

Isabel M^a Mudarra Medina, Marta M^a Acosta Rodríguez
Carlos Manuel G.E do C.Saleiro

Departamento de Materiales & Procesos/Ingeniería Alestis Aerospace
C/Ingeniero Rafael Rubio Elola N°1 P.T Aerópolis 41309 La Rinconada. Sevilla

Prepreg, tejido de carbono, resina termoestable autoadhesiva para piezas sandwich: ventajas, inconvenientes y desafíos en la fabricación

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

Estructura sandwich
Prepreg autoadhesivo
Calidad interna
Reducción peso

Es ampliamente conocido que una estructura sándwich en el sector aeronáutico está formada por un material denominado núcleo, generalmente formato de nido de abeja (Honeycomb) entre dos revestimientos formados por varias capas de material prepreg. Sin embargo, para obtener una buena adherencia entre el núcleo y el prepreg, los sistemas de resina termoestable en su mayoría necesitan utilizar un adhesivo film intercalado entre el núcleo y prepreg que favorezca la formación de un menisco de material adhesivo dentro de la celdilla del núcleo.

El principal beneficio asociado a la utilización de prepegs autoadhesivos en piezas sandwich consiste en la eliminación del adhesivo film de la configuración de la pieza que se traduce en una reducción de peso de la propia estructura.

El presente artículo se centra en los materiales autoadhesivos de curado a 180°. Después de más de 3 años trabajando con varios fabricantes de materiales compuestos y AIRBUS, se han definido los parámetros claves del proceso en un medio industrial, así como las características básicas fundamentales del material necesarias para garantizar la calidad interna de los elementos.

Prepreg, carbon fiber, thermoset autoadhesive resin for sandwich structures: advantages, disadvantages and manufacturing challenges

ABSTRACT

Keywords:

Sandwich structures
Autoadhesive prepreg
Internal quality
Weight reduction

It's thoroughly known that sandwich structures in aeronautical sector are formed by a core material, which more usual format is honeycomb, between two facings or skins made from several prepreg material layers. Nevertheless in order to obtain an adequate adherence between core and prepreg most of thermoset resin systems need the presence of a film adhesive placed among the core and prepreg to favour the adhesive menisci formation inside core cells.

Main benefit associate to autoadhesive prepegs usage in sandwich parts is adhesive elimination from part configuration which translates in a weight reduction of the structure.

Present article is centered in autoadhesive prepreg materials 180° cure. After more than 3 years of work with several composite materials manufacturers and AIRBUS, key process parameters in an industrial environment have been defined along with basic characteristics in order to guarantee internal quality of the elements

1 Introducción

En el sector aeronáutico los criterios impuestos de prestaciones para los materiales empleados son mucho mayores que en otras áreas. Son aspectos clave el bajo peso, la elevada resistencia mecánica, alta rigidez y buena resistencia a la fatiga.

Precisamente el factor peso ha sido el que ha impulsado la incorporación extensiva de los materiales compuestos en la industria aeronáutica pese a sus altos costes de producción y procesos de fabricación no estandarizados. La siguiente Figura ilustra el crecimiento del porcentaje en peso que suponen las estructuras de material compuesto dentro de los aviones fabricados por Airbus durante los últimos 40 años.

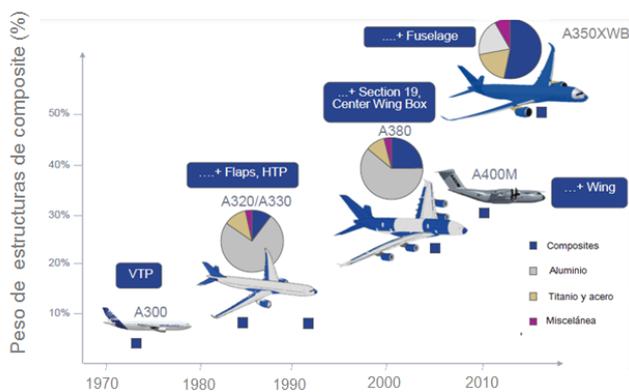


Figura 1 Evolución del % en peso de estructuras de composite en aviones Airbus

La constante demanda de aviones más ligeros y energéticamente más eficientes, obliga a los fabricantes de piezas de material compuesto a mantener un gran esfuerzo de investigación en tecnologías de fabricación, comportamiento estructural y coste y capacidades multifuncionales.

Como ya ha sido adelantado, la incorporación de materiales preimpregnados autoadhesivos supondría una mejora en la tecnología de fabricación de una de las principales estructuras de materiales compuestos utilizadas en el ámbito aeronáutico: las estructuras tipo sándwich.

