

ESTUDO DO PROCESSO DE COMPOSITE BRAIDING NA FABRICAÇÃO DE CILINDROS DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO TIPOS III E IVGuilherme V. R. Furtado¹ (IC), Bruno S. Sousa (PQ)¹¹Instituto de Engenharia Mecânica (IEM), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, Brasil**Palavras-chave:** Elementos finitos. Parâmetros de fabricação. Reforço compósito. Simulações computacionais.**Introdução**

Atualmente, existe um grande esforço tecnológico na busca por fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, uma vez que se procura reduzir o impacto ambiental das necessidades energéticas atuais para garantir a preservação do meio ambiente (ZÜTTEL *et al.*, 2010).

Uma das fontes de energia limpa cuja infraestrutura de produção está sendo desenvolvida de forma crescente é o gás hidrogênio (H_2). Apesar de possuir densidade energética de até 1,3 kWh/kg, aproximadamente 18,57% da densidade energética de hidrocarbonetos comerciais, este gás pode ser produzido a partir de fontes de energia renováveis (ZÜTTEL *et al.*, 2010). No entanto, o grande desafio para o uso em grande escala de hidrogênio como combustível, principalmente em veículos automotores, é o seu armazenamento.

Como o hidrogênio é um átomo de pequenas dimensões, de fato, o menor átomo dentre todos os conhecidos, a maioria dos materiais metálicos não são capazes de armazená-lo, uma vez que suas estruturas cristalinas são permeadas pelo hidrogênio. Isto pode causar a fragilização destes metais (BRAUN; ALLISON, 2022), o que pode levar à ruptura prematura dos cilindros de armazenamento de H_2 . Para mitigar este problema, são utilizados liners poliméricos internos como barreira a gases, tais como os de polietileno de alta densidade (PEAD).

Porém, a pressão comercial de armazenagem do gás hidrogênio é de até 800 bar, ou seja, cilindros de gás de dimensões comuns feitos apenas de materiais metálicos usuais, tais como o aço ou alumínio, não seriam capazes de suportar esta pressão sem algum tipo de reforço (ZÜTTEL, 2004).

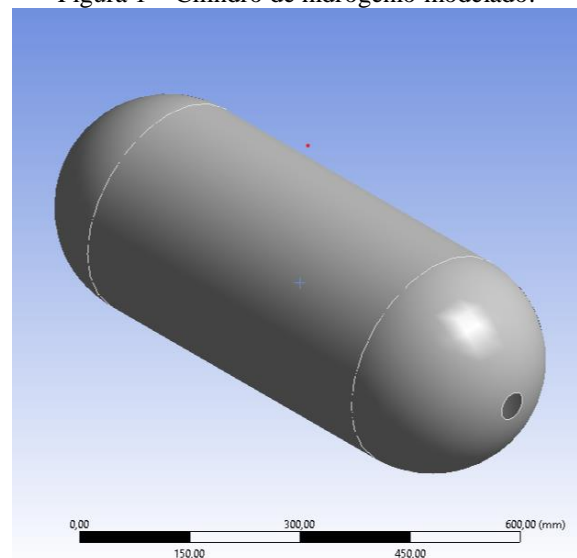
Neste contexto, com o objetivo de conferir grande resistência mecânica e peso comercialmente viável aos cilindros de armazenamento de hidrogênio tipos III e IV, este trabalho buscou determinar as dimensões e parâmetros de fabricação do reforço de

compósito carbono-epóxi pelo processo de *composite braiding*, a partir de simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos.

Metodologia

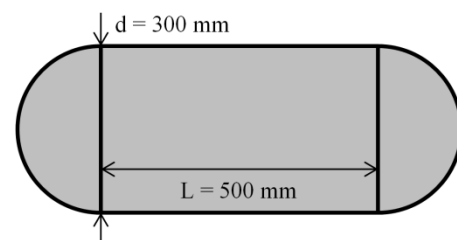
Inicialmente, modelou-se o cilindro de hidrogênio no software ANSYS Workbench 2022 R1, com capacidade de 50 litros, considerando a norma ISO 11119-3 (2020), tal como apresentado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 – Cilindro de hidrogênio modelado.



Fonte: Autor (2025).

Figura 2 – Dimensões internas do cilindro de hidrogênio modelado.

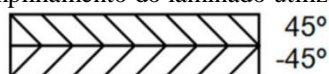


Fonte: Autor (2025).

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

Para as simulações computadorizadas de elementos finitos, foram considerados os parâmetros apresentados na Figura 4 e o reforço compósito carbono-epóxi UD Toray 12K T700 60E, com empilhamento $[45^\circ/-45^\circ]_n$ (Figura 3), sendo suas propriedades especificadas na Tabela 1.

