2010

Armonización de las Actividades en Materiales Compuestos para Aeronáutica y Espacio en España

Grupo de Vigilancia Tecnológica

www.plataforma-aeroespacial.org

Doc. Nº: Doc. Nº: PAE/Doc-VT/1005

Plataforma Aeroespacial Española

Índice

1. Objetivos 3

2. Áreas tecnológicas 4

3. Motivación y valoración del análisis 4

4. Situación y Tendencias en las Áreas Tecnológicas 5

4.1. Estructuras y materiales 5
4.1.1. Aplicaciones aeronáuticas. 5
4.1.2. Aplicaciones espaciales 8
4.1.3. Materias primas y semielaborados 9
4.2. Procesos de fabricación 10
4.2.1. Tecnologías de fabricación de componentes y estructuras 11
4.2.2. Tecnologías de corte y mecanizado 13
4.2.3. Técnicas de unión 14
4.2.4. Utillaje 15
4.3 Procesos de Inspección, mantenimiento y reparación 15
4.3.1. Tecnologías de inspección 15
4.3.2. Tecnologías de reparación 16
4.4 Herramientas de diseño 17
4.5 Técnicas de ensayo 17
4.6 Limitaciones al aumento de aplicaciones 18

5. Análisis de la situación española 19

6. Definición de una estrategia a medio y largo plazo 20

7. Objetivos tecnológicos y propuestas de desarrollo 21

8. Conclusiones y recomendaciones del panel de expertos 24

ANEXO I. Análisis DAFO 26
ANEXO II. Mapa de capacidades 27
ANEXO III. Mapa de capacidades. Otros centros 31
ANEXO IV. Proyectos relevantes 31
ANEXO V. Lista de acrónimos 32
ANEXO VI. Definición de términos 33

Objetivos

1

Durante las últimas décadas, la Industria Aeroespacial española ha destacado por su capacidad para el desarrollo y fabricación de elementos estructurales construidos con materiales compuestos avanzados, habiendo alcanzado en este área de actividad/conocimientos una posición de liderazgo a nivel mundial.

Esta posición destacada se topa ahora con un notable aumento de competencia a nivel mundial, más en un momento en que los principales fabricantes (Airbus y Boeing) han incrementado la utilización de materiales compuestos en los nuevos programas (A-350 y B-787). En ambos casos se ha extendido la utilización de la fibra de carbono a zonas del avión que se fabrican en otros países lo que, unido a la estrategia de Cadena de Suministro desarrollada en estas aeronaves, ha supuesto una diseminación del conocimiento de diseño y fabricación de materiales compuestos a nivel global.

A esta dispersión del conocimiento y aumento de la competencia se añade la importante y creciente aportación que va a suponer, a nivel mundial, el interés demostrado por las llamadas economías emergentes ya que países como China (COMAC) apuntan a una rápida y significativa incorporación de elementos estructurales de material compuesto en sus nuevos programas.

El presente documento, elaborado por el Grupo de Vigilancia Tecnológica (GVT) de la Plataforma Tecnológica Aeroespacial Española (PAE), pretende contribuir al desarrollo de la Agenda Estratégica de Investigación Aeroespacial elaborada por dicha Plataforma y a aportar información útil y propuestas encaminadas a superar los diez grandes retos del sector aeroespacial en España, en los aspectos relativos a los materiales compuestos y su aplicación.

Para su desarrollo y con la coordinación ofrecida por el GVT[1] se ha constituido una mesa de expertos en el tema para revisar la situación actual del sector, las tendencias de las tecnologías consideradas y las actuales capacidades de España. Con esta información se realiza un análisis "DAFO" que pretende arrojar luz en la elaboración de estrategias a corto, medio y largo plazo. Finalmente, con el fin de materializar dichas estrategias, se elaborará una lista de recomendaciones.

El mapa de ruta aquí elaborado será presentado a las entidades asociadas a la PAE, para que sea tenido en cuenta a la hora de generar nuevos programas de financiación pública y para ser utilizado como posición del sector aeroespacial español en los foros nacionales e internacionales relacionados.

De modo genérico, el objetivo de este documento es realizar un análisis serio y crítico de la situación actual de los materiales compuestos estructurales para la aeronáutica y el espacio en España, buscando aportar ideas y recomendaciones para que en España pueda disponerse en el futuro, de una capacidad real de mantener las capacidades de generación de productos propios y de integración de sistemas completos, de PyMEs de elevada excelencia tecnológica, de una infraestructura tecnológica avanzada y eficaz y de una red de entidades (empresas, OPIs y universidades) armonizada, trabajando al unísono y generando conocimiento útil en el desarrollo y mantenimiento de la citada capacidad.

Como objetivos concretos del presente documento se plantean los siguientes:

- Mostrar la situación actual del sector español de los materiales compuestos para la aeronáutica y el espacio, identificando los recursos disponibles, su situación operativa y su potencialidad.
- Identificar las posibles carencias tecnológicas.
- Definir los retos del sector para asegurar su posicionamiento en los próximos años.
- Analizar la posibilidad de armonización del sector, los factores que la dificultan y los que podrían mejorarla, identificando sinergias existentes, potenciales y deseables, para proponer medidas y recomendaciones que ayuden a armonizar el sector.
- Establecer o definir la estrategia (incluyendo los futuros desarrollos tecnológicos necesarios) para superar dichos retos.

[1] Dada la cantidad de siglas que contiene el documento, se recomienda consultar la lista de acrónimos en el Anexo V

2 Áreas tecnológicas

La elaboración de este documento se ha realizado utilizando como base la Agenda Estratégica (AE) de la PAE y por ello y con el fin de organizar la información en coherencia con dicha agenda, la estructura general del documento se intenta adaptar a las Áreas Tecnológicas (AT) definidas en la Agenda, enlazando en concreto el presente informe con las siguientes AT allí definidas.

Desde el punto de vista aeronáutico:

- AT 1: Estructura y materiales.
- AT 2: Procesos de fabricación.
- AT 3: Procesos de mantenimiento.
- AT 4: Herramientas de diseño.
- AT 8: Técnicas de ensayo.

Desde el punto de vista espacial:

- AT 5: Estructuras, control térmico y ambiental.
- AT 11: Materiales componentes y métodos.

Estas AT no solo recogen aspectos relativos a los materiales compuestos, por lo que cuando se haga referencia a ellas a lo largo del presente informe, será únicamente en relación a los materiales compuestos.

Dado que muchos de los comentarios relativos a materiales compuestos en aeronáutica también son aplicables a espacio y debido a que los temas son paralelos, las AT de espacio se tratarán dentro de las de aeronáutica.

3 Motivación y valoración del análisis

Muchos son los puntos que han influido en la elección de este tema como el primero a ser analizado dentro del GVT de la PAE. Es indudable que, en los últimos decenios, en España, se ha generado un importante tejido industrial en torno a los materiales compuestos relativos principalmente al sector aeronáutico y espacial. Este tejido presenta un papel líder en el ámbito internacional y merece una especial dedicación y una continua atención para mantener su nivel de competitividad. Algunas de las causas que centran la atención y que han sido los detonantes de este estudio son:

a. Los materiales compuestos estructurales constituyen un eje tecnológico estratégico en el desarrollo de la industria aeronáutica y espacial española en su contexto europeo e internacional. La estabilidad de este eje es muy dependiente de las decisiones de los grandes constructores aeronáuticos.

b. A pesar del liderazgo que ofrece el sector español y del esfuerzo realizado en los últimos años, la capacidad de ingeniería no ha sido todavía transmitida en gran medida a toda la cadena de valor.

c. El mantenimiento del liderazgo de las industrias y entidades tecnológicas en el área de materiales compuestos y a medio-largo plazo, en el contexto económico y tecnológico actual, demanda una estrategia, preferentemente armonizada de todo el sector y que genere conciencia de trabajo en equipo y potencie los recursos y capacidades en materiales compuestos en España.

d. La adquisición, el mantenimiento y la potenciación de las tecnologías relativas a materiales compuestos permitirá mantener la capacidad de generación de productos propios, mantener la soberanía tecnológica y comercial nacional, extender la presencia comercial internacional de España y mantener la competitividad del sector español en el contexto internacional.

e. Disponibilidad y calificación, son factores clave que inciden en el precio y en las posibilidades de selección de materiales compuestos y sus tecnologías y procesos asociados.

f. La iniciativa europea del Cielo Limpio requiere, entre otras capacidades, disponer de componentes y equipos ligeros, eficientes, integrados, y fabricados con tecnologías de materiales y procesos de bajo impacto ambiental. Los materiales compuestos tienen un papel importante a desarrollar en este contexto.

Situación y Tendencias en las Áreas Tecnológicas

4

En el ámbito tecnológico de los materiales compuestos aparecen varios actores con papeles claramente diferenciados y muy dependientes entre sí, los más relevantes son: los suministradores de semielaborados (fibras, matrices, preimpregnados, etc.); los fabricantes de elementos estructurales (industria tractora y PyMEs); los fabricantes (industria integradora) de aeronaves; las universidades; y los centros de I+D. En el anexo se citan los actores nacionales más relevantes.

No hay que olvidar otro grupo de actores, con papel diferenciado, constituido por las empresas que desarrollan, fabrican y suministran elementos clave para el proceso de fabricación de componentes en fibra de carbono. En este grupo se encontrarían fabricantes de máquinas-herramienta específicas, hornos y autoclaves y equipos de inspección entre otros. Sin duda, el proceso, la calidad de los resultados y, en definitiva la competitividad en este ámbito tecnológico depende también del nivel de desarrollo tecnológico y disponibilidad de elementos de fabricación como el utillaje y la maquinaria mencionada.

