



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

JULYANA XAVIER MARTINS

**MATRIZ DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS APLICADOS EM
TANQUES DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE**

FORTALEZA

2026
JULYANA XAVIER MARTINS

MATRIZ DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS APLICADOS EM TANQUES
DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Metalúrgica do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção
do grau de bacharel em Engenharia
Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira
Quevedo Nogueira.

FORTALEZA

2026

JULYANA XAVIER MARTINS

MATRIZ DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS APLICADOS EM TANQUES
DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Metalúrgica do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção
do grau de bacharel em Engenharia
Metalúrgica.

Aprovada em: 19/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.
(Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Enio Pontes de Deus
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus

À minha família e ao meu namorado

Aos meus amigos de curso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, força e perseverança ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Nos momentos de maior dificuldade, foi a fé que me sustentou e me permitiu seguir em frente com coragem.

Agradeço também a mim mesma, por não ter desistido diante dos desafios enfrentados ao longo do curso. Mesmo diante de obstáculos pessoais, acadêmicos e emocionais, permaneci firme, resiliente e determinada a concluir essa etapa tão importante da minha vida.

Sou imensamente grata às políticas sociais e educacionais que tornaram possível minha permanência em uma universidade pública, gratuita e de qualidade. Reconheço a importância dessas políticas na democratização do acesso ao ensino superior e na transformação de realidades.

Agradeço ao meu orientador, pela disponibilidade, pelas orientações e pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como aos membros da banca examinadora, pelo tempo dedicado, pelas contribuições e pelas valiosas sugestões que enriqueceram este estudo.

Por fim, agradeço à minha família, que esteve ao meu lado.

“Porque Dele, por Ele e para Ele são todas as
coisas.”

Romanos 11:36

RESUMO

O hidrogênio verde tem se destacado como um vetor energético promissor no contexto da transição para sistemas energéticos de baixo carbono. No entanto, um dos principais desafios associados à sua aplicação em larga escala está relacionado ao armazenamento seguro e eficiente, especialmente no que se refere à seleção adequada dos materiais utilizados na fabricação de tanques de armazenamento, que devem suportar pressões elevadas, geralmente na faixa de 200 a 700 bar. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma matriz de decisão multicritério para apoiar a escolha de materiais aplicáveis a tanques metálicos do tipo I destinados ao armazenamento de hidrogênio verde. A metodologia adotada baseia-se no método da Soma Ponderada (SAW - Simple Additive Weighting), pertencente à família dos métodos compensatórios de apoio à decisão multicritério. Foram definidos critérios técnicos, econômicos e ambientais, a saber: resistência mecânica, densidade, resistência à fragilização por hidrogênio, resistência à corrosão, custo relativo e sustentabilidade. As alternativas analisadas incluíram aço inoxidável austenítico AISI 316L, liga de alumínio AA 6061, liga de titânio Ti-6Al-4V e aço baixa liga Cr-Mo (34CrMo4). Os critérios qualitativos foram convertidos em valores numéricos por meio de uma escala ordinal, permitindo sua integração ao modelo. Em seguida, os dados foram normalizados e os pesos atribuídos conforme julgamento técnico, considerando o contexto de armazenamento estacionário. Os resultados indicaram o aço inoxidável austenítico AISI 316L como a alternativa mais adequada entre as analisadas, apresentando melhor equilíbrio entre os critérios avaliados. Conclui-se que o modelo multicritério proposto não substitui a análise aprofundada da literatura, mas constitui uma ferramenta de apoio que fortalece o processo decisório, promovendo uma avaliação estruturada, transparente e consistente na seleção de materiais para tanques de armazenamento de hidrogênio verde.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Armazenamento de hidrogênio. Seleção de materiais. Análise multicritério. Método SAW.

ABSTRACT

Green hydrogen has emerged as a promising energy carrier in the context of the transition toward low-carbon energy systems. However, one of the main challenges associated with its large-scale application is related to safe and efficient storage, particularly regarding the appropriate selection of materials used in the manufacturing of storage tanks, which must withstand high pressures, typically in the range of 200 to 700 bar. In this context, this study aims to develop a multicriteria decision matrix to support the selection of materials for Type I metallic tanks used in green hydrogen storage. The methodology is based on the Simple Additive Weighting (SAW) method, which belongs to the family of compensatory multicriteria decision-making methods. Technical, economic, and environmental criteria were defined, namely: mechanical strength, density, resistance to hydrogen embrittlement, corrosion resistance, relative cost, and sustainability. The analyzed alternatives included austenitic stainless steel AISI 316L, aluminum alloy AA 6061, titanium alloy Ti-6Al-4V, and low-alloy Cr–Mo steel (34CrMo4). Qualitative criteria were converted into numerical values using an ordinal scale, allowing their integration into the decision model. Subsequently, the data were normalized and weights were assigned based on technical judgment, considering the context of stationary storage. The results indicated austenitic stainless steel AISI 316L as the most suitable alternative among those evaluated, presenting the best balance between the selected criteria. It is concluded that the proposed multicriteria model does not replace an in-depth literature review but serves as a decision-support tool that strengthens the selection process by providing a structured, transparent, and consistent evaluation of materials for green hydrogen storage tanks.

Keywords: Green hydrogen. Hydrogen storage. Materials selection. Multicriteria analysis. SAW method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de tanques para armazenamento de hidrogênio.....	20
Figura 2 – Tanque Tipo I (Totalmente Metálico).....	21
Figura 3 – Tanque Tipo II (Metálico com Envoltório Parcial de Compósito).....	22
Figura 4 – Tanque Tipo III (Metálico com Envoltório Total de Compósito).....	23
Figura 5 – Tanque Tipo IV (Polimérico com Envoltório de Compósito).....	24
Figura 6 – Tanque Tipo V (Totalmente em Material Compósito).....	26
Figura 7 – Fluxograma do processo de Apoio à Decisão Multicritério para seleção de materiais de tanques de hidrogênio.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Matriz de decisão inicial dos materiais avaliados.....	40
Tabela 2	– Conversão qualitativa em numérica	41
Tabela 3	– Conversão qualitativa em numérica.....	41
Tabela 4	– Matriz de decisão com valores normalizados.....	42
Tabela 5	– Conversão qualitativa em numérica.....	43
Tabela 6	– Atribuição de pesos aos critérios.....	44
Tabela 7	– Resultado do SAW.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAW	Simple Additive Weighting
AIE	Agência Internacional de Energia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	Geral	16
2.2	Específicos	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Hidrogênio Verde	17
3.2	Vantagens e Desvantagens	18
3.3	Tanques de Armazenamento de Hidrogênio Verde	18
3.3.1	<i>Tipos</i>	19
3.4	CRITÉRIOS DA SELEÇÃO DE MATERIAIS	26
3.5	MATERIAIS UTILIZADOS EM TANQUES METÁLICOS PARA ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO	28
3.5.1	Aço Inoxidável Austenítico (316L)	28
3.5.2	Ligas de Alumínio	30
3.5.3	Ligas de Titânio	31
3.5.4	Aços Baixa Liga Cr-Mo	32
3.6	MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO	34
3.6.1	Soma Ponderada (SAW)	36
3.6.2	Normalização dos dados	36
3.6.3	Atribuição dos pesos	37
3.6.4	Cálculo da Soma Ponderada	38
4	METODOLOGIA	38
4.1	Identificação do problema	38
4.2	Definição das alternativas	39
4.3	Definição dos critérios	39
4.4	Normalização dos dados	40
4.4.1	Conversão qualitativa para numérica	40
4.4.2	Normalização dos dados	42
4.5	Atribuição dos pesos	42
4.6	Cálculo da soma ponderada	44
4.7	Classificação das alternativas	45

4.8	Recomendação do material mais adequado.....	45
5	CONCLUSÃO.....	46
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

A transição energética global e as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado o desenvolvimento e a adoção de fontes limpas de energia. Nesse cenário, o hidrogênio verde emerge como uma alternativa promissora, capaz de atuar como vetor energético de baixo carbono, já que sua produção por eletrólise, utilizando energia proveniente de fontes renováveis, pode evitar a emissão de até 830 milhões de toneladas de CO₂ por ano, valor atualmente gerado quando o hidrogênio é produzido a partir de combustíveis fósseis, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE).

