

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

2. FIBRAS Y MATRICES

2.1 Fibras

- 2.1.1 Vidrio: alta resistencia a tracción con bajo coste
- 2.1.2 Basalto: más resistente que el vidrio
- 2.1.3 Carbono: elevadas prestaciones a un coste elevado
- 2.1.4 Grafito: más rígido que el carbono
- 2.1.5 Aramida: resistencia a tracción y al impacto
- 2.1.6 UHMWPE: excepcional resistencia al impacto y elevado coste
- 2.1.7 PBO: resistencia a tracción con limitaciones
- 2.1.8 Lino: ligereza, rigidez específica y procedencia de la naturaleza
- 2.1.9 Kenaf: cultivo ventajoso y prestaciones mecánicas

2.2 Matrices

- 2.2.1 Poliéster: bajo coste, prestaciones medias y bajas
- 2.2.2 Viniléster: apropiada para aplicaciones químicas
- 2.2.3 Epoxi: idónea para aplicaciones de altas prestaciones
- 2.2.4 Uretano: tenaz y versátil
- 2.2.5 Fenólica: resistente al fuego y humos
- 2.2.6 Cianato éster: alta estabilidad térmica
- 2.2.7 Bismaleimida: resistente a altas temperaturas y tensiones
- 2.2.8 Cargas y aditivos

2.3 Referencias

3. RTM – MOLDEO POR TRANSFERENCIA DE RESINA

3.1 Introducción

- 3.1.1 Características generales del proceso de RTM
- 3.1.2 Ventajas y desventajas del RTM

3.2 Materias primas específicas para RTM

- 3.2.1 Fibras
 - 3.2.1.1 Arquitecturas textiles bidimensionales
 - 3.2.1.2 Arquitecturas textiles tridimensionales
- 3.2.2 Matrices
 - 3.2.2.1 Viscosidad
 - 3.2.2.2 Nivel de catálisis
 - 3.2.2.3 Temperatura

3.2.3. Aditivos y cargas

3.3 Preformado

3.3.1 Compresibilidad

3.3.2 Permeabilidad

3.3.3 Núcleos e insertos

3.3.3.1 Núcleos

3.3.3.2 Insertos

3.3.4 Técnicas comunes de preformado

3.3.4.1 Preformado por corte y colocación

3.3.4.2 Preformado por proyección directa de fibra

3.3.4.3 Preformado por estampación de materiales termoconformables

3.3.4.4 Preformas textiles

3.3.4.5 Comparación entre las técnicas de preformado

3.4 El molde

3.4.1 Diseño del molde

3.4.1.1 Sellado

3.4.1.2 Puntos de inyección y ventilación

3.4.1.3 Sistemas de calentamiento / enfriamiento

3.4.1.4 Cierre y alineación

3.4.2 Materiales del molde

3.5 La inyección

3.5.1 Equipamiento para inyección

3.5.2 Llenado del molde

3.5.2.1 Resistencias al flujo

3.5.2.2 El problema del llenado del molde

3.5.3 Simulación de la inyección

3.5.3.1 Modelo de flujo

3.5.3.2 Determinación experimental de la permeabilidad

3.5.3.3 Aproximación para el análisis numérico

3.5.4 Control de la inyección

3.5.5 Inyección RTM mediante prensa

3.6 El curado

3.6.1 Resinas de epoxi

3.6.2 Resinas cianato

3.6.3 Resinas bismaleimida (BMI)

3.6.4 Resinas de poliéster

3.6.5 Resinas de viniléster

3.6.6 Resinas fenólicas

3.6.7 Resinas uretano

3.6.8 Curado por inducción de calor

3.7 Control de calidad

3.7.1 Control de calidad del material compuesto

3.7.2 Control de calidad del componente

3.7.3 Contribución de variables de RTM en el comportamiento mecánico

3.7.4 Especificaciones de calidad de comportamiento mecánico

- 3.7.4.1 Admisibles de propiedades de materiales
- 3.7.4.2 Especificaciones de proceso
- 3.7.4.3 Especificaciones de pieza terminada
- 3.7.5 Acabado superficial y recubrimientos: *gel coats*
 - 3.7.5.1 Recubrimientos medioambientales
 - 3.7.5.2 Recubrimientos anti-abrasión y adherentes
 - 3.7.5.3 Recubrimientos anti-erosión

3.8 Aplicaciones

- 3.8.1 Aplicaciones típicas
 - 3.8.1.1 Aeronáutica y Espacio
 - 3.8.1.2 Automoción
 - 3.8.1.3 Transporte terrestre
 - 3.8.1.4 Deportes y Competición
- 3.8.2 Otros sectores

