

PROJETO DE TANQUES TIPO III PARA ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIOJoão Rafael Greco¹ (IC), Renata Neves Penha (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá.**Palavras-chave:** Armazenamento de hidrogênio. Enrolamento filamentar. Elementos finitos. Tanque tipo III.**Introdução**

Os vasos de pressão são recipientes estanques capazes de conter fluidos pressurizados, eles apresentam diversos tipos de formato, dimensão e aplicação, como caldeiras, reatores e cilindros para armazenamento de gases ou líquidos. O formato mais seguro e que permite o maior volume de gás armazenado é o formato esférico, porém o mais viável economicamente para aplicações em pequenas dimensões é o cilíndrico. Os domos dos vasos de pressão cilíndricos normalmente apresentam formato hemisférico, elíptico ou toriesférico (TELLES, 2007). Com base em uma abrangente revisão de literatura sobre os tanques de hidrogênio (H₂) de alta pressão, aponta-se os cinco tipos de tanques: o tipo I é produzido apenas com metal (aço ou alumínio); o tipo II é produzido principalmente com metal, possuindo um envoltório circunferencial externo de filamentos de compósito (revestimento); o tipo III é produzido predominantemente com compósitos e internamente possui uma fina camada linear metálica (*liner*); o tanque tipo IV é produzido com compósitos e internamente possui uma fina camada polimérica, que atua na impermeabilidade de H₂; por fim, o tipo V é produzido com compósitos, porém sem camadas ou revestimentos internos. Dispondo de tanques predominantemente de material compósito (tipos III, IV e V), obtém-se significativos ganhos de pressão máxima suportada, ou seja, aumento da resistência, contornando algumas limitações dos tanques metálicos (tipos I e II), como a relação combustível armazenável e dimensão do tanque (massa do tanque) e a atuação indesejada do H₂ na estrutura do tanque (fragilização por hidrogênio). Logo, o aumento do desempenho (redução da massa e ganho de armazenamento) corrobora a aplicação satisfatória de tanques compósitos em veículos (MAGLIANO, 2024). A partir da norma EN 12245:2002 (E), cilindro de gás transportável – cilindros de compósito totalmente revestidos, encontra-se especificações para projeto, fabricação, inspeção e ensaio de cilindros totalmente revestidos, recarregáveis e transportáveis. Logo, para os tanques do tipo III, IV e V a norma é aplicável. Com relação aos tanques do tipo III, aponta-se em sua estrutura

que, o *liner* é significativamente menos espesso que a camada de compósito e, portanto, o metal atua primariamente como barreira à passagem de H₂ e posteriormente como suporte para a distribuição de carga, por volta de 5% da carga total. A espessura do *liner* é função do tipo de material (aço ou alumínio), pressão de trabalho (massa de H₂ armazenado) e das características do revestimento de compósito. Logo, quanto maior a pressão interna e menor a resistência da liga, maior a espessura do *liner*, porém, o aumento da camada de compósito reduz satisfatoriamente as dimensões da camada interna. Com relação ao material do *liner* poderia-se propor o aço carbono, que é usual em vasos de pressão, mas o H₂ pode ser prejudicial à estrutura das ligas aço carbono, pois oferece riscos relacionados à fragilização por H₂. Ademais, o H₂ armazenado pode chegar a temperaturas criogênicas (inferiores à -45°C), possibilitando a fratura frágil catastrófica de alguns aços carbono. A norma europeia EN 12245:2022, aponta o uso do alumínio e do aço inoxidável para a confecção do *liner* do tanque tipo III. Para tal seleção e considerações, ela indica a norma que apresenta a informação adequada sobre o material, o tratamento térmico, o projeto do gargalo, a construção e acabamento, e testes mecânicos necessários. Pode-se destacar a liga de alumínio AA6061 e a liga de aço inoxidável austenítico AISI 316 L. Sobre a camada de compósito, utiliza-se normalmente de resina epóxi, devido ao processo produtivo e às suas propriedades mecânicas de transmissão de carga, e como fibra de reforço, destaca-se a fibra de carbono (maior desempenho de resistência mecânica por massa) quando comparado à fibra de vidro e à aramida, no que se refere à aplicação em veículos, suportando por volta de duas vezes mais pressão interna. Na produção dos tanques tipo III o processamento mais consolidado é o enrolamento filamentar ou bobinagem. Desta forma, os filamentos de fibras já impregnadas são dispostos na superfície do revestimento, visando a espessura desejada e a combinação adequada de ângulos de deposição para suportar as tensões circunferenciais e axiais (ZHANG, 2019). Para viabilizar economicamente uma análise estatística de diferentes parâmetros, como o desempenho