Além de responder à necessidade de reduzir emissões, o hidrogênio verde também se insere em um contexto de segurança energética global. Crises recentes, como a guerra na Ucrânia, evidenciaram a vulnerabilidade do suprimento de combustíveis fósseis e impulsionaram a busca por alternativas mais seguras, eficientes e sustentáveis. Esse movimento reforça a urgência de investir em vetores energéticos de baixo carbono, capazes de sustentar o crescimento da demanda mundial por energia e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante na natureza. Estima-se que, até 2030, a demanda por hidrogênio verde possa alcançar 30 milhões de toneladas, consolidando-se como um dos principais pilares de um futuro energético mais limpo (AIE, 2022). Apesar disso, a tecnologia ainda enfrenta desafios relevantes, como alto custo de produção, elevado gasto energético no processo de eletrólise e riscos associados ao manuseio do hidrogênio, que é altamente volátil e inflamável.

Outro desafio crítico é o armazenamento seguro e eficiente desse combustível. Tanques de hidrogênio comprimido são capazes de estocar energia por longos períodos e apresentam vantagens frente a alternativas como baterias de íons de lítio, especialmente em termos de peso e versatilidade. Ainda assim, a escolha do material adequado para esses tanques é um fator determinante para garantir segurança, durabilidade, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental. Materiais como aços inoxidáveis, ligas de alumínio e ligas de titânio têm sido utilizados em diferentes configurações de tanques, mas cada um apresenta trade-offs (compensações). Os aços inoxidáveis, por exemplo, oferecem boa resistência à corrosão, porém possuem um alto custo. As ligas de alumínio destacam-se pelo baixo peso e boa resistência à fragilização por hidrogênio, mas possuem menor resistência mecânica. Já as

ligas de titânio apresentam excelente desempenho mecânico e, contudo seu elevado custo limita a aplicação em larga escala.

Embora a literatura apresente avanços no campo da viabilidade econômica, modelagem de tanques e panorama político-energético, ainda há uma lacuna significativa na integração desses critérios em um modelo que auxilie engenheiros na tomada de decisão quanto à escolha de materiais. Diante disso, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma matriz de decisão para a seleção de materiais aplicados em tanques de armazenamento de hidrogênio verde, considerando simultaneamente critérios técnicos, econômicos e ambientais.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Elaborar uma matriz de decisão para apoiar a escolha de materiais para tanques de armazenamento de hidrogênio verde, integrando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

2.2 Específicos

- Reunir referências teóricas sobre tecnologias de armazenamento de hidrogênio e alternativas de materiais empregados.
- Mapear critérios relevantes de desempenho mecânico, confiabilidade, custo e sustentabilidade.
- Construir e aplicar a matriz de decisão, atribuindo pesos e avaliando diferentes opções de materiais.
- Analisar os resultados obtidos, destacando vantagens, limitações e implicações para aplicações industriais.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Hidrogênio Verde

Acredita-se que, em alguns anos, o hidrogênio será o principal vetor energético de veículos e dispositivos portáteis, funcionando como meio de armazenamento e transporte de energia. Essa perspectiva é impulsionada pela escassez de petróleo e pela relativa facilidade de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, como energia hidráulica, eólica, solar e geotérmica, utilizando apenas a água como matéria-prima.

O hidrogênio é o elemento mais abundante da natureza, presente em grande parte dos compostos químicos, como na molécula de água (H_2O), em que se combina com o oxigênio. Para ser utilizado como fonte de energia, ele precisa ser separado de outros elementos por meio de processos específicos, sendo a eletrólise da água o método mais limpo e sustentável atualmente disponível.

Durante a eletrólise, uma corrente elétrica é aplicada à água, promovendo a separação de suas moléculas em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). Quando essa energia elétrica é proveniente de fontes renováveis, como a solar, eólica ou hidrelétrica, o produto obtido é chamado de hidrogênio verde. Esse processo não gera emissões de gases de efeito estufa, o que faz desse combustível uma alternativa promissora na redução da pegada de carbono e na transição para uma economia mais sustentável.

Diferente das formas convencionais de produção, que utilizam gás natural ou carvão e liberam grandes quantidades de dióxido de carbono, o hidrogênio verde se destaca por ser limpo e renovável, podendo ser armazenado e aplicado em diversos setores. Ele é usado em veículos movidos a células a combustível, na geração de energia elétrica e em processos industriais.

Dessa forma, o hidrogênio verde consolida-se como uma das principais alternativas para a transição energética em direção a uma economia de baixo carbono. Ainda assim, apresenta vantagens e limitações que devem ser consideradas em sua aplicação.

3.2 Vantagens e Desvantagens

De acordo com a empresa Sunne (2025), o principal obstáculo do hidrogênio verde está no custo de produção, que ainda é elevado quando comparado ao do hidrogênio

cinza, obtido a partir de combustíveis fósseis. Isso ocorre porque as tecnologias de eletrólise e as fontes renováveis de energia ainda apresentam alto investimento inicial e custos operacionais significativos.

Outro desafio é o armazenamento, uma vez que o hidrogênio é um gás extremamente leve e de baixa densidade. Para ser armazenado de forma segura, ele precisa ser comprimido a altas pressões ou resfriado a temperaturas muito baixas, o que requer infraestrutura especializada e encarece o processo.

O transporte também representa uma dificuldade. Por ser altamente inflamável e explosivo, o hidrogênio exige sistemas de segurança rigorosos e transporte sob compressão, o que aumenta o custo logístico e os riscos associados.

Entre as principais vantagens do hidrogênio verde está a baixa emissão de carbono, uma vez que sua produção a partir de fontes renováveis não libera gases poluentes nem resíduos nocivos. (SUNNE, 2025).

Outra vantagem é a redução da dependência de combustíveis fósseis, contribuindo para a segurança energética e para a sustentabilidade a longo prazo.(SUNNE, 2025).

Além disso, o hidrogênio verde funciona como uma forma eficiente de armazenamento de energia renovável, permitindo conservar o excedente gerado por fontes como a solar e a eólica e utilizá-lo em períodos de baixa produção, promovendo maior estabilidade no sistema elétrico.

3.3 Tanques de Armazenamento de Hidrogênio Verde

O armazenamento seguro e eficiente do hidrogênio verde é um dos principais desafios para sua aplicação em larga escala. Por ser um gás de baixa densidade e alta inflamabilidade, exige tanques capazes de suportar altas pressões e resistir à fragilização por hidrogênio, fenômeno que pode comprometer a integridade estrutural dos materiais metálicos utilizados.

Os tanques de hidrogênio, também conhecidos como cilindros ou reservatórios de hidrogênio, são projetados para armazenar o gás em condições de alta pressão, garantindo

segurança e eficiência no transporte e no abastecimento. Esses sistemas são empregados em instalações de armazenamento estacionário, em processos industriais e em diferentes aplicações que demandam o uso de hidrogênio comprimido.

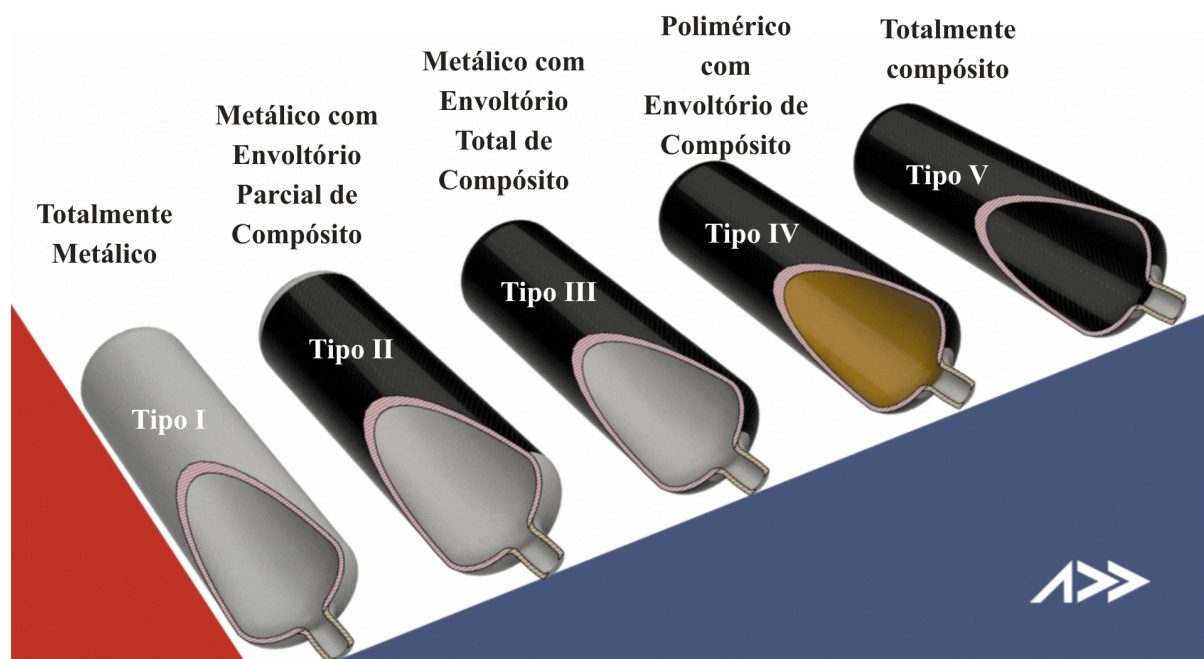
De forma geral, eles devem apresentar as seguintes características:

- **Alta resistência à pressão**, normalmente entre 200 e 700 bar;
- **Baixa permeabilidade**, minimizando o vazamento de hidrogênio;
- **Design leve**, essencial para aplicações móveis;
- **Sistemas de segurança integrados**, como válvulas de alívio e sensores de pressão.