3.9 Bibliografía

4. HP-RTM

4.1 Introducción

4.2 Materias primas específicas para HP-RTM

- 4.2.1 Fibras
- 4.2.2 Matrices

4.3 El molde

4.4 Etapas del proceso

4.5 La inyección a alta presión

4.6 El curado

4.7 Características de una prensa para HP-RTM

4.8 Desafíos del proceso HP-RTM

4.9 Control de calidad

- 4.9.1 Control de calidad del material compuesto
- 4.9.2 Control de calidad del componente

4.10 Aplicaciones

4.10 Bibliografía

5. COMPRESIÓN EN ALTA PRESIÓN RTM – RTM (HP-CRTM)

5.1 Introducción

5.2 Materias primas específicas para HP-CRTM

5.2.1 Fibras

5.2.2 Matrices

5.3 El molde

5.4 Etapas del proceso

5.5 La inyección-compresión

5.6 El curado

5.7 Características de una prensa para HP-CRTM

5.8 Comparación entre los procesos HP-RTM y HP-CRTM

5.9 Desafíos del proceso HP-CRTM

5.10 Control de calidad

5.10.1 Control de calidad del material compuesto

5.10.2 Control de calidad del componente

5.11 Aplicaciones

5.12 Bibliografía

6. RTM LIGHT

6.1 Introducción

6.2 Cuándo utilizar RTM Light, RTM estándar o Infusión

6.3 Materias primas específicas para RTM Light

6.3.1 Fibras

6.3.2 Matrices

6.3.3 Cargas y aditivos

6.4 El molde

6.5 Etapas del proceso

6.6 La inyección

6.7 El curado

6.8 RTM Light con curado en autoclave

6.9 Control de calidad

6.9.1 Control de calidad del material compuesto

6.9.2 Control de calidad del componente

- 6.9.2.1 Control de la viscosidad de la resina
- 6.9.2.2 Tiempo de gel y reactividad
- 6.9.2.3 Control de la temperatura
- 6.9.2.4 Control del componente tras el desmoldeo

6.10 Aplicaciones

- 6.10.1 Aplicaciones típicas
 - 6.10.1.1 Marina
 - 6.10.1.2 Componentes de aerogeneradores
 - 6.10.1.3 Transporte terrestre
- 6.10.2 Otros sectores

6.11 Bibliografía

7. INFUSIÓN

7.1 Introducción

7.2 Materias primas específicas para infusión

- 7.2.1 Fibras
- 7.2.2 Matrices
- 7.2.3 Cargas y aditivos

7.3 El molde

7.4 Etapas del proceso

7.4 La infusión

- 7.4.1 Simulación de la infusión

7.5 El curado

7.6 Variantes del proceso de infusión

- 7.6.1 El método SCRIMP
- 7.6.2 El método CAPRI
- 7.6.3 El proceso VAP
- 7.6.4 A-VaRTM (Infusión avanzada)
- 7.6.5 Proceso de moldeo de bolsa con cavidad cerrada (CCBM)

7.7 Control de calidad

- 7.7.1 Control de calidad del material compuesto
- 7.7.2 Control de calidad del componente

7.8 Aplicaciones

- 7.8.1. Aplicaciones típicas
 - 7.8.1.1 Palas de aerogenerador
 - 7.8.1.2 Cascos de embarcaciones
- 7.8.2 Aplicaciones singulares
 - 7.8.2.1 Aeronáutica
 - 7.8.2.2 Infraestructura de transportes: Puentes