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

na ruptura, as características de falha, desempenho de massa, diferentes geometrias de cilindro, diferentes camadas de compósito, diferentes materiais; pode-se desenvolver modelos pela análise de elementos finitos (FEA, do inglês *Finite Element Analysis*) e comparar os resultados simulados de um determinado cilindro simulado com os resultados experimentais de um cilindro físico equivalente. Desta forma, avalia-se se houve assertividade na simulação e indica a assertividade das demais simulações. As teorias de falha podem ser classificadas quanto a sua limitação atrelada ao tipo de fratura do material analisado, assim, há teorias mais adequadas para materiais dúcteis e teorias mais adequadas para materiais frágeis. Portanto, para calcular a falha de matérias dúcteis, como metais, tem-se a teoria da energia de distorção máxima e a teoria da tensão de cisalhamento máxima, já para os materiais frágeis, como compósitos de fibra com polímeros curados, tem-se a teoria de Mohr-Coulomb e a teoria da tensão principal máxima (SHARMA, 2020). As características da falha do material podem ser avaliadas com base em diferentes critérios, como os critérios de falha de Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hoffman, Puck, Hashin ou outros. (ZHANG, 2019). Um bom projeto de engenharia deve prever e controlar como ocorrerá a falha de um equipamento, assim, no caso, espera-se que a falha por ruptura ocorra na “parede de vaso” da seção cilíndrica, mantendo assim, a integridade da região do domo e do boss. Com isso, protege-se a válvula do tanque, que atua no alívio de pressão durante a falha por ruptura ou incêndio (TSCHIRSCHWITZ, 2019). O objetivo do presente trabalho é realizar uma pesquisa sobre como projetar um tanque de armazenamento de H₂ do tipo III, considerando as condições de contorno relacionadas à normas e ao local de trabalho, a geometria do *liner* metálico, a espessura da camada de compósito, a sequência ideal de camadas de compósito e uma análise de falha inicial, considerando testes por análise de elementos finitos.

Metodologia

A análise do projeto de tanques do tipo III para armazenamento de hidrogênio foi realizada com base na literatura, considerando revisões de literatura e trabalhos específicos para exemplificar as partes do projeto.

Resultados e discussão

Com base em projetos de tanques tipo III para armazenamento de H₂ e H₂ crio-comprimido, apesar de existir diferenças devido à temperatura de trabalho,

observou-se princípios semelhantes que norteiam o projeto de ambos os taques. O esquema da Figura 1 apresenta o projeto do *liner*. Há parâmetros delimitados por norma, como a pressão de trabalho e a pressão que levará o tanque a romper todas as suas camadas (pressão de ruptura) (FU, 2024). A norma também aponta uma condição experimental para a avaliação do projeto (pressão de teste hidráulico). Além dos parâmetros de pressão, o formato e as dimensões do tanque cilíndrico também são delimitados pelas propriedades dos materiais disponíveis e pelo local de trabalho. Se a aplicação for em um carro convencional, um comprimento total de ~1000 mm é mais adequado para o tanque (SHARMA, 2020).