3.3.1 Tipos

Segundo a Addcomposites (2023), os tanques para armazenamento de hidrogênio podem ser classificados em diferentes tipos, de acordo com o material do revestimento interno e do envoltório estrutural: Tipo I (Totalmente Metálico), Tipo II (Metálico com envoltório parcial de compósito); Tipo III (Metálico com Envoltório Total de Compósito), Tipo IV (Polimérico com Envoltório de Compósito) e Tipo V (Totalmente em Material Compósito).

Figura 1 – Tipos de tanques para armazenamento de hidrogênio



Fonte: Addcomposites (2023, com adaptações).

Tipo I - Totalmente Metálico

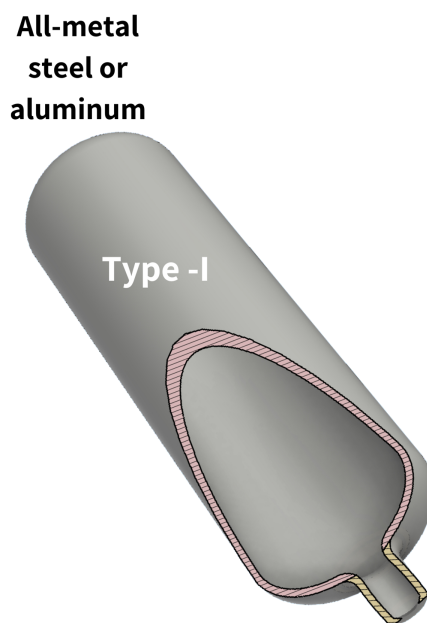
Os cilindros Tipo I representam o modelo mais simples e tradicional para armazenamento de gases comprimidos, sendo construídos inteiramente de metal, geralmente aço ou ligas de alumínio, conforme ilustrado na Figura 2. Operam, em geral, entre 200 e 300 bar e armazenam aproximadamente 15 g/L de hidrogênio, valor limitado pela baixa densidade do gás e pelo peso do recipiente (ADDCOMPOSITES, 2023).

Esses cilindros são amplamente utilizados em aplicações industriais e estacionárias, onde a massa não é fator crítico. A fabricação, baseada em processos consolidados como forjamento e estampagem profunda, garante baixo custo e alta confiabilidade.

Entre suas vantagens destacam-se a simplicidade construtiva e o custo reduzido. Contudo, apresentam desvantagens importantes, como peso elevado e limite de pressão inferior aos modelos reforçados com materiais compósitos.

Neste trabalho, a seleção dos materiais será baseada no tanque Tipo I, por se tratar da opção mais consolidada, acessível e adequada ao escopo proposto.

Figura 2 – Tanque Tipo I (Totalmente Metálico)



Fonte: Addcomposites (2023).

Tipo II - Metálico com Envoltório Parcial de Compósito

Os cilindros Tipo II representam uma evolução em relação aos modelos totalmente metálicos, pois combinam um revestimento metálico interno (em aço ou alumínio) com um reforço parcial em fibras, geralmente fibra de vidro, conforme ilustrado na Figura 3. Essa configuração permite operar em pressões mais elevadas, situadas entre 100 e 500 bar, e alcançar densidades de armazenamento próximas de 20 g/L de hidrogênio (ADDCOMPOSITES, 2023).

Seu uso é comum em aplicações industriais e, em menor escala, em contextos móveis, já que o reforço compósito reduz parte do peso sem comprometer significativamente a resistência mecânica. A fabricação envolve a produção do cilindro metálico, seguida do enrolamento filantar das fibras responsáveis pelo reforço estrutural.

Entre as principais vantagens estão o aumento na capacidade de pressão e a redução de massa quando comparados aos tanques Tipo I. No entanto, ainda apresentam peso

relativamente elevado para aplicações que exigem alta eficiência gravimétrica, como sistemas veiculares.

Figura 3 – Tanque Tipo II (Metálico com Envoltório Parcial de Compósito)



Fonte: Addcomposites (2023).

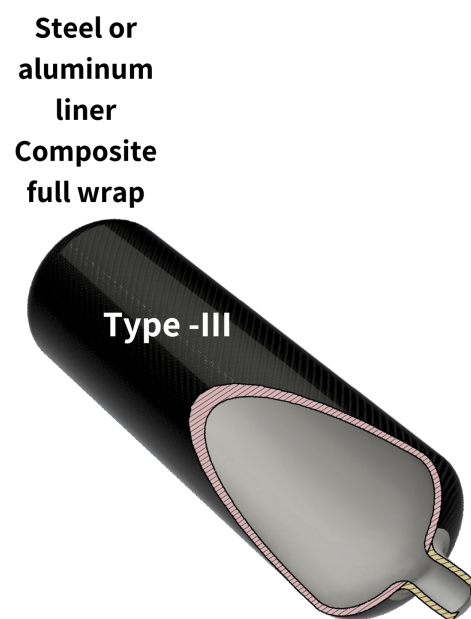
Tipo III – Metálico com Envoltório Total de Compósito

Os cilindros Tipo III apresentam um salto tecnológico importante para o armazenamento de hidrogênio, sobretudo em aplicações que exigem baixo peso, como sistemas veiculares. Eles possuem um revestimento interno metálico, geralmente em alumínio, totalmente envolvido por um compósito de fibra de carbono, responsável pela maior parte da resistência mecânica, conforme ilustrado na Figura 4.

Essa configuração permite operar em pressões elevadas, tipicamente até 350 bar, podendo alcançar 700 bar em versões otimizadas, com densidade de armazenamento em torno de 25 g/L de hidrogênio (ADDCOMPOSITES, 2023). Por isso, são amplamente utilizados em veículos pesados, como ônibus e caminhões.

O processo de fabricação envolve a produção do liner metálico, seguida da aplicação integral do compósito por enrolamento filantar ou colocação automatizada de fibras. Entre suas vantagens destacam-se o peso significativamente reduzido e a capacidade de suportar pressões muito superiores às dos Tipos I e II. Em contrapartida, apresentam maior complexidade produtiva e custo elevado, o que limita sua adoção em aplicações de menor valor agregado.

Figura 4 – Tanque Tipo III (Metálico com Envoltório Total de Compósito)



Fonte: Addcomposites (2023).

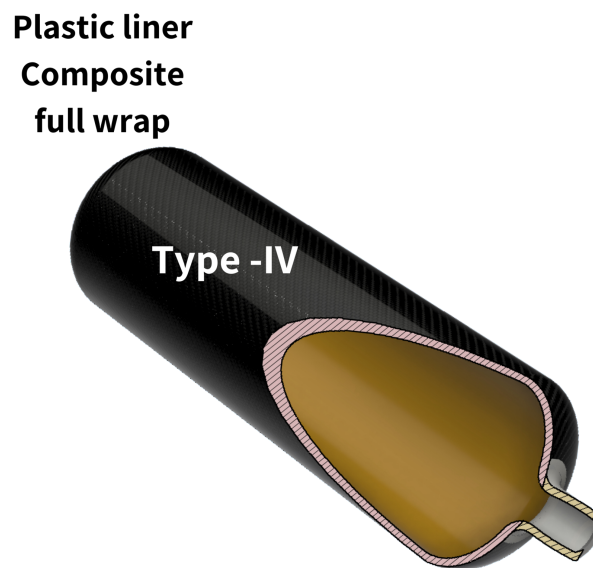
Tipo IV – Polimérico com Envoltório de Compósito

Os cilindros Tipo IV representam o estado da arte no armazenamento de hidrogênio para aplicações móveis, sendo projetados para operar em pressões extremamente elevadas. Eles utilizam um revestimento interno polimérico, geralmente polietileno de alta densidade ou poliamida, totalmente encapsulado por um compósito de fibra de carbono, responsável pela resistência estrutural, conforme ilustrado na Figura 5.