4.1. Estructuras y materiales

Los materiales compuestos son ideales en elementos que requieren elevada resistencia y/o rigidez específicas, caso típico de todo ingenio aeroespacial. Las estructuras de material compuesto resultan más ligeras, más resistentes a la corrosión, aerodinámicamente superiores y menos críticas frente a cargas cíclicas, aunque no deben perderse de vista algunos problemas no totalmente resueltos en aspectos como reparabilidad, inspeccionabilidad y mantenimiento, tolerancia al daño, conductividad térmica/eléctrica o comportamiento electromagnético.

4.1.1. Aplicaciones aeronáuticas

Los materiales compuestos confieren a los elementos estructurales unas mejores prestaciones mecánicas específicas que se traducen en un significativo ahorro de peso. Este factor es de gran interés para el sector aeronáutico ya que dicho ahorro implica un menor consumo de combustible y, por tanto, disminución de costes y mayor respeto medioambiental.

En cuanto a necesidades de material, la aviación civil es, con diferencia, el segmento aeronáutico que mayor consumo demanda, pero los materiales compuestos también están entrando con fuerza en el resto de segmentos. A continuación se tratan todos ellos intentando mostrar de manera escueta cuál es la situación actual, cuáles son las tendencias y qué papel está desarrollando España, identificando los actores y proyectos principales.

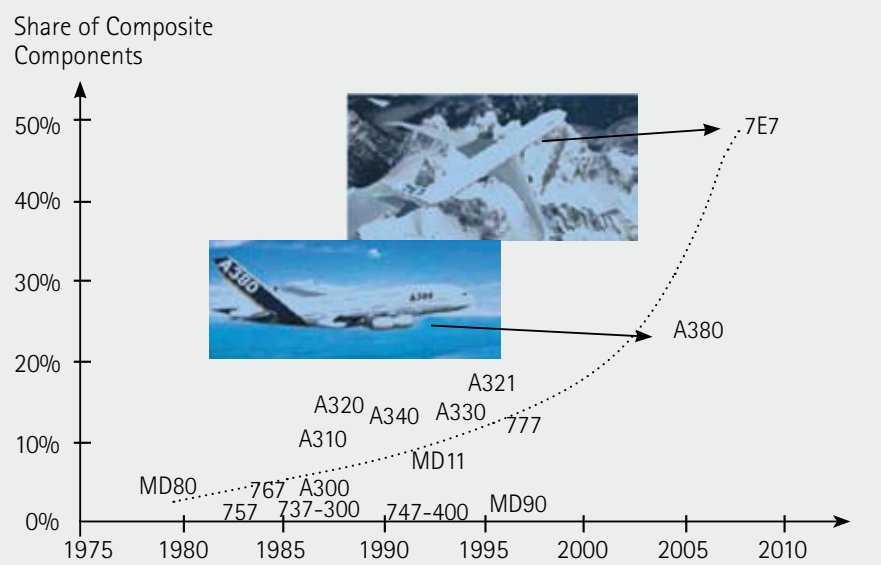

Figura 1.- Evolución en el uso de materiales compuestos en los últimos años (Fuente: DLR)

De forma genérica, la utilización de material compuesto (básicamente polímero reforzado con fibra de carbono) en la industria aeronáutica puede estimarse en:

- Aeronaves comerciales: 21.000 Tm en 2007-2011 (33.000 Tm en 2012-2016).
- Aviación ejecutiva y general: 1.200 Tm en 2007-2011.
- Aeronaves de ala rotatoria: 3.000 Tm MC en 2007-2012.
- Aeronaves militares: 2.300 Tm en 2007-2011.
- Vehículos lanzadores:1.500 Tm en 2007-2011.

La capacidad mundial actual de producción de fibra de carbono de grado aeroespacial se estima en unas 60.000 Tm/año.

A continuación se describen algunos aspectos relativos a las diferentes áreas de aplicación.

» **Aviación civil.**

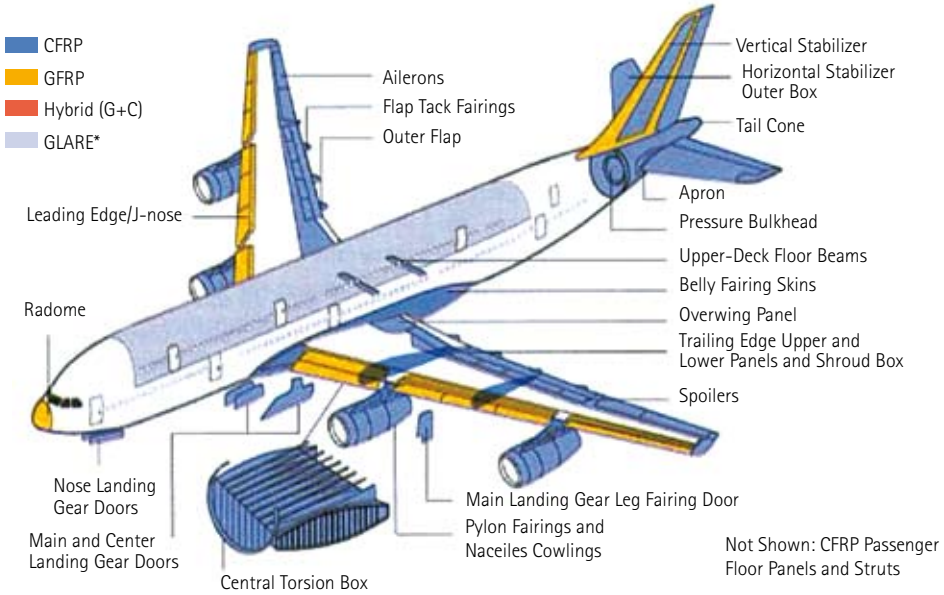

Figura 2.- Principales aplicaciones ejecutadas en materiales compuestos en el nuevo Airbus A380 (Fuente: Airbus Operations, S.L.)

La introducción de los materiales compuestos en aviación civil tuvo sus inicios en los años 80 aunque con una repercusión muy pequeña en el total de las aeronaves, poco a poco el porcentaje de materiales compuestos ha ido aumentando de manera significativa. En el caso del Airbus A380 (ver Figura 2), el uso de materiales compuestos alcanza casi el 25% del total de la estructura y en el Boeing B787 llega a un 50% del peso estructural, del mismo orden que en el Airbus A350XWB, que alcanzará un 52%. Estos valores son quizás más indicativos cuando se expresan en términos volumétricos (un B-787 tiene aproximadamente un 80% de estructura de materiales compuestos en volumen). A medida que ha ido aumentando la confianza en el uso de materiales compuestos se han ido abordando desarrollos de piezas de mayor responsabilidad como alas y fuselajes.

En el caso del A380 destacan los siguientes aspectos:

» Aproximadamente el 25% del peso estructural en materiales compuestos.

» Aplicación innovadora en materiales compuestos en estructuras de alta responsabilidad como la correspondiente al cajón de torsión central (para la unión de las alas), en CFRP para reducir peso, o el fuselaje trasero.

» Aproximadamente el 90% de los materiales compuestos son termoestables a pesar de que se han incrementado los materiales compuestos termoplásticos.

» Se han introducido nuevos procesos alternativos al moldeo de preimpregnados en autoclave como el proceso de RTM *(Resin Transfer Moulding).*

» Merece destacarse el protagonismo de la participación española en el diseño y fabricación de componentes realizados en material compuesto, en particular: estabilizador horizontal, timones de altura y dirección, fuselaje trasero, costillas del ala, carena ventral y puertas del tren de aterrizaje.

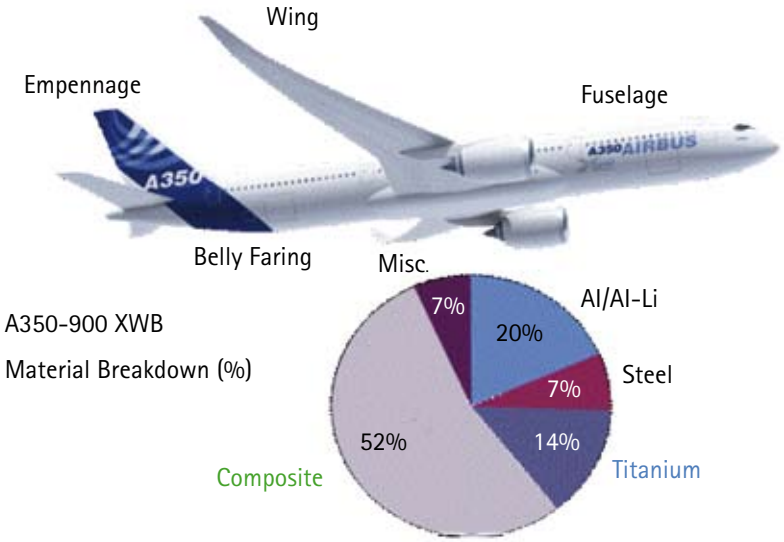

Figura 3.- Reparto de materiales en el A350-900 XWB (Fuente: EADS)

Este porcentaje se ha incrementado notablemente en el futuro A350XWB, donde se proyecta incorporar, como ya se ha dicho, un 52% de la estructura en materiales compuestos, incluyendo fuselaje y ala. El uso de estos materiales puede ser aún más extendido si cabe, en ciertos programas de otros sectores de la aviación civil, como lo son la Aviación Ejecutiva y la General, en especial los VLJ (de mayor proyección en EE.UU.).

» Aviación militar.