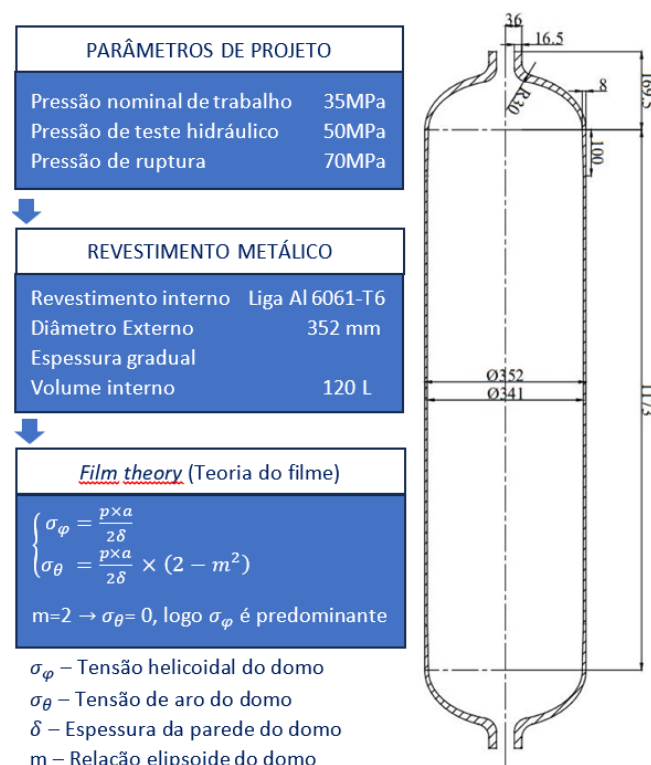


Figura 1 – Projeto do *liner* do tanque tipo III. Adaptado de FU (2024) e SHARMA (2020).

A espessura da parede do cilindro não é uma constante principalmente na parte do domo, sendo que, a partir de conceitos teóricos, o formato das extremidades do cilindro (formato elipsoidal) se mostra funcional pois, quando a relação elipsoide do domo (fator dimensional) é 2, incorre na sobreposição da tensão helicoidal sobre a tensão de aro, o que auxilia na previsibilidade do projeto. A otimização da camada de compósito, reduzindo sua massa e mantendo a boa resistência mecânica e a boa capacidade de armazenamento de H₂, é fundamental para a aplicação do tanque tipo III (MAGLIANO, 2024). O número de camadas por bobinagem que geram a camada

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

de compósito, é função das propriedades do compósito (resina e fibra), da espessura da fibra impregnada, do modelo matemático utilizado para projetar as camadas e do coeficiente de reforço do domo (Figura 2). É importante destacar as dificuldades para prever a espessura exata do enrolamento helicoidal no domo elipsoidal, já que suas seções circulares e paralelas possuem raios gradualmente distintos, assim, para garantir a disposição uniforme das fibras banhadas, pode-se utilizar de equações que modelam a deposição do enrolamento filamental nesta região, como a condição de Clairault (PETERS, 2011).

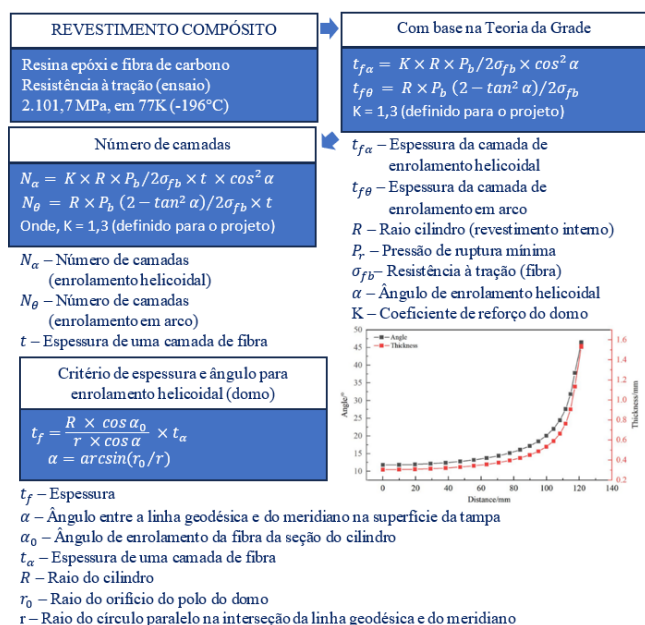


Figura 2 – Projeto da camada de compósito do tanque tipo III. Adaptado de Fu (2024).

