

COBEF2025-0128

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CILINDROS PARA ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE: EXEMPLOS E APLICAÇÕES DE PROJETOS PARA UMA MANUFATURA SUSTENTÁVEL

Marcos Lazaro Batista, marcoslazarob@gmail.com¹
Felipe Palato, d2022013125@unifei.edu.br¹
Anthonin Demarbaix, anthonin.demarbaix@condorcet.be²
Yohan Ali Diaz Méndez, yohan.g8@unifei.edu.br¹
Sebastião Simoes Cunha Jr, sebas@unifei.edu.br¹

¹ Universidade Federal de Itajuba, Avenida BPS, 1303, Pinheirinho, Itajuba-MG

² Hainaut Provincial High School - Condorcet, Digue de Cuesmes 29, 7000 Mons, Bélgica

Resumo: Este estudo irá explorar a otimização dos processos de fabricação de cilindros para hidrogênio verde, com ênfase em exemplos e aplicações de projetos voltados para uma manufatura sustentável. O hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, é uma alternativa promissora para apoiar uma economia de baixo carbono. No entanto, a eficácia dessa solução energética depende fortemente da eficiência e sustentabilidade dos cilindros utilizados em armazenamento e transporte. Através de uma revisão bibliográfica abrangente, o estudo irá examinar as técnicas e inovações atuais na fabricação de cilindros para armazenamento do hidrogênio verde, identificando oportunidades de melhoria e inovação. A revisão busca realizar uma análise detalhada dos materiais utilizados, dos processos de produção, dos desafios associados à segurança e durabilidade dos cilindros, das mais recentes inovações tecnológicas que impactam na fabricação destes cilindros, além dos projetos de manufatura que visam otimizar os processos. As tecnologias emergentes, como o uso de compósitos avançados e técnicas de produção mais eficientes, serão analisadas para entender como podem contribuir para a redução de custos e aumento da eficiência. Serão abordadas questões relacionadas à reciclagem e ao impacto ambiental dos materiais utilizados. Além disso, o estudo irá oferecer sugestões práticas para a aplicação desses projetos de manufatura, fundamentadas nas análises da literatura. O estudo adotará abordagens integradas que envolvem melhorias nos processos de manufatura, investimentos em pesquisa e desenvolvimento e a colaboração entre indústrias e centros de pesquisa. O objetivo é fornecer uma visão crítica e atualizada que não apenas identifique lacunas e oportunidades no campo, mas também ofereça direções concretas para a implementação de projetos mais eficientes e sustentáveis na fabricação de cilindros para hidrogênio verde. Assim, este trabalho contribuirá para o avanço da tecnologia e a promoção de uma economia mais sustentável, ao oferecer uma análise detalhada e recomendações práticas para a otimização dos projetos de manufatura de cilindros de hidrogênio verde.

Palavras-chave: Manufatura vasos de pressão, cilindros de hidrogênio, enrolamento de filamento

1. INTRODUÇÃO

A fabricação de vasos compostos de alta pressão é realizada por enrolamento de filamentos processos. Isso envolve enrolar camadas de reforço de carbono em um revestimento em várias orientações que dão um composto que é adaptado para suportar o arco e longitudinal cargas no cilindro pressurizado. O processo proporciona flexibilidade na sequência de laminação e é capaz de enrolar rebocos sobre as seções abobadadas do navio. A desvantagem é que o processo é relativamente lento, pois o enrolamento axial requer um posicionamento específico de reboca ao longo de caminhos geodésicos. Ao considerar os navios maiores, movidos a combustível alternativo, o tempo de produção pode chegar a 12 horas.

Atualmente, existem tecnologias de enrolamento que podem fornecer alternativas adequadas para enrolamento de filamentos na fabricação de cilindros de gás. Isso inclui enrolamento robótico e trançado. O enrolamento robótico pode ser usado na fabricação de peças complexas e reduz os custos de mão de obra devido ao alto nível de manipulação de peças por robôs e alta fibra taxas de deposição. A trança é usada em várias aplicações têxteis, incluindo fabricação de

cordas. Embora o processo seja uma fabricação têxtil de longa data técnica, foco recente tem examinado o uso de tranças em estruturas compostas. A trança proporciona uma alta taxa de deposição de fibras devido à deposição simultânea de vários reboques durante o processo.