De la misma manera, como se puede observar a continuación, también en aviación militar, la utilización de los materiales compuestos ha sufrido un avance importante tanto en EE.UU. como en Europa. La introducción "seria" de los materiales compuestos en aviación militar se produjo en la década de los 70.

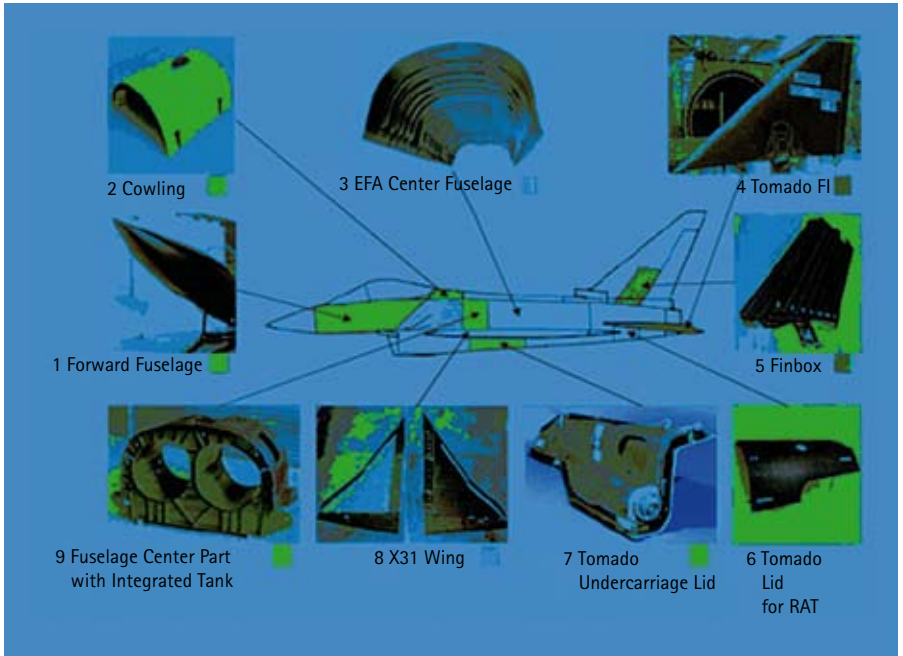

Figura 4.- Ejemplos de estructuras y componentes de aviación militar fabricados en materiales compuestos (Fuente: Airbus Operations)

En la figura 4 se recogen ejemplos concretos de estructuras y componentes de aviación militar fabricados en materiales compuestos.

En aviones de combate actualmente en servicio y de diseño reciente, el empleo de material compuesto oscila entre el 20% y el 40% en peso de estructura.

Figura 5. - Ejemplo distribución Materiales Externos en un avión de combate

» Helicópteros.

En los helicópteros de última generación se realiza en gran proporción, aproximadamente un 85% en peso de la estructura primaria, en materiales compuestos. En la figura 6 se recoge, a modo de ejemplo, algunas de las aplicaciones en materiales compuestos para helicópteros.

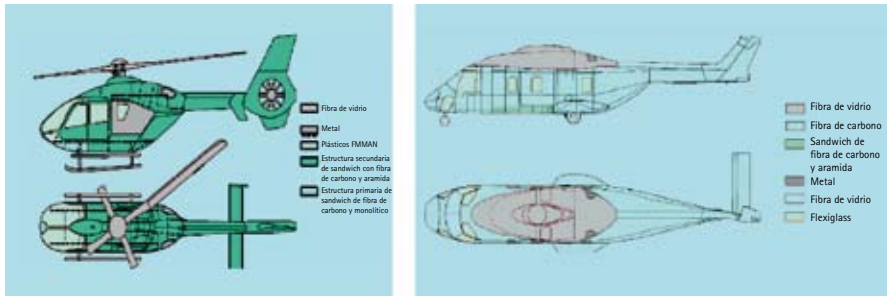

Figura 6.- Estructuras y componentes en materiales compuestos para helicópteros (Fuente: Eurocopter)

» UAS.

En los últimos años se están desarrollando multitud de proyectos de aviones no tripulados ("Unmanned Aerial Systems" o UAS), con una actividad muy destacada en España (ATLANTE, BARRACUDA, NEURON, SIVA y TALARION). Cabe destacar que el Proyecto ATLANTE es enteramente español y está concebido con un 68% de su estructura en materiales compuestos. El motor de su desarrollo ha sido el militar, debido a la capacidad

que ofrecen estos vehículos de introducirse en zonas de alto riesgo para obtener información sin necesidad de poner en peligro la vida de personas, si bien el mercado está cada vez más pendiente de las posibilidades civiles que estos vehículos pueden ofrecer. El mercado civil aún necesita unos años para explotar, ya que depende de una normativa, todavía inexistente, que regule su vuelo, aunque hay grupos de trabajo que están abordando este tema.

Al igual que en el resto de segmentos aeronáuticos, la mayor parte de los UAVs utilizarán materiales compuestos en porcentajes muy elevados. Dadas las diferentes tipologías, tamaños y requerimientos de los UAVs (HALE, MALE, tácticos, Mini, Micro...) se presenta un sector muy interesante para "vertebrar" actividades de I+D en PyMEs y Universidades y Centros de I+D-T, sector hacia el que podrán migrar industrias ya presentes o no en el sector aeronáutico, desde las de aviación civil hasta las de aeromodelismo.

Figura 7.- ATLANTE (Fuente EADS CASA)

» **Aviación general.**

En España la aviación general presenta un mercado prácticamente inexistente. En otros países, como EE.UU., los desarrollos de este segmento incluyen porcentajes de materiales compuestos muy variables que van desde menos del 10% a valores elevados en torno al 60%.

4.1.2 Aplicaciones espaciales

Los materiales compuestos se han utilizado con profusión en el espacio desde el inicio de su desarrollo, debido al ahorro de masa obtenible con dichos materiales en las estructuras espaciales. Como dato significativo el coste de 1 kg de carga de pago en órbita geoestacionaria es mayor de 20.000 €, por lo que cualquier ahorro de masa en la estructura del satélite o de la parte alta del lanzador, queda suficientemente justificado por dicha cifra.

En las dos últimas décadas del siglo pasado, se utilizaron en el espacio materiales compuestos muy sofisticados (fibras de boro, fibras de muy alta conductividad térmica y muy alto módulo, etc.) dado que el ahorro de masa y las prestaciones estaban por encima de cualquier consideración de coste. En el siglo XXI, estas consideraciones de coste y, ahora en mayor grado, de disponibilidad, hacen que se traten de utilizar materiales comunes con la aeronáutica, dejando sólo para aplicaciones muy específicas los demás materiales "sofisticados". Además, las razones de coste, han hecho que la incorporación de tecnologías automatizadas de fabricación, ampliamente utilizadas en aeronáutica, sean una realidad también en el espacio.

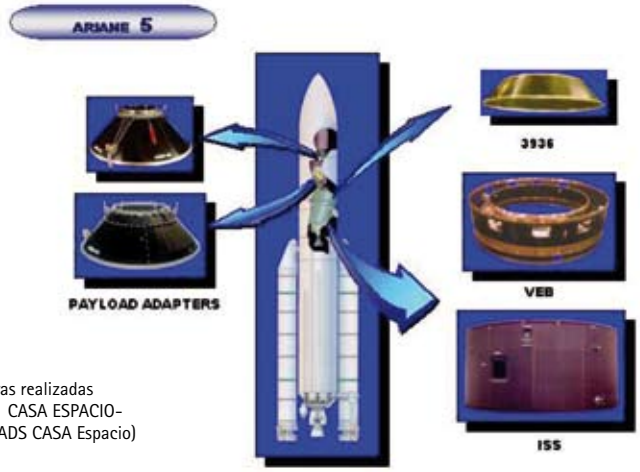

Figura 8.- Estructuras realizadas por ASTRIUM EADS CASA ESPACIO- Ariane 5 (Fuente: EADS CASA Espacio)

Las aplicaciones más significativas en el ámbito espacial corresponden con los lanzadores y los satélites. A continuación se comenta brevemente la utilización de los materiales compuestos en ambos casos.

» **Lanzadores.**

La cantidad de material compuesto utilizada en los lanzadores, Ariane 4 (7%) y Ariane 5 (16%), es menor que las actuales de la industria aeronáutica, debido a que la ganancia de masa en la carga de pago depende del tiempo que la estructura del lanzador acompaña a ésta durante la fase de lanzamiento. Así, mientras que en las etapas superiores la ganancia es del 100%, por lo que se utilizan masivamente estructuras en material compuesto de fibra de carbono, en la primera etapa queda reducido al 7%, por lo que se utilizan estructuras metálicas.

En la figura 5 se muestran las estructuras principales realizadas por EADS CASA Espacio para la última versión del lanzador Ariane 5.

» **Satélites.**

Los materiales compuestos de fibra de carbono con matriz epoxi se utilizan ampliamente en las estructuras de satélites, habiendo desplazado a las aleaciones de aluminio, salvo donde la conductividad térmica es un requisito primario. La necesidad de estas estructuras de tener una alta rigidez específica hace que se utilicen fibras de carbono con módulos mayores a 500 GPa.