7.8.2.3 Transporte terrestre / ferrocarril

7.8.3 Otros sectores

7.9 Bibliografía

8. EL ENROLLAMIENTO FILAMENTARIO

8.1 Introducción

8.1.1 Diferencias entre el proceso de enrollamiento filamentario y la colocación automática de fibras

8.2 Materias primas específicas para enrollamiento filamentario

8.2.1 Fibras

8.2.2. Matrices

8.2.3 Cargas y aditivos

8.3 Sistemas de alimentación

8.3.1 Sistema estacionario

8.3.2 Sistema móvil

8.4 Procedimientos de impregnación de la fibra

8.4.1 Procedimiento vía húmeda

8.4.1.1 Sistemas de guiado y tensado del refuerzo

8.4.1.2 Sistemas de impregnación del refuerzo

8.4.1.3 Sistemas de entrega de la fibra impregnada sobre el mandril

8.4.2 Procedimiento vía seca

8.4.2.1 El concepto de towpreg

8.4.2.2 Sistemas de guiado y tensado del towpreg

8.4.2.3 Sistemas de entrega del towpreg sobre el mandril

8.4.3 Ventajas e inconvenientes de los dos procedimientos

8.5 El proceso recíproco

8.5.1 Giro del mandril y desplazamiento del carro (procesado recíproco de tubería)

8.5.1.1 El bobinado helicoidal

8.5.1.2 La máquina

8.5.1.3 El mandril

8.5.1.4 Curado

8.5.1.5 Desmoldeo

8.5.2 Giro del mandril y giro del mecanismo de guiado (depósitos esféricos o de longitud reducida)

8.5.2.1 El bobinado polar

8.5.2.2 La máquina

8.5.2.3 El molde

8.5.2.4 Curado

8.5.2.5 Desmoldeo

8.5.3 Cuatro grados de libertad: bobinado mixto polar y circunferencial (depósitos a presión)

8.5.3.1 El bobinado mixto

8.5.3.2 La máquina

8.5.3.3 El molde

8.5.3.4 Curado

8.5.3.5 Desmoldeo

8.5.4 Casos especiales (Piezas con concavidades, no axisimétricas, ...)

- 8.5.4.1 Bobinado de piezas con concavidades
- 8.5.4.2 Bobinado de elementos de unión en forma de L (codos)
- 8.5.4.3 Bobinado de elementos de unión en forma de T
- 8.5.4.4 Bobinado de largueros y mástiles
- 8.5.4.5 Máquinas de enrollamiento duales

8.6 El proceso continuo

- 8.6.1 El mandril
- 8.6.2 Curado
- 8.6.3 Desmoldeo

8.7 El Control

- 8.7.1 Control mediante robot
- 8.7.2 Software comercial de programación del control numérico
 - 8.7.2.1 Cadfil
 - 8.7.2.2 Cadwind
 - 8.7.2.3 Compositcad
 - 8.7.2.4 Fibergrafix
 - 8.7.2.5 Simwind

8.8 Procesos de enrollamiento filamentario avanzados

- 8.8.1 Pull-winding
- 8.8.2 Carbon shell system (CSS)

8.9 Control de calidad

- 8.9.1 Control de calidad del material compuesto
- 8.9.2 Control de calidad del componente
 - 8.9.2.1 Inspección visual y mediciones
 - 8.9.2.2 Ensayo de rigidez circunferencial
 - 8.9.2.3 Ensayo de compresión
 - 8.9.2.4 Ensayo de presión

8.10 Aplicaciones

- 8.10.1 Aplicaciones típicas
 - 8.10.1.1 Conducciones en la industria química, de energía, de agua y offshore
 - 8.10.1.2 Depósitos a presión
 - 8.10.1.3 Tanques y tolvas
 - 8.10.1.4 Chimeneas
- 8.10.2 Aplicaciones singulares
 - 8.10.2.1 Espacio: carcasas de motores
 - 8.10.2.2 Aeronáutica; radomas y conos de cola
 - 8.10.2.3 Escultura
 - 8.10.2.4 Arquitectura
 - 8.10.2.5 Carrocerías de autobús en materiales compuestos
- 8.10.3. Otros sectores de aplicación
 - 8.10.3.1 Aplicaciones eléctricas: postes de líneas de transmisión
 - 8.10.3.2 Deporte y competición
 - 8.10.3.3 Generación de energía: Aerogeneradores
 - 8.10.3.4 Almacenamiento de energía: volantes de inercia
 - 8.10.3.5 Defensa

- 8.10.3.6 Aplicaciones marinas: largueros y mástiles
- 8.10.3.7 Transporte terrestre y automoción: árboles de transmisión
- 8.10.3.8 Ferrocarril

8.11 Bibliografía

9. LA PULTRUSIÓN

9.1 Introducción

- 9.1.1 Características generales
- 9.1.2 Ventajas y desventajas de la pultrusión

9.2 Materias primas específicas para pultrusión

- 9.2.1 Fibras
- 9.2.2 Matrices
- 9.2.3 Cargas y aditivos

9.3 El proceso de pultrusión

- 9.3.1 Sistemas de alimentación
- 9.3.2 Alineación de las fibras
- 9.3.3 Sistemas de impregnación de la fibra
- 9.3.4 Preformado
- 9.3.5 Curado
- 9.3.6 Desmoldeo
 - 9.3.6.1 Desmoldeantes
- 9.3.7 Estación de arrastre
 - 9.3.7.1 Tracción intermitente + enganche alternativo
 - 9.3.7.2 Tracción continua + enganche alternativo
 - 9.3.7.3 Tracción continua mediante correa
- 9.3.8 Control
 - 9.3.8.1 Control de velocidad de tiro
 - 9.3.8.2 Interface del operador de pantalla táctil
- 9.3.9 Corte del perfil