Figura 3 – Empilhamento do laminado utilizado no estudo.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do laminado carbono-epóxi UD Toray 12K T700 60E $[45^\circ/-45^\circ]_n$.

Direção	Longitudinal	Transversal
Carregamento	Tração	
Módulo elástico, E (GPa)	10,39	10,39
Resistência à tração (MPa)	9,9	9,5
Carregamento	Cisalhamento	
Módulo elástico, G (GPa)	27,06	27,06
Resistência ao cisalhamento (MPa)	38,4	38,4

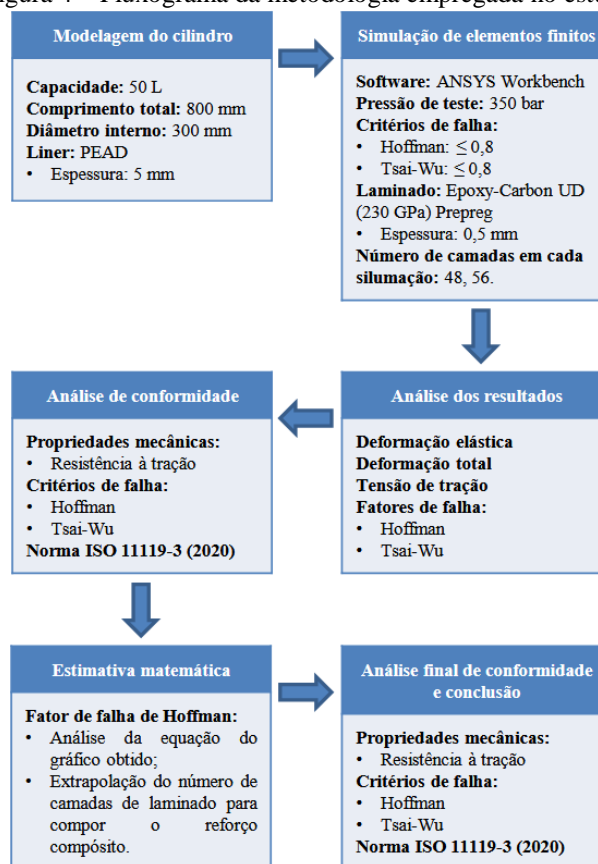
Fonte: TRUONG *et al.* (2005).

As simulações foram realizadas com número crescente de camadas de reforço compósito, até o limite de capacidade de processamento do computador utilizado, conforme apresentado na Figura 4. Ademais, a análise dos resultados e viabilidade do cilindro foi realizada a partir da devolutiva do *software*, considerando os critérios de falha Tsai-Wu e Hoffman (Figuras 5 e 6).

Em seguida, foi realizada a avaliação do cilindro, para cada quantidade de camadas utilizada, conforme os critérios de falha empregados, as propriedades mecânicas do reforço compósito e a norma ISO 11119-3 (2020), onde se afirma: “O cilindro será rejeitado se apresentar uma expansão elástica (máxima) superior a 110 % da expansão elástica média do lote”.

Por fim, a partir da equação do gráfico do critério de falha de Hoffman, foi extrapolado o número mínimo de camadas de reforço necessárias para que o cilindro desenhado não falhasse na pressão de teste e estivesse em conformidade com os critérios de falha empregados, as propriedades mecânicas do reforço compósito e a norma apresentada.

Figura 4 – Fluxograma da metodologia empregada no estudo.

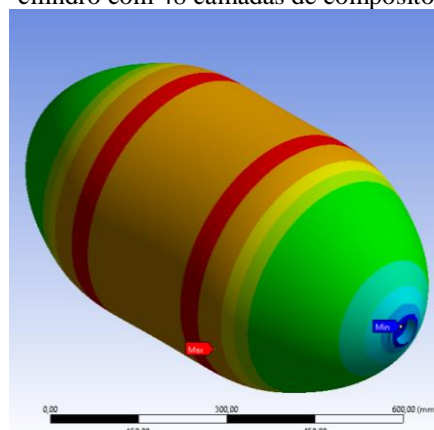


Fonte: Autor (2025).

Resultados e discussão

Após as simulações de elementos finitos, foi possível observar o gradiente de deformação elástica sofrido pelo cilindro modelado, tal como apresentado na Figura 5:

Figura 5 – Gradiente de deformação plástica ao longo do cilindro com 48 camadas de compósito.



