RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VI, v.1 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 10/11/2025 | publicação: 13/11/2025

Controle dinâmico de impregnação no processo de filament winding: impactos na eficiência estrutural e na gestão da manufatura avançada

Dynamic impregnation control in the filament winding process: impacts on structural efficiency and advanced manufacturing management

Control dinámico de impregnación en el proceso de filament winding: impactos en la eficiencia estructural y en la gestión de la manufactura avanzada

Lucas Emanuel Soeira
Doutor em Ciências (Engenharia Mecânica) pela Universidade de São Paulo (USP);
Mestre em Engenharia Mecânica (USP); Engenheiro Mecânico (UNESP).

RESUMO

O presente artigo examina os fundamentos acadêmicos e técnicos do controle de processos mecânicos aplicados à manufatura de polímeros reforçados. Focado no método de *Filament Winding*, o estudo explora a literatura científica sobre a impregnação fluídica de reforços fibrosos e analisa as limitações dos sistemas passivos de umectação. A pesquisa correlaciona a homogeneidade da matriz termofixa com a estabilização das propriedades mecânicas do compósito, evidenciando que a intervenção física na arquitetura da fibra reduz os defeitos de porosidade. Argumenta-se que o domínio rigoroso das variáveis termodinâmicas e mecânicas no chão de fábrica é o alicerce da confiabilidade em setores de alta exigência estrutural.

Palavras-chave: *Filament Winding*; Materiais Compósitos; Mecânica dos Fluidos; Cinética de Cura; ASTM D2290.

ABSTRACT

This article examines the academic and technical foundations of mechanical process control applied to the manufacture of reinforced polymers. Focused on the Filament Winding method, the study examines the scientific literature on the fluid impregnation of fibrous reinforcements and analyzes the limitations of passive wetting systems. The research correlates the homogeneity of the thermoset matrix with the stabilization of the composite's mechanical properties, highlighting how physical intervention in the fiber architecture reduces porosity defects. It is argued that the rigorous control of thermodynamic and mechanical variables on the shop floor is the foundation for reliability in highly demanding structural sectors.

Keywords: Filament Winding; Composite Materials; Fluid Mechanics; Cure Kinetics; ASTM D2290.

1. INTRODUÇÃO

A busca por eficiência estrutural na engenharia contemporânea tem impulsionado o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias de conformação que alinham o rigor da mecânica dos sólidos aos imperativos técnicos da manufatura avançada. No âmbito dos materiais compósitos de matriz polimérica, a substituição de ligas metálicas por estruturas de alto desempenho consolidou-se como padrão para indústrias que demandam uma elevada relação resistência/peso. Setores de infraestrutura energética, transporte aeroespacial e defesa dependem criticamente dessas características anisotrópicas. A aplicação prática e segura dessas estruturas, contudo, esbarra na necessidade absoluta de garantir uma repetibilidade industrial

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.1 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 10/11/2025 | publicação: 13/11/2025

perfeita ao longo do ciclo de fabricação contínuo.

O processo de *Filament Winding*, caracterizado pela deposição tridimensional de mechas de fibras tensionadas sobre um mandril rotativo, ilustra perfeitamente o desafio dessa otimização mecânica. Historicamente, a impregnação da resina termofixa no interior do feixe de filamentos (*tow*) baseou-se em arranjos de roletes cilíndricos e em banhos de imersão passivos. A literatura aponta que estes métodos são severamente limitados para assegurar a saturação capilar total,dependendo quase exclusivamente da baixa viscosidade inicial da resina. O aprisionamento de ar e a formação de zonas ricas em resina (*resin-rich areas*) constituem defeitos microscópicos crônicos que afetam a distribuição das tensões interfaciais na peça consolidada.

Essas descontinuidades volumétricas precipitam a delaminação sob baixas cargas, reduzindo a vida útil do componente sob regimes de fadiga e inviabilizando sua certificação em ambientes de alta criticidade, como tubulações de alta pressão offshore. Para superar essa barreira imposta pela física dos fluidos, a engenharia de pesquisa acadêmica tem se concentrado no desenvolvimento de intervenções ativas na linha de deposição. A busca concentra-se em mecanismos que atuem diretamente na geometria do material antes do contato com o molde, alterando o estado físico do feixe para otimizar a permeabilidade transversal.

