

AVALIAÇÃO DE UMA JUNTA HÍBRIDA METAL/COMPÓSITO PARA POTENCIAL APLICAÇÃO EM VASOS DE PRESSÃO

Beatriz Silveira Duarte (IC)¹, Renata Neves Penha (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Palavras-chave: Material híbrido. Vaso de pressão. Teste hidrostático. Modo de falha.

Introdução

Os materiais compósitos estão presentes em diferentes ramos da indústria como aeronáutica, aeroespacial, automobilística, esportiva, *etc.* Uma vez que apresenta propriedades mecânicas favoráveis, como altos valores de resistência e rigidez, resistência à corrosão e baixa densidade. No entanto, um empecilho para a aplicação desses materiais é o elevado custo do material e associado ao seu processamento (KNOW, 2019).

Uma possível solução para diversas aplicações são as juntas híbridas metal/compósito, visto que alcançam as propriedades combinadas de ambos os materiais. Entretanto, devido às diferenças das características termofísicas, há uma grande dificuldade na junção desses materiais. Na atualidade, para otimizar a adesão entre o metal e o compósito, são empregados colagem por meio de adesivos estruturais, fixação mecânica, ou soldagem (PEREIRA, 2018 e CAIWANG, 2021).

Para uma adesão eficiente, alguns parâmetros precisam ser considerados, como a geometria do material, comprimento mínimo de sobreposição, espessura do adesivo, caso for uma colagem com adesivos, distância do passo e folga do furo do parafuso, se por fixação mecânica, tipo dos materiais usados, tanto o metal quanto o compósito (XIAOQI, 2021). Para isso, muitas pesquisas, análises e testes são desenvolvidos para avaliar e consolidar dados referentes a essa união metal/compósito para diferentes aplicações.

Tendo como exemplo, os testes comumente realizados são de fluência, resistência à tração, compressão e principalmente, análise da superfície do metal que irá receber o compósito e análise da microestrutura na região da união dos materiais, após a finalização do processo de fabricação da junta híbrida. Ademais, é comum a realização análise de falha e modos de fratura e de simulações computacionais com diferentes parâmetros dos materiais e/ou de processamento.

Assim, uma aplicação direta para um material híbrido metal/compósito são os vasos de pressão dos tipos II e III. Uma vez que são projetados para conter substâncias sob pressão, sendo necessário uma vedação

eficaz e segura, logo o material para tal uso deve apresentar e suportar tais condições de exposição.

Logo, o presente trabalho visa avaliar a adesão de uma junta híbrida metal/compósito para possíveis aplicações em vasos de pressão, utilizando liner de liga de alumínio e revestimento de laminado de fibra de carbono em matriz polimérica. Serão realizadas análises de caracterização da superfície metálica e testes mecânicos na junta híbrida fabricada, incluindo análise de falhas e modos de fratura. O objetivo dessas análises é avaliar as propriedades desejadas e compará-las com dados existentes na literatura, levando em conta as variáveis de fabricação ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Metodologia

No experimento, foram utilizados cilindros de armazenamento de alumínio 6061, uma liga endurecida por precipitação com magnésio e silício, com capacidade para 1 L e pressão de trabalho de 300 bar. Para melhorar a adesão do compósito, foi necessário remover a tinta superficial dos vasos, utilizando um removedor da marca Vonde®, seguido de lixamento com lixas de 400 e 600 para criar ranhuras e aumentar a aderência entre o alumínio e o compósito.

Após a preparação da superfície, iniciou-se a laminação do compósito, utilizando tecido do tipo sarja (2/2) de fibra de carbono fornecidos pela Barracuda Advanced Composites. Cada cilindro foi coberto com duas camadas de fibra. A quantidade de resina necessária foi determinada a partir do cálculo de proporção correlacionando massa, volume e densidade, da fibra e da resina, utilizando as Equações 1 e 2, sequencialmente. Resultando em 29,15 g de resina para cobrir os tecidos de fibra de carbono.

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_f} \quad (1) \quad \rho_r = \frac{m_r}{V_r} \quad (2)$$

A cura da resina foi realizada em temperatura ambiente por 48 horas, obtendo-se vasos híbridos de metal e fibra de carbono, ilustrado na Figura 1. Após a cura, foi realizado o teste hidrostático para caracterizar mecanicamente os cilindros. Três cilindros, um sem

revestimento e dois revestidos, foram submetidos a pressões de até 500 bar, utilizando uma bomba de pressurização, com o objetivo de atingir a pressão de ruptura dos cilindros.

Figura 1 – Vasos de pressão reforçados com fibra de carbono, já sendo caracterizados como materiais híbridos.



Fonte: Autora.

Durante o experimento, os vasos foram posicionados dentro de um bunker juntamente com uma câmera para capturar o momento da falha do material. A pressão foi aplicada gradualmente para evitar danos antes da ruptura, permitindo uma análise posterior dos modos de falha dos vasos de pressão, comparando os resultados entre os cilindros revestidos e o não revestido.

Resultados e discussão

O primeiro teste hidrostático a ser realizado foi no cilindro de pressão sem revestimento, ou seja, apenas o cilindro de alumínio, sem revestimento de fibra. A amostra tem uma pressão de trabalho nominal de até 200 bar, conforme informado pelo fabricante. No entanto, durante o teste, a pressão atingiu 500 bar sem que o cilindro apresentasse falhas, alcançando o limite máximo de pressão permitido pelo equipamento utilizado, como pode ser observado no manômetro fixado na bomba presente na Figura 2.

