

M. Salvado<sup>a</sup>, M. Marcos<sup>b</sup>, F.J. Botana<sup>c</sup>, B.M. Simonet<sup>d</sup><sup>a,b</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, E.S.I., Avda. Universidad de Cádiz, 10, 11519 Puerto Real, Cádiz, España<sup>c</sup> Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, E.S.I., Avda. Universidad de Cádiz, 10, 11519 Puerto Real, Cádiz, España<sup>d</sup> Nanotures S.L. Parque Tecnológico Agroindustrial, C/ de la Inteligencia, nº 18, 11591 Guadalcazín, Jerez de la Frontera, Cádiz, España

## Proceso de fabricación de estructuras de materiales compuestos de fibra de carbono mediante moldeo por compresión asistido por membranas

### 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:

Polímero reforzado con fibra de carbono  
Curado

Fuera de Autoclave

Los principales objetivos que se persiguen con este trabajo de investigación son buscar nuevas vías de reducción de costes de fabricación de materiales compuestos, automatizar los procesos y mejorar la eficiencia energética buscando alternativas al uso de autoclave, cumpliendo siempre los requisitos de calidad. Para ello, se estudia un proceso de curado fuera de autoclave mediante un sistema innovador de curado automático y rápido de piezas de materiales compuestos para los sectores aeronáutico, automoción y construcción.

El procedimiento permite el curado de preimpregnados de diversos materiales y geometrías. El proceso incluye aporte de temperatura mediante placa calefactable con resistencias eléctricas, presión y vacío regulables a través de un compresor de aire, y refrigeración mediante circuito a través de placas mecanizadas. La principal característica innovadora de este sistema es el aporte de presión con aire comprimido a la pieza mediante una membrana de silicona moldeable y reutilizable, lo que permite ampliar el campo de estudio a elementos complejos salvando la limitación actual de las prensas de platos calientes, y sin la necesidad de colocar contraútil. Se fabrican piezas de CFRP curada en este nuevo sistema, posteriormente se comparan sus propiedades con piezas curadas en autoclave y se obtienen propiedades similares, además se reducen considerablemente los materiales auxiliares. Se puede concluir que dicho sistema mejora la eficiencia energética, disminuye los costes y optimiza los tiempos.

## Process for manufacturing carbon fiber composite structures by membrane-assisted compression molding

### ABSTRACT

#### Palabras clave:

Carbon fiber reinforced polymer  
Curing

Out of Autoclave

The main objectives of this research work are to find new ways of reducing costs in the manufacture of composite materials, automate processes and improve energy efficiency by looking for alternatives to the use of autoclave, always meeting the quality requirements. For this, an out of autoclave curing process is studied through an innovative system of automatic and fast curing of composite parts for the aeronautic, automotive and construction sectors.

The process allows the curing of prepreps of various materials and geometries. The process includes the provision of temperature by heating plate with electric resistances, pressure and vacuum adjustable through an air compressor, and cooling through circuit through mechanized plates. The main innovative feature of this system is the pressure supply with compressed air to the piece by means of a moldable and reusable silicone membrane, which allows to extend the field of study to complex elements saving the current limitation of hot plates presses, and without the need to place counter mold. CFRP cured parts are manufactured in this new system, then their properties are compared with autoclave cured parts and similar properties are obtained, and auxiliary materials are considerably reduced. It can be concluded that this system improves energy efficiency, reduces costs and optimizes times.

## 1 Introducción

Los polímeros reforzados con fibra de carbono 'CFRP' se usan, fundamentalmente, en aplicaciones estructurales guiadas por la reducción de peso, como es el caso de la industria aeronáutica o la aeroespacial. Estos materiales se caracterizan por poseer muy buenas propiedades mecánicas específicas [1], en comparación con las aleaciones metálicas tradicionales, como pueden ser las derivadas del aluminio.

Las principales tecnologías sobre los procesos de fabricación empleadas en los materiales CFRP son: autoclave, resin transfer moulding 'RTM', prensa de platos calientes, hand lay-up y out of autoclave 'OOA' [3-4]. Dichas tecnologías se encuentran ya maduras, pero presentan una serie de inconvenientes frente a la competitividad de dichos materiales en el mercado.

Se puede analizar que entre los diferentes procesos de curado, el método de autoclave es el más estudiado y empleado mientras que los métodos fuera de autoclave son los que tienen menor producción científica, Figura 1. El proceso de fabricación en autoclave presenta una serie de inconvenientes como son el alto coste del equipo y de los materiales auxiliares, el alto coste de producción, una tasa de producción baja provocando cuellos de botella y tamaño de piezas limitado.