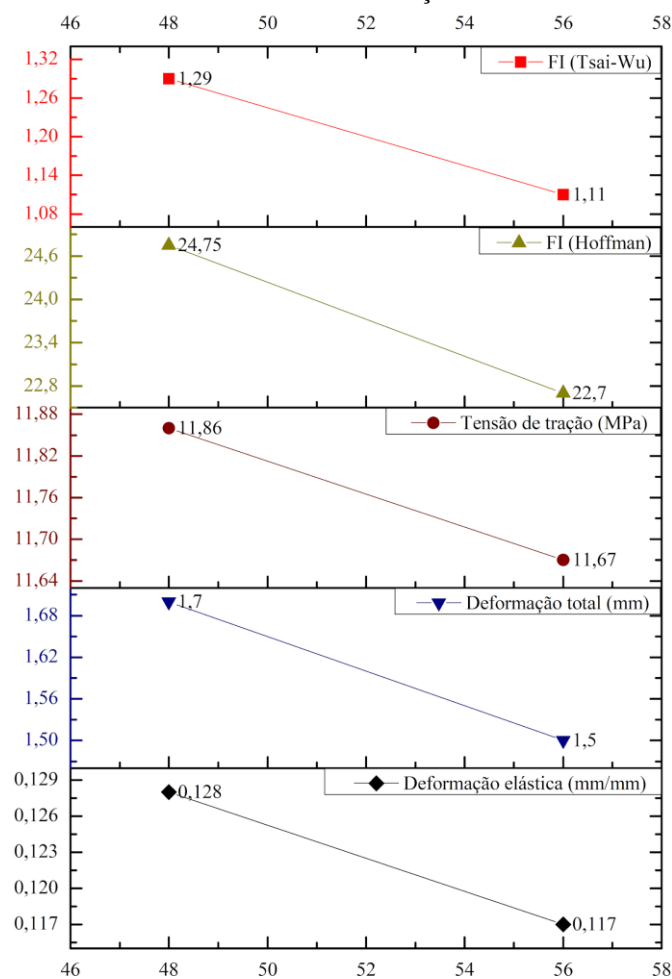
Fonte: Autor (2025).

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

Nota-se que as regiões com as piores deformações (destacadas em vermelho), condizem com pontos de mudança de geometria, ou seja, as áreas de transição entre os domos e a seção retilínea do cilindro de H₂. Isto é esperado, uma vez que mudanças de geometria geram concentração de tensões (FERREIRA, 2019), o que também indica que o cilindro de hidrogênio falharia nas regiões destacadas.

Ademais, obtiveram-se os gráficos apresentados na Figura 6 e avaliou-se o cilindro com 56 camadas de laminado conforme os critérios de falha adotados, as propriedades do laminado e a norma ISO 11119-3 (2020) (Tabelas 2 e 3).

Figura 6 – Valores máximos de parâmetros e fatores de falha para cada quantidade de camadas de laminado carbono-epóxi utilizada nas simulações.



Camadas de compósito
Fonte: Autor (2025).

Tabela 2 – Avaliação do cilindro com 56 camadas de compósito em relação aos critérios de falha e propriedades do laminado.

Critério	Valor medido	Aprovado	Reprovado	Diferença (%)
Resist. à tração (MPa)	11,67	-	X	+17,88
Hoffman	22,70	-	X	+2737,50
Tsai-Wu	1,11	-	X	+38,75

Fonte: Autor (2025).

Tabela 3 – Avaliação do cilindro com 56 camadas de compósito em relação à norma ISO 11119-3 (2020).

Def. total máx. (mm)	Def. total méd. (mm)	Apr.	Repr.	Diferença (%)
1,49	1,09	-	X	+36,70

Fonte: Autor (2025).

A partir dos gráficos da Figura 6, notou-se que há melhora nas propriedades do reforço compósito conforme se aumenta o número de camadas utilizadas, uma vez que ocorre a distribuição majoritariamente igualitária de forças entre cada camada do laminado (KAW, 2006). No entanto, notou-se que 56 camadas de laminado não seriam suficientes para atender os pré-requisitos para cilindros de armazenamento de hidrogênio tipo IV, em especial, como especificado na norma ISO 11119-3 (2020).

Considerando que a diferença do valor medido em 56 camadas de compósito do fator de falha de Hoffman foi de 2737,5% em relação ao valor de referência empregado, igual a 0,8, se optou por obter a equação do gráfico do critério de falha de Hoffman, exibido na Figura 6. Neste contexto, foi estipulado o número de camadas necessário para que um cilindro de H₂ fabricado com reforço compósito das especificações estipuladas no estudo seja viável.