Mesmo ao atingir o limite de pressão da bomba utilizada, ou seja, ultrapassando em 150% a pressão de trabalho pré-estabelecida, o cilindro pressurizado não sofreu nenhuma deformação em sua estrutura, nem mesmo chegou à ruptura como era o esperado, o que se viu na Figura 3. Ademais, pela figura também é possível perceber que não houve vazamento do líquido pressurizado, de modo que toda superfície ao redor do cilindro estava completamente seca, sem vestígios de umidade.

Figura 2 - Pressão atingida pelo manômetro no primeiro teste hidrostático.



Fonte: Autora.

Figura 3 - Vaso de pressão após pressurização com 500 bar.



Fonte: Autora.

Devido à incapacidade do equipamento de causar a falha do cilindro sem revestimento, optou-se por não realizar o teste nos vasos revestidos com fibra de carbono. Como a bomba de pressão utilizada não conseguiu fraturar o cilindro de alumínio, não seria capaz de atingir a ruptura do material híbrido, que requer pressões ainda maiores por combinar propriedades mecânicas de alumínio e compósito. Como Sharma (2022) demonstra em seu estudo, onde vasos de pressão revestidos com fibra de carbono e resina epóxi precisam de uma pressão de ruptura superior a 70 MPa (700 bar), conforme as normas ISO 15869.

No entanto, era esperado que o modo de ruptura do cilindro sem revestimento iniciasse no centro do cilindro e se espalhasse na direção longitudinal. Considerando os cilindros revestidos, após o início da ruptura no centro do vaso, era esperada a formação de uma superfície de fratura na direção longitudinal do cilindro, como foi realizado no estudo de Cho (2019), e pode ser visto na Figura 4, um vaso de pressão que atingiu a falha a uma pressão de 1.100 bar.

Figura 4 – Ruptura de um vaso de pressão à 1100 bar.



Fonte: Cho, 2019.

A partir da análise estrutural realizada por Cho (2019), observou-se que cilindro se expandiu radialmente sob pressão interna exercida, enquanto a parte do bocal se moveu na direção longitudinal. Sendo que esse é o movimento comum quando há aplicação de uma cúpula isotensóide, que, devido ao seu formato mais curto na direção radial, deforma-se longitudinalmente.

Ademais, outras influentes do modo de ruptura são, teoria da rede, quanto menor for o coeficiente de equilíbrio de tensão k , maior será a espessura do enrolamento helicoidal da fibra para realização do compósito que irá revestir o cilindro, e consequentemente o modo de ruptura tende a ser mais Seguro (Hu, 2021). E também, a espessura de fibra utilizada para o revestimento, considerando o método de parábola, que leva em conta o empilhamento de fibra camada por camada (Lin, 2023).

Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste estudo, a aplicação de juntas híbridas metal/compósito, especificamente alumínio com fibra de carbono e resina epóxi, para vasos de pressão revelou desafios significativos na realização das caracterizações mecânicas para compreender as propriedades mecânicas desses materiais sob condições de pressão máxima. O teste hidrostático demonstrou que o cilindro de alumínio sem revestimento suportou uma pressão acima do esperado, sem falhas evidentes. No entanto, devido às limitações da capacidade de pressurização do equipamento disponível, não foi possível alcançar a falha dos vasos revestidos com compósitos, impedindo uma avaliação completa de sua resistência à pressão.

Dessa forma, recomenda-se futuras investigações utilizando equipamentos de teste adequados para avaliar corretamente as propriedades mecânicas dos compósitos em pressões que simulam condições de uso real, e também analisar os modos de falha, conforme as normas estabelecidas para vasos de pressão. Esses estudos são essenciais para validar e otimizar o desenvolvimento de materiais híbridos metal/compósito, garantindo sua segurança e eficácia em aplicações industriais exigentes.

Agradecimentos

A UNIFEI pela estrutura e pelo apoio a pesquisa, a CNPq pelo investimento e incentivo à pesquisa, e aos técnicos do Núcleo de Separadores Compactos (NUSEC) pela paciência, dedicação e suporte ao experimento realizado.

Referências

- CAIWANG, T. A. N. et al. Laser joining of CFRTP to titanium alloy via laser surface texturing. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 34, n. 5, p. 103-114, 2021.
- CHO, Sung-min et al. Development of a type 4 composite cylinder for self-contained breathing apparatus. **Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers**, v. 18, n. 12, p. 1-6, 2019.
- HU, Zhengyun; CHEN, Minghe; PAN, Bo. Simulation and burst validation of 70 MPa type IV hydrogen storage vessel with dome reinforcement. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 46, p. 23779-23794, 2021.
- KWON, Dong-Jun et al. Comparison of interfacial adhesion of hybrid materials of aluminum/carbon fiber reinforced epoxy composites with different surface roughness. **Composites Part B: Engineering**, v. 170, p. 11-18, 2019.
- LIN, Jiao et al. Prediction of composite pressure vessel dome contour and strength analysis based on a new fiber thickness calculation method. **Composite Structures**, v. 306, p. 116590, 2023.
- OMAIREY, Sadik; JAYASREE, Nithin; KAZILAS, Mihalis. Defects and uncertainties of adhesively bonded composite joints. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 9, p. 769, 2021.
- PEREIRA, Rúben Leandro Leitão. Perfis Híbridos Metal/Compósito. 2018.
- SHARMA, Pranjali et al. 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.
- XIAOQI, L. I. et al. Tensile properties of a composite-metal single-lap hybrid bonded/bolted joint. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 34, n. 2, p. 629-640, 2021.