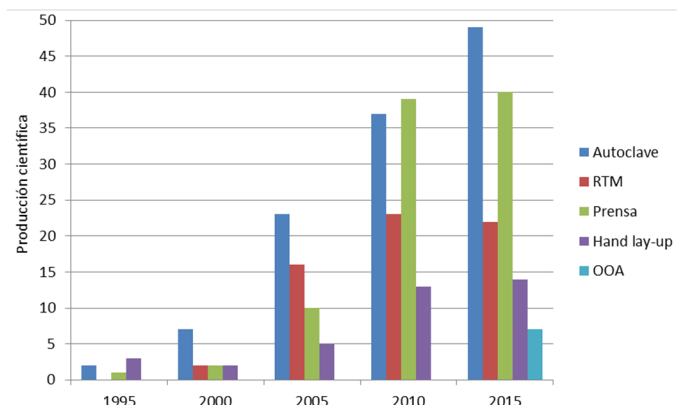


Figura 1. Análisis cuantitativos de los procesos de fabricación de CFRP.

Los principales objetivos que se persiguen con este trabajo son buscar nuevas vías de reducción de costes de fabricación de materiales compuestos, automatizar los procesos y mejorar la eficiencia energética buscando alternativas al uso de autoclave, siempre cumpliendo los requisitos de calidad [2]. Para ello se propone diseñar y validar un nuevo sistema alternativo al autoclave que optimice los tiempos de operación, reduzca considerablemente los materiales auxiliares y aplique la presión mediante una membrana de silicona reutilizable y moldeable, lo que permitirá ampliar el campo de estudio a elementos complejos salvando la limitación actual de las prensas de platos calientes sin la necesidad de colocar contraútil.

La principal característica de este novedoso sistema denominado *Fabricación Asistida por Membranas 'FAM'* es la presión ejercida con aire comprimido a la pieza a través de

una membrana de silicona moldeable además del aporte de temperatura regulable para el curado.

## 2 Experimental

### 2.1 Materiales

El material seleccionado es el polímero reforzado con fibra de carbono PREPEG GG 204T IMP505L 46% H100 CM con las siguientes características: tejido de fibra de carbono preimpregnado en resina epoxi, para uso general. Textura: sarga 2x2. Peso superficial de la fibra:  $193 \pm 8$  g/m<sup>2</sup>. Peso superficial del prepreg:  $386 \pm 20$  g/m<sup>2</sup>. Contenido en resina:  $50 \pm 3\%$ . Temperatura de curado:  $120 \pm 5$  °C. Propiedades físicas del laminado: Espesor por capa:  $0,260 \pm 0,020$  mm. Volumen de fibra: 42%. Almacenaje: 1 año a -18°C máximo. En la Tabla I, se recogen los parámetros de curado para este material [5].

Tabla I. Ciclo de curado según normativa aeronáutica

VARIABLES		Nota
Presión	90 +10/-5	3
Vacío (mm Hg)	550 a 600	1
Tiempo de calentamiento (min.)	25 a 160	2
Temperatura de estabilización (°C)	124 ± 3	
Tiempo de estabilización (min.)	90 a 105	
Tiempo de enfriamiento (min.)	25	
Temperatura de desmoldeo (°C)	60	

#### Notas

- Ventilar al exterior a los 20 PSIG.
- Máxima velocidad de subida a 4 °C a. Intervalo 54 °C a 88 °C mínima velocidad de subida 1,2 °C/min b. Intervalo 88 °C a 110 °C mínima velocidad de subida 0,6 °C/min c. Intervalo 110 °C a 124 °C mínima velocidad de subida 0,2 °C/min.
- Se permite una caída natural de presión, durante una etapa de enfriamiento manteniendo un mínimo de 58 PSIG.