O enrolamento de filamentos é um dos métodos mais importantes de produção de peças compostas. As aplicações estão em todos os campos e em todas as regiões do mundo: produção de silos de armazenamento; sistemas de tubulação de água; garrafas; vasos de alta pressão e outros. O enrolamento de filamentos é usado até mesmo no design de casas e jardins hoje em dia. No passado, o ciclo de design de componentes de filamentos enrolados envolvia muitos testes e trabalho em uma base de tentativa e erro. Apenas ferramentas de cálculo simples estavam disponíveis para encontrar a geometria da peça desejada e a estrutura laminada. Era necessário fabricar muitos protótipos, testá-los e então melhorar o design de acordo. Nos dias atuais, programas especializados de análise de laminados, são usados hoje para prever o comportamento mecânico de filamentos enrolado sob carga. A integração desses programas permite que o engenheiro de projeto evite muitos ciclos de fabricação/teste de protótipos. (Laval, 2006)

Vasos de alta pressão para armazenamento de hidrogênio usados como tanques de combustível na indústria automotiva são bons exemplos para cálculos de design moderno. Com uma pressão de trabalho de 700 bar, o laminado desses vasos é espesso em relação ao diâmetro. O laminado não pode mais ser considerado uma casca fina. A modelagem sólida é necessária. Os softwares de simulação podem simular essa construção de fibra espessa e exportar todos os dados necessários (geometria da peça, estrutura laminada e sequência de empilhamento em qualquer ponto da peça) para o programa FEA. (Laval, 2006) Desde o início do desenvolvimento desses softwares, o foco principal era a visualização gráfica do processo de enrolamento no computador. No entanto, uma simulação animada real do processo de enrolamento mostrando a máquina realmente enrolando as fibras era muito pesada para o poder dos computadores pessoais naquela época. Isso mudou drasticamente nos últimos anos, em linha com a expansão dos jogos de computador. Atualmente o projetista pode ver os movimentos da máquina e suas dinâmicas, se o alcance de um eixo é excedido, pode verificar se o programa de enrolamento está funcionando sem problemas e se os parâmetros de pós-processamento escolhidos são ótimos para a aplicação. (Laval, 2006)

O pós-processador dos softwares de simulação dos dias atuais permite o uso de robôs industriais para enrolamento de filamentos. Como um produto em série, um robô tem muitas vantagens: tem um preço econômico; serviços de manutenção são facilmente disponíveis; e muitas pessoas já estão acostumadas a lidar com esses robôs. Ao integrar um robô em um ambiente apropriado, o grau de automação pode ser aumentado consideravelmente. Devido ao alto número de graus de liberdade, um robô é altamente flexível. (Laval, 2006) Mas também há desvantagens. O movimento de um robô é o resultado do movimento das diferentes partes do braço robótico. As juntas entre essas partes tornam todo o robô menos rígido e o posicionamento menos preciso. O tamanho e o peso das peças são limitados, o que torna o robô mais adequado para a produção de componentes compactos. (Laval, 2006)

Os polímeros superaram outros materiais devido ao seu peso leve, resistência à corrosão, etc., mas também têm algumas restrições com relação à resistência. O envolvimento de aditivos é crucial para superar isso. Podemos melhorar as propriedades físicas dos polímeros por meio de aditivos. Quando um aditivo (orgânico ou inorgânico) é combinado com um polímero, são produzidos compósitos poliméricos (Leriche *et al.*, 2017). Suas excelentes propriedades, particularmente resistência à corrosão, alta resistência à tração, leveza, alta capacidade de carga, melhores acabamentos de superfície e maior resistência à fadiga, fornecem vantagens significativas em uma variedade de aplicações. Os compósitos poliméricos estão agora sendo modificados como materiais de biocompatibilidade e usados na produção de várias aplicações de implantes biomédicos como ortopédicos, substituição de joelho e quadril, aplicação odontológica, engenharia de tecidos e equipamentos médicos (Biswal *et al.*, 2020). Os compósitos de polímero também são amplamente utilizados nos setores aeroespacial e automobilístico devido à sua natureza leve. Os compósitos de polímero também são empregados em indústrias de embalagens, eletrodomésticos (tanques suspensos, interruptores elétricos, etc.), indústrias de brinquedos e itens de construção (tubos, painéis, armações, etc.). (Sun, 2017; Mansor *et al.*, 2015)

2. MOLDAGEM ROTACIONAL

Os compósitos são processados por meio de várias técnicas de fabricação industrial, cada uma com seus prós e contras. A técnica de moldagem rotacional (RM) pode ser uma técnica de fabricação utilizada no processo de materiais que utilizam compósitos. Os principais benefícios da moldagem rotacional decorrem do fato de que o design da peça é quase ilimitado, com a capacidade de fazer formas complicadas em uma ampla variedade de tamanhos e, além disso, seu custo de produção também é baixo. Nesse processo, também podemos controlar a espessura da peça pela quantidade de material carregado e pela espessura do molde. A RM é particularmente vantajosa do ponto de vista ecológico, com baixas perdas de material e a capacidade de reciclar materiais de produtos desgastados, em comparação com outras técnicas de produção, como moldagem por sopro e extrusão. Embora a RM seja promissora como um método de fabricação para componentes poliméricos, ela é limitada por alguns problemas, incluindo alta energia, longas durações de ciclo, polimento de superfície ruim, uma gama limitada de polímeros adequados e controle de processo desafiador. (Crawford *et al.*, 2004; Ogila *et al.*, 2017)