1.1 Campo de aplicación

Alestis Aerospace es responsable del paquete de trabajo A350XWB Belly Fairing. La "Belly Fairing" o carenado ventral es una estructura mixta situada en la parte inferior del fuselaje, entre las alas, y cubre la panza o parte inferior de la aeronave (de ahí su nombre en inglés: "belly", que significa panza o vientre). Este elemento encierra soportes y apoyos para un gran número de sistemas.

Consiste en una estructura soporte anclada al fuselaje sobre la que se ubican paneles sándwich de fibra de carbono. Aunque no se trata de una estructura primaria, sí está sometida a cargas aerodinámicas, que los paneles transmiten a la estructura soporte por lo que los paneles sandwich que la constituyen se encuentran dimensionados en consecuencia para resistir dichas cargas. Estos paneles constan de un

núcleo *honeycomb* revestido por dos pieles fabricadas en material de fibra de carbono preimpregnado en resina epoxy termoestable. Dependiendo de los requerimientos térmicos de la zona el prepreg a utilizar es de curado a baja o alta temperatura (120°/180°C). El uso de material autoadhesivo ya se encuentra implementado en los paneles de baja temperatura, sin embargo, no se dispone de un material certificado equivalente para los paneles de curado a alta temperatura.

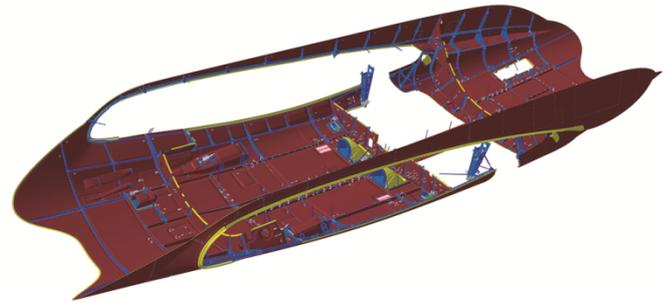


Figura 2 A350XWB Belly Fairing

1.2 Prepregs autoadhesivos de curado a 180°

Las propiedades autoadhesivas se obtienen a través de formular los sistemas de resina con vista a garantizar una serie de características:

- Flujo de resina necesario para favorecer la formación del menisco dentro de la celdilla del núcleo,
- Adhesión del revestimiento considerando la variabilidad de núcleos
- Estanqueidad de la estructura sándwich
- Mantenimiento de los espesores de capa curada dentro de un rango estable
- Fácil manipulación en un ambiente industrial

Las ventajas derivadas del uso de esos materiales y la consiguiente eliminación del adhesivo film son evidentes:

- Ahorro de peso
- Ahorro de costes asociados al adhesivo, no solo su precio, también costes de recepción, almacenamiento...
- Reducción de los tiempos de fabricación asociados a la eliminación de capas y a la preparación del adhesivo
- Eliminación de problemas de compatibilidad

A fin de obtener visibilidad acerca de sus posibles inconvenientes así como evidencias del comportamiento de estos materiales en fabricación Alestis optó por realizar un conjunto de pruebas de fabricación o "shop trials" con prepregs autoadhesivos propuestos por distintos fabricantes.

2 Metodología de calificación

Se seleccionaron dos tipologías de paneles sándwich pertenecientes a la "Belly Fairing" (simple y complejo) pertenecientes a la producción habitual de planta sobre los cuales se efectuaron toda una serie de ensayos e inspecciones tanto destructivos como no destructivos.