9.4 Utillajes para el proceso de pultrusión

- 9.4.1 El molde
- 9.4.2 Instalaciones auxiliares

9.5 Aspectos críticos del proceso

- 9.5.1 Perfil de temperatura de calentamiento del molde y grado de curado
- 9.5.2 Tensiones residuales, distorsiones y delaminaciones en el material compuesto
- 9.5.3 Fuerza de tracción
- 9.5.4 Porosidad

9.6 Procesos de pultrusión avanzados

- 9.6.1 Inyección – Pultrusión
- 9.6.2 Pultrusión – Preimpregnación
- 9.6.3 Pulforming
- 9.6.4 Pulpress
- 9.6.5 Radius – Pultrusion™

9.6.6 iPul

9.6.7 ASFM

9.7 Diseño de piezas fabricadas mediante pultrusión

9.7.1 Criterios básicos de diseño

9.7.2 Propiedades típicas de las piezas fabricadas mediante pultrusión

9.7.2.1 Barras y redondos de fibra de vidrio

9.7.2.2 Placas planas de fibra de vidrio

9.7.2.3 Perfiles de fibra de vidrio (E_L en el rango 20 – 21 GPa)

9.7.2.4 Angulares de fibra de vidrio (E_L en el rango 24 – 25 GPa)

9.7.2.5 Perfiles en doble T de ala ancha de fibra de vidrio (E_L en el rango 28 – 29 GPa)

9.7.2.6 Perfiles multicelulares de fibra de vidrio

9.7.2.7 Perfiles multicelulares híbridos vidrio/carbono

9.7.2.8 Paneles multicelulares interconectados de fibra de vidrio

9.7.2.9 Barras de fibra de carbono de tow grande (50 K)

9.7.2.10 Placas planas de fibra de carbono de tow grande (50 K)

9.7.2.11 Barras, redondos y placas planas de fibra de carbono de bajo tow (3, 6, 12K)

9.7.3 Diseño de uniones

9.7.3.1 Uniones mecánicas entre perfiles mediante cartelas atornilladas

9.7.3.2 Uniones entre perfiles mediante el sistema hueso de perro

9.7.3.3 Uniones mediante paneles pultrusionados interconectados

9.7.3.4 Uniones nodulares mecánicas entre perfiles

9.7.3.5 Uniones nodulares por adhesivo entre perfiles

9.8 Control de calidad

9.8.1 Control de calidad del material compuesto

9.8.2 Control de calidad del componente

9.9 Aplicaciones

9.9.1 Aplicaciones típicas

9.9.1.1 Aplicaciones eléctricas

9.9.1.2 Rejillas

9.9.1.3 Barra corrugada para el refuerzo de hormigón

9.9.1.4 Perfiles de ventana

9.9.1.5 Transporte por carretera

9.9.2 Aplicaciones singulares

9.9.2.1 Espacio: antenas y mástiles

9.9.2.2 Aeronáutica; perfiles estructurales en fibra de carbono pultruidos

9.9.2.3 Infraestructura de transportes: Puentes

9.9.2.4 Infraestructura de transportes: puertos

9.9.2.5 Infraestructura de transportes: túneles

9.9.2.6 Arquitectura

9.9.3 Otros sectores de aplicación

9.9.3.1 Palas eólicas

9.9.3.2 Radio antenas & radomas

9.9.3.3 Otros

9.10 Bibliografía

RESUMEN

A lo largo de 410 páginas y 372 figuras y fotografías se expone la tecnología actual de los procesos más importantes de materiales compuestos de matriz termoestable, así como las innovaciones más recientes. En aeronáutica, cada vez hay más componentes en RTM dadas sus ventajas: capacidad de optimizar los diseños de geometrías más complejas y de integración de varias piezas en un conjunto, no requiere autoclave, exige menos estrictas condiciones de sala blanca que la preimpregnación y hace posible una alta automatización en la fabricación de preformas, incluyendo 3D, para conseguir la mejor ruta de carga.