Deseja-se otimizar o enrolamento filamental para reduzir a massa da camada de compósito e manter sua resistência mecânica, modificando-se, assim, o ângulo de enrolamento ou a sequência de empilhamento das camadas. Calcula-se a tensão principal máxima em função do ângulo e do número de camadas associada à aquele ângulo, plotando-se curvas de tensão principal máxima em função do número de camadas para ângulos discretos de 0 a 90°. Com base nessa abordagem e no ângulo mínimo, Sharma, 2020, obteve a seguinte sequência inicial de camadas de enrolamento $(\pm 9,43)_{10} / (\pm 30)_7 / (\pm 35)_8 / (\pm 60)_5$. Pela simulação de análise de tensão no modelo projetado, obtém-se a pressão de ruptura, se o resultado não atender o valor desejado (70MPa), ou seja, estiver acima da pressão de ruptura desejada, o número

de camadas é reduzido e a análise é efetuada novamente. No fim, atinge-se o modelo com o menor número de camadas, dado as condições impostas, ou seja, um modelo otimizado. Obteve-se um número de 30 a 32 camadas de compósito por bobinagem para atender à pressão de ruptura (70MPa) (SHARMA, 2020).

Os cilindros com domos hemisférico, paraboloide, elipsoide (1,7):1 (I), elipsoide (2,5):1 (II), elipsoide 4:1 (III) e isotensoide, foram estudados. Os formatos de domo de maior desempenho de ruptura são o formato elipsoidal (II) e o isotensoide, pois apresentaram, as menores tensões equivalentes pela análise de tensão de Von Mises (895 e 899 MPa) e as maiores pressões de ruptura (77,5 e 77,2 MPa) (SHARMA, 2022). Os parâmetros críticos para o controle de falha mais recorrentes são a pressão de ruptura, a vida em fadiga e o dano nas fibras. Na literatura, constata-se que as simulações se concentram em modelos de análise progressiva de falha: método de degradação das propriedades do material (MPDM) e método de elemento coesivo (CE); mecânica do dano contínuo; teoria micromecânica da falha (MMF); e método de degradação das propriedades do material (MPDM) (ZHANG, 2019). No ensaio de ruptura hidrostática, a pressão é aplicada em taxa constante até que o rompimento é identificado pela perda abrupta de pressão. Após 500 ciclos de ensaio de fadiga em ambiente de hidrogênio, houve redução de 15% na pressão de ruptura (ZHENG, 2013), porém o número de amostras era reduzido. Para avaliar a falha dos materiais compósitos, considerando as resistências à tração, compressão e cisalhamento dos materiais, utiliza-se preferencialmente os critérios de falha de Hoffman, Tsai-Hill e Tsai-Wu (SHARMA, 2022). As malhas com maior probabilidade de falha são marcadas com contornos vermelhos, já as com menor probabilidade de falha são marcadas com contornos verdes (Figura 3).

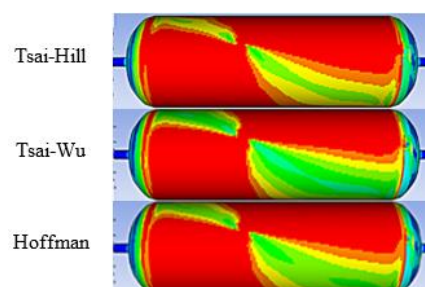


Figura 3 – Critérios de falha de Tsai-Hill, Tsai-Wu e Hoffman. Domo isotensoide e pressão hidrostática. Adaptado de SHARMA et. al (2022).

Os resultados simulados são sempre próximos da realidade, entretanto para prever a ruptura de forma

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

realista seria necessário investimentos em infraestrutura segura para as análises. E a simulação por FEA necessita considerar critérios de falha distintos, temperatura de análise e parâmetros de bobinagem mais realistas. Há um crescente aumento de trabalhos para a otimização de projetos no que se refere à reforço do domo e verificação experimental de análise de falhas. Além de que, há o interesse de pesquisas sobre técnicas de ensaios não destrutivos (ZHOU, 2022).