Para o critério de falha de Hoffman, temos a equação do gráfico da simulação:

$$y = -0,2571x + 37,096$$

Se $y \leq 0,8$, então:

$$0,8 \leq -0,2571x + 37,096$$

$$\therefore x = 141,1746 \cong 142 \text{ camadas}$$

Sendo assim, determinou-se que o número mínimo de camadas de laminado necessárias para compor o reforço compósito do cilindro de H₂ projetado,

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

com este sendo aprovado em todos os critérios e na norma vigente (Tabela 4), é igual a 142, com a espessura total do reforço sendo igual a 71 mm, o que é muito grande para torná-lo comercialmente viável.

Apesar da aproximação da equação do gráfico utilizado ser igual a 100%, ou seja, seu $R^2 = 1$, o número de simulações realizadas foi muito baixo para determinar o comportamento real da curva do gráfico. Isto, por sua vez, é consequência da falta de capacidade de processamento necessária para realizar simulações de elementos finitos com números maiores de camadas.

Tabela 4 – Avaliação do cilindro com 142 camadas de compósito em relação aos critérios de falha, às propriedades do laminado e à norma ISO 11119-3 (2020).

Critério	Aprovado	Reprovado	Diferença (%)
Resistência à tração	X	-	0
Hoffman	X	-	0
Tsai-Wu	X	-	0
ISO 11119-3	X	-	0

Fonte: Autor (2025).

Conclusões

A partir das simulações de elementos finitos, notou-se que a área de maior deformação elástica sofrida pelo cilindro modelado condiz com as regiões de transição entre os domos e a região retilínea do cilindro, concentradoras de tensões. Neste contexto, as áreas de maior probabilidade de falha do cilindro também são estas regiões.

Ademais, também verificou-se, por meio da comparação dos valores de referência dos critérios de falha, propriedades mecânicas do laminado e pela inconformidade com a norma ISO 11119-3 (2020), que 56 camadas de laminado não são suficientes para garantir a integridade estrutural do cilindro modelado na pressão de teste. Nesta configuração, a diferença entre os valores medidos de resistência à tração, fatores de falha de Hoffman e Tsai-Wu, e os valores de aceite foram de +17,88, +2737,50 e +38,75, respectivamente.

Neste contexto, a partir da equação da reta do fator de falha de Hoffman e considerando o valor de referência do fator $FI \leq 0,8$, foi extrapolado o número mínimo de camadas de laminado necessário para que o cilindro esteja em conformidade com os critérios adotados no estudo, sendo este igual a 142 camadas.

No entanto, devido à falta de capacidade computacional disponível para a realização de

simulações com números de camadas superiores a 56, a equação do gráfico utilizado na extrapolação não descreve plenamente o comportamento do gráfico em questão.

Agradecimentos

Primeiramente à minha família, especialmente meus pais Alexandre e Elaine, por todo o apoio, paciência e compreensão nestes anos de trabalho longe de casa, e também por serem minhas maiores inspirações pessoais e profissionais.

À Profa. Dra. Renata Neves Penha, que me deu a oportunidade de participar deste projeto de pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bruno Silva de Sousa, por me auxiliar durante todo o trabalho e sempre proporcionar, de forma séria e profissional, grande liberdade e criatividade na pesquisa e escrita científica.

À UNIFEI, pelo auxílio financeiro fornecido por meio do programa PIBIC e por disponibilizar a infraestrutura para a realização deste trabalho.

Referências

BRAUN, K.; ALLISON, T. C. *“Machinery and Energy Systems for the Hydrogen Economy”*. 1. ed.: Elsevier, 2022.

FERREIRA, E. T. **Elementos de mecânica da fratura aplicada à engenharia estrutural**. 2. ed. rev. e aum.: UFLA, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11119-3**. *“Gas cylinders – Design, construction and testing of refillable composite gas cylinders and tubes – Part 3: Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders and tubes up to 450 l with non-load-sharing metallic or non-metallic liners or without liners”*. Geneva: ISO, 2020.

KAW, A. K. *“Mechanics of composite materials”*. 2. ed.: CRC Press, 2006.

TRUONG, T. C. *et al.* *“Carbon composites based on multi-axial multi-ply stitched preforms. Part 4: Mechanical properties of composites and damage observation”*. **Composites: Part A**, v. 36, p. 1207–1221, 2005.

ZÜTTEL, A. *“Hydrogen storage methods”*. **Naturwissenschaften**, v. 91, p. 157–172, 2004.

ZÜTTEL, A. *et al.* *“Hydrogen: the future energy carrier”*. **Philosophical Transactions of The Royal Society**, v. 368, p. 3329–3342, 2010.