Los materiales auxiliares empleados para la fabricación son:

- Bolsas de vacío, que permiten la estanqueidad de la pieza actuando como contramolde para la compactación durante la fase de laminado de la pieza, de gran adaptabilidad y resistentes a los diversos tipos de resinas. Con las siguientes características: espesor de 75 micras, resistencia térmica hasta 215 °C y con elongación hasta 500 %.
- Masilla de sellado o tacky tape con alto poder de fijación, para el cierre de la bolsa de vacío al molde para la compactación durante la fase de laminado. Proporciona una superficie de sellado perfecta, es fácil de retirar y no deja residuos en el molde. Resistencia térmica hasta 200°C.
- Film separador, para asegurar la separación entre las diferentes partes, con elongación hasta 420% y resistencia térmica hasta 260°C.
- Manta de absorción de poliéster para conseguir presión de vacío en toda la superficie de la pieza, con una resistencia térmica hasta 190 °C.
- Retenedor de borde, tiras de corcho de 2,4 mm de espesor y 12 mm de ancho que sirven para delimitar el contorno de las piezas fabricadas y evitar así, la pérdida de resina. Los retenedores disponen de una cara adhesiva para fijación de



las tiras en las pestañas de los moldes. Simplemente se retira el papel y se fija con un poco de presión.

vi. Desmoldeante líquido (marbocote 227-CEE) que se aplica varias capas en la superficie útil para poder desmoldear fácilmente la pieza cuando finaliza el proceso de curado.

Para el aporte de presión se analizan diferentes tipos de membranas, finalmente se utiliza la membrana reutilizable de silicona curada y se prueba con dos espesores diferentes, plancha de silicona translúcida FDA 40°SH ( $\pm 5$ ), ancho 1200 mm, espesores 1 y 1,5 mm ( $\pm 0,2$  mm), con las siguientes características: densidad 1,14 g/cm<sup>3</sup>, buena resistencia térmica hasta los 200 °C, dureza Shore A 62, resistencia a la tracción 11 MPa, alargamiento a rotura 385 %, módulo al 100% de alargamiento 2,2 MPa, desgarrar 21 KN/m y resiliencia 53%.

## 2.2 Equipos

El Sistema de Fabricación Asistida por Membranas 'FAM' de CFRP, Figura 2, es un nuevo sistema alternativo al proceso de curado dentro de Autoclave para piezas con dimensiones máximas de 500x500x8 mm. El sistema está formado principalmente por un conjunto de placas de aluminio 5083 mecanizadas sobre una estructura metálica, en forma de prensa, cada una de dichas placas aporta su función: calefactora, refrigeradora y presión de curado. Las principales características de este nuevo sistema son, Tabla II:

**Tabla II.** Características técnicas del sistema FAM.

Dimensiones	2000x1000x1000 mm
Peso	1 Tn
Potencia	8,23 KW
Consumo	1,004 €/ h
Autómata	Relé Zelio 100-240v e/s 12

El sistema de refrigeración está formado por: un aroenfriador de agua ABA46, una bomba inline de rotor seco con variador de velocidad, un depósito de inercia de 500 litros, instalación de tubería de cobre, valvulerías y accesorios.

El sistema de calefacción está formado por un conjunto de 12 resistencias eléctricas de cartucho de dimensiones 15x1000 mm y de 600 W de potencia, colocadas en el interior de la placa metálica. La temperatura máxima alcanzable es de 250 °C.

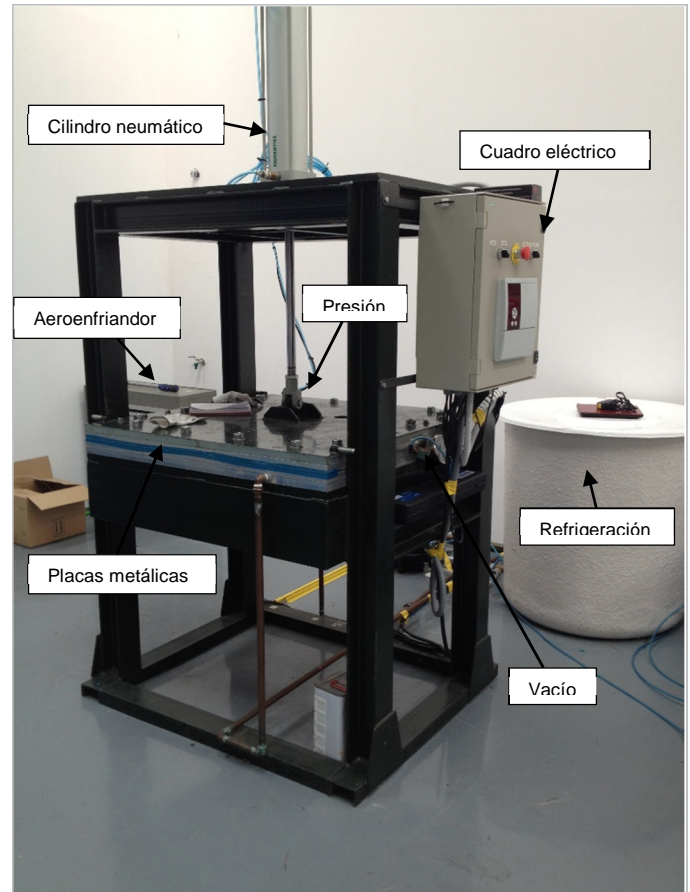
El sistema de presión se realiza a través de un compresor de pistón ABAC con las siguientes características: aire aspirado 222 l/min, depósito 50 litros, presión máxima 8 bar y potencia motor 2 HP. Para el sistema de presión de vacío se usa una bomba de vacío regulable con un vacuómetro de glicerina 1/0 bar, colocado en la entrada del tubo a la placa metálica.