Essa construção permite pressões de operação até 700 bar, podendo chegar a 875 bar em modelos específicos, alcançando densidades de armazenamento próximas de 40 g/L, as mais altas entre todos os tipos de cilindro (ADDCOMPOSITES, 2023). Por isso, são amplamente empregados em automóveis, veículos comerciais pesados e até em sistemas portáteis.

A fabricação envolve a moldagem do liner polimérico, por técnicas como moldagem rotacional ou moldagem por sopro, seguida do revestimento integral em compósito. Entre os principais benefícios estão o baixo peso, a alta resistência à fadiga e o excelente desempenho gravimétrico. Como limitações, destacam-se a complexidade produtiva e a possibilidade de maior permeação de hidrogênio através do material polimérico.

Figura 5 – Tanque Tipo IV (Polimérico com Envoltório de Compósito)



Fonte: Addcomposites (2023).

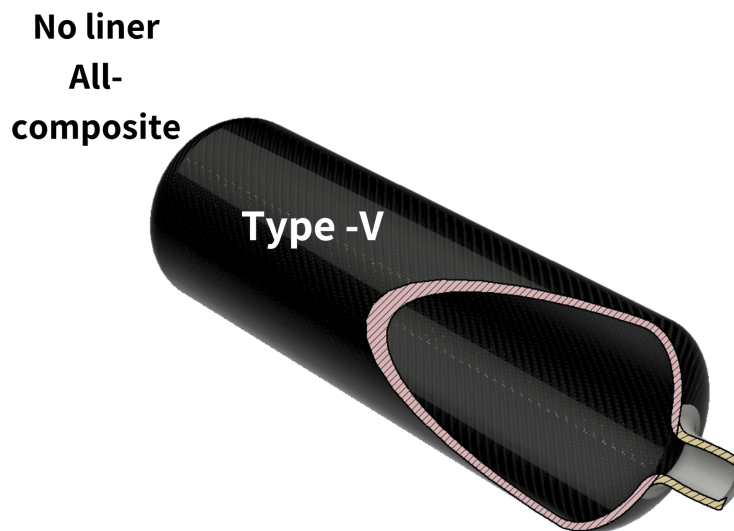
Tipo V – Totalmente em Material Compósito

Os cilindros Tipo V representam a configuração mais avançada e ainda predominantemente experimental para armazenamento de hidrogênio. Diferentemente dos demais modelos, eles são fabricados inteiramente em material compósito, sem a presença de um revestimento metálico ou polimérico interno, o que reduz significativamente a massa total do tanque, conforme ilustrado na Figura 6.

A pressão de operação desses recipientes é variável, pois depende diretamente do projeto e dos materiais empregados. A densidade de armazenamento situa-se em torno de 20 g/L, embora haja potencial para valores superiores à medida que tecnologias de compósitos evoluem (ADDCOMPOSITES, 2023). Seu uso ocorre principalmente em aplicações especializadas, pesquisa e desenvolvimento.

O processo de fabricação envolve técnicas avançadas de laminação e consolidação de compósitos, especialmente em matrizes termoplásticas. Entre suas vantagens destacam-se o potencial de peso extremamente baixo e a redução de complexidade associada à ausência de um liner. Em contrapartida, esse tipo de tanque ainda enfrenta desafios significativos relacionados à permeação de hidrogênio e à baixa maturidade tecnológica, fatores que limitam sua aplicação comercial.

Figura 6 – Tanque Tipo V (Totalmente em Material Compósito)



Fonte: Addcomposites (2023).

3.4 CRITÉRIOS DA SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seleção de materiais para tanques de armazenamento de hidrogênio requer a consideração simultânea de diversos critérios, uma vez que o desempenho do sistema depende não apenas das propriedades mecânicas. Diante disso, neste trabalho foram definidos seis critérios principais para a avaliação comparativa dos materiais: **resistência mecânica, densidade, resistência à fragilização por hidrogênio, resistência à corrosão, custo e sustentabilidade.**

A resistência mecânica refere-se à capacidade do material de suportar esforços sem sofrer deformação excessiva ou ruptura, sendo representada neste estudo pela resistência à tração. Esse critério é fundamental, pois os tanques operam sob elevadas pressões internas, exigindo materiais capazes de resistir às tensões impostas durante o armazenamento do hidrogênio. Assim, quanto maior a resistência mecânica do material, melhor seu desempenho para a aplicação analisada.

A densidade é definida como a relação entre a massa e o volume do material, estando diretamente associada ao peso total da estrutura. Embora a densidade seja um fator crítico em aplicações de transporte, neste trabalho, voltado ao armazenamento estacionário, sua influência é menos determinante, sendo atribuído menor peso relativo no processo decisório.

A resistência à fragilização por hidrogênio está relacionada à capacidade do material de manter suas propriedades mecânicas quando exposto ao hidrogênio. Esse fenômeno ocorre quando o hidrogênio interage com a microestrutura do metal, podendo reduzir sua ductilidade e tenacidade e aumentar a suscetibilidade à fratura. Dessa forma, materiais menos sensíveis à fragilização por hidrogênio são preferíveis, uma vez que oferecem maior segurança e confiabilidade ao longo do tempo. Assim, quanto menor a suscetibilidade à fragilização, melhor o desempenho do material.

A resistência à corrosão também é um critério relevante, considerando a possível exposição dos tanques a ambientes industriais e atmosféricos agressivos. Materiais com elevada resistência à corrosão tendem a apresentar maior durabilidade e menor necessidade de manutenção ao longo de sua vida útil, sendo, portanto, mais adequados para a aplicação proposta.

O custo foi avaliado sob uma perspectiva comparativa, considerando fatores como o custo da matéria-prima, a disponibilidade no mercado, a maturidade tecnológica e a complexidade dos processos de fabricação associados a cada material. Não foram considerados custos específicos de projeto, operação ou manutenção. Nesse critério, materiais com menor custo relativo são considerados mais vantajosos.

Por fim, a sustentabilidade foi avaliada considerando aspectos como reciclabilidade, vida útil e impacto ambiental associado ao ciclo de vida do material. Materiais com maior durabilidade e maior potencial de reciclagem tendem a apresentar melhor desempenho nesse critério, contribuindo para soluções mais alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

Além disso, é importante destacar que os critérios adotados não possuem a mesma relevância no processo decisório. Critérios relacionados à segurança e à integridade estrutural, como resistência mecânica, resistência à fragilização por hidrogênio e resistência à corrosão, assumem papel prioritário. Por outro lado, critérios como densidade, embora

relevantes, apresentam menor impacto relativo devido ao foco do estudo em sistemas estacionários. Já os critérios de custo e sustentabilidade são tratados como elementos centrais da análise, por representarem desafios fundamentais para a relação custo benefício.

3.5 MATERIAIS UTILIZADOS EM TANQUES METÁLICOS PARA ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO

A escolha do material para tanques metálicos do tipo I é um fator determinante para garantir segurança, durabilidade e viabilidade econômica no armazenamento de hidrogênio comprimido. Diferentes ligas metálicas apresentam comportamentos distintos quando submetidas a altas pressões, tipicamente na faixa de 200 a 300 bar, especialmente devido à fragilização por hidrogênio, fenômeno amplamente discutido por Züttel (2003), que destaca como a interação entre o hidrogênio e a microestrutura metálica pode reduzir a ductilidade e a resistência mecânica.

Assim, torna-se essencial avaliar cada material considerando simultaneamente critérios técnicos, econômicos e ambientais, em alinhamento com a matriz de decisão proposta neste trabalho. Entre os materiais metálicos mais relevantes encontram-se o **aço inoxidável, a liga de alumínio, a liga de titânio e aço baixa liga Cr-Mo.**

3.5.1 Aço Inoxidável Austenítico (316L)

Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas ferrosas amplamente utilizadas em aplicações industriais devido à combinação equilibrada de propriedades mecânicas e químicas. Segundo Callister e Rethwisch, os aços inoxidáveis são definidos pela presença de, no mínimo, 11% de cromo em sua composição, o que permite a formação de uma camada passiva de óxido de cromo na superfície, conferindo elevada resistência à corrosão. A adição de elementos como níquel e molibdênio contribui adicionalmente para a estabilidade da microestrutura e para o desempenho em ambientes agressivos.

A microestrutura predominante dos aços inoxidáveis austeníticos é a austenita, caracterizada por uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Essa configuração confere ao material alta ductilidade, boa tenacidade e capacidade de deformação plástica, atributos importantes para componentes submetidos a esforços internos, como é o caso de tanques metálicos para armazenamento de hidrogênio.

No que se refere à resistência mecânica, os graus AISI 316 e 316L apresentam valores adequados para suportar as tensões associadas à operação pressurizada. A presença de molibdênio na liga 316 melhora a resistência geral e a estabilidade sob carregamentos alternados, aspectos desejáveis em recipientes que operam em regimes de pressão variáveis. A variante 316L, com menor teor de carbono, reduz o risco de precipitação de carbonetos durante a fabricação, o que favorece a resistência à corrosão intergranular sem comprometer significativamente a resistência mecânica (DUSTRE, s.d.).