En automoción, el actual desafío es bajar el tiempo de ciclo por debajo de 3 minutos garantizando que las altas presiones en la cavidad no resten viabilidad al proceso de inyección. Se está trabajando en el HP-RTM actualizado, el HP-CRTM o el PC-RTM para bajar los tiempos de ciclo del BMW i3, en el rango de los 3-7 minutos. Los procesos de infusión, RTM Light y CCBM están al alza en sectores significativos como el transporte, infraestructuras y palas de aerogenerador, donde el contacto a mano y la preimpregnación han sido barridos prácticamente por esta familia de procesos. Los procesos de enrollamiento filamentario más recientes incluyen la robotización en la manipulación del refuerzo, el uso de drones para el posicionamiento de las fibras, la impresión 3D o el uso de materiales con memoria de forma en la fabricación de moldes de sección variable. En pultrusión, hay que subrayar las numerosas iniciativas conducentes a resolver sus dos principales limitaciones: la linealidad y la sección constante del componente. Nuevas tecnologías como Radius-pultrusion, Pul-press, ASFM o iPul permiten la fabricación de componentes pultruidos con curvaturas y de sección variable.

En la actualidad la conjunción de las tecnologías de última generación: automatización, robotización, control, simulación, ... y las metodologías de

procesado de materiales compuestos de matriz orgánica está marcando un punto de inflexión que está cambiando radicalmente la forma de fabricar componentes con nuestros materiales. Si inicialmente a mediados del siglo XX, el contacto a mano era la única forma, rudimentaria y de elevado coste de mano de obra, de procesar componentes en materiales compuestos, hoy en día, setenta años después, está en auge una familia de procesos, muy competitivos desde el punto de vista de prestaciones y coste, que están impulsando la aplicación de nuestros materiales en todos los sectores industriales.

La aeronáutica es un sector singular en el sentido que se prima la reducción de peso y las prestaciones mecánicas del componente de manera distinta al resto de los sectores industriales. Hoy en día, hay aún un vivo debate sobre el uso de materiales compuestos y las aleaciones de aluminio. El hecho de que Boeing haya vuelto al fuselaje metálico en el nuevo 777x tras usar los materiales compuestos en el del 787 ha creado decepción entre los seguidores de los materiales compuestos, sin duda el requerimiento de tolerancia al daño ha tenido algo que ver.

La buena noticia es que el ala del nuevo 777x se va a fabricar con nuestros materiales. Si bien antes la preimpregnación con curado en autoclave era el proceso exclusivo en la aeronáutica, hoy en día cada vez hay más componentes en RTM, dadas sus ventajas: capacidad de optimizar los diseños de geometrías más complejas y de integración de varias piezas en un conjunto, el hecho de no incluir resina impregnada en el tejido de fibra de carbono permite mayor conformabilidad, es un proceso robusto con alta automatización, no requiere autoclave, exige menos estrictas condiciones de sala blanca que la preimpregnación y hace gala de la posibilidad de una alta automatización en la fabricación de preformas, incluyendo preformas 3D, para conseguir la mejor ruta de carga. El borde de ataque del estabilizador horizontal del Airbus A-350 es un ejemplo ilustrativo. Y no sólo el RTM, recientemente, la infusión ha sido utilizada en una pieza de gran compromiso estructural, como es el ala de avión comercial MS-21. El libro trata en detalle esta familia de procesos.

La obra asimismo analiza en profundidad el área de procesado de los componentes de geometría de revolución. Prácticamente, con presencia en todos los sectores industriales, el enrollamiento filamentario ha desbancado al resto de procesos y se está aplicando con éxito creciente en las industrias del petróleo, energía, agua, depósitos a presión, defensa y espacio, entre otras. Sus principales bazas son sus elevadas prestaciones mecánicas y la automatización. A mitad de los 40s se fabricaba el primer prototipo de carcasa de motor de cohete de forma casi manual. Hoy en día, la tecnología del enrollamiento filamentario ha evolucionado significativamente con sofisticados programas de simulación y control, automatización y robótica que permiten la introducción de hasta doce grados de libertad y el uso de drones para el posicionamiento de las fibras en aplicaciones de grandes dimensiones. Sin duda, un sector al alza y cada vez con mayor número de aplicaciones incluyendo complejas piezas arquitectónicas y de ingeniería civil.

En el área de componentes lineales: vigas, perfiles, barras, placas, mástiles, ... se analiza en detalle el proceso de la pultrusión, que se aplica prácticamente con exclusividad, introduciéndose cada vez en más aplicaciones basándose en su principal ventaja: su bajo coste debido a la casi total automatización del proceso. Hay que subrayar las numerosas iniciativas conducentes a resolver sus dos principales limitaciones: la linealidad y la sección constante del componente. Nuevas tecnologías como Radius-pultrusion, Pul-press, ASFM e iPul permiten la fabricación de componentes pultruidos con curvaturas y de sección variable. Espacio, aeronáutica, torres de enfriamiento, transporte terrestre, construcción y minería son algunos de los numerosos sectores donde este proceso se está aplicando con éxito.