La apertura y cierre de la placa superior se lleva a cabo a través de un pistón neumático de 25 mm de diámetro y 500 mm de carrera conectado al circuito de aire comprimido.

A través del cuadro eléctrico con su relé Zelio se conecta y se programa todo el sistema para conseguir programar el ciclo de curado completo: calefacción, refrigeración y presiones.

El registro de los valores de presión y temperatura durante el proceso de fabricación se lleva a cabo a través de un

registrador de datos AKO-15782 y un software para la gestión y monitorización SOFTRegis.H. Se coloca 1 sensor PT100 en la superficie útil y 4 termopares tipo K colocados dos en superficie útil y otros dos directamente en pieza, estos valores se registran cada minuto y luego se extrae a través de una hoja Excel.



**Figura 2.** Sistema de Fabricación Asistida por Membranas 'FAM' de CFRP.

## 2.3 Procedimientos

El procedimiento permite el curado de preimpregnados de diferentes tipos de materiales compuestos en elementos con cualquier geometría. El proceso incluye aporte de temperatura, presión y vacío regulables. Las principales características son el aporte de presión a la pieza a través de una membrana de silicona reutilizable y moldeable, así como el aporte de calor a través de resistencias eléctricas y por último vacío en la zona de curado. El sistema mejora la eficiencia energética, disminuye costes y reduce los tiempos.

El aporte de temperatura se transmite mediante resistencias eléctricas desde el útil hacia la parte superior cumpliendo la rampa de calentamiento, una temperatura constante con un margen de tolerancia de  $\pm 5$  °C y la rampa de enfriamiento según normativa aeronáutica vigente aportando de esta forma el calor a la pieza de fibra de carbono. Además, el contraútil no es calefactable, aunque va alcanzando progresivamente temperatura debido a la transmisión del calor por conducción. La rampa de calentamiento (°C/min) se consigue programando las resistencias mediante pulsos (on-off) y variando el tiempo. Una vez que finaliza la rampa de subida y alcanza la



temperatura de curado, comienza la etapa de estabilización térmica durante el tiempo correspondiente, también de la misma forma que la rampa de calentamiento, mediante el sistema de pulsos se consigue mantener la temperatura de curado dentro de la tolerancia permitida por las especificaciones del material ( $\pm 5$  °C). Por último, finalizado el tiempo de curado se apagan las resistencias y se enciende el circuito refrigerador, dicho refrigerante circula por otra placa mecanizada que se encuentra unida a la placa calefactora. Con este circuito, se consigue realizar dentro de especificaciones de curado, la rampa de enfriamiento (°C/min). La pieza se retira del sistema de curado cuando alcanza la temperatura de 60°C, temperatura mínima que se permite desmoldear según normativa aeronáutica.

El aporte de presión se ejerce mediante una bomba de aire comprimido consiguiendo un aire estático entre la placa contraútil mecanizada y la membrana moldeable, por tanto dicha cavidad queda estanca, posteriormente a través de una válvula colocada en la parte superior se le inyecta aire comprimido. El aire comprimido a una presión (bar) determinada infla la cavidad interna aplicando la membrana dicha presión sobre la pieza. Al tratarse de una membrana de silicona moldeable y de poco espesor, se adapta perfectamente a la forma de la pieza y consigue aplicar la presión de curado en toda la superficie de la pieza. A su vez, la membrana consigue sellar y obtener la cámara de vacío necesaria para curar la pieza y evitar cualquier tipo de porosidad o exceso de resina. La placa útil se encuentra mecanizada de forma que se conecta una toma de vacío, consiguiendo presión de vacío en la zona de curado tal como requiere el proceso de fabricación.