O processo RM envolve misturar uma resina base com aditivos por meio de mistura seca ou derretida. A mistura seca pode ser realizada misturando a resina base e os aditivos em um misturador de alta velocidade, enquanto a mistura derretida é feita por meio de uma extrusora que derrete e mistura continuamente os materiais. Subsequentemente, um pulverizador é usado para preparar o material para o processo RM. Após medir a quantidade necessária do material, ele é

preenchido em metade de um molde dividido, que é então selado, e rotação biaxial e calor são aplicados simultaneamente. O molde pode ser aquecido de várias maneiras, incluindo transferência de calor por convecção pelo ar, aquecimento a gás, aquecimento por microondas, aquecimento elétrico e aquecimento solar. O movimento rotacional lento do molde elimina a possibilidade de forças centrífugas. Então a resina será derretida e uniformemente coberta dentro do molde rotativo na forma de uma camada de espessura de parede uniforme e densificada. Após a formação desta camada, o molde é resfriado usando um mecanismo de resfriamento, como uma corrente de ar forçada externamente, um jato fino externo de água e um mecanismo de resfriamento interno. No caso de resfriamento externo, o calor flui através da espessura do polímero e então através do molde, resfriando sua superfície externa através do modo de convecção de transferência de calor. Após solidificação, quando a temperatura desejada para desmoldagem é atingida, o produto é desmoldado (Figura 1). (Yadav *et al.*, 2023)

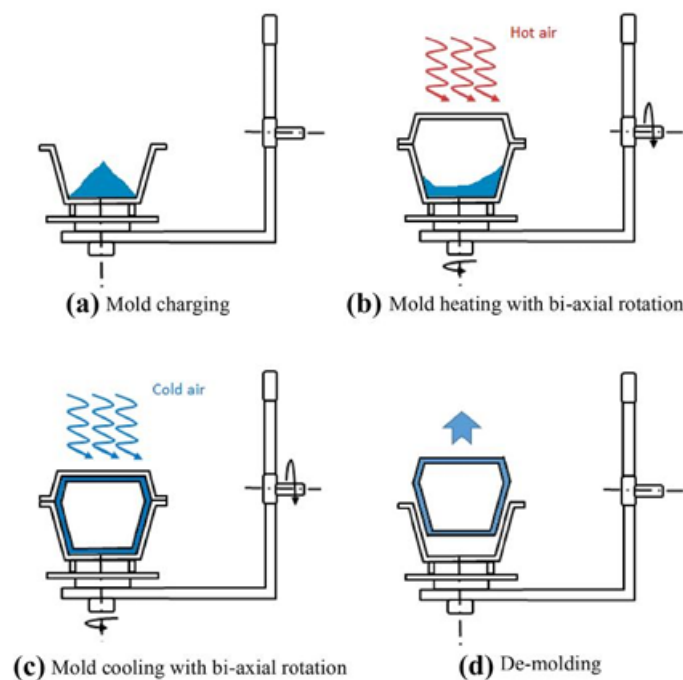


Figura 1: *Processo de moldagem rotacional*

Nas últimas duas décadas, a popularidade do RM aumentou drasticamente nas indústrias de manufatura. A pesquisa e o desenvolvimento do RM da última parte do século XX até o presente resultaram em melhorias significativas no controle de processo, projeto de componentes, materiais e processos de moldagem. O polietileno (PE) é provavelmente o termoplástico mais amplamente utilizado para RM, pois é usado na maioria das aplicações. No entanto, os componentes de RM mais rígidos são a necessidade da indústria impulsionou o desenvolvimento de polietileno de alta densidade (PEAD) e polietileno reticulado (XLPE). Policarbonatos (PC), poliamidas (Nylon, PA), e polipropilenos (PP) foram feitos porque o PE não pode ser usado para algumas tarefas especializadas devido às suas propriedades. No entanto, produzir moldagens de alta qualidade com o perfil de propriedade necessário usando tais termoplásticos é um procedimento de tentativa e erro que consome muito tempo. Houve um número limitado de alternativas desenvolvidas para PE devido ao seu custo e complexidade de processamento. Portanto, há uma necessidade de revisar diferentes materiais e suas propriedades. Foi observado que propriedades mecânicas mais baixas são a principal desvantagem no uso de polietileno para aplicações críticas. Alguns aditivos como fibras e cargas inorgânicas podem ser adicionados para melhorar o acima mencionado. (Yadav *et al.*, 2023)

Existem principalmente duas categorias de plásticos: termoendurecíveis e termoplásticos. A maioria das resinas utilizadas em RM são termoplásticos. Agora, uma variedade de termoplásticos estão disponíveis para RM, como polietileno (polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno linear de média densidade (PELMD), polietileno linear de baixa densidade (PEBDL) e polietileno de baixa densidade (PEBD)), o restante dos materiais são cloreto de polivinila (PVC), ABS, polipropileno (PP), poliéster, poliestireno (PS), policarbonato, epóxis, etc., dos quais aproximadamente 85% são compostos por polietileno. Diferentes parâmetros, como uma ampla janela de processamento, estabilidade térmica, facilmente incorporados com aditivos e assim por diante, tornam o PE adequado para moldagem rotacional. (Yadav *et al.*, 2023)