O estudo das variáveis envolvidas na umectação de fibras contínuas exige uma abordagem multidisciplinar que engloba termodinâmica, cinemática e resistência dos materiais. O controle preciso da viscosidade da resina e da tensão de enrolamento determina o grau de consolidação do laminado ortotrópico. Este artigo tem como objetivo revisar a formulação conceitual da impregnação dinâmica, detalhar a interação térmica durante a cura e situar as tecnologias de alteração física da fibra como um vetor fundamental para o aprimoramento de vasos de pressão industriais.

2. REVISÃO TEÓRICA: O COMPORTAMENTO FLUÍDICO E A MECÂNICA CAPILAR

A dinâmica de fabricação de cilindros tubulares por *Filament Winding* obedece a leis estritas relacionadas à reologia da resina e à tensão mecânica aplicada aos milhares de filamentos individuais de vidro, aramida ou carbono. Quando um feixe cilíndrico de reforço cruza um banho umectante, a tensão superficial do fluido tende a envolver o perímetro externo do cordão. Essa dinâmica cria uma barreira pelicular que frequentemente deixa o núcleo dos filamentos

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.1 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 10/11/2025 | publicação: 13/11/2025

internos completamente seco, prejudicando a fração volumétrica final da matriz. A compreensão da lei de Darcy aplicada a meios porosos é indispensável para diagnosticar a resistência ao fluxo radial e para propor intervenções que garantam a capilaridade.

Sob a ótica da micromecânica dos compósitos, a presença de espaços vazios (Vv) altera drasticamente a matriz de rigidez do material, na qual a soma das frações volumétricas de fibra (Vf), matriz (Vm) e vazios deve totalizar 1 (Vf + Vm + Vv = 1). A teoria clássica dos laminados estabelece que a capacidade de transferir carga elástica entre as fibras de alta resistência depende inteiramente da integridade do cisalhamento fornecido pela matriz polimérica circundante. Quando o processo produtivo falha em minimizar Vv , a resistência ao cisalhamento interlaminar (*Interlaminar Shear Strength* - ILSS) sofre decréscimos que podem ultrapassar 30%, invalidando os cálculos de projeto originais.

A otimização desses parâmetros ilustra a transição de uma produção balizada por tolerâncias empíricas amplas para uma manufatura orientada à precisão científica. A implementação de sistemas de controle numérico computadorizado (CNC) sincronizados com o tensionamento ativo reflete a maturação da engenharia de processos em materiais avançados.Inovações nos sistemas de guiamento e de impregnação surgem como respostas acadêmicas e industriais à necessidade de garantir que o objeto físico manufaturado seja uma réplica isenta de microdefeitos do modelo matemático avaliado.

Estudos recentes demonstram que a estabilização das propriedades físico-químicas da matriz se reflete ao longo de toda a cadeia de avaliação do ciclo de vida do componente. Reduzir a porosidade interna não apenas maximiza a resistência à fadiga termomecânica, como também estabiliza as propriedades dielétricas e a resistência à degradação química em ambientes severos. Tal uniformidade microscópica constitui o alicerce irredutível para a previsibilidade atuarial exigida em processos normativos voltados a aplicações contínuas de longo prazo em infraestruturas vitais.

3. METODOLOGIA DE INTERVENÇÃO FÍSICA: O REMODELAMENTO DE FIBRAS

A literatura técnica sobre o pré-processamento físico da matéria-prima aponta métodos de alteração geométrica do feixe de fibras como a solução mecânica primária para os bloqueios fluídicos intrínsecos ao banho de resina. O princípio mecânico dessa intervenção consiste na aplicação de restrições de formato ao trajeto do fio tracionado. Ao forçar a transição de uma

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.1 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 10/11/2025 | publicação: 13/11/2025

seção transversal aglomerada e cilíndrica para o formato de uma fita achatada e paralela, a engenharia de processos multiplica a área superficial de contato.

Essa expansão dimensional maximiza a exposição da fibra à resina imediatamente antes da etapa de consolidação sobre o mandril, rompendo a tensão superficial que isolava o núcleo do feixe. O resultado termodinâmico e fluídico dessa aplicação metodológica é a saturação acelerada pela ação capilar otimizada, que extingue a formação de *dry spots* (pontos secos). Ao garantir a molhabilidade integral de cada filamento isolado, assegura-se que a adesão interfacial química ocorra em sua plenitude teórica.