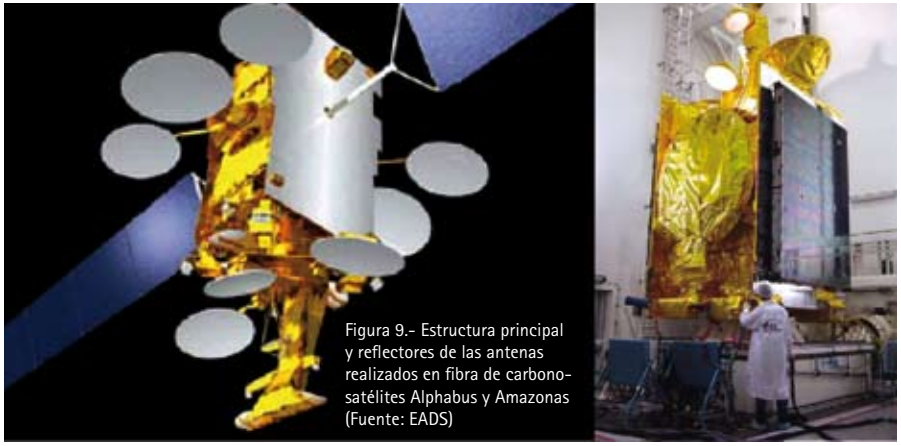

Figura 9.- Estructura principal y reflectores de las antenas realizados en fibra de carbono-satélites Alphabus y Amazonas (Fuente: EADS)

En lo que se refiere a la carga de pago, los materiales compuestos se utilizan donde se requieren grandes estabilidades dimensionales ante las grandes variaciones térmicas (-150º C a +150º C) del ambiente espacial, usándose configuraciones de materiales de fibra de carbono con coeficientes de dilatación térmica cercanos a cero. Además, las necesidades de estabilidad dimensional en el vacío, hacen también que se utilicen para esta aplicación sistemas cianoesteres, con casi nula absorción de humedad.

En España, el actor principal, casi en exclusividad, es ASTRIUM- EADS CASA Espacio. Las cortas series (6 ó 7 unidades anuales) de los lanzadores y uno o dos modelos por satélite, así como el elevado nivel de ingeniería necesario, hacen que la posibilidad de subcontratación sea muy limitada. Este hecho se ha agravado con el Ariane 5, donde las estructuras en fibra de carbono se han automatizado al completo (posicionado de fibras). Esta automatización ha permitido que EADS CASA Espacio sea el líder en estructuras en fibra de carbono para los lanzadores europeos. No obstante, es necesario que las empresas subcontratistas de primer nivel incorporen progresivamente dicha tecnología, para poder así transvasar en ellas actividades espaciales de lanzadores y aumentar el cupo nacional en dicho mercado.

Como principales carencias de la industria espacial española (y mundial) en este campo de los materiales compuestos, estaría el ya mencionado problema de la disponibilidad de materiales, ya que por su escaso volumen, esta disponibilidad está supeditada a los vaivenes de la demanda de material aeronáutico. El otro problema digno de mención es el monopolio exclusivo del precursor PAN de las fibras de muy alto módulo, que hace que su precio y su disponibilidad pudieran comprometer seriamente el área de los satélites científicos o comerciales. Como carencia exclusiva en España, habría que mencionar el conocimiento y experimentación en termoplásticos, si bien es cierto que en otros sectores (transporte, eólica, construcción) se están emprendiendo en la actualidad diversos proyectos, con la participación de algunos centros de I+D y fabricantes de máquinas-herramienta específicas, centrados en la reducción de costes/pesos mediante la incorporación de matrices con menores propiedades mecánicas.

4.1.3 Materias primas y semielaborados

Los materiales compuestos con responsabilidad estructural que se usan en la industria aeronáutica son de matriz termoestable. Si bien también se utiliza fibra de vidrio o de Kevlar, las mejores propiedades mecánicas específicas se alcanzan mediante el uso de la fibra continua de carbono.

Airbus utiliza mayoritariamente materiales de resina epoxi y refuerzo de carbono en forma de preimpregnados, si bien también emplea algunos materiales para procesos de

RTM en la fabricación de algunos componentes del A380, como son las cuadernas de la sección 19 del fuselaje.

Los materiales preimpregnados más utilizados se presentan en forma de cinta unidireccional, por sus mayores prestaciones mecánicas en comparación con el tejido y por su grado de implementación en procesos automatizados.

En lo que se refiere al tipo de fibra de carbono, los últimos dos modelos de Airbus incorporan fibra de módulo intermedio (T800 e IM7), en lugar de la alta resistencia (también llamados de módulo estándar) usada en los modelos anteriores (T300 y AS4).

Los principales suministradores de material preimpregnado para aplicaciones aerospaciales son Hexcel y Cytec pero otros proveedores de materia prima empiezan a ofrecer al mercado interesantes productos alternativos competitivos en coste como Advanced Composites Group (ACG), Toho/Tenax, Isovolta, Stesalit o Park Electro. En el campo de termoplásticos habría que añadir también a Tencate. Y como suministrador de fibra de carbono emerge el fabricante turco Aksa.

Hay que destacar por ello la enorme importancia de que exista en España una planta de fabricación de fibra de carbono y de impregnación del fabricante Hexcel. No obstante, Hexcel no realiza en España actividades de desarrollo de producto limitándose a mantener capacidad productiva. Este hecho limita la capacidad de la industria nacional en el desarrollo de materias primas lo que supone una de nuestras principales carencias.

Si bien la tendencia reciente ha sido la de incrementar los elementos de estructuras sólidas en detrimento de las estructuras sándwich, éstas siguen teniendo presencia en la fabricación de componentes de estructura secundaria como puede ser la carena ventral del A380. Es en estos componentes, en concreto en sus pieles, donde más se utilizan los tejidos de carbono e incluso de vidrio. En lo que se refiere a los núcleos, son de panal de abeja constituidos por papel fabricado mediante resina fenólica y fibra de aramida o de vidrio.

La utilización de estructuras sándwich ofrece ventajas en términos de coste y peso en determinadas aplicaciones. El relativo declive de estas estructuras se debe principalmente a su tendencia a absorber agua en servicio que produce desencolados a largo plazo y a su respuesta bajo determinados niveles de energía en impacto. Sería interesante resolver estos problemas con el fin de poder beneficiarse de las mencionadas ventajas.

Como se ha comentado brevemente en el apartado anterior, las materias primas y semielaborados utilizados en espacio difieren claramente según que la aplicación sea para lanzadores o satélites.

- **Lanzadores.** Se utilizan actualmente sistemas de resina epoxi con fibras de módulo intermedio (IM) y alto módulo (HM). Por razones de volumen se intenta que las matrices epoxi sean las mismas utilizadas en aplicaciones aeronáuticas. Existe una clara posibilidad de utilización a corto plazo de sistemas de bismaleimida (BMI), especialmente para el caso de los nuevos lanzadores reutilizables. Asimismo, existe a medio y largo plazo una clara posibilidad de utilización de termoplásticos, lo que supondría debilitar la posición española en dicho campo salvo que se avanzase rápidamente en la generación de conocimientos e investigación aplicada en este área.
- **Satélites.** Se utilizan sistemas de resina epoxi y, en menor medida, ciano-éster. Siempre con fibras HM y muy alto módulo (UHM). Debido al carácter estratégico de la fibra UHM y al monopolio de Toray, la posibilidad de desarrollar y fabricar dichas fibras en la única planta productora situada en España (Illescas), posicionaría al sector español como una referencia mundial.

4.2 Procesos de fabricación

Más del 90% de los componentes estructurales de material compuesto fabricados para la industria aerospacial se fabrican por laminación manual o automática de preimpregnados y el posterior curado en autoclave de la pieza. Estos preimpregnados son mayoritariamente de carbono/epoxi. La figura 7 ilustra el esquema general de una planta de producción de estas estructuras, que se compone de cuatro partes diferenciadas:

- Zona de almacenamiento de material preimpregnado (frigoríficos a -20º C para almacenamiento de ese material y zona de acondicionamiento), y almacén de utillaje y material auxiliar.
- Área Limpia o sala de Lay-up. Es una zona acondicionada en humedad (40% HR) temperatura (23 +/-3º C) y ausencia de polvo (grado 1000). En ella se procede al corte manual o automático de los rollos de tejido preimpregnado, adaptándose a la geometría de pieza requerida, y a su colocación sobre el útil, de acuerdo con la secuencia de apilamiento especificada, y con la ayuda de trazadores láser, que permiten orientar las sucesivas láminas con precisión de 3 grados. Alternativamente a lo anterior, para estructuras de grandes dimensiones y muy alta calidad, se emplean máquinas de encintado automático, cuando se trata de superficies casi planas, o máquinas de posicionado de fibras, cuando se trata de encintar sobre superficies curvas, que automatizan todo el proceso de colocación de fibras sobre el útil. El material empleado es cinta unidireccional preimpregnada, de 150-300 mm de ancho en la encintadora, o

como mechas de 3-6 mm para la máquina de posicionado de fibras. El coste de estos equipos es de varios millones de euros.

» Curado en autoclave. Realizado el laminado en fresco, se le pone encima una bolsa de vacío para que dicho laminado se adapte fielmente a la forma del molde. Luego, molde y laminado se introducen en el autoclave donde se produce el curado de la resina. El autoclave es, en esencia, una vasija en la que por aire caliente circulante (generalmente se emplea N2 para evitar riesgo de incendio) y con una presión y un tiempo determinados se realiza el ciclo de curado. Con los materiales preimpregnados actuales, se requiere una alta presión (0,7 MPa) para asegurar la correcta consolidación del laminado. A continuación, se procede al recanteado de la pieza, que se realiza mediante herramienta abrasiva, y muy recientemente, mediante corte por chorro de agua.

» Todas las estructuras fabricadas para aplicaciones aeroespaciales se someten a inspección no destructiva mediante ultrasonidos, para asegurar la calidad de la pieza (ausencia de porosidad y delaminaciones). Para detalles locales y geometrías complicadas se hará inspección manual y para grandes estructuras se hace inspección automatizada en C-Scan.

