Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VI, vol. 1 2025 | Envío: 07/11/2025 | Aceptado: 10/11/2025 | Publicación: 13/11/2025

Control dinámico de la impregnación en el proceso de bobinado de filamentos: repercusiones en la eficiencia estructural y la gestión avanzada de la fabricación.

Control dinámico de la impregnación en el proceso de bobinado de filamentos: impactos en la eficiencia estructural y la gestión avanzada de la fabricación.
Control dinámico de la impregnación en el proceso de bobinado de filamentos: impactos en la eficiencia estructural y la gestión avanzada de la fabricación.

Lucas Emanuel Soeira es

doctor en Ciencias (Ingeniería Mecánica) por la Universidad de São Paulo (USP); posee una maestría en Ingeniería Mecánica (USP); y una licenciatura en Ingeniería Mecánica (UNESP).

RESUMEN

Este artículo examina los fundamentos académicos y técnicos del control de procesos mecánicos aplicado a la fabricación de polímeros reforzados. Centrándose en el método de bobinado de filamentos, el estudio explora la literatura científica sobre la impregnación fluida de refuerzos fibrosos y analiza las limitaciones de los sistemas de humectación pasiva. La investigación relaciona la homogeneidad de la matriz termoestable con la estabilización de las propiedades mecánicas del compuesto, demostrando que la intervención física en la arquitectura de la fibra reduce los defectos de porosidad. Se argumenta que el control riguroso de las variables termodinámicas y mecánicas en la planta de producción es fundamental para la fiabilidad en sectores con altas exigencias estructurales.

Palabras clave: Bobinado de filamentos; Materiales compuestos; Mecánica de fluidos; Cinética de curado; ASTM D2290.

ABSTRACTO

Este artículo examina los fundamentos académicos y técnicos del control de procesos mecánicos aplicado a la fabricación de polímeros reforzados. Centrado en el método de bobinado de filamentos, el estudio analiza la literatura científica sobre la impregnación fluida de refuerzos fibrosos y examina las limitaciones de los sistemas de humectación pasiva. La investigación relaciona la homogeneidad de la matriz termoestable con la estabilización de las propiedades mecánicas del compuesto, destacando cómo la intervención física en la arquitectura de las fibras reduce los defectos de porosidad. Se argumenta que el control riguroso de las variables termodinámicas y mecánicas en planta es fundamental para la fiabilidad en sectores estructurales de alta exigencia.

Palabras clave: Bobinado de filamentos; Materiales compuestos; Mecánica de fluidos; Cinética de curado; ASTM D2290.

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de la eficiencia estructural en la ingeniería contemporánea ha impulsado...

desarrollo continuo de nuevas tecnologías de conformado que alinean el rigor de

Desde la mecánica de sólidos hasta los imperativos técnicos de la fabricación avanzada. Dentro del ámbito de

Materiales compuestos de matriz polimérica, la sustitución de aleaciones metálicas por estructuras de

El alto rendimiento se ha convertido en el estándar para las industrias que exigen alto...

Relación resistencia-peso. Infraestructura energética, transporte aeroespacial y sectores de defensa.

Dependen críticamente de estas características anisotrópicas. La aplicación práctica y segura de estas

Sin embargo, estas estructuras se ven obstaculizadas por la necesidad absoluta de garantizar la repetibilidad industrial.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VI, vol. 1 2025 | Envío: 07/11/2025 | Aceptado: 10/11/2025 | Publicación: 13/11/2025

Perfecto a lo largo de todo el ciclo de fabricación continuo.

El proceso de bobinado de filamentos , caracterizado por la deposición tridimensional de filamentos.

Las fibras tensadas sobre un mandril giratorio ilustran a la perfección el reto que supone esta optimización.

Mecánico. Históricamente, la impregnación de resina termoendurecible en el interior del haz de filamentos.

(tow) se basaba en disposiciones de rodillos cilíndricos y baños de inmersión pasiva. La literatura

Se señala que estos métodos tienen serias limitaciones para garantizar la saturación capilar.

total, dependiendo casi exclusivamente de la baja viscosidad inicial de la resina.

El atrapamiento de aire y la formación de áreas ricas en resina constituyen

Defectos microscópicos crónicos que afectan la distribución de las tensiones interfaciales en la pieza.

consolidado.

Estas discontinuidades volumétricas precipitan la delaminación bajo cargas bajas, reduciendo la

La vida útil del componente en condiciones de fatiga se ve afectada, lo que hace que su certificación sea inviable en ciertos entornos.

de alta criticidad, como los oleoductos submarinos de alta presión. Para superar esta barrera impuesta

Debido a la física de fluidos, la ingeniería de investigación académica se ha centrado en

Desarrollo de intervenciones activas en la línea de asentamiento. La búsqueda se centra en

mecanismos que actúan directamente sobre la geometría del material antes de que entre en contacto con el molde,

alterar el estado físico del haz para optimizar la permeabilidad transversal.