3. COLAGEM POR ROLO

Na colagem por rolo, os compósitos sanduíche metal-polímero-metal podem ser fabricados usando um agente de cola (adesão indireta) ou sem usar um agente de cola (adesão direta) para colar os laminados (Grujcic, 2018). (Carradò *et al.*,

2010) produziram compósitos sanduíche de aço-polipropileno-aço usando a técnica de colagem por rolo e empregaram um agente de cola entre as camadas compostas. (Harhash *et al.*, 2014) investigaram a conformabilidade de compósitos sanduíche de aço-polímero e descobriram que eles eram muito comparáveis aos monomateriais em termos de economia realizada pela leveza do compósito. Em contraste com a adesão indireta, (Mousa and Kim, 2015) introduziram uma técnica de adesão direta usando um processo de colagem por rolo quente (WRB) para produzir compósitos sanduíche de alumínio-poliuretano-alumínio. Eles investigaram a força de adesão das camadas e descobriram que o mecanismo de ligação dominante era o intertravamento mecânico (Mousa and Kim, 2015).

4. TÉCNICA DE ENROLAMENTO DE FILAMENTO

A tecnologia de enrolamento de filamentos (FW) é uma das práticas de fabricação emergentes com alto grau de excelência e automação que revolucionou a doutrina de armazenamento e transporte de gás. Vários vasos de pressão evoluíram nas últimas décadas, de tanques de metal a reforçados com fibra, principalmente para economia de peso e classificações de alta pressão; vantajosamente, os vasos de pressão compostos (CPVs) Tipo 4 podem afetar a economia de peso dos tanques de gás combustível em 75% em comparação com vasos metálicos. Como resultado, os dutos compostos e a fabricação de CPV por meio da tecnologia FW proliferaram. Embora muitos desafios de design e fabricação estejam associados a vários fatores de processo envolvidos na tecnologia de enrolamento, considerações cuidadosas são necessárias para criar um produto confiável. Portanto, é essencial compreender os vários parâmetros de processo, seus efeitos combinados e os desafios associados ao projetar e fabricar estruturas de enrolamento de filamentos. (Azeem *et al.*, 2022)

Neste método, os fios/filamentos de fibra são enrolados continuamente em uma forma de suporte ou mandril. Este método pode criar itens geralmente na forma de cilindros e tubos, por exemplo, recipientes de alta pressão, caixas de motores de foguetes, tubos de lançamento, varas de pesca e hastes de tacos de golfe (Ramaswamy and Ramesh Babu, 2021). FW é um método barato e automatizado para posicionar fibras em um padrão preciso que se adapta ao caminho do estresse, permitindo o uso eficiente de fibras de alta resistência para maior eficiência estrutural (Ellul *et al.*, 2016). Além disso, a produção em massa pode reduzir ainda mais o custo (Li *et al.*, 2021).

A Fig. 2 mostra o diagrama esquemático do método FW. Um mandril rotativo estacionário é usado no processo FW, enquanto um braço de carro se move horizontalmente com o mandril. O braço contém um olhal de pagamento de enrolamento, que agrupa e distribui fibras pré-impregnadas chamadas rovings; os rovings são geralmente de carbono, Kevlar™, fibra de vidro ou um híbrido (Gemi *et al.*, 2019). À medida que o mandril gira, os rovings o envolvem para formar um enrolamento composto sobre a superfície do mandril. A direção exata do enrolamento composto é determinada pela taxa de carro e pela velocidade de rotação do mandril. As fibras são impregnadas na resina antes de envolverem o mandril e depois se solidificam com a fibra. Após o término do sobreenvoltório da fibra, todo o conjunto, mandril mais camadas sobreenvoltórias compostas, é colocado no forno para ser aquecido nas temperaturas necessárias para a cura. O mandril é removido quando a resina composta está completamente curada (Rajak *et al.*, 2019), deixando a estrutura composta oca. No entanto, a otimização do tipo de resina, tipo de fibra, tensão da fibra, espessura do enrolamento, ângulo do enrolamento e velocidade, etc., é necessária para adequar a qualidade final necessária do produto.

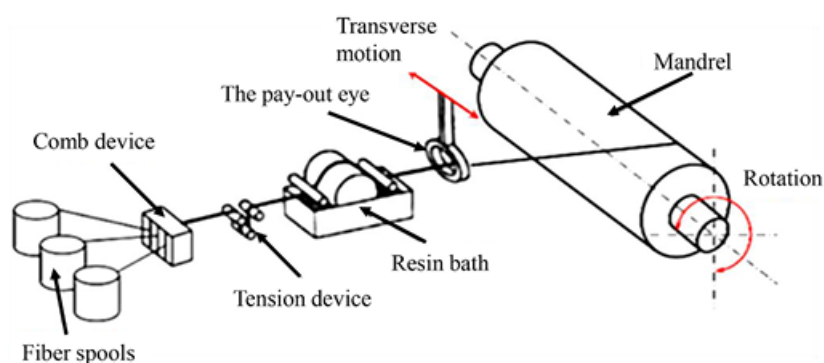


Figura 2: Esquema do processo de enrolamento de filamentos para tubos compostos (Ma *et al.*, 2019).