Conclusões

O projeto de tanques de tipo III envolve a análise detalhada da geometria do *liner* metálico, da espessura e sequência das camadas de compósito e da resistência mecânica global, sendo a simulação por FEA uma ferramenta essencial para prever falhas. Os parâmetros críticos para o controle de falha mais recorrentes são a pressão de ruptura, o dano nas fibras e a fadiga. A otimização da camada de compósito, por meio da escolha do número de camadas e ângulo de enrolamento, permite reduzir a massa sem comprometer a resistência, enquanto a geometria do domo afeta diretamente a capacidade de suportar pressão, destacando-se o domo elipsoide (2,5):1. Os critérios de falha mais utilizados para materiais compósitos são Hoffman, Tsai-Hill e Tsai-Wu, permitindo identificar regiões críticas. Finalmente, observa-se um crescente interesse em otimização de projetos e aplicação de ensaios não destrutivos, reforçando a importância de combinações entre análise experimental e simulação para o desenvolvimento seguro e eficiente desses cilindros.

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal de Itajubá pela oportunidade de estudo e ao órgão CNPq pela bolsa de estudos. Agradeço à Prof. Renata pela oportunidade de realizar a iniciação científica.

Referências

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12245:2002 – Transportable gas cylinders – Fully wrapped composite cylinders. Brussels, 2002.

FU, Hao; LV, Cui; MENG, Junqing; HE, Ming; WU, Jihao; GONG, Linghui. Strength and fatigue study of on-board type III cryo-compressed hydrogen storage cylinder. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 57, p. 1081–1088, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.098.

HIEN, Dinh V.; THANH, Tran N.; LAM, Vu T.; VAN, Tran T. T.; HAO, Le V. Design of planar wound composite vessel based on preventing slippage tendency of fibers. *Composite Structures*, v. 254, 112854, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112854>.

MAGLIANO, Alfonso; PEREZ CARRERA, Carlos; PAPPALARDO, Carmine Maria; GUIDA, Domenico; BERARDI, Valentino Paolo. A comprehensive literature review on hydrogen tanks: storage, safety, and structural integrity. *Applied Sciences*, v. 14, n. 20, p. 9348, 2024. DOI: 10.3390/app14209348.

PETERS, S. T. (Ed.). *Composite filament winding*. Materials Park, OH: ASM International, 2011. ISBN 978-1-62708-338-6. DOI: 10.31399/asm.tb.cfw.9781627083386.

SHARMA, Pranjali; BERA, Tapan; SEMWAL, Kaladhar; BADHE, Rajesh M.; SHARMA, Alok; RAMAKUMAR, S.S.V.; NEOGI, Swati. Theoretical analysis of design of filament wound type 3 composite cylinder for the storage of compressed hydrogen gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 46, p. 25386–25397, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.269.

SHARMA, Pranjali; SHARMA, Shubhangi; BERA, Tapan; SEMWAL, Kaladhar; BADHE, Rajesh M.; SHARMA, Alok; KAPUR, Gurpreet Singh; RAMAKUMAR, S. S. V.; NEOGI, Swati. Effects of dome shape on burst and weight performance of a type-3 composite pressure vessel for storage of compressed hydrogen. *Composite Structures*, v. 293, p. 115732, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115732>.

TELLES, Pedro C. Silva. *Vasos de pressão*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

TSCHIRSCHWITZ, Rico; KRENTEL, Daniel; KLUGE, Martin; ASKAR, Enis; HABIB, Karim; KOHLHOFF, Harald; KRÜGER, Simone; NEUMANN, Patrick P.; RUDOLPH, Michael; SCHOPPA, André; STORM, Sven-Uwe; SZCZEPANIAK, Mariusz. Hazards from failure of CNG automotive cylinders in fire. *Journal of Hazardous Materials*, v. 367, p. 1–7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.026>.

ZHANG, Ming; LV, Hong; KANG, Huairong; ZHOU, Wei; ZHANG, Cunman. A literature review of failure prediction and analysis methods for composite high-pressure hydrogen storage tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.l.], v. 44, n. 47, p. 25777–25799, 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.001.

Zheng, C.-X., Wang, L., Li, R., Wei, Z.-X. & Zhou, W.-W. (2013). Fatigue test of carbon epoxy composite high pressure hydrogen storage vessel under hydrogen environment. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 14(6), 393–400. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1200297>

ZHOU, Wei; WANG, Jie; PAN, Zhi-bo; LIU, Jia; MA, Lian-hua; ZHOU, Jia-yi; SU, Yi-fan. Review on optimization design, failure analysis and non-destructive testing of composite hydrogen storage vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.l.], v. 47, n. 91, p. 38862–38883, 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.028.