio verde, ganha maior respaldo técnico e científico, acelerando o progresso rumo a um mundo mais sustentável e livre de emissões de carbono.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, F. H. *et al.* Design and fabrication of low cost filament winding machine. **Materials & design**, v. 28, n. 1, p. 234-239, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.015>. Acesso em: 04 jul. 2023.
- ABE, John O. *et al.* Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. **International journal of hydrogen energy**, v. 44, n. 29, p. 15072-15086, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>. Acesso em: 14 mai. 2023.
- AIR, Alexander; SHAMSUDDOHA, Md; PRUSTY, B. Gangadhara. A review of Type V composite pressure vessels and automated fibre placement based manufacturing. **Composites Part B: Engineering**, v. 253, p. 110573, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110573>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- ALCANTAR, V. *et al.* Optimization of type III pressure vessels using genetic algorithm and simulated annealing. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 31, p. 20125-20132, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.146>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- ALMEIDA, A. S. de. *et al.* Hidrogênio, o combustível do futuro. **Diversitas Journal**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 356–366, 2019. DOI: 10.17648/diversitas-journal-v4i2.593. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/593. Acesso em: 29 abr. 2023.
- ANSYS. ANSYS Composite PrepPost User's Guide, 2018.
- AZEEM, Mohammad *et al.* Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review. **Journal of Energy Storage**, v. 49, p. 103468, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- BARBOSA, Harley Alves. **Processos de produção e estocagem de hidrogênio: uma revisão da literatura**. 2020. 81p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020. Disponível em: <http://monografias.ufrn.br/handle/123456789/10926>. Acesso em: 25 abr. 2023.
- BARTHÉLÉMY, Hervé; WEBER, Mathilde; BARBIER, Françoise. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 11, p. 7254-7262, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- BŁACHUT, Aleksander *et al.* Influence of fiber tension during filament winding on the mechanical properties of composite vessels. **Composite Structures**, p. 116337, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116337>. Acesso em: 04 jul. 2023.

BORGES, Ana Caroline Fernandes. **Hidrogênio verde**: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética. 2022. 66p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista, Rosana, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/238476>. Acesso em: 25 abr. 2023.

CHAWLA, N. C. K. K.; CHAWLA, K. K. Metal-matrix composites in ground transportation. **JoM**, v. 58, p. 67-70, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0231-5>. Acesso em: 12. jul. 2023.

DE SOUZA, G. P. *et al.* Metodologia para aplicação de critérios de falhas em materiais compósitos laminados utilizando o método dos elementos finitos. In: **Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais**. 2002.

DINIZ, Camila Aparecida. **Otimização Estrutural de Elementos em Compósitos Usando Redes Neurais Artificiais**. 2017. 87p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/678>. Acesso em 09 jul. 2023.

ELBERRY, Ahmed M. *et al.* Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems. **International journal of hydrogen energy**, v. 46, n. 29, p. 15671-15690, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.080>. Acesso em: 22 mai 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 02 jul. 2023.

FIGUEIREDO, Beatriz Beca; CESAR, Francisco Ignácio Giocondo. HIDROGÊNIO COMO FONTE ALTERNATIVA DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO: UMA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA EXPLORATÓRIA. **REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE-ISSN 2763-8928**, v. 1, n. 6, p. e1649-e1649, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/acertte.v1i6.49>. Acesso em: 25 abr. 2023.

FREITAS, Guilherme Marcelino Teixeira de. **Hidrogênio verde**: estudo de caso sobre o potencial brasileiro como exportador para União Europeia utilizando programação linear. 2022. 63p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2022. Disponível em: <http://app.uff.br/riuff/handle/1/26070>. Acesso em: 29 abr. 2023.

GARDINER, G. Composites in Hydrogen Storage. **CompositeWorld Collections**, 2020. 4-18.

HASAN, Mahadi; ZHAO, Jingwei; JIANG, Zhengyi. Micromanufacturing of composite materials: a review. **International Journal of Extreme Manufacturing**, v. 1, n. 1, p. 012004, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab0f74>. Acesso em 08 jul. 2023.

HASSAN, I. A. *et al.* Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111311, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311>. Acesso em: 20 jun. 2023.