O conceito de FW foi introduzido na década de 1940. Em 1945, a Bassons Industries fabricou aros de plástico reforçado e leve no torno para o projeto nuclear de Manhattan (durante a Segunda Guerra Mundial). Em 1947, foi projetada uma máquina de enrolamento com um mandril de madeira para o US Navy Bureau of Ordnance (Iroegbu and Ray, 2022). A primeira produção da caixa do motor de foguete (para aplicações espaciais) por meio de FW foi registrada, o que estabeleceu o início das máquinas de enrolamento. A versão básica de 2 eixos foi produzida até a década de 1950 (Purnomo *et al.*, 2023).

5. PROCESSO DE ENROLAMENTO APLICADO A VASOS DE PRESSÃO

Os revestimentos de vasos de pressão do tipo III são fabricados por meio de cascas cilíndricas de repuxo profundo a partir de placas circulares de alumínio. As placas são colocadas sobre uma matriz de formação com diâmetro maior que o do vaso desejado. Um aríete cilíndrico força o alumínio para dentro da matriz, formando um recipiente que é fechado em uma extremidade. O processo é repetido usando matrizes menores até que o diâmetro correto seja alcançado. A extremidade aberta do cilindro é então fechada em um domo usando técnicas de fiação de metal. Uma ferramenta é usada para formar o contorno do pescoço enquanto o revestimento gira em alta velocidade.

O equipamento tradicional de enrolamento de filamentos é composto por três partes principais: a cesta, o impregnador e o cabeçote de enrolamento. Uma disposição esquemática do equipamento de enrolamento de filamentos é mostrada na Figura 3.

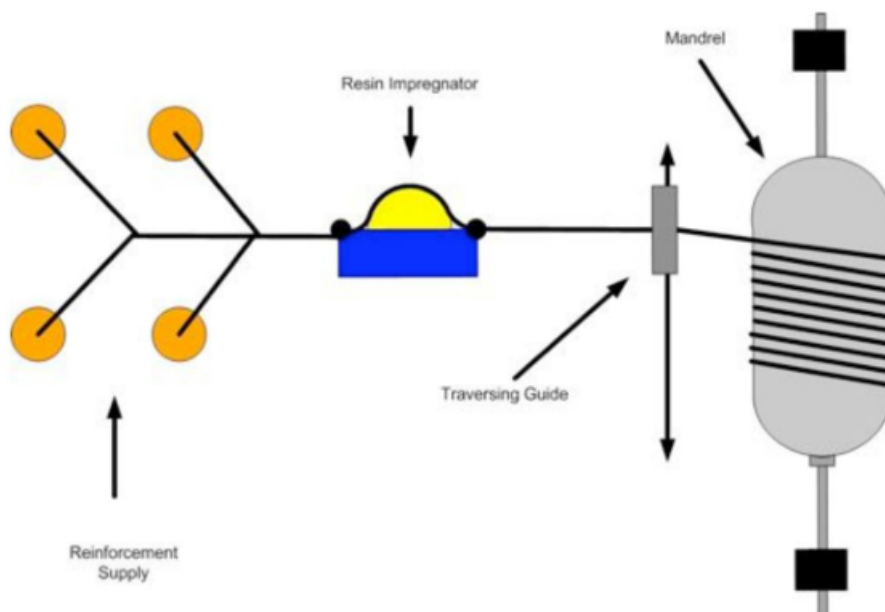


Figura 3: Diagrama da configuração do enrolamento do filamento.

Apesar dos benefícios do enrolamento de filamentos, incluindo a qualidade da peça acabada e a flexibilidade do processo, o tempo de fabricação de um vaso de pressão composto costuma ser alto devido ao tempo gasto na formação das camadas helicoidais. Ao enrolar o reforço de aro, as taxas de deposição do enrolamento do filamento são altas devido às altas velocidades de rotação do mandril utilizado. Para obter os ângulos de reforço helicoidal de baixo ângulo e fornecer cobertura adequada nas seções do domo, a velocidade de rotação do mandril deve ser reduzida. Para obter a espessura helicoidal adequada, são necessários muitos circuitos com o olhal-guia percorrendo o comprimento da garrafa a cada rotação do revestimento. Para um vaso de pressão de um litro, são necessários 70 circuitos helicoidais para proporcionar o reforço adequado, o que resulta em um tempo de fabricação de 30 minutos. Vasos de combustível alternativo maiores podem levar até 12 horas para serem produzidos devido ao tamanho do vaso e à quantidade de reforço necessária. O baixo rendimento também é agravado pelo fato de que menos recipientes grandes podem ser enrolados simultaneamente.