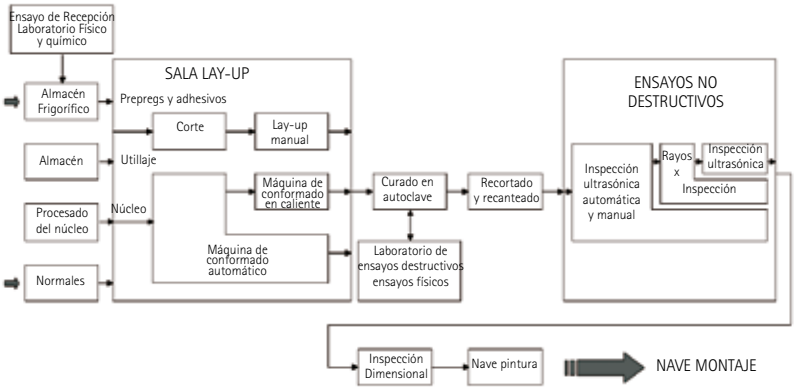

Figura 10.- Esquema general de una planta de fabricación de estructuras en material compuesto

En España existen actualmente varias plantas para fabricación e integración de grandes estructuras en el grupo EADS, como Airbus Military (Centro de Bahía de Cádiz), EADS CASA Espacio–Barajas y la planta de Airbus-Illescas, la de mayor tamaño y medios más modernos, Getafe y Puerto Real. Tienen además capacidad de fabricación de grandes estructuras las empresas Aries Complex / ARESA, AERNNOVA y ALESTIS en cuyas páginas Web se puede encontrar información detallada sobre sus instalaciones. Entre los centros de investigación con autoclaves y medios de tamaño suficiente para el desarrollo de estructuras están FIDAMC, CIDAUT e INTA.

En el **Anexo II** existe un mapa de capacidades tecnológicas de todas estas entidades.

En España hay también un importante grupo de industria para la fabricación de los equipos necesarios, destacando M. TORRES, uno de los principales fabricantes mundiales de maquinas de encintado automático y posicionado de fibras.

Existen dos fabricantes nacionales de autoclaves, TEICE y OLMAR.

En equipos de inspección ultrasónica automatizada destaca la empresa TECNATOM.

La fabricación del utillaje necesario, tanto para útiles de moldeo como para útiles de montaje, tiene gran importancia en el proceso. Las empresas M. TORRES y el grupo ACITURRI tienen capacidad para desarrollar y construir estos útiles.

En los próximos apartados se repasan las tecnologías de fabricación más destacadas, dejando la inspección para el apartado 4.3.

4.2.1 Tecnologías de fabricación de componentes y estructuras

4.2.1.1 Tecnologías de preimpregnados

Los principales procesos utilizados en el sector aerospacial para la fabricación de componentes y estructuras en materiales compuestos se recogen a continuación:

» **Apilamiento manual**. Esencialmente consiste en colocar las distintas telas de preimpregnado sobre un molde utilizando como ayuda la proyección de la silueta de los patrones mediante proyectores láser que en ocasiones también se utilizan como referencia para el corte manual de las telas mediante plantilla.

Figura 11.- Proceso de devanado de filamentos(Fuente: TECNALIA)

El corte de las telas también se puede efectuar de modo automático empleando técnicas y máquinas de patronaje provenientes del mundo textil que utilizan control numérico.

» **Apilamiento automático *(tape laying).*** Este proceso es similar al anterior pero se realiza de modo automático mediante una máquina de encintado automático. En él la cabeza dispensadora se desplaza mediante un sistema de ejes cartesiano y en la zona de contacto con la pieza se deposita la fibra con libertad de giro.

Una de las empresas líderes a nivel mundial en fabricación y suministros de máquinas para encintado automático es la española M. Torres.

Figura 12.- Máquina de ATL (izquierda) y de posicionado de fibras (derecha). Ambas de M. Torres

Entre las entidades que disponen de máquinas de este tipo destacan:

- EADS CASA Espacio cuenta con una encintadora plana de 7 m de longitud y 4 m de anchura para los paneles de lanzadores y satélites.
- Airbus Operations dispone de 11 máquinas de encintado automático de Cincinnati y M. Torres, la mayoría con posicionamiento 3D.
- ARESA cuenta con una máquina de encintado automático en su planta de Boecillo (Valladolid).
- AERNNOVA cuenta con dos máquinas de ATL de M. Torres en su planta de Illescas y planifica ampliar a 6.

Figura 13.- ATL, FP,IND, Autoclave y Laboratorios de FIDAMC

» **Posicionado de fibras *(fibre placement).*** Un robot multieje posiciona la fibra húmeda sobre un molde siguiendo un camino predeterminado y controlado por CNC. Se utiliza en piezas grandes de gran curvatura como trampas de tren de aterrizaje o secciones de fuselaje, o aplicaciones que requieran direccionado de las mechas *(tow steering).*

EADS CASA Espacio cuenta con dos sistemas (Viper 3000 y Viper 6000 de última generación) para sus estructuras de lanzadores y satélites.

Airbus Operations, S.L. cuenta con dos máquinas de posicionamiento de fibras de la empresa Cincinnati. en su fábrica de Illescas.

» **Moldeo en autoclave.** Es el más ampliamente utilizado en la industria aeroespacial. Como se ha comentado anteriormente, para el moldeo por autoclave se utilizan diferentes técnicas de apilamiento que requieren distintas formas de presentación del material preimpregnado.

Airbus Operations, S.L. dispone de 5 autoclaves TEICE en su factoría de Illescas, el mayor de los cuales tiene unas dimensiones de 33,4 x 6,5 m.

EADS CASA Espacio cuenta con 3 autoclaves, el mayor de 6 m de diámetro y 7 m de longitud.

Figura 14.- Equipamiento de autoclave (Fuente: TECNALIA)

» Cabe notar una tendencia creciente al uso de preimpregnados de curado fuera de autoclave (OoA) en determinados sectores aeronáuticos en EE.UU. (hasta ahora limitado a programas de aviación general/ejecutiva), con demostrado interés institucional.

4.2.1.2 Tecnologías de fibra seca

En este caso la impregnación se realiza durante el propio proceso de conformado. Las técnicas más utilizadas son:

» **Devanado de filamentos *(filament winding).*** Se utiliza para la fabricación de componentes o estructuras tubulares, siendo uno de los procesos automatizados más rápidos. Su principal limitación es que sólo se puede emplear en superficies de revolución y con orientaciones de la fibra limitadas. El proceso de devanado consiste en el bobinado de fibras alrededor de un mandril a las que se les añade la resina, normalmente, justo antes del bobinado. Posteriormente la pieza es curada sobre el mandril y después se retira. Nuevas variantes de este proceso permiten el devanado de material preimpregnado *(tow-preg).*

» **Moldeo por transferencia de resina (RTM).** Es utilizado con materiales similares a los correspondientes a los procesos anteriores, como la fibra de carbono con preforma seca y resinas epoxi o cianoester (termoestables) en sus calidades para infusión, pero en aplicaciones con requerimientos estructurales ligeramente inferiores.

Este proceso se diferencia de otros en que el refuerzo se introduce seco en el molde y la resina se inyecta con el molde una vez cerrado. Posteriormente la pieza se cura mediante calentamiento en el mismo molde.

Dentro de los procesos de RTM y RFI (infusión de película de resina) es fase fundamental la elaboración de la preforma que puede realizarse de diversas formas entre las que destacan el trenzado *(braiding),* el tejido tridimensional *(3-D weaving)* y el cosido *(stitching).* Se trata de generar una preforma de fibra seca de manera precisa y repetitiva combinando las siguientes operaciones:

- Fabricación rollo de tejido convencional.
- Corte de las diferentes capas de tejido a la geometría.
- Ensamblado de las diferentes capas de tejido seco mediante un "cosido" por control Numérico utilizando también hebras de fibra de carbono.

De esta manera se consigue una preforma compacta que permite conseguir geometrías complejas, facilita la colocación de los refuerzos en el molde y permite integrar refuerzos localizados.

Cabe destacar el desarrollo que recientemente se ha llevado a cabo en estos procesos de infusión de resina líquida, buscando cada vez estructuras de mayor tamaño e identidad estructural. Existen variantes del RTM como el VaRTM o el SQRTM que pueden reducir algunas de las limitaciones intrínsecas a este proceso.

Entre las entidades que disponen de capacidades en este campo destacan:

- **EADS CASA Espacio** dispone de un sistema de transferencia de hasta 20 kg de resina en un mismo proceso.
- **Airbus Operations, S.L.** cuenta con instalaciones para fabricación por RTM en su fábrica de Getafe.
- **IDEC, SIP y AERNNOVA** disponen de capacidades para fabricar piezas y equipos.

4.2.2 Tecnologías de corte y mecanizado

El mecanizado de los materiales compuestos conlleva requerimientos y condiciones esencialmente diferentes del convencional mecanizado de los metales, debido a las temperaturas que se originan en los procesos, la baja conductividad térmica y a la diferencia existente entre los coeficientes térmicos de expansión de fibra y matriz, que favorecen la formación de esfuerzos residuales que puede dificultar la consecución de una adecuada calidad dimensional y la absorción de fluidos, que puede producir cambios en las propiedades físicas de la estructura de material compuesto.

Las operaciones que forman parte de este apartado son:

- Corte.
- Recanteo.
- Fresado.
- Taladrado.
- Avellanado.
- Escariado.