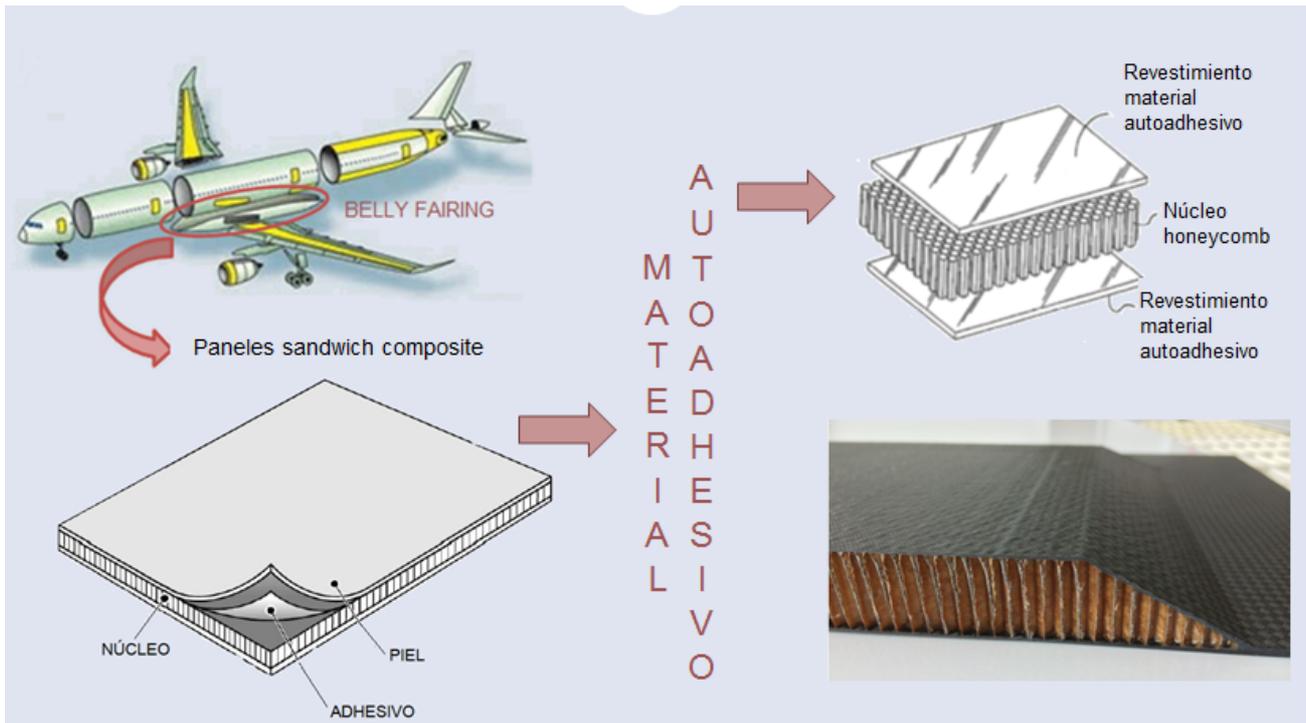


Figura 3 Uso material autoadhesivo en paneles sándwich

De este modo se obtuvieron datos tanto del comportamiento de los materiales durante la fabricación así como de la calidad del producto final fabricado.

Tal y como puede verse en la Figura 4, tanto los paneles simples como los complejos son estructuras tipo sándwich mixtas, es decir, presentan zonas puramente sándwich así como zonas de pista exclusivamente formadas por laminado sólido. En el caso del panel complejo aparece una zona de laminado radial de ahí su denominación.

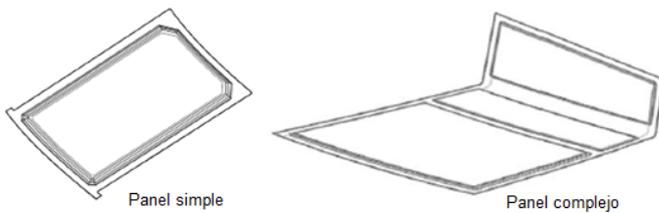


Figura 4 Tipología paneles

Los materiales empleados en la fabricación de los paneles son los usados de forma general en la fabricación en serie de esas mismas piezas simplemente sustituyendo el prepreg no autoadhesivo por el prepreg autoadhesivo.

2.1 Matriz de ensayos

Una vez fabricados, los paneles se sometieron a comprobaciones de dos tipos:

- Inspecciones no destructivas: visual, dimensional (peso y medición de espesores), ultrasonidos y estanqueidad.
- Ensayos destructivos: los usualmente realizados en los procesos de certificación de calidad interna, como los procesos de calificación de la primera pieza o FPQ "First Part Qualification"

- Ensayos mecánicos: sobre paneles de control de proceso

La siguiente figura extraída del MIL Handbook 17 Volume 3 [1] ayuda a ilustrar la necesidad de realizar este tipo de ensayos en piezas de composite. Por lo general, estos ensayos se usan para asegurar la integridad estructural de un componente cuando esta no puede quedar garantizada únicamente con las técnicas no destructivas. Incluyen la disección de la pieza para examinar su interior y ensayos mecánicos efectuados sobre paneles de control de procesos fabricados con ese fin.