El estudio de las variables involucradas en la humectación de fibras continuas requiere un enfoque

Un enfoque multidisciplinario que abarca la termodinámica, la cinemática y la resistencia de los materiales. Control

La viscosidad de la resina y la tensión de bobinado determinan el grado de consolidación.

de laminado ortotrópico. Este artículo tiene como objetivo revisar la formulación conceptual de

impregnación dinámica, detallando la interacción térmica durante el curado y situando las tecnologías de

La alteración física de la fibra como vector fundamental para la mejora de los vasos a presión.

industrial.

2. REPASO TEÓRICO: COMPORTAMIENTO DE LOS FLUIDOS Y MECÁNICA CAPILAR

El proceso de fabricación de cilindros tubulares mediante bobinado de filamentos se rige por normas estrictas.

relacionado con la reología de la resina y la tensión mecánica aplicada a los miles de filamentos

Piezas individuales de vidrio, aramida o carbono. Cuando una viga de refuerzo cilíndrica cruza una

En un baño de humectación, la tensión superficial del fluido tiende a envolver el perímetro exterior del cordón.

Esta dinámica crea una barrera similar a una película que frecuentemente se desprende del núcleo de los filamentos.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VI, vol. 1 2025 | Envío: 07/11/2025 | Aceptado: 10/11/2025 | Publicación: 13/11/2025

Las partes internas están completamente secas, lo que afecta negativamente a la fracción de volumen final de la matriz. Comprender la ley de Darcy aplicada a medios porosos es esencial para diagnosticar la resistencia al flujo radial y proponer intervenciones que garanticen la capilaridad.

Desde la perspectiva de la micromecánica de los materiales compuestos, la presencia de huecos (Vv) altera Altera drásticamente la matriz de rigidez del material, en la que la suma de las fracciones de volumen de fibra (Vf), matriz (Vm) y huecos deben sumar 1 (Vf + Vm + Vv = 1). La teoría clásica de los laminados Establece la capacidad de transferir carga elástica entre fibras de alta resistencia.

Depende enteramente de la integridad de la resistencia al corte que proporciona la matriz polimérica. área circundante. Cuando el proceso de producción no logra minimizar Vv , resistencia a La resistencia al corte interlaminar (ILSS) sufre disminuciones que pueden Si supera el 30%, los cálculos de diseño originales quedan invalidados.

La optimización de estos parámetros ilustra la transición de un sistema de producción guiado por tolerancias. Amplios datos empíricos para un proceso de fabricación de precisión impulsado científicamente. La implementación de Sistemas de control numérico computarizado (CNC) sincronizados con el tensado El activo refleja la madurez de la ingeniería de procesos en materiales avanzados. Innovaciones en Los sistemas de guía e impregnación surgen como respuestas académicas e industriales a la necesidad de asegurar que el objeto físico fabricado sea una réplica libre de microdefectos en el modelo matemático evaluado.

Estudios recientes demuestran que la estabilización de las propiedades fisicoquímicas de la matriz Esto se refleja en toda la cadena de evaluación del ciclo de vida del componente. Reducir el La porosidad interna no solo maximiza la resistencia a la fatiga termomecánica, sino que también estabiliza las propiedades dieléctricas y la resistencia a la degradación química en entornos severa. Dicha uniformidad microscópica constituye el fundamento irreductible de la predictibilidad. datos actuariales requeridos en procesos regulatorios destinados a aplicaciones continuas a largo plazo en infraestructura vital.

3. METODOLOGÍA DE LA INTERVENCIÓN FÍSICA: LA REMODELACIÓN DE FIBRAS

La literatura técnica sobre el preprocesamiento físico de materias primas apunta a métodos de Alteración geométrica del haz de fibras como solución mecánica principal para las obstrucciones. fluidos intrínsecos del baño de resina. El principio mecánico de esta intervención consiste en: Aplicar restricciones de forma a la trayectoria del cable tensado. Al forzar la transición de uno a otro

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VI, vol. 1 2025 | Envío: 07/11/2025 | Aceptado: 10/11/2025 | Publicación: 13/11/2025