La apertura y cierre del sistema de la placa superior se realiza a través de un cilindro neumático, una vez que se cierra el sistema se asegura el cierre hermético apretando todos los tornillos que se encuentran fijados en las placas inferiores y atraviesan las placas superiores.

El curado en la pieza de CFRP se lleva a cabo de la siguiente manera, en primer lugar se levanta la placa superior mediante el cilindro neumático, se aplica en la superficie útil cuatro capas de marbocote cada 15 minutos, se coloca la pieza de CFRP, se conectan los sensores y termopares, sobre la pieza se coloca un film separador y finalmente la manta de absorción, se cierra la placa superior, se aprietan todos los tornillos para conseguir la estanqueidad y se activa el sistema.

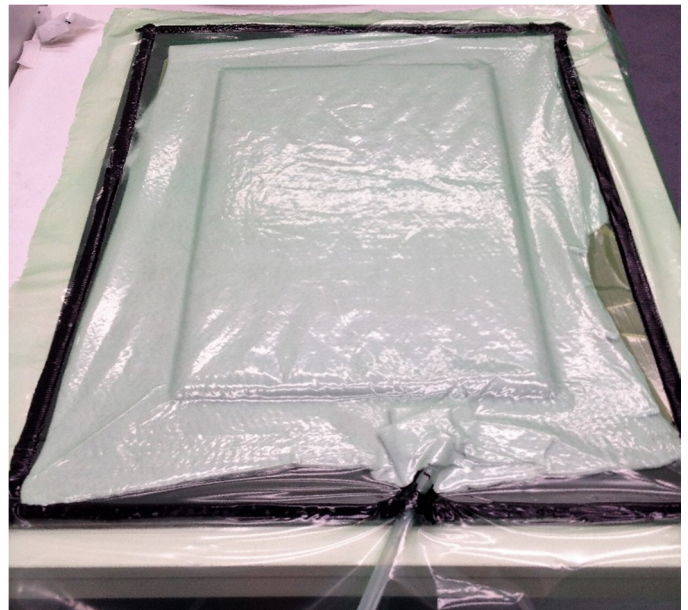
### 3 Resultados y discusión

Se fabrican seis piezas planas de CFRP aeronáuticas, denominadas *suplementos* de dimensiones 500x300 mm, tanto de bajo espesor como de alto espesor. Las variables empleadas son tanto el espesor con valores de 3 y 9 mm como la presión de curado de valores de 0, 3.5 y 6 bar. La presión de vacío siempre se mantiene activa para el curado de todas las probetas. Se consigue una serie de probetas para poder analizar a través de los datos experimentales y obtener un estudio del efecto de la temperatura sobre su espesor y de sus propiedades variando la presión. A continuación, se puede observar en la Tabla III las probetas que se fabrican para llevar a cabo el estudio experimental.

**Tabla III.** Configuración de las probetas de CFRP fabricadas.

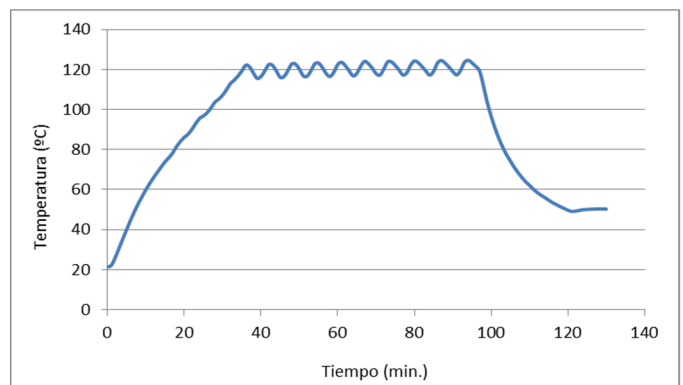
Probeta	Espesor	Presión de curado
FAM-1601	3 mm	0 bar
FAM-1602	3 mm	3,5 bar
FAM-1603	3 mm	6 bar
FAM-1604	9 mm	0 bar
FAM-1605	9 mm	3,5 bar
FAM-1606	9 mm	6 bar

En primer lugar, se corta el prepeg y se van apilando el número de capas necesario para obtener el espesor deseado, cada cuatro capas de laminación se somete la pieza a compactación durante 15 minutos, Figura 3, para asegurar una buena compactación entre capas.