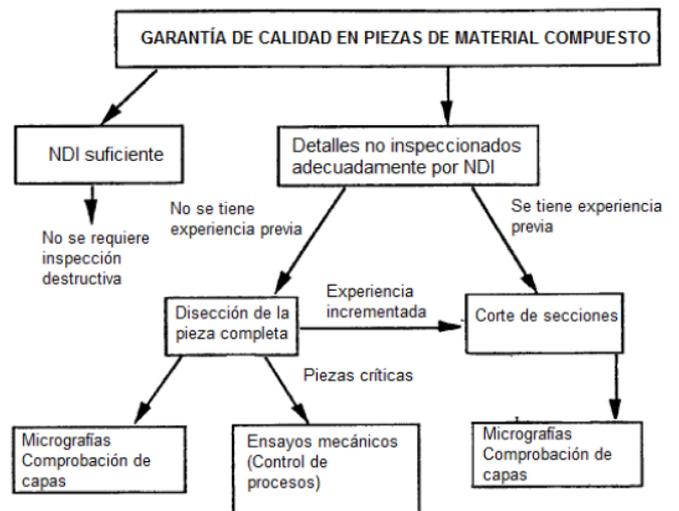


Figura 5 Uso de los ensayos destructivos en piezas de material compuesto



De acuerdo a la Figura existen dos categorías principales de ensayos destructivos: la disección de la pieza completa o bien el examen de algunas de las secciones de la misma. La elección de una u otra categoría depende del grado de madurez del proceso de fabricación y del conocimiento disponible sobre las peculiaridades de la producción y la calidad interna de las piezas.

Dado que el estudio efectuado consistía en la evaluación de nuevos materiales compuestos sobre los que no se dispone de información alguna referente a su puesta en uso en la fabricación, la disección realizada sobre los paneles fue total a fin de efectuar un examen completo de los mismos.

Los ensayos destructivos que se efectuaron aparecen recogidos en la Figura 6.

El contenido en volátiles es uno de los principales indicadores de calidad interna. Una porosidad excesiva trae consigo una reducción de las propiedades mecánicas teóricas de la estructura así como puede llegar incluso a afectar al aspecto visual de la misma. Unos porcentajes de fibra y resina dentro de los límites definidos para el material implican que la fluidez del preimpregnado es la adecuada y no se generan fugas de resina en la estructura.

Íntimamente relacionado con este ensayo se encuentra la inspección macro/micrográfica ya que permite la observación de la porosidad en caso de que exista así como de zonas de exceso/pérdida de resina. Otras características observables son el número y la distribución de las capas y los posibles defectos que podrían darse en las mismas tales como arrugas, delaminaciones, etc.

La determinación de la temperatura de transición vítrea aporta información acerca de la temperatura de servicio de los materiales.

El ensayo de pelado de tambor se realiza para efectuar la caracterización mecánica del comportamiento autoadhesivo.

TIPO DE ENSAYO	PROCEDIMIENTO	DATOS A RECOPIRAR
Determinación del contenido en fibra, resina y huecos	Digestión de resina según EN2564 [2]	<ul style="list-style-type: none"> Densidad del preimpregnado Contenido en fibra, resina y huecos por volumen
Determinación de la temperatura de transición vítrea	DMA (Análisis dinámico-mecánico)	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura de transición vítrea (Tg)
Observación macro/microscópica de secciones transversales	Imágenes macro/micrográficas	<ul style="list-style-type: none"> Número de capas Porosidad Arrugas Ondulaciones de la fibra Microgrietas Delaminaciones Inclusiones de objetos extraños Morfología de los meniscos Morfología de la zona de transición Morfología de las celdillas
Ensayo de pelado de tambor	Pelado de tambor según normativa UNE EN2243-3 [3]	<ul style="list-style-type: none"> Carga de pelado Resistencia al pelado

Figura 6 Ensayos destructivos

Finalmente, los ensayos mecánicos permiten cuantificar una serie de propiedades de resistencia frente a diversas sollicitaciones.

TIPO DE ENSAYO	PROCEDIMIENTO	DATOS A RECOPIRAR
Cortadura interlaminar	Según normativa UNE EN2563 [4]	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia a cortadura (MPa) Modo de fallo
Tracción plana	Según AITM1-0025 [5]	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia a tracción plana (MPa) Modo de fallo
Pelado de tambor	Según normativa UNE EN2243-3 [3]	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia al pelado (MPa) Modo de fallo
Tracción simple	UNE EN2597 [6]	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia a tracción (MPa) Módulo de elasticidad (GPa)
Cuatro puntos de flexión	Según AITM1-0018 [7]	<ul style="list-style-type: none"> Carga máxima (N) Deflexión máxima (mm) Modo de fallo
Compresión	UNE EN2850 (Tipo B) [8]	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia a compresión (MPa)

Figura 7 Ensayos mecánicos

3 Fabricación de los paneles

Durante la fabricación de los paneles de prueba se siguió la misma ruta general seguida por los paneles durante la fabricación en serie a excepción de algunas operaciones. Concretamente, a partir de su desmoldeo, la ruta que siguieron estos paneles comenzó a diferir de la que habrían seguido de haberse tratado de piezas de serie. Puesto que su propósito final era servir de ítem de ensayos, se omitieron las operaciones de acabado tales como el recanteo, taladrado, avellanado, sellado de bordes y pintura. Si se sometieron sin embargo a todas aquellas inspecciones que pudieran arrojar información acerca de la calidad de los mismos como son la ultrasónica, la estaqueidad y la pesada.