Em relação à densidade, os aços inoxidáveis austeníticos apresentam valores típicos de ligas ferrosas (cerca de 7,8 a 8,0 g/cm³). Embora essa densidade seja superior à de ligas leves como o alumínio ou o magnésio, a robustez mecânica e a estabilidade estrutural desses materiais os tornam competitivos para tanques do tipo I, especialmente em aplicações estacionárias, onde a redução de massa não é o fator mais crítico.

Um ponto importante é a fragilização por hidrogênio. A literatura indica que a presença de níquel estabiliza a fase austenítica, reduzindo a tendência à formação de martensita induzida por hidrogênio e, conseqüentemente, melhorando a resistência à fragilização quando comparada a outras classes de aço menos estáveis. Ademais, o molibdênio presente no 316L também contribui para a estabilidade microestrutural em ambientes contendo hidrogênio, minimizando a degradação prematura.

Quanto à resistência à corrosão, os aços inoxidáveis austeníticos apresentam excelente desempenho em presença de cloretos e umidade, devido à capacidade de regeneração da camada passiva protetora. Essa resistência química é uma vantagem importante para tanques de hidrogênio que possam operar em ambientes variáveis, reduzindo a necessidade de manutenção e aumentando a vida útil do componente (DUSTRE, s.d.).

No critério custo, ele é superior ao dos aços carbono, mas geralmente inferior ao de materiais como ligas de titânio. A produção em larga escala, familiaridade tecnológica e ampla disponibilidade industrial contribuem para que o custo total de aplicação seja considerado razoável quando ponderado com os benefícios de desempenho.

Finalmente, no critério sustentabilidade, os aços inoxidáveis austeníticos apresentam alta reciclabilidade e boa durabilidade, tornando-se materiais ambientalmente favoráveis para aplicações de longo prazo. A possibilidade de reaproveitamento ao final da vida útil e a menor necessidade de substituições frequentes contribuem para reduzir o impacto ambiental comparado a materiais menos duráveis ou de difícil reciclagem.

3.5.2 Ligas de Alumínio

O alumínio e suas ligas destacam-se pela baixa densidade, em torno de $2,7 \text{ g/cm}^3$, significativamente inferior à dos aços ($7,8 \text{ g/cm}^3$), o que resulta em estruturas mais leves. Segundo Callister e Rethwisch, essas ligas apresentam ainda elevada ductilidade, boa conformabilidade e resistência à corrosão em diversos ambientes, devido à formação espontânea de uma camada superficial de óxido de alumínio, estável e protetora.

A estrutura cristalina do alumínio é cúbica de face centrada (CFC), o que garante a manutenção da ductilidade mesmo em temperaturas reduzidas. A resistência mecânica do alumínio puro é relativamente baixa; entretanto, pode ser significativamente aumentada por meio de mecanismos como endurecimento por solução sólida, encruamento e, principalmente, endurecimento por precipitação, amplamente empregado em ligas tratáveis termicamente (SHEID, s.d.).

Entre os principais elementos de liga utilizados estão magnésio, silício, cobre, manganês e zinco, que permitem a obtenção de ligas com diferentes combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão e processabilidade. As ligas de alumínio podem ser divididas em ligas termicamente tratáveis (como as séries 2xxx, 6xxx e 7xxx) e termicamente não tratáveis (como as séries 3xxx e 5xxx).

No contexto de aplicações estruturais e de vasos de pressão, destaca-se a liga AA 6061 (Alumínio 6061), pertencente à série 6xxx (Al-Mg-Si). Essa liga apresenta bom equilíbrio entre resistência mecânica e ductilidade, podendo atingir resistências à tração da ordem de 290 MPa na condição T6 (tratamento térmico), além de boa soldabilidade e resistência à corrosão (METALTHAGA, s.d.).

Em relação à fragilização por hidrogênio, as ligas de alumínio apresentam comportamento favorável quando comparadas a certos aços de alta resistência, uma vez que o

alumínio não sofre fragilização clássica por hidrogênio da mesma forma que materiais ferrosos.

Do ponto de vista econômico, as ligas de alumínio apresentam custo intermediário, superior ao do aço carbono, porém geralmente inferior ao de ligas especiais como as de titânio. Sua ampla utilização industrial, facilidade de conformação e disponibilidade global contribuem para a viabilidade econômica em aplicações de grande escala.

Quanto à sustentabilidade, o alumínio destaca-se pela alta reciclabilidade, podendo ser reutilizado com consumo energético significativamente menor em comparação à produção primária (METALTHAGA, s.d.).

3.5.3 Ligas de Titânio

O titânio e suas ligas são materiais relativamente recentes na engenharia, destacando-se pela combinação excepcional de baixa densidade e elevada resistência mecânica. O titânio puro apresenta densidade em torno de $4,5 \text{ g/cm}^3$, significativamente inferior à dos aços, além de alto ponto de fusão (aproximadamente $1668 \text{ }^\circ\text{C}$) e módulo de elasticidade da ordem de 107 GPa . Essas características conferem às ligas de titânio elevada resistência, tornando-as atrativas para aplicações estruturais exigentes (INFOMET, s.d.).

Do ponto de vista da resistência mecânica, ligas de titânio podem atingir valores elevados de resistência à tração em temperatura ambiente, chegando a valores superiores a 900 MPa . Um exemplo representativo é a liga Ti-6Al-4V, a mais empregada comercialmente, que combina alta resistência, boa ductilidade e excelente desempenho estrutural, sendo amplamente utilizada nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, química e de petróleo (INFOMET, s.d.).

Em relação à densidade, as ligas de titânio situam-se em uma faixa intermediária entre o aço e o alumínio, oferecendo significativa redução de peso em comparação aos materiais ferrosos, sem comprometer a resistência mecânica. Essa característica é particularmente relevante para estruturas pressurizadas em que a relação resistência/peso é um fator crítico.

Quanto à resistência à corrosão, o titânio apresenta desempenho excepcional, devido à formação espontânea de uma camada passiva de óxido altamente estável. Essa camada confere resistência a ambientes agressivos, incluindo atmosferas industriais, meios

marinhos e diversos agentes químicos, característica que favorece sua aplicação em sistemas de armazenamento de hidrogênio (INFOMET, s.d.).

No que se refere à interação com hidrogênio, as ligas de titânio apresentam comportamento que exige atenção. O titânio possui afinidade com o hidrogênio, podendo absorvê-lo sob determinadas condições, o que pode levar à formação de hidretos e à redução da ductilidade. Entretanto, em aplicações controladas e com projeto adequado, esse efeito pode ser mitigado, permitindo o uso do material em ambientes contendo hidrogênio, especialmente quando comparado a aços de alta resistência mais suscetíveis à fragilização (UFPR, s.d.).

O custo constitui uma das principais limitações das ligas de titânio. A elevada reatividade química do titânio em altas temperaturas exige processos de extração e fabricação não convencionais, o que resulta em custos significativamente superiores aos do aço e do alumínio. Esse fator restringe seu uso a aplicações em que o desempenho técnico justifica o investimento (UFPR, s.d.).

Sob a ótica da sustentabilidade, embora o processo de obtenção do titânio seja energeticamente intensivo, sua elevada durabilidade, resistência à corrosão e possibilidade de reciclagem contribuem para um ciclo de vida longo, reduzindo a necessidade de substituições frequentes e impactos associados à manutenção.

3.5.4 Aços Baixa Liga Cr-Mo

Os aços baixa liga são materiais ferrosos que contêm pequenas quantidades de elementos de liga, como cromo, molibdênio, níquel ou manganês, adicionados com o objetivo de melhorar propriedades mecânicas específicas, sem atingir os elevados teores característicos dos aços inoxidáveis. Entre esses materiais, destacam-se os aços Cr-Mo, amplamente utilizados em aplicações estruturais e em vasos de pressão submetidos a condições severas de serviço (UFPR, s.d.).

O aço 34CrMo4 é um exemplo representativo dessa classe, contendo teores moderados de cromo e molibdênio. A adição de cromo contribui para o aumento da resistência mecânica e da resistência ao desgaste, enquanto o molibdênio melhora a temperabilidade do aço e sua resistência à fluência e à fadiga em condições de serviço exigentes. Essas características tornam os aços Cr-Mo adequados para componentes

submetidos a altas pressões, como cilindros e reservatórios de gases (SOLITAIRE OVERSEAS, s.d.).