**Figura 3.** Piezas de CFRP compactando durante el proceso de laminado.

En segundo lugar, se coloca el laminado en el sistema FAM para proceder a la fase de curado. En la Figura 4, se puede observar el registro de valores de temperatura cada minuto a través del PT100 colocado en la placa útil durante el proceso de curado de la pieza. Estos valores cumplen las especificaciones requeridas por el material para el curado.



**Figura 4.** Registro del PT100 colocado en la placa útil.

Además, se realiza un control complementario de temperatura a través de cuatro termopares tipo K. Se colocan T1 y T2 en la probeta mientras que T3 y T4 se colocan en la cara útil de



curado, Figura 5. De esta forma, se consigue un control y registro uniforme de la placa tanto en la cara útil como directamente en la pieza. A su vez se mide la transferencia de calor sobre el carbono en función del espesor.

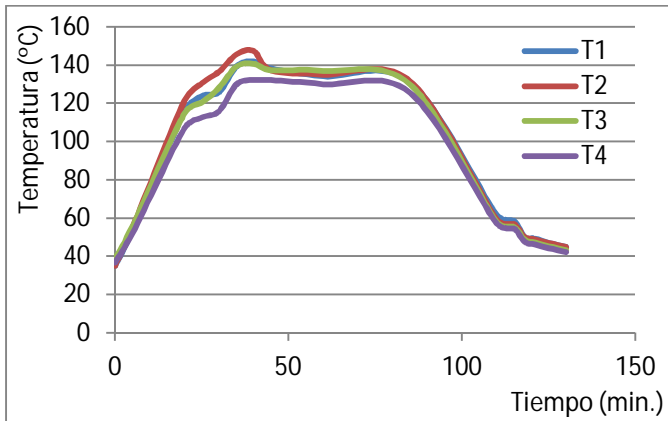


Figura 5. Registro de los cuatro termopares tipo k.

Una vez finalizado el proceso de curado en el sistema FAM, se desmoldea a 60°C, se mecanizan los contornos y se ha completado el proceso de fabricación, Figura 6.

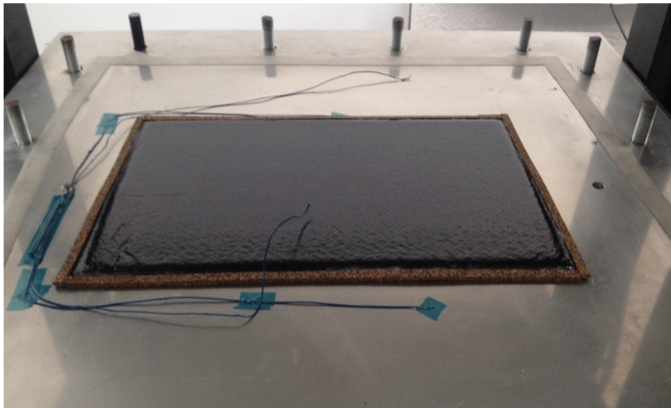


Figura 6. Probeta de CFRP curada en el sistema FAM.

Para validar nuestro prototipo de sistema alternativo al autoclave, se necesita caracterizar las piezas fabricadas. Se muestran los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio acreditado de las probetas fabricadas mediante el sistema FAM. En las figuras 7, 8, 9, 10 y 11 se pueden observar los datos de los ensayos establecidos frente a las variables de fabricación determinadas, como son la presión de curado y espesor de la probeta.

Las probetas de tracción de 9 mm de espesor fabricada a 3 y 6 bar presentan una tipología de rotura fuera de norma de ensayo establecida EN2561, Figura 7.

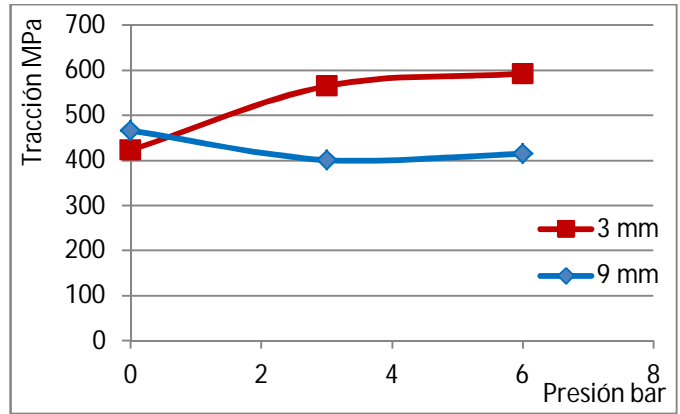


Figura 7. Resultados de los ensayos de tracción de las probetas FAM 1601 – 1606.