3.1 Consideraciones a la fabricación

Durante el apilado de las telas de prepreg se utilizaron elementos de utillaje auxiliar conocidos con el nombre de bandas rugosas. Se trata de unas bandas de chapa semiduras que se disponen a lo largo del contorno del útil con el objeto de retener las telas de preimpregnado a medida que se van disponiendo sobre este.

Finalmente, cabe destacar que los materiales se curaron en el ciclo de autoclave definido actualmente en la planta en lugar de emplear los ciclos de curado definidos por cada fabricante alternativo para el curado de su material correspondiente. Los parámetros teóricos de este ciclo de un solo escalón englobarían a los teóricos de cada ciclo si bien con algunas diferencias principalmente en el caso del Material I en el que la propuesta de calentamiento se haría en dos escalones en lugar de uno.

Los comentarios recogidos por los operarios durante la fabricación de los paneles sobre distintos aspectos de interés a la hora de manipular los materiales se resumen en la Figura 8. (Información extraída de [9]).



Acción	MATERIAL I		MATERIAL II		MATERIAL III	
	Paneles de ensayo	Puntos	Paneles de ensayo	Puntos	Paneles de ensayo	Puntos
Corte de telas	+ Bueno	3	- Ligero deshilachado de telas	0	+ Bueno	3
Pegajosidad	+ Buena	3	- Aspecto muy seco - Baja pegajosidad	0	+ Bueno	3
Moldeabilidad	+ Buena	3	+ Buena	3	+ Buena + Baja flexibilidad pero buena adaptabilidad	3
Posicionamiento de telas	+ Bueno	3	- El protector de las telas debido a la baja pegajosidad dificulta la operación de apilado	1	+ Bueno - El protector de telas se separa con parte de la resina superficial	2
Posicionamiento de núcleo	+ Buena adherencia. No es necesario el uso de secador	3	- Se requiere el uso de secador - El núcleo se desplaza localmente durante la compactación	0	+ Baja adherencia pero no se requiere el uso de secador	2
Deformación de las telas	No observada ¹⁾	-	- Deformación de las telas durante el apilado	0	No observada ¹⁾	-
Arrugas	No observadas ¹⁾	-	-El protector de telas se cae durante el apilado produciendo arrugas. Relacionado con las arrugas encontradas en las macros	0	No observadas ¹⁾	-
Adaptabilidad radios	+ Buena durante el apilado -Punteo de los radios (panel complejo)	1	- Baja pegajosidad	0	+ Buena durante el apilado - Riesgo potencial debido a la baja flexibilidad - Punteo de radios (panel complejo)	1
Desmoldeo	- Ligero springback en la dirección opuesta a la esperada ²⁾		- Delaminaciones en el radio		No observado ¹⁾	
Aspecto superficial	- Pequeñas manchas oscuras en cara útil de ambos paneles relacionadas con los malos resultados en el ensayo de estanqueidad	1	- Abundantes manchas oscuras en cara útil correlacionadas con los malos resultados en el ensayo de estanqueidad en ambos paneles	0	- Pequeñas manchas oscuras en la cara útil del panel complejo relacionadas con los malos resultados de estanqueidad + Buenos resultados estanqueidad panel simple	2
Recanteado	No realizado	-	No realizado	-	No realizado	-
<p>1) No observado/a implica que no se recibieron comentarios al respecto por parte de la planta durante el proceso de fabricación y por tanto no se dispone de evidencias durante los ensayos</p> <p>2) No se disponen de medidas acerca del springback</p>						
EVALUACIÓN	1		3		2	

Figura 8 Comparativa de materiales autoadhesivos en función de los parámetros de fabricación



4 Análisis de resultados

La inspección dimensional realizada sobre los paneles fabricados consistente en la medición de espesores en zona de pistas (zona de laminado sólido) permitió constatar que para todos los materiales tuvo lugar una reducción de espesores de capa curada respecto al teórico esperado lo que se tradujo en una pérdida de espesor global.

Estos resultados se pueden correlacionar con los porcentajes de resina medidos durante el ensayo de determinación del %fibra/resina/huecos. Para los tres materiales se registraron porcentajes de resina por debajo de los valores teóricos suministrados por el fabricante.

Cabe pensar que ambos resultados están íntimamente relacionados entre sí y con la fluidez de la resina a mayor fluidez peores resultados de espesores/%resina.