A aplicação de métodos mecânicos dessa natureza impacta diretamente a estatística de confiabilidade da produção em larga escala. Em termos práticos de avaliação estrutural, a supressão de defeitos elementares reflete-se na redução do desvio padrão nos ensaios mecânicos, diminuindo a dispersão dos dados de resistência última. A previsibilidade do limite de falha em testes de laboratório aumenta exponencialmente, alinhando a resposta da amostra física aos rigorosos modelos de mecânica da fratura previamente traçados no ambiente computacional.

Além dos ganhos estruturais, a sistematização de mecanismos de controle da arquitetura da fibra viabiliza uma operação muito mais estável frente a oscilações climáticas no ambiente de manufatura. Ao reduzir a dependência exclusiva de fatores como a temperatura ambiente e a viscosidade momentânea da resina, o sistema de deposição torna-se mais robusto. Ele passa a suportar leves variações nas propriedades do lote do polímero sem sacrificar a integridade de impregnação do tubo fabricado, protegendo a linha de produção contra altos índices de rejeição e refugo.

4. VARIÁVEIS TERMODINÂMICAS E CINÉTICA DE CURA DA MATRIZ POLIMÉRICA

A estabilidade estrutural de uma peça fabricada por meio de Filament Winding não se limita à etapa geométrica da deposição; é indissociável da fase térmica de reticulação da matriz termofixa. A resina epóxi ou poliéster, submetida ao processo de cura, sofre uma reação exotérmica violenta. Durante o ciclo de aquecimento em estufa, a viscosidade da resina despenca exponencialmente antes de atingir o ponto de gelificação (*gel point*). Uma impregnação irregular gera gradientes térmicos catastróficos no interior da parede do compósito, em que as zonas ricas em resina acumulam calor, enquanto as áreas secas atuam

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.1 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 10/11/2025 | publicação: 13/11/2025

como isolantes térmicos indesejados.

A homogeneidade da fração volumétrica (Vf), garantida pelo pré-processamento e pelo remodelamento mecânico do feixe de fibras, atua como um estabilizador termodinâmico global da estrutura. A fibra de vidro ou de carbono conduz o calor gerado pela reação exotérmica de forma uniforme ao longo do laminado. Quando a impregnação é perfeita, não ocorrem picos de temperatura isolados (pontos quentes) que levariam à degradação térmica localizada do polímero ou ao surgimento de tensões residuais agudas no momento do resfriamento pós-cura. O controle sobre o grau de conversão da resina (cinética de cura) dita as propriedades finais de transição vítrea (Tg) do compósito estrutural. Peças espessas, características de vasos de pressão destinados ao armazenamento de hidrogênio ou de gás natural, são particularmente sensíveis a esse fenômeno. Se a cura térmica ocorrer de forma assimétrica devido à má distribuição da matriz, o cilindro desenvolverá empenamentos e microfissuras interfaciais antes mesmo de ser retirado do mandril e submetido à sua primeira carga de trabalho hidrostática.

Portanto, o refinamento da etapa mecânica de umectação tem impacto profundo e preventivo na termodinâmica da peça. Ao garantir que cada fibra esteja perfeitamente envelopada por uma camada micrométrica e constante de polímero,o engenheiro de processos assegura que as equações de transferência de calor transiente aplicadas no projeto atuam de forma simétrica em toda a espessura da casca cilíndrica. Isso extingue a geração de defeitos induzidos por choque térmico interno e consolida a integridade física do equipamento.

5. IMPACTOS NORMATIVOS E ENSAIOS PADRONIZADOS DE AVALIAÇÃO

Para que a manufatura de compósitos seja incorporada a projetos de infraestrutura de alto risco, operados por órgãos estatais ou multinacionais, as inovações no controle de impregnação devem ser validadas em conformidade com um rigoroso arcabouço normativo. O impacto de uma distribuição uniforme de resina é comprovado empiricamente por meio da aplicação das normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). O ensaio ASTM D2290 (*Apparent Tensile Strength of Ring or Tubular Plastics by Split Disk Method*), popularmente conhecido como teste *NOL Ring*, é a métrica padrão para atestar a resistência circunferencial contínua da peça enrolada.