HERNANDEZ-MORENO, Hilario *et al.* Influence of winding pattern on the mechanical behavior of filament wound composite cylinders under external pressure. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 3-4, p. 1015-1024, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.07.020>. Acesso em 05 jul. 2023.

Hydrogen – data telling a story. **Global Energy Infrastructure**, 30 mar. 2021. Disponível em: <https://globalenergyinfrastructure.com/articles/2021/03-march/hydrogen-data-telling-a-story/>. Acesso em: 30 abr. 2023.

IBERDROLA. Transição Energética. **Iberdrola**, 2022. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/transicao-energetica>. Acesso em: 03 dez. 2022.

IEA - International Energy Agency. **Global energy investment in clean energy and in fossil fuels 2015-2023**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-investment-in-clean-energy-and-in-fossil-fuels-2015-2023>. Acesso em: 02 jul. 2023.

JUNIOR, Valter Luiz Jantara; PAPAELIAS, Mayorkinos. Design by analysis of deep-sea type III pressure vessel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 17, p. 10468-10477, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.128>. Acesso em: 20 jun. 2023.

KUMAR, Ashwini *et al.* Fabrication methods of metal matrix composites (MMCs). **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 6840-6846, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.128>. Acesso em: 12 jul. 2023.

KUMAR, S. Shiva; HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, n. 3, p. 442-454, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>. Acesso em: 06 abr. 2023.

LEITE, Vinicius R. L. R. Estado da arte dos materiais compósitos na indústria aeronáutica. **Revista Ciências Exatas**, v. 20, n. 2, p. 16-28, 2014. Disponível em: <http://periodicos.unitau.br/ojs/index.php/exatas/article/view/2014>. Acesso em: 08 jul. 2023.

LOSSIE, Mieke; VAN BRUSSEL, Hendrik. Design principles in filament winding. **Composites manufacturing**, v. 5, n. 1, p. 5-13, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0956-7143(94)90014-0). Acesso em: 05 jul. 2023.

MAŁACHOWSKA, Aleksandra *et al.* Hydrogen storage in geological formations—The potential of salt caverns. **Energies**, v. 15, n. 14, p. 5038, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/14/5038>. Acesso em: 14 mai. 2023.

MISTRY, Jitendra M.; GOHIL, Piyush P. Research review of diversified reinforcement on aluminum metal matrix composites: fabrication processes and mechanical characterization. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 25, n. 4, p. 633-647, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/secm-2016-0278>. Acesso em 10 jul. 2023.

NATIONS. Paris Agreement. **United Nations**, 2020. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 03 dez. 2022.

PARK, Gunyoung; JANG, Hyoseong; KIM, Chul. Design of composite layer and liner for structure safety of hydrogen pressure vessel (type 4). **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 35, n. 8, p. 3507-3517, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0723-9>. Acesso em: 22 jun. 2023.

PERES, Amanda Pereira. **Um estudo comparativo de critérios de falha aplicados ao dano progressivo de materiais laminados**. 2019. 25p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/206371>. Acesso em: 18. jul. 2023.

Por que esse é o momento certo para o Hidrogênio? **Blog ESSS**, 26 set. 2022. Disponível em: https://www.esss.co/blog/melhor-momento-para-combustivel-hidrogenio/?utm_campaign=newsletter_esss_-_novembro_2022_-_pt&utm_medium=email&utm_source=RD+Station. Acesso em: 03 dez. 2022.

QUANJIN, Ma *et al.* Filament winding technique, experiment and simulation analysis on tubular structure. In: **IOP conference series: materials science and engineering**. IOP Publishing, p. 012029, 2018b. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/342/1/012029>. Acesso em: 04 jul. 2023

QUANJIN, Ma *et al.* Robotic filament winding technique (RFWT) in industrial application: A review of state of the art and future perspectives. **Int. Res. J. Eng. Technol**, v. 5, n. 12, p. 1668-1676, 2018a.

RAJAK, Dipen Kumar *et al.* Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 6, p. 6354-6374, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>. Acesso em: 10 jul. 2023.

RAVICHANDRAN, M. *et al.* Recent developments in polymer matrix composites—a review. In: **IOP conference series: materials science and engineering**. IOP Publishing, 2020. p. 012096. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/988/1/012096>. Acesso em: 12 jul. 2023.