Em termos de resistência mecânica, os aços Cr–Mo apresentam valores elevados de resistência à tração quando comparados aos aços carbono comuns, especialmente após tratamentos térmicos adequados. Essa elevada resistência estrutural é uma das razões pelas quais esses aços são amplamente empregados na fabricação de cilindros metálicos para armazenamento de gases comprimidos.

A densidade dos aços Cr–Mo é semelhante à dos aços convencionais, situando-se em torno de $7,8 \text{ g/cm}^3$, o que resulta em estruturas mais pesadas quando comparadas a ligas de alumínio ou titânio. Entretanto, esse fator é frequentemente compensado pela elevada resistência mecânica e pela robustez estrutural do material.

No que se refere à resistência à corrosão, os aços Cr–Mo apresentam desempenho superior ao dos aços carbono, embora não alcancem o nível de proteção oferecido pelos aços inoxidáveis. Por esse motivo, sua aplicação geralmente requer o uso de revestimentos, tratamentos superficiais ou controle rigoroso do ambiente de operação (UFPR, s.d.).

Quanto à interação com o hidrogênio, os aços Cr–Mo demandam atenção especial. Embora sejam amplamente utilizados em cilindros de alta pressão, a presença de hidrogênio pode induzir mecanismos de fragilização, especialmente em condições de altas tensões e pressões elevadas. Assim, a seleção desse material para aplicações envolvendo hidrogênio deve considerar critérios rigorosos de projeto, fabricação e inspeção (SOLITAIRE OVERSEAS, s.d.).

Do ponto de vista econômico, os aços Cr–Mo apresentam custo inferior ao dos aços inoxidáveis austeníticos e das ligas de titânio, o que os torna atrativos para aplicações industriais em larga escala. Além disso, sua ampla disponibilidade no mercado e compatibilidade com processos de fabricação convencionais contribuem para sua viabilidade econômica.

Em relação à sustentabilidade, esses aços apresentam boa reciclabilidade e longa vida útil quando corretamente projetados e mantidos. Sua elevada resistência mecânica permite a redução de espessuras em determinadas aplicações, o que pode contribuir para a otimização do uso de material.

3.6 MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

A Análise Multicritério, inserida no campo da Pesquisa Operacional, aborda problemas de decisão caracterizados pela presença de múltiplos critérios, muitas vezes conflitantes entre si. Nesse tipo de problema, a melhoria de um determinado critério pode causar a perda de desempenho em outro, de modo que não existe uma alternativa que seja superior em todos os aspectos simultaneamente. Assim, o objetivo da análise não é identificar uma solução ideal absoluta, mas sim aquela que apresenta o melhor compromisso entre os diferentes requisitos envolvidos no processo decisório (HAJKOWICZ, 2008).

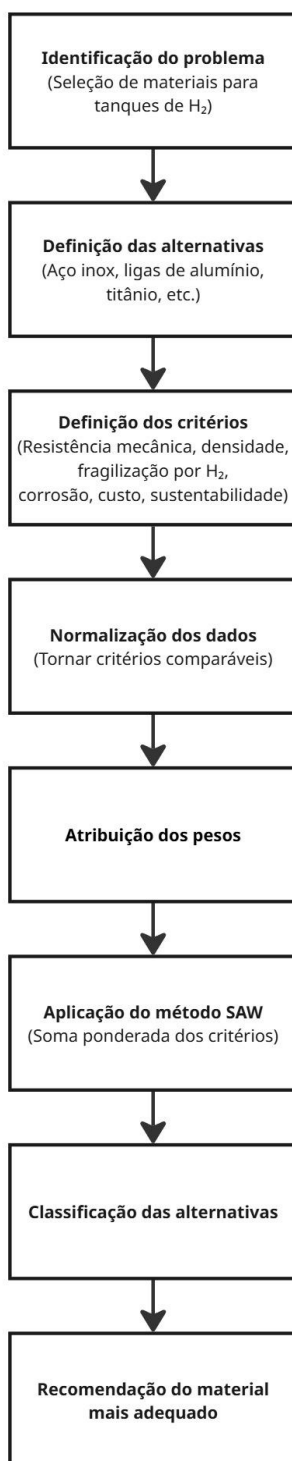
No contexto da seleção de materiais para tanques de armazenamento de hidrogênio, esses conflitos se tornam evidentes, uma vez que materiais com elevada resistência mecânica, alta resistência à corrosão e menor suscetibilidade à fragilização por hidrogênio tendem, em geral, a apresentar custos mais elevados. Por outro lado, alternativas economicamente mais acessíveis podem comprometer aspectos relacionados à segurança ou durabilidade. Dessa maneira, critérios como sustentabilidade e custo podem entrar em conflito, já que materiais mais duráveis e recicláveis nem sempre correspondem às opções de menor investimento. Esses “trade-offs” justificam a adoção de uma abordagem multicritério para apoiar a tomada de decisão.

Segundo Gomes et al. (2004), o processo de Apoio à Decisão Multicritério envolve etapas como a definição dos decisores, a identificação das alternativas e dos critérios relevantes, a avaliação das opções e a recomendação da alternativa mais adequada.

A Figura 7 ilustra de forma esquemática o processo de Apoio à Decisão Multicritério aplicado neste trabalho, desde a definição do problema até a recomendação do material mais adequado. O fluxograma evidencia as principais etapas envolvidas.

De modo geral, os métodos multicritério podem ser classificados em compensatórios e não compensatórios. Nos compensatórios, um desempenho inferior em determinado critério pode ser equilibrado por um resultado superior em outro, permitindo uma análise mais flexível. Já nos métodos não compensatórios, não há compensação entre critérios, uma falha em um aspecto crítico não pode ser superada por bom desempenho em outro.

Figura 7 – Fluxograma do processo de Apoio à Decisão Multicritério para seleção de materiais de tanques de hidrogênio



Fonte: elaborado pelo autor.

Neste trabalho, optou-se pela aplicação do método da Soma Ponderada (SAW - Simple Additive Weighting), pertencente à família dos métodos compensatórios, devido à sua simplicidade e transparência.

3.6.1 Soma Ponderada (SAW)

O SAW se baseia na soma ponderada dos atributos avaliados, em que a alternativa que apresenta o maior valor agregado é considerada a mais vantajosa. Essa abordagem permite integrar critérios técnicos, econômicos e ambientais em uma única análise, auxiliando na identificação do material que oferece o melhor equilíbrio. A aplicação do método segue três etapas principais:

- Normalização dos valores das alternativas, de modo a torná-los comparáveis entre si;
- Atribuição dos pesos correspondentes à importância relativa de cada critério;
- Cálculo da soma ponderada, obtida pela agregação dos valores normalizados e ponderados de cada alternativa.

3.6.2 Normalização dos dados

Essa etapa permite tornar comparáveis critérios expressos em escalas e naturezas distintas. No contexto deste trabalho, alguns critérios são quantitativos, como a resistência mecânica, enquanto outros possuem natureza qualitativa ou caráter relativo, como custo e sustentabilidade.

De acordo com Gomes, Araya e Carignano (2004), a normalização consiste na transformação dos valores originais dos critérios em valores adimensionais, geralmente variando entre 0 e 1, de modo que possam ser agregados em uma única função de desempenho. Esse procedimento assegura que nenhum critério exerça influência indevida no resultado final apenas em função de sua magnitude numérica.

No presente trabalho, foram adotadas duas formas de normalização, conforme a natureza de cada critério, seguindo a abordagem clássica do método da Soma Ponderada (SAW), amplamente descrita na literatura (GOMES et al., 2004; REIS; SCHRAMM, 2022):

- Para critérios em que valores mais altos são desejáveis (critérios de benefício), utiliza-se:

$$rij = \frac{xij}{\max(xij)} \quad (1)$$

- Para critérios em que valores menores são preferíveis (critérios de custo), aplica-se:

$$rij = \frac{\min(xij)}{xij} \quad (2)$$

Onde:

- rij é o valor normalizado da i -ésima alternativa em relação ao j -ésimo critério;
- xij representa o valor original da i -ésima alternativa no j -ésimo critério;
- $\max(xij)$ corresponde ao maior valor observado entre todas as alternativas para o critério analisado;
- $\min(xij)$ representa o menor valor observado entre todas as alternativas do mesmo critério.

Assim, todos os critérios passam a variar em uma escala adimensional entre 0 e 1, tornando possível a sua comparação e agregação na análise multicritério.

3.6.3 Atribuição dos pesos

A atribuição dos pesos aos critérios constitui uma etapa fundamental no processo, pois representa a importância relativa de cada critério no contexto do problema analisado. Essa etapa possui caráter qualitativo e subjetivo, uma vez que depende das prioridades do estudo e das características da aplicação considerada.