Cómo se puede observar, Figura 8, si se aumenta la presión de curado, aumenta el volumen de fibra, disminuyendo el volumen de resina y por tanto, mejorando el módulo de la pieza.

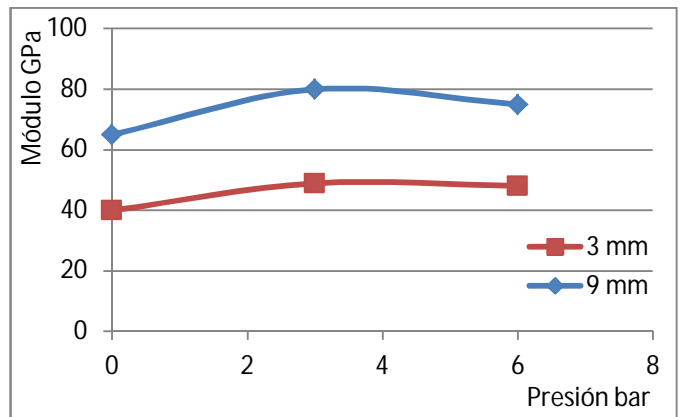


Figura 8. Resultados de los ensayos de módulo de las probetas FAM 1601 – 1606.

Los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de ILSS son los esperados, es decir, los valores aumentan en función que se aumenta el espesor de la probeta y la presión de curado, Figura 9.

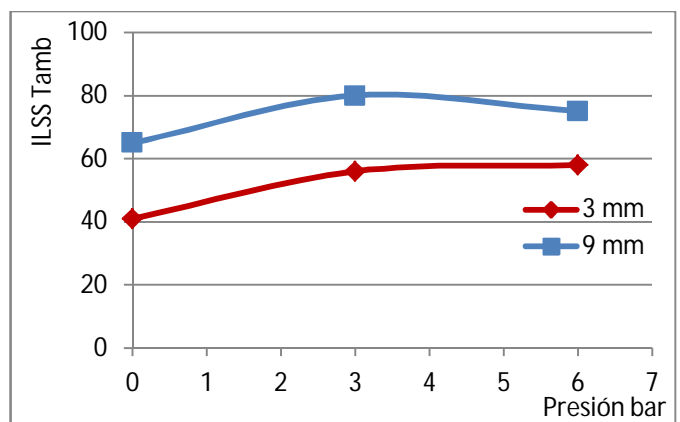
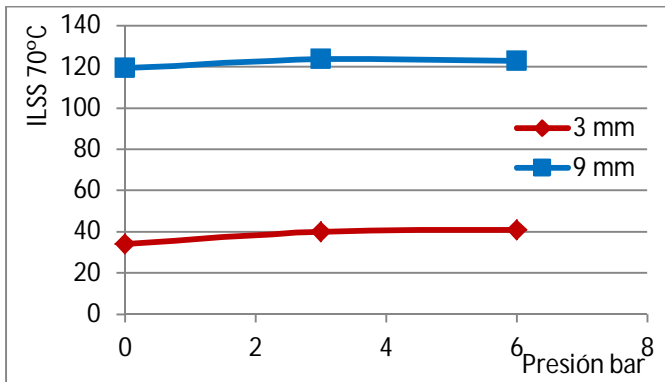


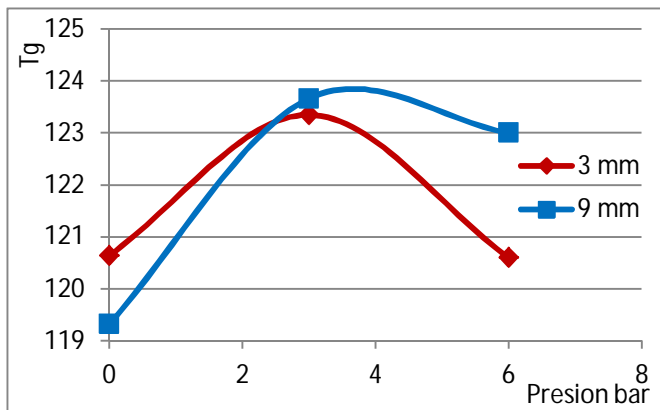
Figura 9. Resultados de los ensayos de ILSS a temperatura ambiente de las probetas FAM 1601 – 1606.