Por otro lado, esta fase del proceso de fabricación de un elemento en material compuesto no se sustrae a la tendencia creciente de automatización de los procesos. Ésta reúne los objetivos de mejora de calidad, disminución de costes recurrentes, mejora de las condiciones de salud laboral y eliminación de trabajos repetitivos, insatisfactorios para los trabajadores y que son fácilmente deslocalizables, en favor de trabajos más tecnificados, competitivos y de mayor valor añadido.

La calidad de la arista de corte, dependiente de los posibles daños que aparecen en el mecanizado, de forma fundamental las delaminaciones, junto con la garantía de intercambiabilidad en el caso de taladros y la repetibilidad del proceso en general, son los elementos más determinantes en la consecución de un nivel de calidad óptimo para el producto final.

Las líneas de esfuerzo tecnológico van en este apartado sensiblemente dirigidas a la eliminación de procesos manuales. Se trata tanto de extender el uso de equipos automáticos como de desarrollar e implementar los denominados 'Métodos No Convencionales de Mecanizado', como son:

- Mecanizado por ultrasonidos.
- Mecanizado por chorro de agua.
- Mecanizado por chorro abrasivo.
- Mecanizado por láser.

Figura 15.- Máquina de corte por chorro de agua de 5 ejes

En la actualidad, los procesos de corte y mecanizado de materiales compuestos asentados en la industria aeroespacial española son:

- Tecnologías de corte de preimpregnados y tejidos secos. Actualmente se emplean mesas de corte en las que se realiza un corte automático del material tratando además de minimizar el porcentaje de desperdicio de material.

  Airbus Operations, así como los principales subcontratistas industriales del ramo, tienen una máquina Lectra de corte de telas de tres ejes en sus instalaciones de Illescas.

- Tecnologías de corte y mecanizado de pieza curada. Las principales soluciones utilizadas son las siguientes:

  – Mecanizado tradicional. Se utiliza en este caso normalmente herramientas de diamante y una alta velocidad de giro de la herramienta de corte.

  – Corte por chorro de agua a alta presión con o sin abrasivo.

  Entre las entidades que disponen de capacidades en este campo destacan:

  * **Airbus Operations, S.L.** cuenta con tres máquinas de recanteo de 5 ejes de M. Torres en Illescas y una máquina de corte por chorro de agua, también de 5 ejes.
  * **AERNNOVA** cuenta con un centro de mecanizado TorresTool en sus instalaciones de FIBERTECNIC en Vitoria.
  * **MUDEN** es empresa especializada en tecnologías de mecanizado de elementos de material compuesto.

Asimismo cobra importancia el desarrollo de tecnologías de inspección in-situ de estas operaciones (mediante un dispositivo de inspección acoplado al sistema que realiza el mecanizado, a través, por ejemplo, de la tecnología de medida de taladros por capacitancia) Se busca así inspeccionar in-situ operaciones como el taladrado para analizar su efecto en la integridad estructural de la pieza sobre la que se realizan. Cabe destacar el esfuerzo en este sentido de la empresa SERRA, del grupo AERNNOVA.

4.2.3 Técnicas de unión

Las técnicas de unión de elementos de materiales compuestos que se utilizan son mecánicas y encoladas.

Las uniones adhesivas son las óptimas en el caso de estructuras de material compuesto pues evitan el taladrado de las mismas, permitiendo además una unión continua. España

posee una gran tradición de encolado de elementos con responsabilidad estructural, especialmente rigidizadores a paneles en cajones, costillas, largueros, etc. Esta unión se efectúa mediante adhesivos en forma de película y de naturaleza epoxi (BMI en áreas que requieren mayor resistencia a temperatura).

Los adhesivos se suelen curar entre 120 ºC y 180 ºC en función de la aplicación. Con el fin de optimizar la producción, la aplicación mayoritaria de los adhesivos se lleva a cabo en los denominados procesos de co-encolado, en los cuales el adhesivo se cura a la vez que ambos (co-curado) o uno (co-encolado) de los sustratos que se va a encolar.

Estas uniones pegadas se encuentran en la actualidad incluso en estructuras constitutivas del tanque de combustible. No obstante, y debido a la falta de métodos de inspección o garantía de calidad que aseguren que el proceso tal y como se ha realizado en cada pieza en concreto asegure la duración de la unión, es de uso común la aplicación de los denominados remaches "quita-miedo" (o "antipelado"), en los dos extremos de la unión.

En lo que se refiere a las uniones mecánicas, conviene destacar que todavía se realizan en general de un modo manual, si bien en los últimos tres años se ha realizado un esfuerzo en la automatización del montaje mecánico.

Por último, merece la pena mencionar que aún quedan muchas uniones mecánicas no-estructurales que se podrían sustituir por uniones encoladas, ahorrando coste, tiempo y peso. En este sentido, cabe resaltar el ámbito de los soportes de elementos de los diferentes sistemas de la aeronave.

4.2.4 Utillaje

Las temperaturas relativamente altas a las que suelen curar las estructuras aeroespaciales (180ºC), junto el gran tamaño de algunas de ellas, implican la utilización de material de utillaje de bajo coeficiente de expansión térmica.

El utillaje se fabrica generalmente en acero o, para piezas grandes, aleaciones de níquel como el Invar.

Existen numerosas empresas con capacidad de fabricación de utillajes complejos dentro del tejido industrial español que, en muchos casos, son competitivas en el ámbito internacional.

Cabe destacar la necesidad de estudiar y desarrollar soluciones de menor coste y plazo para cubrir necesidades de prototipado rápido, demostradores en I+D, series cortas y pruebas de fabricabilidad.

4.3. Procesos de Inspección, mantenimiento y reparación

4.3.1 Tecnologías de inspección

La inspección, mediante Ensayos No Destructivos (END) es una necesidad ineludible en dos situaciones de la vida del componente estructural: al finalizar su fabricación, para garantizar su integridad y calidad, y durante su vida en servicio, para detectar daños incipientes derivados del uso de la estructura.

La inspección inicial debe garantizar la integridad estructural del componente, o lo que es lo mismo, la ausencia de defectos originados durante el proceso de fabricación. Verificar el correcto encolado entre partes, la ausencia de porosidades y de despegamiento entre telas, o del revestimiento respecto al núcleo en el caso de estructuras sándwich, es el objetivo principal de la inspección. Cubrir el 100% del volumen del componente con la necesaria sensibilidad, garantizando la detección, caracterización, dimensionamiento y localización de los posibles defectos, es el desafío a cubrir en esta actividad.

Más tarde, durante la vida en servicio del componente, será preciso aplicar técnicas de inspección capaces de detectar nuevos defectos surgidos por el uso y las solicitaciones mecánicas a que se somete la estructura tales como impactos y grietas o el crecimiento de defectos pre-existentes, aceptados dentro de los límites de permisibles de diseño.

Las principales técnicas de inspección no destructiva existentes son:

» Inspección mediante ultrasonidos.

» Radiografía (rayos X).

» Termografía (cámara IR).

» Holografía (láser).

» Serigrafía (nueva técnica en fase de validación).

Las más utilizadas en la industria aeronáutica se basan actualmente en la inspección por ultrasonidos. En el caso de elementos estructurales, se efectúa una inspección 100%.

La inspección por ultrasonidos se aplicaba, inicialmente, de forma manual, de manera que la calidad y fiabilidad de la inspección descansaba únicamente en la pericia y experiencia del operador. Un paso importante en la automatización de la inspección fue, hace ya algunos años, la aplicación de técnicas de transmisión (en general mediante chorros

de agua que facilitan el paso de los ultrasonidos a través de la pieza). Estos sistemas aunque ya más sofisticados que los inicialmente diseñados han quedado, en los nuevos programas, limitados a su uso para elementos casi planos y estructuras sándwich, puesto que el avance importante más reciente consiste en la aplicación masiva de la técnica de pulso-eco.

Se extiende el uso de unidades portátiles llamadas *"bond testers"*, simplificación de equipos ultrasónicos desarrollados específicamente para la inspección de uniones encoladas.

Entre las entidades que disponen de capacidades en este campo destacan:

- **Airbus Operations, S.L.** que cuenta en Getafe con una máquina de transmisión fabricada por TECAL (empresa española ya desaparecida) y otra de fabricación propia, así como una recientemente suministrada por TECNATOM para su planta de Illescas.
- **EADS CASA Espacio** cuenta con una máquina fabricada por TECAL y otra de TECNATOM para transmisión en seco.
- **AERNNOVA** cuenta con una máquina fabricada por TECAL y otra de TECNATOM en su factoría de Toledo (ICSA), otra, también fabricada por TECNATOM en COASA y otras dos (una de MECASONICS, empresa ya desaparecida, y que fue actualizada por TECNATOM y la otra fabricada por TECNATOM en Fibertecnic). Alestis San Pablo cuenta con dos máquinas, ambas actualizadas por TECNATOM.

La incorporación del Phased Array, como base para la inspección utilizando la técnica de pulso-eco, ha supuesto un gran avance en el proceso de automatización de la inspección que, además, puede realizarse ahora a mayor velocidad con lo que supone de reducción de tiempos y costes, siendo la única técnica que será utilizada en el nuevo programa A350XWB.

Entre las entidades que disponen de capacidades en este campo destacan:

- **Airbus Operations, S.L.** que cuenta, en Illescas, con dos máquinas fabricadas por TECNATOM y una de General Electric.
- **Alestis** tiene una máquina en SK-10 (Puerto de Santa María) fabricada por TECNATOM.
- **FIDAMC** dispone también de una máquina fabricada por TECNATOM.
- La nueva planta de **AERNNOVA** en Illescas contará así mismo con un puente (*gantry*) fabricado por General Electric (Alemania).