No presente trabalho, os pesos dos critérios foram definidos de forma qualitativa, sendo classificados em níveis de relevância (Muito alto, Alto, Médio, Baixo ou Muito baixo). Essa definição foi realizada com base no julgamento da pesquisadora, não sendo adotados métodos matemáticos formais para o cálculo dos pesos.

Os critérios diretamente relacionados à segurança e à integridade estrutural dos tanques (resistência mecânica, resistência à fragilização por hidrogênio e resistência à corrosão) foram classificados com maior grau de relevância, em função de seu impacto direto na confiabilidade e no desempenho do sistema de armazenamento. O critério densidade

recebeu menor relevância relativa, considerando que o estudo é voltado ao armazenamento estacionário, no qual o peso da estrutura não constitui um fator crítico.

Os critérios de custo e sustentabilidade foram classificados com relevância intermediária, por representarem aspectos centrais para a viabilidade econômica e ambiental da solução proposta, sem comprometer os requisitos mínimos de segurança e desempenho.

Dessa forma, a atribuição qualitativa dos pesos, garante coerência entre os objetivos do estudo e a aplicação do método multicritério, permitindo a comparação e a agregação das alternativas de maneira consistente na matriz de decisão.

3.6.4 Cálculo da Soma Ponderada

Abaixo a equação geral do método:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot r_{ji} \quad (3)$$

Onde:

- S_i corresponde ao valor da função de utilidade da i -ésima alternativa, onde $i = 1, 2, \dots, n$;
- W_j representa o peso atribuído ao j -ésimo critério, sendo $j = 1, 2, \dots, n$;
- r_{ji} indica o valor normalizado do desempenho da i -ésima alternativa em relação ao j -ésimo critério.

4 METODOLOGIA

4.1 Identificação do problema

O problema abordado neste trabalho consiste na seleção do material mais adequado para tanques de armazenamento de hidrogênio verde, considerando a necessidade de atender simultaneamente a requisitos de segurança, desempenho mecânico, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental. Conforme mencionado anteriormente, a análise está restrita aos tanques do Tipo I, por se tratarem da opção mais consolidada, acessível e adequada ao escopo proposto.

A complexidade do problema está associada ao caráter conflitante dos critérios analisados, uma vez que nenhum material apresenta desempenho superior em todos os aspectos considerados. Nesse contexto, a adoção de um método de decisão multicritério não tem como objetivo substituir o julgamento do engenheiro, mas sim apoiar e estruturar o processo de tomada de decisão, permitindo uma análise comparativa mais sistemática e fundamentada entre as alternativas avaliadas.

4.2 Definição das alternativas

As alternativas analisadas correspondem aos materiais metálicos selecionados a partir da literatura. Neste estudo, foram consideradas as seguintes alternativas:

- Aço inoxidável austenítico (AISI 316L);
- Liga de alumínio (AA 6061);
- Liga de titânio (Ti-6Al-4V);
- Aço baixa liga Cr–Mo.

4.3 Definição dos critérios

A seleção dos critérios foi realizada com base na literatura e nas exigências operacionais dos tanques de armazenamento de hidrogênio. Foram definidos seis critérios de avaliação:

- Resistência mecânica (resistência à tração);
- Densidade;
- Resistência à fragilização por hidrogênio;

- Resistência à corrosão;
- Custo relativo do material;
- Sustentabilidade.

A Tabela 1 apresenta a matriz de decisão inicial do estudo, reunindo as alternativas analisadas e os respectivos valores associados a cada critério de avaliação. Nessa tabela são listados tanto os dados quantitativos, como resistência mecânica e densidade, quanto os critérios de natureza qualitativa, como resistência à fragilização por hidrogênio, resistência à corrosão, custo relativo e sustentabilidade. Para os critérios qualitativos, foram atribuídos valores numéricos com base em uma escala definida, apresentada na tabela 2, de modo a possibilitar sua incorporação ao método de decisão multicritério. Essa matriz constitui a base para as etapas subsequentes de normalização e aplicação do método SAW.

Tabela 1 - Matriz de decisão inicial dos materiais avaliados

Tabela principal	Maior, melhor	Menor, melhor	Maior, melhor		Maior, melhor		Menor, melhor		Maior, melhor	
	Resistência mecânica (MPa)	Densidade (g/cm ³)	Resistência Fragilização por H ₂		Resistência à corrosão		Custo relativo		Sustentabilidade	
			Atribuição	Valor	Atribuição	Valor	Atribuição	Valor	Atribuição	Valor
Aço inox 316L	485	7,8	Muito alta	5	Muito alta	5	Alto	2	Alta	4
Al 6061	290	2,7	Alta	4	Alta	4	Médio	3	Alta	4
Ti-6Al-4V	900	4,5	Baixa	2	Muito alta	5	Alto	2	Média	3
Aço Cr-Mo	700	7,8	Muito baixa	1	Média	3	Médio	3	Média	3

Fonte: elaborada pelo autor.

4.4 Normalização dos dados

A aplicação do método da Soma Ponderada (SAW) exige que todos os critérios avaliados sejam expressos em uma escala comum, de modo a permitir sua comparação e posterior agregação. No presente estudo, os critérios considerados apresentam naturezas distintas, incluindo valores quantitativos. Dessa forma, tornou-se necessária a conversão e a normalização dos dados antes da aplicação do método multicritério.

4.4.1 Conversão qualitativa para numérica

Inicialmente, os critérios avaliados de forma qualitativa foram convertidos em valores numéricos, a fim de possibilitar sua utilização na matriz de decisão. Para isso,

adotou-se uma escala ordinal composta por cinco níveis de desempenho: Muito alta, Alta, Média, Baixa e Muito baixa.

Essa conversão foi realizada de acordo com a natureza de cada critério. Para os critérios classificados como de benefício (aqueles em que valores mais elevados indicam melhor desempenho) a atribuição numérica seguiu uma ordem crescente, em que “Muito alta” corresponde ao maior valor e “Muito baixa” ao menor. Já para os critérios classificados como de custo (nos quais valores menores são mais desejáveis) a escala foi invertida, garantindo coerência com o princípio de que maiores valores normalizados representam melhor desempenho. As tabelas de conversão qualitativa para numérica são apresentadas nas Tabela 2 e 3.

Tabela 2 - Conversão qualitativa em numérica

Quanto maior, melhor	Representação numérica
Muito alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito Baixa	1

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Conversão qualitativa em numérica

Quanto menor, melhor	Representação numérica
Muito alta	1
Alta	2
Média	3
Baixa	4
Muito Baixa	5

Fonte: elaborado pelo autor.

Após essa etapa, todos os critérios passaram a ser representados por valores numéricos, permitindo sua inclusão na matriz de decisão principal, apresentada na Tabela 1.

4.4.2 Normalização dos dados

Com os dados expressos em formato numérico, procedeu-se à etapa de normalização, cujo objetivo é transformar os valores dos critérios em uma escala adimensional entre 0 e 1. Essa etapa é fundamental, pois evita que critérios expressos em diferentes unidades ou escalas exerçam influência desproporcional no resultado final.

No presente trabalho, foram adotadas duas expressões de normalização, conforme citado anteriormente. Para os critérios de benefício, utilizou-se a razão entre o valor do critério e o maior valor observado entre as alternativas. Para os critérios de custo, aplicou-se a razão entre o menor valor observado e o valor do critério avaliado.

A aplicação dessas expressões resultou na matriz normalizada, apresentada na Tabela 4, na qual todos os critérios passaram a variar entre 0 e 1. Dessa forma, tornou-se possível a comparação direta entre as alternativas e a posterior aplicação dos pesos e do cálculo da soma ponderada.

Tabela 4 - Matriz de decisão com valores normalizados

Tabela normalizada	Maior, melhor	Menor, melhor	Maior, melhor	Maior, melhor	Menor, melhor	Maior, melhor
Material	Resistência mecânica (MPa)	Densidade (g/cm³)	Resistência Fragilização por H₂	Resistência à corrosão	Custo relativo	Sustentabilidade
Aço inox 316L	0,54	0,35	1,00	1,00	0,50	1
Al 6061	0,32	1,00	0,80	0,80	0,33	1
Ti-6Al-4V	1,00	0,60	0,40	1,00	0,50	0,75
Aço Cr-Mo	0,78	0,35	0,20	0,60	0,33	0,75

Fonte: elaborado pelo autor.

4.5 Atribuição dos pesos

Após a definição dos critérios de avaliação, procedeu-se à etapa de atribuição dos pesos, a qual tem como objetivo representar a importância relativa de cada critério no processo de tomada de decisão, conforme apresentado na tabela 5.