Los espesores obtenidos también se encuentran influenciados por el uso de bandas rugosas, habiéndose detectado espesores inferiores en aquellas zonas en las que la se había dispuesto banda rugosa en el contorno. La utilización de este tipo de elemento de utillaje auxiliar colocado en las inmediaciones del borde de las piezas, a pesar de resultar por lo general beneficiosa a la hora de minimizar defectos como el recogimiento de núcleos en este caso logra un efecto no deseado.

La explicación se haya en que su presencia minimiza el flujo de resina desde los bordes de la pieza hacia las zonas de rampa por lo que la resina que se acumula en estas zonas ha fluido no desde el borde sino desde una zona situada más al interior del laminado, que además es coincidente con la zona donde se realiza la inspección dimensional que es la que vería más reducido su espesor. En ausencia de banda rugosa, el flujo de resina hacia las zonas de rampa tiene lugar desde los bordes de la pieza hacia dentro hasta la transición con el núcleo, lo que hace que la disminución de espesor experimentada en la zona donde se inspecciona dimensionalmente la pieza sea menor.

El análisis de las micrografías resulta clave en la determinación de la calidad interna de los paneles. La inspección estuvo orientada a la observación de las defectologías más habituales: porosidad, arrugas...Un resumen de la misma aparece en la Figura 9.

A destacar que el material que en fabricación presentó peor pegajosidad o "tacking" es el que permitió peor adaptación a la zona de radios lo que se tradujo en la aparición de delaminaciones en esa zona tras el curado. Cabe por tanto esperar que un buen "tacking" sea una cualidad deseable en este tipo de materiales sin embargo un exceso del mismo se puede traducir en un flujo excesivo de resina que origine acumulaciones no deseadas como las que aparecen al inicio de la zona de rampa.

En cuanto a los niveles de porosidad presentados, otro de los factores clave en cuanto a calidad interna de una pieza, la observada en todos los paneles durante la inspección micrográfica no resulta significativa puesto que no es detectable por ultrasonidos y no comprometería el comportamiento estructural de las piezas.

Asimismo los resultados para el volumen de huecos en las zonas laminadas resultan aceptables.

El aspecto microográfico de los paneles también puede relacionarse con su comportamiento en las inspecciones de estanqueidad y ultrasonidos. Dicha correlación se resume en la Figura 10.

	MATERIAL I	MATERIAL II	MATERIAL III
Inspección UT. Paneles Simples	Resultado aceptable	Resultado aceptable	Resultado aceptable
Inspección UT. Paneles Complejos	Resultado aceptable	No aceptable (Atenuación inaceptable detectada en el radio)	Resultado aceptable (aceptable a pesar de las atenuaciones detectadas en el laminado de la piel y del radio)
Correlación de la inspección por ultrasonidos con la inspección micrográfica	Laminado (no presenta porosidad)	Porosidad en el laminado (no detectada por ultrasonidos)	Porosidad en el laminado (detectada por ultrasonidos)
	Porosidad en radio (no detectada por ultrasonidos)	Porosidad /delaminación en radio (detectada por ultrasonidos)	Porosidad en radio (detectada por ultrasonidos)
	Porosidad en zona de rampa (zona no inspeccionada por ultrasonidos)	Porosidad en zona de rampa (zona no inspeccionada por ultrasonidos)	Porosidad en zona de rampa (zona no inspeccionada por ultrasonidos)
Correlación de la inspección por ultrasonidos con el ensayo de estanqueidad	Panel simple : aceptable	Panel simple : no aceptable	Panel simple : aceptable
	Panel complejo: No aceptable. Fuga generalizada	Panel complejo: No aceptable. Fuga generalizada	Panel complejo: aceptable. Fugas dentro de lo admisible
	Porosidad No detectada por ultrasonidos	Porosidad / Delaminación Detectada por ultrasonidos	Porosidad Detectada por ultrasonidos pero aceptable
EVALUACIÓN	1	3	2