una sección transversal cilíndrica y agrupada en forma de cinta aplanada y paralela, una
La ingeniería de procesos multiplica la superficie de contacto.
Esta expansión dimensional maximiza la exposición de la fibra a la resina inmediatamente antes de...
etapa de consolidación en el mandril, rompiendo la tensión superficial que aisló el núcleo del
haz. El resultado termodinámico y fluidodinámico de esta aplicación metodológica es la saturación.
Acelerado por una acción capilar optimizada, que elimina la formación de zonas secas .
Para garantizar la humectabilidad completa de cada filamento aislado, se asegura la adhesión interfacial.
La química se presenta en toda su plenitud teórica.
La aplicación de métodos mecánicos de esta naturaleza impacta directamente en las estadísticas de
fiabilidad de la producción a gran escala. En términos prácticos de evaluación estructural, la
La supresión de defectos elementales se refleja en la reducción de la desviación estándar en las pruebas.
Factores mecánicos que reducen la dispersión de los datos de resistencia última. La predictibilidad del límite.
La tasa de fallos en las pruebas de laboratorio aumenta exponencialmente, en consonancia con la respuesta de la muestra.
física aplicada a los rigurosos modelos de mecánica de fractura previamente elaborados en el entorno
computacional.
Además de las ganancias estructurales, la sistematización de los mecanismos de control para la arquitectura de
La fibra óptica permite un funcionamiento mucho más estable frente a las fluctuaciones climáticas del entorno.
fabricación. Al reducir la dependencia exclusiva de factores como la temperatura ambiente y
Debido a la viscosidad temporal de la resina, el sistema de deposición se vuelve más robusto. Entonces se convierte en...
Para soportar ligeras variaciones en las propiedades del lote de polímero sin sacrificar su integridad.
Impregnación del tubo fabricado, protegiendo la línea de producción contra altas tasas de rechazo.
y se niegan.

4. Variables termodinámicas y cinética de curado de la matriz POLIMÉRICO

La estabilidad estructural de una pieza fabricada mediante bobinado de filamentos no se limita a
etapa geométrica de la deposición; es inseparable de la fase de reticulación térmica de la matriz.
Termoendurecible. La resina epoxi o de poliéster, al ser sometida al proceso de curado, experimenta una reacción.
Reacción exotérmica violenta. Durante el ciclo de calentamiento del horno, la viscosidad de la resina...
Cae exponencialmente antes de alcanzar el punto de gelificación . Uno
La impregnación irregular genera gradientes térmicos catastróficos dentro de la pared de la
compuesto, en el que las zonas ricas en resina acumulan calor, mientras que las zonas secas actúan

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VI, vol. 1 2025 | Envío: 07/11/2025 | Aceptado: 10/11/2025 | Publicación: 13/11/2025

como aislantes térmicos indeseables.

La homogeneidad de la fracción de volumen (Vf), garantizada por el preprocesamiento y por
La remodelación mecánica del haz de fibras actúa como un estabilizador termodinámico global.
de la estructura. La fibra de vidrio o fibra de carbono conduce el calor generado por la reacción exotérmica de
Forma uniforme en todo el laminado. Cuando la impregnación es perfecta, no aparecen picos.
temperaturas aisladas (puntos calientes) que conducirían a una degradación térmica localizada de
polímero o la aparición de tensiones residuales agudas durante el enfriamiento posterior al curado.
El control sobre el grado de conversión de la resina (cinética de curado) determina las propiedades finales de
Temperatura de transición vítrea (Tg) del material compuesto estructural. Partes gruesas, características de los recipientes.
Los recipientes a presión diseñados para el almacenamiento de hidrógeno o gas natural son particularmente
sensible a este fenómeno. Si el curado térmico ocurre de forma asimétrica debido a una mala
Debido a la distribución de la matriz, el cilindro desarrollará deformaciones y microfisuras interfaciales antes de
incluso después de haber sido retirado del mandril y sometido a su primera carga de trabajo hidrostática.
Por lo tanto, perfeccionar la etapa de humectación mecánica tiene un impacto profundo y preventivo.
en la termodinámica de la pieza. Al asegurar que cada fibra esté perfectamente envuelta por una
capa de polímero micrométrica y constante, el ingeniero de procesos se asegura de que
Las ecuaciones de transferencia de calor transitorias aplicadas en el diseño actúan simétricamente en
a lo largo de todo el espesor de la carcasa cilíndrica. Esto elimina la generación de defectos inducidos por impactos.
El aislamiento térmico interno refuerza la integridad física del equipo.

5. Impactos regulatorios y pruebas de evaluación estandarizadas

Para que la fabricación de materiales compuestos se incorpore a proyectos de infraestructura de alto riesgo,
operadas por organismos estatales o multinacionales, innovaciones en el control de la impregnación
Deben ser validados de acuerdo con un marco regulatorio riguroso. El impacto de
Se demuestra empíricamente una distribución uniforme de la resina mediante la aplicación de
Normas de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM). La prueba ASTM D2290
(Resistencia a la tracción aparente de plásticos anulares o tubulares mediante el método del disco partido), popularmente
Conocida como la prueba del anillo NOL, es la métrica estándar para medir la resistencia circunferencial.
continuo de la pieza enrollada.
Muestras de prueba extraídas de tuberías con un alto índice de porosidad, debido a una mala
impregnación, fallan prematuramente en la prueba del disco partido (anillo NOL), mostrando
Las fallas de cizallamiento interlaminar se producen mucho antes de que se alcance la resistencia a la tracción máxima de las fibras.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VI, vol. 1 2025 | Envío: 07/11/2025 | Aceptado: 10/11/2025 | Publicación: 13/11/2025

logrado. La aplicación de dispositivos de dispersión y remodelación de haces plantea

Los valores de resistencia a la tracción en este ensayo fueron aproximadamente los mismos que los valores en los que se midió la tensión de rotura, tal como consta en el informe de laboratorio.