ROUSSEAU, J.; PERREUX, D.; VERDIERE, N. The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes. **Composites Science and Technology**, v. 59, n. 9, p. 1439-1449, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00184-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00184-5). Acesso em: 05 jul. 2023.

RUSMAN, N. A. A.; DAHARI, M. A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 28, p. 12108-12126, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.244>. Acesso em: 04 jun. 2023.

SAFRI, Syafiqah Nur Azrie *et al.* Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 133, p. 112-121, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.008>. Acesso em: 10 jul. 2023.

SHARMA, Daulat Kumar; MAHANT, Devang; UPADHYAY, Gautam. Manufacturing of metal matrix composites: A state of review. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 506-519, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.128>. Acesso em: 12 jul. 2023.

SHARMA, Pranjali; CHUGH, Parivesh; NEOGI, Swati. Study to methodize the design of a safe Type-4 CNG storage vessel using finite element analysis with experimental validation. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 192, p. 104425, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104425>. Acesso em: 20 jun. 2023.

SHRIGANDHI, Ganesh D.; KOTHAVALA, Basavaraj S. Biodegradable composites for filament winding process. **Materials Today: Proceedings**, v. 42, p. 2762-2768, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.718>. Acesso em: 04 jul. 2023.

SIQUEIRA, Eder José. **Estudo dos critérios de falhas em compósitos PPS/fibras de carbono utilizando elementos finitos**. 2009. 183p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/97058>. Acesso em: 18 jul. 2023.

SOFI, Tasdeeq; NEUNKIRCHEN, Stefan; SCHLEDJEWSKI, Ralf. Path calculation, technology and opportunities in dry fiber winding: a review. **Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science**, v. 4, n. 3, p. 57-72, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/20550340.2018.1500099>. Acesso em: 05 jul. 2023.

SOLIDWORKS. Critério de Falha de Tsai-Wu, 2022. Disponível em: [https://help.solidworks.com/2022/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/r_TsaiWu_Failure_Criterion.htm?format=P&value=.](https://help.solidworks.com/2022/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/r_TsaiWu_Failure_Criterion.htm?format=P&value=) Acesso em: 18 jul. 2023.

SUN, Jinxing *et al.* A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites. **Journal of Materials Science & Technology**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.06.039>. Acesso em: 12 jul. 2023.

TARASOV, Boris P. *et al.* Metal hydride hydrogen storage and compression systems for energy storage technologies. **international journal of hydrogen energy**, v. 46,

n. 25, p. 13647-13657, 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.085>. Acesso em: 04 jun. 2023.

TARHAN, Cevahir; ÇIL, Mehmet Ali. A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods. **Journal of Energy Storage**, v. 40, p. 102676, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102676>. Acesso em: 18 jun. 2023.

VALENTI, Gianluca. Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. In: **Compendium of hydrogen energy**. Woodhead Publishing, 2016. p. 27-51. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00002-X>. Acesso em: 15 mai. 2023.

VANCOILLIE, Jeroen *et al.* Comparison of the renewable transportation fuels, hydrogen and methanol formed from hydrogen, with gasoline–Engine efficiency study. **International journal of hydrogen energy**, v. 37, n. 12, p. 9914-9924, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.145>. Acesso em: 09 ago. 2023.

WU, Qiaoguo *et al.* Design and fabrication of carbon-fiber-wound composite pressure vessel with HDPE liner. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 200, p. 104851, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104851>. Acesso em: 20 jun. 2023.

XU, Ping; ZHENG, J. Y.; LIU, P. F. Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels. **Materials & Design**, v. 30, n. 7, p. 2295-2301, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.006>. Acesso: 18 jul. 2022.

YUE, Meiling; LAMBERT, Hugo; PAHON, Elodie; ROCHE, Robin; JEMEI, Samir; HISSEL, Daniel. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 146, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>. Acesso em: 06 abr. 2023.

ZHANG, Qian *et al.* Design of a 70 MPa type IV hydrogen storage vessel using accurate modeling techniques for dome thickness prediction. **Composite Structures**, v. 236, p. 111915, 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111915>. Acesso em: 20 jun. 2023.

ZUO, Peiyuan; SRINIVASAN, Dharun V.; VASSILOPOULOS, Anastasios P. Review of hybrid composites fatigue. **Composite Structures**, v. 274, p. 114358, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114358>. Acesso em: 10 jul. 2023.