Existem tecnologias alternativas que podem melhorar a velocidade de fabricação do COPV. Essas tecnologias incluem o enrolamento robótico e a trança. Ambas as técnicas têm vantagens e desvantagens em relação às técnicas de enrolamento de filamentos usadas atualmente na fabricação de cilindros de gás.

O enrolamento robótico pode ser usado na colocação de fibras de reforço nas superfícies de formas complexas de mandril. O processo envolve a manipulação do mandril, do cabeçote de enrolamento ou de ambos para colocar o material de reboque na orientação adequada. Há três classificações do método de enrolamento que são possíveis com o equipamento de enrolamento robótico. São elas: enrolamento convencional, enrolamento de mandril estacionário e enrolamento de cabeçote de vento estacionário (Minsch *et al.*, 2017). Esses processos oferecem um alto grau de controle sobre a trajetória dos caminhos de reboque. Isso é vantajoso quando é necessário o enrolamento de formas complexas.

O enrolamento convencional é essencialmente o mesmo processo realizado pelas máquinas de enrolamento de filamentos CNC. O mandril é girado enquanto um braço robótico manipula o material fibroso para produzir um composto enrolado com cabos ao longo de caminhos geodésicos. Nesses processos, o robô controla vários cabeçotes-guia, permitindo o enrolamento simultâneo de vários recipientes. O uso de robôs para enrolar mandris de maneira convencional tem a vantagem de um maior potencial de automação. Depois de enrolar um primeiro conjunto de recipientes com reforço de carbono, os cabeçotes de enrolamento podem se mover para um segundo conjunto de fusos, enquanto um segundo robô pode enrolar a camada protetora nos cilindros enrolados anteriormente. No enrolamento de mandril estacionário, os cabos

são guiados ao redor do mandril e colocados na ferramenta na orientação desejada. Os processos de mandril estacionário podem ser divididos em duas técnicas: enrolamento de roda sem centro e colocação de braço robótico.

A Figura 4 mostra um diagrama esquemático do equipamento de enrolamento robótico, conforme descrito por Carrino (Carrino *et al.*, 2004), e mostra um braço robótico e um mandril. Uma alimentação contínua de reboque é fornecida ao efetuador final do robô. O cabeçote pode então ser girado em torno do mandril para fornecer reforço na orientação correta. Na manifestação de Carrino, os cabos ou fitas de reforço são mantidos na extremidade do braço robótico. A tensão de funcionamento do reforço é controlada de perto. Tensões mais altas resultam em forças de compactação mais altas e, portanto, em frações de volume de fibra maiores.



Figura 4: Esquema do braço robótico usado no Enrolamento Robotizado (Carrino et al., 2004)

Há literatura existente sobre o uso de rodas sem centro como método de enrolamento de mandris que são mantidos estacionários, enquanto o reboque ou a fita de alimentação giram em torno do mandril. Isso, por si só, não é um conceito novo. O enrolamento toroidal, usado para produzir componentes elétricos, é realizado com máquinas comerciais há mais de 50 anos, sendo que a patente mais antiga data de 1956 (Frederick, 1956). A Figura 5 mostra uma configuração típica de bobinador toroidal. Os cabos são enrolados em torno de um mandril em forma de toróide por um anel de enrolamento que pode ser desmontado. Tecnologias semelhantes de rodas sem centro estão começando a ser examinadas como possíveis processos de fabricação de compósitos(Allen *et al.*, 2006).

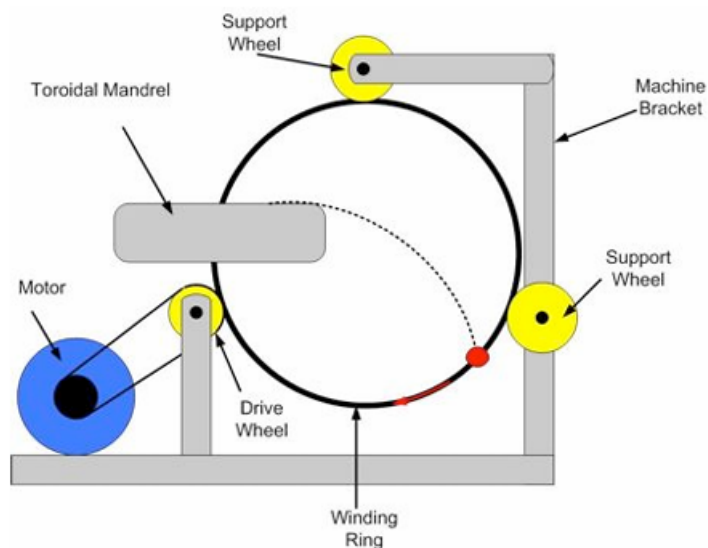


Figura 5: Diagrama de um bobinador toroidal(Allen et al., 2006)

Uma terceira manifestação de posicionamento de fibra emprega um distribuição de fibra estacionária. Um braço robótico é então empregado para manipular um mandril. Ao fazer isso, os fios de reforço são retirados do pagamento de fibras e enrolados no mandril. A Figura ?? mostra um diagrama esquemático de uma configuração típica de guia estacionária. O mandril é conectado a um braço robótico que é capaz de manipular o artigo conforme descrito no diagrama. Os fios são retirados de uma gaiola e passados por uma guia estacionária para produzir uma faixa de material. Os fios são continuamente puxados da gaiola apenas pelo movimento do mandril.