A atribuição dos níveis de relevância aos critérios foi realizada com base no julgamento da autora, considerando os objetivos do estudo, o contexto de aplicação em

tanques de armazenamento de hidrogênio e o suporte da literatura revisada. Ressalta-se que essa etapa possui caráter subjetivo e pode variar de acordo com o contexto analisado, as necessidades do projeto e as prioridades estabelecidas pelo decisor, não sendo, portanto, única ou universal.

Tabela 5 - Conversão qualitativa em numérica

Atribuição	Peso (W)
Muito alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito baixa	1

Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores numéricos atribuídos a cada critério foram posteriormente normalizados, de modo que a soma dos pesos resultasse em unidade, conforme apresentado na Tabela 6. Essa normalização garante a coerência do modelo e permite que cada critério contribua de forma proporcional no cálculo da soma ponderada, preservando a hierarquia de importância definida na etapa qualitativa.

Dessa forma, a atribuição dos pesos reflete as prioridades estabelecidas neste estudo específico e assegura a adequada aplicação do método SAW na avaliação e classificação dos materiais analisados, reconhecendo-se que diferentes contextos de aplicação podem conduzir a configurações distintas de pesos e, conseqüentemente, a resultados diferentes.

Tabela 6 - Atribuição de pesos aos critérios

Critério	Atribuição	Peso (W)	Normalizado (W)
Resistência Mecânica	Alta	4	0,19
Resistência à fragilização por H ₂	Muito alta	5	0,24
Resistência à corrosão	Alta	4	0,19
Custo	Alta	4	0,19
Sustentabilidade	Média	3	0,14
Densidade	Muito Baixa	1	0,05
	Soma	21	1,00

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6 Cálculo da soma ponderada

a) Aço inox 316L

$$S_{316L} = (0,54 \cdot 0,19) + (0,35 \cdot 0,05) + (1,00 \cdot 0,24) + (1,00 \cdot 0,19) + (0,50 \cdot 0,19) + (1,00 \cdot 0,14)$$

$$S_{316L} = 0,1026 + 0,0175 + 0,2400 + 0,1900 + 0,0950 + 0,1400$$

$$S_{316L} = 0,7851$$

b) Liga de Alumínio 6061

$$S_{Al} = (0,32 \cdot 0,19) + (1,00 \cdot 0,05) + (0,80 \cdot 0,24) + (0,80 \cdot 0,19) + (0,33 \cdot 0,19) + (1,00 \cdot 0,14)$$

$$S_{Al} = 0,0608 + 0,0500 + 0,1920 + 0,1520 + 0,0627 + 0,1400$$

$$S_{Al} = 0,6575$$

c) Liga de Titânio Ti-6Al-4V

$$S_{Ti} = (1,00 \cdot 0,19) + (0,60 \cdot 0,05) + (0,40 \cdot 0,24) + (1,00 \cdot 0,19) + (0,50 \cdot 0,19) + (0,75 \cdot 0,14)$$

$$STi = 0,1900 + 0,0300 + 0,0960 + 0,1900 + 0,0950 + 0,1050$$

$$STi = 0,7060$$

d) Aço Cr–Mo (34CrMo4)

$$SCrMo = (0,78 \cdot 0,19) + (0,35 \cdot 0,05) + (0,20 \cdot 0,24) + (0,60 \cdot 0,19) + (0,33 \cdot 0,19) + (0,75 \cdot 0,14)$$

$$SCrMo = 0,1482 + 0,0175 + 0,0480 + 0,1140 + 0,0627 + 0,1050$$

$$SCrMo = 0,4954$$

4.7 Classificação das alternativas

Após a aplicação do método da Soma Ponderada (SAW), considerando os critérios definidos e seus respectivos pesos normalizados, foi possível obter o valor global de desempenho de cada alternativa analisada.

Tabela 7 - Resultado do SAW

Classificação	Soma Ponderada (Si)	Material
1º	0,7851	Aço inox 316L
2º	0,7060	Ti-6Al-4V
3º	0,658	Al 6061
4º	0,4954	Aço Cr–Mo

Fonte: elaborado pelo autor.

4.8 Recomendação do material mais adequado

Com base nos resultados obtidos a partir da aplicação do método da Soma Ponderada (SAW), o **aço inoxidável AISI 316L** apresentou o maior valor da função de utilidade entre os materiais analisados, sendo, portanto, recomendado como o material mais adequado para tanques de armazenamento de hidrogênio no contexto deste estudo.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo apoiar a seleção de materiais para tanques de armazenamento de hidrogênio por meio da aplicação de um método de Apoio à Decisão Multicritério, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais. A utilização do método da Soma Ponderada (SAW) permitiu estruturar o problema de decisão e comparar, de forma sistemática, diferentes alternativas de materiais discutidos na literatura.

Os resultados obtidos indicaram o **aço inoxidável AISI 316L** como o material mais adequado dentro do contexto analisado, apresentando melhor desempenho global quando considerados, de forma integrada os critérios.

Dessa forma, conclui-se que a abordagem multicritério aplicada neste estudo contribuiu de maneira significativa para a análise e seleção de materiais para tanques de armazenamento de hidrogênio, oferecendo um modelo estruturado, transparente e replicável.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a comparação entre diferentes métodos de decisão multicritério, como HP, TOPSIS e VIKOR, a avaliação da sensibilidade dos resultados em relação à variação dos pesos atribuídos aos critérios, bem como a incorporação de novos critérios de avaliação, como vida útil, estabilidade térmica, disponibilidade comercial e soldabilidade, visando aprofundar e ampliar as análises realizadas.

REFERÊNCIAS

LUTHADA, Pravin. Design and Development of Sustainable Compressed Hydrogen Storage Tank: Course. **Addcomposites**, 2024. Disponível em:

<https://www.addcomposites.com/post/design-and-development-of-sustainable-compressed-hydrogen-storage-tank-course#headline2>. Acesso em: 10 dez. 2026.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Acesso em: 10 dez. 2026.

DUSTRE. **Aço inox 316L**. Disponível em:

<https://dustre.com.br/produtos-ligas-especiais/acos-inoxidaveis-austeniticos/aco-inox-316l/>.

Acesso em: 11 dez. 2026.

EKOS BRASIL. **O hidrogênio verde é o combustível do futuro**. Disponível em:

<https://www.ekosbrasil.org/o-hidrogenio-verde-e-o-combustivel-do-futuro/>. Acesso em: 11 dez. 2026.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisão em cenários complexos: introdução aos métodos multicritério**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 11 dez. 2026.

IBERDROLA. **Hidrogênio verde**. Disponível em:

<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>. Acesso em: 11 dez. 2026.

INFOMET. **Titânio e suas ligas**. Disponível em:

<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=93>. Acesso em: 12 dez. 2026.

INFOMET. **Aços e ligas metálicas**. Disponível em:

<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=255>. Acesso em: 12 dez. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (IBP). *Guerra na Ucrânia, petróleo e gás no Brasil*. Disponível em:

<https://portal.ibp.org.br/noticias/guerra-ucrania-petroleo-gas-no-brasil/>. Acesso em: 16 dez. 2026.

METALTHAGA. *Principais ligas de alumínio e para que servem*. Disponível em:

<https://metalthaga.com.br/artigos/principais-ligas-de-aluminio-e-para-que-servem/>. Acesso em: 16 dez. 2026.

REIS, A. C. B.; SCHRAMM, V. B. *Guia para aplicação da análise multicritério em Análise de Impacto Regulatório (AIR) no Inmetro*. Brasília: Inmetro, 2022. Acesso em: 16 dez.

2026.

SOLITAIRE OVERSEAS. *Low alloy steel*. Disponível em:

<https://www.solitaire-overseas.com/blog/low-alloy-steel/>. Acesso em: 16 dez. 2026.

SUNNE. *Vantagens e desvantagens do hidrogênio verde*. Disponível em:

<https://sunne.com.br/blog/vantagens-e-desvantagens-do-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 16 dez. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. *Aula sobre alumínio*. Disponível em:

http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Sheid/Aula_Aluminio.pdf. Acesso em: 16 dez. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. *Titânio*. Disponível em:

http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM343/Tit%C3%A2nio.pdf.

Acesso em: 16 dez. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. *Aços - siderurgia*. Disponível em:

http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM343/A%C3%A7os%20-%20siderurgia.pdf. Acesso em: 16 dez. 2026.

WWF BRASIL. *Hidrogênio verde*. Disponível em:

https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/conceitos/_hidrogenio_verde_/. Acesso em: 16 dez. 2026.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). *Global Hydrogen Review 2022.*

Paris: International Energy Agency, 2022. Disponível em:

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>. Acesso em: 27 nov. 2026.