La eficacia de la técnica de fabricación avanzada y la validación del componente ante los auditores.
técnicos.

Simultáneamente, la calificación química del lote de producción depende de metodologías como:
ASTM D2584 (Pérdida por ignición de resinas reforzadas curadas), que determina la fracción de volumen.
La fibra exacta (Vf) se obtiene calcinando la matriz polimérica en un horno de mufla a alta temperatura. Un proceso
Un bobinado de filamentos bien gestionado no solo presenta un alto porcentaje de fibra.
(a menudo superando el 65% en volumen), pero, principalmente, una variación insignificante.
este porcentaje entre diferentes muestras tomadas del mismo tubo, lo que demuestra la
estabilidad del baño de resina y tensado.

Traducir esta conformidad en una gestión de fabricación avanzada implica lograr
Certificación de calidad sin reservas. Cuando los informes atestiguan la ausencia de vacíos (Vv <
(2%) y la muy alta resistencia aparente a la tracción, la empresa fabricante es elegible para competir por
Procesos de licitación rigurosos en los sectores de defensa naval y extracción de petróleo en aguas profundas.
La presentación a pruebas estandarizadas deja de ser un cuello de botella para el rechazo y se convierte en
en un mecanismo irrefutable para probar el dominio tecnológico de la ingeniería sobre
el tema.

CONCLUSIÓN

Una revisión exhaustiva de los mecanismos mecánicos y termodinámicos involucrados en
La impregnación de materiales compuestos establece que la estricta regulación de la arquitectura
La fibra primaria es el factor clave para aumentar la seguridad elástica. Al reconfigurar el haz
Mediante el refuerzo a través de restricciones geométricas, la mecánica de precisión ofrece una respuesta.
definitivo para la erradicación de discontinuidades crónicas y estabilización térmica durante el
Curado de la resina, elevando sistemáticamente la calidad de la matriz de los cilindros sometidos a altas temperaturas.
presiones.

En el espectro del diseño estructural asistido por computadora, la garantía física de una fracción
El análisis volumétrico, libre de gradientes de porosidad, transforma la práctica analítica. Ingenieros
Los ingenieros obtienen una base sólida para reducir los coeficientes de seguridad excesivamente altos.
conservadores en la fase de diseño, basándose en la certeza de que la anisotropía modelada no será
comprometido por defectos ocultos en la planta de producción. Esta sinergia entre la fabricación controlada

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VI, vol. 1 2025 | Envío: 07/11/2025 | Aceptado: 10/11/2025 | Publicación: 13/11/2025

La simulación permite diseñar infraestructuras sustancialmente más ligeras y económicas.
y eficiente.

Además, la optimización de fluidos y mecánica corrobora las directrices esenciales de fabricación.
Sostenible en el siglo XXI. La absorción estrictamente necesaria del volumen de resina, impuesta
Debido a su sistema capilar bien estructurado, evita el goteo crónico y la eliminación masiva de
polímeros termoestables excedentes. Mitigar el uso innecesario de resinas derivadas de
La industria petrolera alinea el proceso de bobinado de filamentos con los objetivos macroeconómicos y ambientales.
iniciativas globales para reducir los residuos industriales tóxicos.

En resumen, el avance conceptual y aplicado en las técnicas de humectación consolida un pilar de...
Innovación tangible. Profundización científica interdisciplinaria que abarca la ley de Darcy.
para fluidos, la cinética térmica de las reacciones de polímeros y los requisitos normativos de ASTM.
— Esto da fe de la madurez del sector de los compuestos estructurales. Entender e intervenir en la trayectoria de
El fluido a escala micrométrica ha demostrado ser el camino innegociable para garantizar la estabilidad y
Seguridad macroscópica en componentes que sustentan operaciones globales críticas.

REFERENCIAS

MALLICK, PK. Materiales compuestos reforzados con fibra: materiales, fabricación y diseño. 3.ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

PETERS, ST. Bobinado de filamentos compuestos. Materials Park: ASM International, 2011.

ASTM D2290-19. Método de ensayo estándar para la resistencia aparente a la tracción de anillos o tubos de plástico y plásticos reforzados mediante el método del disco partido. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM D2584-18. Método de ensayo estándar para la pérdida por ignición de resinas reforzadas curadas.
ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.