Figura 9 Evaluación de la calidad interna en base a la inspección micrográfica

CARACTERÍSTICA	MATERIAL I	MATERIAL II	MATERIAL III
Porosidad	Laminado (no presenta porosidad) Porosidad en radio Porosidad en zona de rampa	Ligera porosidad en laminado Porosidad en radio Porosidad en zona de rampa	Porosidad en laminado Porosidad en radio Porosidad en zona de rampa
Delaminación	No observada	Observada en el radio del panel complejo	No observada
Ondulación de fibras, arrugas	No observadas excepto: - Cerca de los límites del núcleo y las áreas de chafalán - Radio (panel complejo)	No observadas excepto: - Cerca de los límites del núcleo y las áreas de chafalán - Radio (panel complejo)	No observadas
Orientación de las fibras	Correcta	Correcta	Correcta
Telegraphing	Observado en todos los paneles	Observado en todos los paneles	Observado en todos los paneles
Rotura de celdillas	No observada. (Solo colapso de núcleo en el panel complejo en la zona donde no se dispuso banda rugosa)	No observada. Solo alguna rotura/separación de las paredes de las celdillas en el panel complejo	No observada
Acumulaciones de resina	Observada entre el laminado y el núcleo (inicio de la zona de rampa)	No observada (ligera presencia entre el laminado y el núcleo al inicio de la zona de rampa)	Observada entre el laminado y el núcleo (inicio de la zona de rampa)
EVALUACIÓN	1	3	2

Figura 10 Correlación UT con estanqueidad y micros



Como parte de la evaluación de las propiedades adhesivas de los preimpregnados se analizó la formación de menisco por parte de la resina del prepreg en la interfase de unión piel/núcleo. La calidad de dicha unión es altamente dependiente de la forma y el tamaño del menisco creado.

Una curva de resina se forma en la interfase entre el laminado y las paredes de las celdillas del núcleo honeycomb a medida que la viscosidad desciende con el aumento de la temperatura que tiene lugar durante el proceso de curado. La resina experimenta un fenómeno de capilaridad formándose un menisco entre la piel y la celdilla del núcleo "honeycomb". La resina cura en esta forma originándose un arco o curva denominado menisco.

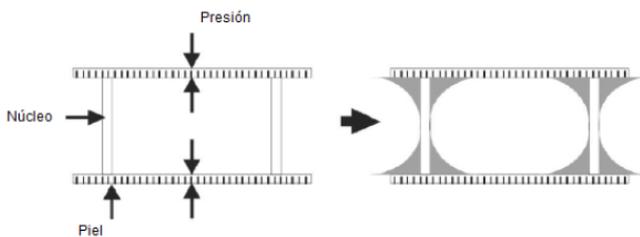


Figura 11 Formación de meniscos en paneles sandwich

	MATERIAL I		MATERIAL II		MATERIAL III	
	Panel simple	Panel complejo	Panel simple	Panel complejo	Panel simple	Panel complejo
Formación menisco resina	+ Buena formación (caras bolsa & útil)	+ Formación de menisco (caras bolsa & útil)	- Pobre formación de meniscos (caras bolsa & útil)	- Pobre formación de meniscos (caras bolsa & útil)	- Pobre formación de meniscos (caras bolsa & útil)	+ Inconsistente formación de meniscos
	+ Misma altura en meniscos izquierdo y derecho	- Diferente altura en meniscos izquierdo y derecho	- Diferente altura en meniscos izquierdo y derecho	- Diferente altura en meniscos izquierdo y derecho	+ Misma altura en meniscos izquierdo y derecho	- Diferente altura en meniscos izquierdo y derecho
Distorsión de las celdillas	+ Sin distorsión en las celdillas	- Distorsión global y telegraphing	+ Sin distorsión en las celdillas	- Distorsión global y telegraphing	+ Sin distorsión en las celdillas	- Distorsión global y telegraphing
Sangrado de resina	- Elevado sangrado de resina de cara bolsa a cara útil	- Elevado sangrado de resina de cara bolsa a cara útil	- No existe flujo de resina (pobre formación de menisco)	- No existe flujo de resina (pobre formación de menisco)	- No existe flujo de resina (pobre formación de menisco)	- Elevado sangrado de resina de cara bolsa a cara útil
EVALUACIÓN	1		3		2	

Figura 12 Evaluación de la calidad de la interfase piel/núcleo

La calidad de la unión en la interfase piel/núcleo tiene relación directa con los resultados de los ensayos de pelado de tambor efectuados sobre los paneles, sin embargo al presentar ambos paneles alturas de núcleo inferiores a la recomendada en la normativa de ensayo empleada UNE EN 2243-3 [3] >12mm) los resultados obtenidos no resultan del todo representativos ya que el modo de fallo presenta una rotura parcial del núcleo. En los resultados de resistencia obtenidos para esos modos de fallo es más significativo el aporte de resistencia del núcleo en lugar de la adhesividad aportada por la unión laminado/núcleo.

El otro ensayo mecánico que arroja información acerca de la calidad de la unión piel/núcleo es el ensayo de tracción plana efectuado a los paneles de control de procesos. Se consideró modo de fallo aceptable aquel que se produjo por el núcleo y no por la interfase, al implicar que la resistencia de la unión excede la resistencia del material del core por lo que el fallo nunca sucedería por la interfase antes que por el núcleo.