**Figura 10.** Resultados de los ensayos de ILSS a 70°C de las probetas FAM 1601 – 1606.

El valor de Tg oscila en  $\pm 2$  °C, Figura 11, la Tg no depende del espesor ni de la presión de curado, si depende de la temperatura de curado que es 120°C y esa variación puede ser porque no es totalmente uniforme en la zona de curado, como se puede observar en los valores registrados con los termopares tipo K, Figura 5.



**Figura 11.** Resultados de los ensayos de DMA de las probetas FAM 1601 – 1606.

A continuación, en la Tabla IV, se recogen los resultados del volumen de poros, resina y fibra en las probetas FAM 1601-1606.

Probeta	Densidad	Vo %	Vf %	Vr %
FAM01	1,402	2,5	41,92	55,58
FAM02	1,451	1,17	42,86	58,32
FAM03	1,463	1,86	43,51	58,35
FAM04	1,435	2,46	47,34	50,2
FAM05	1,442	1,3	41,11	60,19
FAM06	1,458	0,89	44,57	56,32

**Tabla IV.** Resultados de volumen de poros, resina y fibra.

Se aprecian de forma considerable las mejoras en las propiedades del material conforme aumenta el valor de la presión de curado sobre la membrana, ya que mejora compactación entre capas, tiene mayor volumen de fibra, elimina mejor la porosidad y también consigue eliminar el sobrante de resina.

Los resultados de los ensayos representan una muy buena reproducibilidad de valores de rotura en las series de cada tipo de ensayo.

## 4 Conclusiones

Este prototipo FAM cumple con los requisitos del ciclo de curado para material CFRP aeronáutico según normativa del material seleccionado. Y además, se mejoran las rampas de calentamiento y enfriamiento en los ciclos de curado reduciendo considerablemente los tiempos comparándolos con los tiempos en Autoclave. También se ha comprobado que la presión aplicada tiene un efecto positivo sobre las propiedades del composite siendo aconsejable trabajar a una presión de 3,5 bar para probetas de espesores comprendidos entre 3 y 9 mm.

Este nuevo sistema FAM con las mismas prestaciones que un autoclave influye positivamente reduciendo los costes de inversión, costes de operación y tiempos de operario.

La membrana de silicona tiene una relación directa con la disminución considerable de materiales auxiliares utilizados en el proceso de fabricación de curado en autoclave.

El sistema de fabricación FAM está limitado para piezas con dimensiones máximas de 500x500x8 mm, y límite de presión de curado de 8 bar, pero dicho sistema es perfectamente escalable a piezas de cualquier geometría y dimensiones con mayor presión de curado.

Mejora la eficiencia energética del proceso, ya que se reducen los tiempos de operación y no se necesita utilizar gas inerte como en el proceso de curado en autoclave.

Se simplifican los procesos que son más fácilmente automatizables.

## Agradecimientos

Se agradece especialmente a la empresa Nanotures S.L. por su aporte decidido en la investigación, desarrollo e innovación de materiales compuestos que permite desarrollar la Tesis Doctoral.

## Referencias

- [1] Soo-Jin Park (2014). Carbon Fibers. Springer Series in Materials Science 210.
- [2] M. Salvado, M. Marcos, F.J. Botana. *Desarrollo, optimización y estudio de un proceso de fabricación de estructuras de materiales compuestos de fibra de carbono mediante moldeo por compresión asistido por membranas*. VI JORPRESI – Universidad de Cádiz. (2015)
- [3] F. C. Campbell. *Manufacturing processes for advanced composites*. New York: Elsevier. (2004).
- [4] Quickstep Technologies y Dale Brosius, "An Out-of-Autoclave Innovation for Advanced Composites Fabrication" Quickstep Technologies. (2008).
- [5] Airbus S.L. *AING-508. Ciclos de curado y conformado de materiales compuestos*. 06/01/2013.



- [6] Airbus S.L. *I+D-P-233\_D3. Fabricación de estructuras con materiales compuestos de fibra de carbono (laminados y "sándwich")*. 01/02/2007.
- [7] J.E. Shigley, Charles Mischke, R.G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*, 9º Ed., McGraw–Hill,
- [8] F. Salas, T. Álamo, F. Cuesta, D. Limón y C. Vivas. *Control automático*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.