Finalmente hay que señalar lo que parece el futuro de la aplicación de la inspección por ultrasonidos para material compuesto: los ultrasonidos generados por Láser. Si bien esta tecnología viene aplicándose en EE.UU. (Lockheed Martin) desde hace tres o cuatro años, no ha estado, hasta ahora, disponible en el mercado para otros fabricantes.

Los ultrasonidos por Láser (LUS) incorporan ventajas muy significativas especialmente al considerar componentes de pequeño tamaño y geometría compleja, que todavía, en muchos casos sólo pueden inspeccionarse manualmente.

Los sistemas LUS además de automatizar la inspección, y garantizar la disponibilidad de un registro de los datos obtenidos, elimina el agua requerido en técnicas convencionales como acoplante acústico y la necesidad de un contacto físico del elemento auscultador con la superficie de la pieza a inspeccionar. En los sistemas tradicionales, ya fueran para la aplicación de técnicas de transmisión o de pulso eco, los ultrasonidos deben introducirse en la pieza a inspeccionar una vez generados en un elemento piezoeléctrico exterior, y para ello hay que asegurar el acoplamiento mediante el chorro de agua o el contacto húmedo, en los sistemas basados en LUS los ultrasonidos se generan en la pieza que es excitada con un rayo Láser. Si consideramos que el ángulo de incidencia del Láser admite un gran margen de variación puede entenderse las posibilidades que esta tecnología abre para el futuro de la inspección en los procesos de fabricación en material compuesto.

TECNATOM está realizando actualmente la fabricación y suministro del primer sistema de este tipo que se instalará en Europa.

Para el análisis de problemas concretos en estructuras sándwich se utiliza también la radiografía y la termografía, mientras que la serigrafía ha mostrado vacíos aún por resolver.

Adicionalmente, también es posible integrar sensores (de fibra óptica, ultrasónicos, etc.) dentro del propio laminado de material compuesto para poder monitorizar el estado tensional de la estructura incluso en tiempo real, si bien esta tecnología se encuentra todavía en desarrollo para su uso extensivo.

4.3.2 Tecnologías de reparación

Las tecnologías de reparación pueden ser mecánicas o encoladas dependiendo de la categorización estructural del elemento y del defecto a reparar, así como el tipo de reparación, es decir, reparaciones en producción o reparaciones en servicio llevadas a cabo por el operador de la aeronave.

Las reparaciones encoladas se encuentran establecidas especialmente para daños menores o reparación de defectos pequeños pero su utilización en daños severos, aunque factible, está severamente restringida al ámbito de la estructura secundaria. Esto es debido al límite impuesto por los criterios de fallo, ya que la estructura reparada debe soportar carga límite en el supuesto de pérdida de la reparación encolada. Dicha limitación está relacionada con la carencia de métodos de inspección que aseguren la calidad de la reparación a largo plazo. Se están realizando esfuerzos para desarrollar nuevos enfoques de calificación de proceso y certificación de estructura para permitir el uso de reparaciones encoladas en estructura primaria de gran tamaño. Por ahora la aplicación de parches metálicos o de material compuesto remachado, es por ello, el estado del arte de las reparaciones de daños severos en estructura primaria de fibra de carbono.

Las reparaciones en servicio utilizan en general materiales diferentes a los de producción, ya que no se pueden realizar mediante la utilización de autoclaves. Incluso cuando las piezas a reparar se pueden desmontar, se carece del utillaje apropiado para poder hacer reparación en autoclave. Por ello, se utilizan materiales desarrollados especialmente para reparaciones que curan a temperaturas comprendidas entre 80 y 130 ºC (dependiendo de que la estructura original se haya curado a 123 ºC o 180 ºC) y capaces de generar poca porosidad curando a vacío sin presión adicional.

Tradicionalmente se han empleado materiales preimpregnados para este fin, pero requieren almacenamiento en congelador. Si bien existen resinas de laminación por apilamiento en húmedo que se pueden almacenar a temperatura ambiente, es necesario un esfuerzo para mejorar sus formulaciones en lo que se refiere a su tenacidad y resistencia a temperatura, propiedades en condiciones de humedad.

Es de vital importancia trabajar en el desarrollo de sistemas que alcancen propiedades mecánicas aceptables a cada vez menor temperatura de procesado (idealmente "en frío", o a temperatura ambiente) de cara a su uso en centros de servicio. Asimismo es deseable disminuir los tiempos de reparación y la exigencia de trabajadores muy especializados certificados.

4.4 Herramientas de diseño

Existen múltiples herramientas de diseño, siendo la clave del éxito el correcto empleo de las mismas. Hay una larga experiencia de esta utilización en empresas, universidades y centros tecnológicos y en el momento actual se están buscando herramientas de simulación que disminuyan el coste y los tiempos de certificación de estructuras en la línea denominada ensayos virtuales.

4.5 Técnicas de ensayo

En estructuras aeroespaciales realizadas con materiales compuestos y para garantizar la integridad estructural, se suele emplear la metodología de ensayos planteada por el manual de materiales compuestos del Departamento de Defensa de EE.UU. (antes MIL-HDBK-17 y ahora CMH-17), vulgarmente denominada "pirámide de ensayos" que establece la necesidad de realizar ensayos desde la "base", a nivel de probetas simples y dirigidas a conocer la respuesta básica de lámina y laminado de material compuesto, hasta llegar al ensayo final de la estructura completa, buscando verificar la bondad de todo el diseño estructural y proceso de fabricación y del cumplimiento del requisito de factor de seguridad de diseño.

Debido a la naturaleza anisótropa de los materiales compuestos, el amplio abanico de propiedades que ofrecen y la constante aparición de nuevos refuerzos y matrices, la puesta a punto y normalización de métodos de ensayo adecuados para establecer de modo fiable y comparable su comportamiento o respuesta plantea dificultades que, en muchos casos, no resultan sencillas de superar.

Actualmente existen numerosas normas y métodos de ensayo que, básicamente, pueden dividirse entre las de "dominio público", generadas en el seno de instituciones, asociaciones y organismos y que son de libre difusión y empleo (previo pago de una cantidad razonable) y las de "utilización restringida", controlada o limitada, propiedad de compañías o empresas que las han generado para su utilización particular.

Entre las primeras cabe destacar las normas ASTM, EN o ISO (o MIL y SACMA, ya no mantenidas pero aún en uso en programas históricos, sobre todo en EE.UU.) y entre las segundas las normas Boeing, Airbus, etc. Una norma de ensayo típica suele incluir la aplicabilidad y alcance de dicha norma, una lista de documentos aplicables y de referencia, una definición de terminología relevante, las descripciones del equipamiento necesario así como del espécimen de ensayo, sus dimensiones, preparación y acondicionamiento y, finalmente, detalles del procedimiento de ensayo, de los métodos de reducción de los datos obtenidos durante el ensayo y de la información que debería incluir el informe de ensayo.

Debe tenerse presente que dado que las propiedades a medir son muchas se requieren multitud de normas, no existiendo todavía un cuerpo de normativa común y único a nivel mundial, por lo que existen diferentes normas de ensayo para obtener una misma propiedad y en ocasiones, el valor de la propiedad obtenido es diferente dependiendo de la norma utilizada.

Por otra parte, el coste de "garantizar" y "validar" lo adecuado y fiable de una norma en lo tocante a su capacidad de obtener determinada propiedad de forma coherente y robusta frente a variaciones de los parámetros de ensayo, es elevado y se requiere mucho trabajo que exige atención y cuidado en su desarrollo, siendo necesidad fundamental la de realizar multitud de ensayos interlaboratorio y resultando esencial desde el punto de vista estratégico, el fomentar y apoyar la participación de instituciones nacionales en comités internacionales de normalización.

A nivel de infraestructura, instalaciones y equipamiento, la inversión necesaria es considerable, especialmente al ir subiendo desde la "base de la pirámide de ensayos" hacia la "cúspide". Se requiere personal con formación adecuada siempre y se trata de un trabajo que requiere atención y pulcritud, resultando en muchos casos tedioso, monótono y muy repetitivo, en especial a nivel de ensayos básicos de caracterización y calificación de material y procesos.

En España existen actualmente un buen número de grupos de trabajo en diferentes Universidades y Centros de Investigación y Tecnológicos, con capacidad y experiencia en la realización de ensayos tanto sobre probeta elemental, como sobre elementos de desarrollo e incluso elemento estructural completo. Quizás el problema fundamental estribe en un desconocimiento de las capacidades combinadas de dichos grupos y de falta de colaboración estrecha y coordinada entre ellos que más funcionan compitiendo entre sí, que colaborando para generar sinergia. La posible razón de esto es la ausencia de un "proyecto" o "proyectos vertebradores nacionales" o, dicho de otro modo, la ausencia de una motivación común que fomente un trabajo en equipo encaminado a conseguir un objetivo u objetivos a nivel nacional y de cara a lograr una posición de excelencia a nivel mundial que motive a los equipos humanos implicados.

La competencia entre autonomías, multiplicándose el número de centros tecnológicos y equipos universitarios fomentados por los Gobiernos Autonómicos sin una estrategia nacional conjunta necesaria para mantener una posición de liderazgo a nivel mundial son, indudablemente, razones que perjudican considerablemente el rendimiento que puede obtenerse de los medios disponible actualmente en España, medios que no son en absoluto escasos, aunque tampoco sean los mejores ni más completos a nivel mundial.

El hecho de que se haya invertido mucho (aunque haya sido de forma desordenada y sin una estrategia común) en tener medios materiales y humanos capaces de acometer las tareas de ensayo de materiales compuestos, puede convertirse en una ventaja para España, siempre y cuando esos medios existentes se pongan a trabajar en común para desarrollar una estrategia nacional en el campo de los materiales compuestos, estrategia que debería definirse cuidadosamente y dejando al margen intereses autonómicos y/o de partido político.