6. CONCLUSÃO

A tecnologia de enrolamento de filamentos permitirá uma produção mais precisa e rápida, reduzindo custos e melhorando a qualidade por meio da integração de automação e robótica. Aumentar a conscientização ambiental incentivará o uso de materiais recicláveis e promoverá o uso de termoplásticos nesse processo. Além disso, essa tecnologia oferecerá flexibilidade significativa e oportunidades de inovação para a produção de peças complexas e personalizadas em indústrias como a automotiva e aeroespacial. Além disso, a produção em pequena escala que é difícil ou custosa com métodos tradicionais se tornará mais acessível com o processo de enrolamento de filamentos.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro das agências brasileiras: CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)). Os autores também gostariam de agradecer ao Programa de Educação Tutorial (PET/Engenharia Mecânica da UNIFEI).

8. REFERÊNCIAS

- Allen, A., Andersen, J. and Carter, P., 2006. "The new lotus filament-winding method for composite fabrication".
- Azeem, M., Ya, H., Kumar, M., Stabla, P., Smolnicki, M., Gemi, L., Khan, M., Ahmed, T., Ma, Q., Sadique, R., Mokhtar, A., Mustapha, M. and Alam, M., 2022. "Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: A review". *The Journal of Energy Storage*, Vol. 49, p. 103468. doi:10.1016/j.est.2021.103468.
- Biswal, T., Badjena, S.K. and Pradhan, D., 2020. "Synthesis of polymer composite materials and their biomedical applications". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 30. doi:10.1016/j.matpr.2020.01.567.
- Carradó, A., Sokolova, O., Ziegmann, G. and Palkowski, H., 2010. "Press joining rolling process for hybrid systems". *Key Engineering Materials*, Vol. 425, p. 271 – 281. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.425.271. Cited by: 18.
- Carrino, L., Polini, W. and Sorrentino, L., 2004. "Method to evaluate winding trajectories in robotized filament winding". *Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER*, Vol. 38, pp. 41–56. doi:10.1177/0021998304038177.
- Crawford, R., Spence, A., Cramez, M. and Oliveira, M., 2004. "Mould pressure control in rotational moulding". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, pp. 1683–1693. doi:10.1177/095440540421801204.
- Ellul, B., Camilleri, D., Grech, J. and Muscat, M., 2016. "Filament wound composite pressure vessels and pipes subject to an internal pressure - an experimental and material characterization study". *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 138, pp. 060906–1,8. doi:10.1115/1.4032506.
- Frederick, A., 1956. *Toroidal Coil Winder*. U.S. Patent Office, United States.
- Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U. and Soylu Gemi, D., 2019. "An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of gfrp composite pipes and damage formation". *Composites Part B Engineering*, Vol. 172, pp. 186–194. doi:10.1016/j.compositesb.2019.05.023.
- Grujicic, M., 2018. "Injection overmolding of polymer–metal hybrid structures". *Joining of Polymer-Metal Hybrid Structures: Principles and Applications*, pp. 277–305.
- Harhash, M., Sokolova, O., Carradó, A. and Palkowski, H., 2014. "Mechanical properties and forming behaviour of laminated steel/polymer sandwich systems with local inlays – part 1". *Composite Structures*, Vol. 118, pp. 112–120. ISSN 0263-8223. doi:https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.07.011. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822314003316>.
- Iroegbu, A.O.C. and Ray, S.S., 2022. "Recent developments and future perspectives of biorenewable nanocomposites for advanced applications". *Nanotechnology Reviews*, Vol. 11, No. 1, pp. 1696–1721. doi:doi:10.1515/ntrev-2022-0105. URL <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0105>.
- Laval, C., 2006. "Cadwind 2006 – 20 years of filament winding experience". *Reinforced Plastics*, Vol. 50, No. 2, pp. 34–37. ISSN 0034-3617. doi:https://doi.org/10.1016/S0034-3617(06)70913-4. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034361706709134>.
- Leriche, A., Drouet, C., Hampshire, S., Stamboulis, A., Iafisco, M., Tampieri, A. and Kashani, M., 2017. *Types of ceramics : material class*.
- Li, H., Sueda, S. and Keyser, J., 2021. "Computation of filament winding paths with concavities and friction". *Computer-Aided Design*, Vol. 141, p. 103089. doi:10.1016/j.cad.2021.103089.
- Ma, Q., Rejab, R., Zhang, B., Merzuki, M. and Manoj Kumar, N., 2019. "Wireless technology applied in 3-axis filament winding machine control system using mit app inventor". Vol. 469. doi:10.1088/1757-899X/469/1/012030.
- Mansor, M.R., Sapuan, S., Zainudin, E.S., A.A., N. and Ariff, H., 2015. "Life cycle assessment of natural fiber polymer composites". *Agricultural Biomass Based Potential Materials*, pp. 121–141. doi:10.1007/978-3-319-13847-3_6.
- Minsch, N., Herrmann, F., Gereke, T., Nocke, A. and Cherif, C., 2017. "Analysis of filament winding processes and potential equipment technologies". *Procedia CIRP*, Vol. 66, pp. 125–130. doi:10.1016/j.procir.2017.03.284.
- Mousa, S. and Kim, G.Y., 2015. "Experimental study on warm roll bonding of metal/polymer/metal multilayer composites". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 222, pp. 84–90. ISSN 0924-0136. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.040. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401361500093X>.