Corpos de prova extraídos de tubulações com alto índice de porosidade, devido à má impregnação, falham prematuramente no ensaio do disco bipartido (NOL Ring), exibindo falhas de cisalhamento interlaminar muito antes de a resistência trativa máxima das fibras ser

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.1 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 10/11/2025 | publicação: 13/11/2025

atingida. A aplicação de dispositivos de espalhamento e remodelamento do feixe eleva sensivelmente os valores de tensão de ruptura neste ensaio, atestando, em relatório laboratorial, a eficácia da técnica de fabricação avançada e validando o componente perante auditores técnicos.

Simultaneamente, a qualificação química do lote de produção depende de metodologias como a ASTM D2584 (*Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*), que determina a fração volumétrica exata de fibra (Vf) ao calcinar a matriz polimérica em mufla a alta temperatura. Um processo de *Filament Winding* bem governado exibe não apenas uma alta porcentagem de fibra (frequentemente superior a 65% em volume), mas, principalmente, uma variância insignificante desse percentual entre diferentes amostras retiradas do mesmo tubo, comprovando a estabilidade do banho de resina e do tensionamento.

A tradução dessa conformidade para a gestão da manufatura avançada consiste na obtenção da certificação de qualidade sem ressalvas. Quando os laudos atestam a ausência de vazios (Vv < 2%) e a altíssima resistência à tração aparente, a empresa fabricante está apta a concorrer a licitações rigorosas nos setores de defesa naval e de extração petrolífera em águas profundas. A submissão aos ensaios padronizados deixa de ser um gargalo de reprovação e transforma-se em um mecanismo de comprovação incontestável do domínio tecnológico da engenharia sobre a matéria.

CONCLUSÃO

A revisão aprofundada dos mecanismos mecânicos e termodinâmicos envolvidos na impregnação de materiais compósitos estabelece que a regulação rigorosa da arquitetura primária da fibra é o fator primordial para elevar a segurança elástica. Ao reconfigurar o feixe de reforço por meio de restrições geométricas, a mecânica de precisão oferece uma resposta definitiva para a erradicação de descontinuidades crônicas e a estabilização térmica durante a cura da resina,elevando sistematicamente a matriz de qualidade dos cilindros submetidos a altas pressões.

No espectro do design estrutural assistido por computador, a garantia física de uma fração volumétrica isenta de gradientes de porosidade transforma a prática analítica. Engenheiros calculistas adquirem embasamento real para reduzir coeficientes de segurança excessivamente conservadores na fase de projeto, com base na certeza de que a anisotropia modelada não será comprometida por defeitos ocultos do chão de fábrica. Essa sinergia entre fabricação controlada

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.1 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 10/11/2025 | publicação: 13/11/2025

e simulação viabiliza a concepção de infraestruturas substancialmente mais leves, econômicas e eficientes.

Ademais, a otimização fluídica e mecânica corrobora as diretrizes essenciais da manufatura sustentável no século XXI. A absorção estritamente necessária do volume de resina, imposta pela capilaridade bem estruturada, evita o gotejamento crônico e o descarte em massa de polímeros termofixos excedentes. A mitigação do uso desnecessário de resinas derivadas do petróleo alinha o processo de Filament Winding aos objetivos macroeconômicos e ambientais globais de redução de passivos industriais tóxicos.

Em síntese, o avanço conceitual e aplicado nas técnicas de umectação consolida um pilar de inovação tangível. O aprofundamento científico interdisciplinar — englobando a lei de Darcy para fluidos, a cinética térmica das reações poliméricas e as exigências normativas da ASTM — atesta a maturidade do setor de compósitos estruturais. Compreender e intervir no trajeto do fluido em escala micrométrica mostrou-se o caminho inegociável para garantir a estabilidade e a segurança macroscópicas em componentes que sustentam operações críticas globais.

REFERÊNCIAS

MALLICK, P. K. **Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

PETERS, S. T. **Composite Filament Winding**. Materials Park: ASM International, 2011.

ASTM D2290-19. **Standard Test Method for Apparent Tensile Strength of Ring or Tubular Plastics and Reinforced Plastics by Split Disk Method**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM D2584-18. **Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.