Para el resto de ensayos mecánicos las prestaciones observadas para los distintos materiales alternativos fueron similares.

Las comparativas recogidas en las Figuras 9, 10, 11, fueron extraídas de [9]. Dicho documento recoge los resultados completos de los distintos ensayos sin embargo no se incluyen nombres comerciales de los distintos prepreps ni sus fabricantes. Esta información es de carácter confidencial y se encuentra recogida en el informe de referencia interna Alestis [10].

5 Conclusiones

A la vista de la información previamente presentada podrían extraerse las siguientes conclusiones acerca de los preimpregnados autoadhesivos:

- Se trata de materiales altamente sensibles al factor presión durante el curado. La presión teórica del ciclo de curado actual se encuentra muy próxima al límite de presión superior admisible en todos los materiales. Una presión excesiva durante las primeras fases del curado puede traer consigo una fluidez excesiva de la resina. Del repaso a los parámetros teóricos de ciclo propuestos por los distintos fabricantes, se observó que de los tres materiales, aquel que presentó una mayor reducción de espesores/%resina fue aquel en el que el fabricante proponía realizar un primer escalón de calentamiento o "dwell" sin presión. El haber sometido a la resina a presión desde el arranque del ciclo habría ocasionado una fluidez excesiva de la misma que se tradujo en una migración de ésta hacia la zona de crece
- El exceso de presión también puede relacionarse con la aparición de defectologías como el "telegraphing" o el recogimiento de núcleos. El uso de bandas rugosas para mitigar estos efectos resulta contraproducente ya que se originan mayores pérdidas de espesor de laminado en las zonas de las que se utilizan.
- La falta de pegajosidad puede llevar consigo dificultad de adaptación del prepreg a zonas de mayor complejidad como zonas de radios lo que puede derivar en delaminaciones y por tanto malos resultados en inspecciones ultrasónica y de estanqueidad mientras que el exceso de la misma favorece la fluidez excesiva de la resina que puede originar acumulaciones no deseadas.
- El pobre comportamiento a estanqueidad presentado por los paneles fabricados con estos materiales también se halla relacionado con las fugas de resina. Una posible causa del aumento de las mismas podría estar en la incompatibilidad entre los materiales superficiales (adhesivo y malla de bronce) con el preimpregnado autoadhesivo. No obstante, esta hipótesis habría de ser demostrada

Referencias

[1] Department of Defense Handbook. (2002). Chapter 3.3.3 Destructive tests. MIL Handbook 17 Volume 3. Polymer Matrix



Composites Materials: usage, design and analysis. (Página 130).

[2] UNE EN 2243-3. Material aeroespacial. Adhesivos estructurales. Métodos de ensayo. Parte 3: ensayo de pelado metal-núcleo de nido de abeja. (Versión oficial EN 2243-3:1991).

[3] UNE EN2564 Revisión 99. (Fecha de edición: 1999-04-22) Material aeroespacial. Laminados de fibra de carbono. Determinación del contenido en fibra, resina y tasa de porosidad.

[4] UNE EN 2563 Material aeroespacial. Plásticos reforzados de fibras de carbono. Estraficados unidireccionales. Determinación de la resistencia aparente al cizallamiento interlaminar. (1997)

[5] AITM1-0025. Fiber reinforced plastics. Flatwise tensile test of composite sandwich panel. (1994)

[6] UNE EN 2597. Material aeroespacial. Plásticos reforzados de fibra de carbono. Laminados unidireccionales. Ensayo de tracción perpendicular a la dirección de las fibras. (1999)

[7] AITM1-0018 Airbus Test Method. Fibre reinforced Plastic. Sandwich flexural test 4-point bending (2004)

[8] UNE EN 2850 Tipo B. Aerospace series. Carbon fibre thermosetting resin unidirectional laminates- Compression test parallel to fibre direction.

[9] Mudarra Medina Isabel M^o (2015) Proyecto Final de Carrera. Ingeniería Aeronáutica. Estudio para la selección de un material autoadhesivo para la fabricación de paneles sándwich en estructuras aeronáuticas.

10] SE7305-3-15-01-14-011-1_FPQ_Test Report
Autoadhesive prepregs 180° cure

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi compañera dentro del Departamento de Materiales y Procesos de Alestis Marta M^o Acosta Rodríguez quien lideró el Proyecto Autoadhesivo desde su arranque en 2013 por su seguimiento durante las fases de fabricación y su trabajo de análisis y presentación de resultados.

Agradecer también a mi responsable Carlos Saleiro por el apoyo prestado y consejos para el desarrollo de este artículo.