- Ogila, K., Shao, M., Yang, W. and Tan, J., 2017. "Rotational molding: A review of the models and materials". *Express Polymer Letters*, Vol. 11, pp. 778–798. doi:10.3144/expresspolymlett.2017.75.
- Purnomo, H., Soemardi, T., Budiono, H., Wibowo, H. and Ibadi, M., 2023. "The filament winding method's finishing process impact on high-fidelity specimens: homogeneity of density, fiber volume fraction, outer surface roughness and tensile strength". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, pp. 43–51. doi:10.15587/1729-4061.2023.288025.
- Rajak, D., Pagar, D., Kumar, R. and Pruncu, C., 2019. "Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8. doi:10.1016/j.jmrt.2019.09.068.
- Ramaswamy, K. and Ramesh Babu, P., 2021. "Fracture analysis of composite pressure vessel using fem". *International Journal of Computational Materials Science and Engineering*, Vol. 10, No. 01, p. 2150003. doi:10.1142/S2047684121500032. URL <https://doi.org/10.1142/S2047684121500032>.
- Sun, Z., 2017. "Progress in the research and applications of natural fiber-reinforced polymer matrix composites". *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol. 25. doi:10.1515/secm-2016-0072.
- Yadav, J., Pl, R. and Parwani, A., 2023. "A comprehensive review to evaluate the consequences of material, additives, and parameterization in rotational molding". *Journal of Polymer Research*, Vol. 30. doi:10.1007/s10965-023-03591-z.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MANUFACTURING PROCESSES FOR GREEN HYDROGEN STORAGE CYLINDERS: EXAMPLES AND DESIGN APPLICATIONS FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING

Marcos Lazaro Batista, marcoslazarob@gmail.com¹
LucasAntonio de Oliveira, lucasoliveira2@unifei.edu.br²
Matheus Francisco, matheus_brendon@unifei.edu.br¹
Yohan Ali Diaz Méndez, yohan.g8@unifei.edu.br¹
Sebastião Simoes Cunha Jr, sebas@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajuba, Avenida BPS, 1303, Pinheirinho, Itajuba-MG

²Universidade Federal de Itajubá -Campus Itabira, rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira-MG)

Abstract: *This study will explore the optimization of manufacturing processes for green hydrogen cylinders, with an emphasis on examples and applications of projects aimed at sustainable manufacturing. Green hydrogen, produced from renewable sources, is a promising alternative to support a low-carbon economy. However, the effectiveness of this energy solution depends heavily on the efficiency and sustainability of the cylinders used for storage and transportation. Through a comprehensive literature review, the study will examine current techniques and innovations in the manufacturing of cylinders for green hydrogen storage, identifying opportunities for improvement and innovation. The review seeks to carry out a detailed analysis of the materials used, the production processes, the challenges associated with the safety and durability of the cylinders, the latest technological innovations that impact the manufacturing of these cylinders, in addition to manufacturing projects that aim to optimize the processes. Emerging technologies, such as the use of advanced composites and more efficient production techniques, will be analyzed to understand how they can contribute to reducing costs and increasing efficiency. Issues related to recycling and the environmental impact of the materials used will be addressed. Furthermore, the study will offer practical suggestions for the implementation of these manufacturing projects, based on literature reviews. The study will adopt integrated approaches that involve improvements in manufacturing processes, investments in research and development, and collaboration between industries and research centers. The objective is to provide a critical and updated view that not only identifies gaps and opportunities in the field, but also offers concrete directions for the implementation of more efficient and sustainable projects in the manufacturing of green hydrogen cylinders. Thus, this work will contribute to the advancement of technology and the promotion of a more sustainable economy, by offering a detailed analysis and practical recommendations for the optimization of green hydrogen cylinder manufacturing projects.*

Keywords: *Manufacture of pressure vessels, hydrogen cylinders, filament winding*

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.