4.6 Limitaciones al aumento de aplicaciones

Hay que destacar las limitaciones actuales que impiden una mayor proliferación de los materiales compuestos, especialmente en productos que implican una serie grande o producción más masiva, como puede ser, por ejemplo, la familia de pasillo único de Airbus.

Desde un punto operativo y tecnológico las más destacadas son:

- Altas inversiones en equipos (autoclave, ultrasonidos, equipos de corte, etc.) que suponen una barrera de entrada para empresas de tamaño pequeño.
- Alto coste de la materia prima y la producción.
- Alto coste y tiempos de fabricación del utillaje.
- Ciclos de producción largos.
- Baja conductividad térmica y eléctrica que dificultan la protección de equipos y sistemas y protección frente al rayo.
- Poca resistencia a impacto.
- Necesidad de realizar protección galvánica en uniones con metales.
- Poca repetitividad en la producción que garantice la calidad.
- Importante gasto en producción en inspección no destructiva.
- Montaje e integración costosos.
- Falta de soluciones de reciclado.
- Falta de estanquidad de las estructuras sándwich.

En España la introducción de la automatización (número robots/empleado) es muy escasa. Los costes de mano de obra en el producto son altos, lo que implica una potencial amenaza si se desplaza la producción a los países tipo China de menores costes salariales.

Análisis de la situación española

5

El incremento en el empleo de los nuevos materiales compuestos en la práctica totalidad de los sectores industriales, ha planteado un conjunto de oportunidades de negocio que está contribuyendo de forma muy significativa a su desarrollo en España. En lo que respecta al sector aeroespacial, su uso ha crecido de forma espectacular a lo largo de la última década en España, partiendo del posicionamiento como uno de los líderes a nivel mundial en capacidades y conocimientos de la antigua empresa CASA, reconocida durante la constitución de EADS. Conviene destacar que merced a este conocimiento en materiales compuestos el volumen de negocio en el sector aeroespacial en España ha crecido acompañando a la mayor utilización de dichos materiales en los nuevos programas de Airbus. De especial importancia es el tejido industrial de socios a riesgo de primer orden que se ha creado para hacer frente al desarrollo y futura fabricación del nuevo A350XWB. Estas empresas españolas, con responsabilidad en el diseño de las estructuras de las que se hacen cargo, podrán en un futuro próximo colaborar con cualquier fabricante a nivel mundial.

Este aumento en la utilización de estos materiales se debe, esencialmente, a su elevada eficiencia estructural, posibilitando fabricar aeronaves y otros sistemas de transporte colectivo e individual en los que se puede alcanzar un considerable ahorro en costes operativos directos, tanto por el ahorro de combustible debido a disponer de estructuras más ligeras, como derivado de la disminución considerable de problemas de corrosión y deterioro de estructuras. Por otro lado, el empleo de estos materiales hace factible la realización de ingenios que resultaban imposibles o muy difíciles de realizar con el empleo de materiales clásicos de ingeniería.

Los materiales compuestos puedan considerarse actualmente como un nuevo tipo de material con la madurez suficiente como para poder emplearse de forma masiva con un elevado grado de fiabilidad. Sin embargo existen muchos aspectos, tanto de los propios materiales como de las tecnologías a ellos asociadas, que no están totalmente maduros y existe una considerable capacidad de mejora, tanto en las prestaciones y características de los materiales en sí, como en los procesos y tecnologías asociados al empleo y puesta en servicio de los elementos estructurales realizados con este tipo de material. Asimismo, existen multitud de posibilidades de mejora ligadas a la creciente utilización en servicio de estos materiales, pudiendo citarse como ejemplo el desarrollo de nuevas y eficientes metodologías y filosofías de mantenimiento de los sistemas estructurales en los que se empleen materiales compuestos.

Esta situación, como se ha comentado, es fuente de una gran cantidad de oportunidades de negocio en España pero, a nivel global, también conlleva un nivel de competencia creciente. Por un lado hay que citar la migración de la fabricación manual de elementos estructurales y su integración hacia las denominadas "economías emergentes", con costos de mano de obra muy inferiores a los actuales en España. Por otro lado, en el área de la generación, diseminación y rentabilidad de los conocimientos necesarios para alcanzar y mantener un alto grado de competitividad, resalta la proliferación y fortalecimiento de nuevos centros tecnológicos y de investigación en las naciones de nuestro entorno atraídos por la aplicación de este tipo de materiales de fuselaje presurizado y revestimientos de ala; países que han demostrado una mayor capacidad de coordinación con los sectores industrial y universitario.

Posibles soluciones para no perder capacidad y competitividad, pasan por la automatización y mejora de los procesos productivos y la implantación en España de una serie de medidas encaminadas a mejorar la coordinación entre industria, centros de I+D, universidades y centros tecnológicos, con una estrategia común y colaborativa cuyo objeto sea optimizar los recursos y obtener resultados útiles para generar un elevado valor añadido. Hay que mencionar asimismo la necesidad de que los nuevos actores empresariales incorporen el I+D+i como elemento esencial de su competitividad a futuro y participen de manera elemental en la elaboración y desarrollo de la mencionada estrategia.

En el marco económico y político actual, la industria aeroespacial nacional depende en gran medida de decisiones que se toman fuera de nuestras fronteras, por lo que sus necesidades de apoyo en I+D y de subcontratación en temas relativos a materiales compuestos y sus procesos y tecnologías asociados, se resolverán, en parte, en ese contexto internacional. Esta situación plantea una situación de difícil competencia que hace muy complicado para los actores españoles de I+D el poder optar a obtener subcontratos interesantes, económicamente rentables y, sobre todo, tecnológicamente avanzados y que permitan adquirir valor añadido.

El éxito en la utilización de los materiales compuestos en estructuras aeronáuticas y espaciales, requiere disponer de los materiales de partida más eficaces, de medios productivos eficientes y rentables y del conocimiento que permita aplicar el material idóneo, procesado de forma rentable en una estructura segura, duradera y ligera. Todo ello hace necesario disponer en España de un tejido de I+D que proporcione soporte fiable, flexible, acertado y rápido a las industrias del sector, industrias que tienen que recuperar unas inversiones considerables en un plazo que, siendo muy largo por las especiales características del sector aeroespacial, no debe alargarse tanto como para poner en claro peligro la competitividad y la existencia de dichas industrias.

En este contexto hay que destacar el riesgo que supone el que materiales esenciales para el sector, como las fibras de carbono, sean prácticamente un monopolio de Japón que produce cerca del 80% de las utilizadas en el sector aeroespacial. Por otro lado, la inversión necesaria y la cantidad y calidad de conocimientos que se requieren para poder competir con Japón hoy día en ese terreno, probablemente sean de tal nivel que hacen que no sea rentable. Otros materiales esenciales para el sector, como las matrices que aglutinan las fi-

5

bras, también presentan situaciones similares. De hecho el desarrollo de nuevas tecnologías de producción requiere del desarrollo de nuevas resinas, desarrollo que no es posible realizar en España en la actualidad, lo que impone un paso limitante importante en el conjunto del I+D+i del sector. Adicionalmente y en relación con nuevos materiales de altas y/o especiales prestaciones, están produciéndose desarrollos de nuevas tecnologías a nivel mundial por las que España debería apostar. Dentro de este ámbito destacan, entre otros, las matrices termoplásticas, las nuevas fibras estructurales y arquitecturas de refuerzo, los nuevos procesos de curado fuera de autoclave (ya sea con preimpregnados o a través de nuevos procesos de infusión de resina líquida como alternativa más flexible al RTM), las nuevas matrices termoestables no epoxídicas, la investigación del comportamiento en servicio a largo plazo de los materiales compuestos o el desarrollo de metodologías de análisis de fallos en servicio, sin olvidar que la incorporación de los conocimientos que se están generando en otros sectores puede ayudar a cambiar esta tendencia.

En relación con el procesado rentable del material para lograr una estructura competitiva, las exigencias de calidad y rentabilidad plantean la necesidad de procesos con mayor grado de automatización, menor consumo energético, más flexibles, etc. Para garantizar una estructura segura y duradera, plantea la necesidad de desarrollar resinas adecuadas para los nuevos procesos productivos, así como tecnologías de inspección no destructiva mejores, más rápidas, más fiables e integrables con la cadena productiva, y nuevas metodologías de reparación, realizables a un costo razonable y que no requieran de medios y/o de personal "excepcionales".

En España, existe una razonablemente buena disponibilidad, a nivel industrial, de equipamiento capaz de realizar de forma automatizada procesos productivos avanzados, adecuados al sector de las estructuras de material compuesto y, además, existen algunos fabricantes de equipos automáticos avanzados de producción y de inspección de elementos estructurales de material compuesto con proyección internacional. Por otro lado, el sector de la fabricación de estructuras de material compuesto de calidad aeroespacial, posee una amplia experiencia y una calidad reconocida internacionalmente en diseño y producción, pudiendo afirmarse que la cadena de valor tiene actualmente una alta capacidad tecnológica en su conjunto, pero el nivel de desarrollo de una estrategia común para el sector, que incluya de forma plena a universidades y centros tecnológicos y de I+D, es todavía muy mejorable.

En lo que se refiere a las empresas subcontratistas de la industria tractora/integradora, la mayor parte se ha limitado básicamente, y hasta la fecha, a "producción", de acuerdo con la experiencia de estas últimas, pero ni han desarrollado todavía ingeniería de diseño a nivel competitivo, ni dedican suficiente esfuerzo y recursos a actividades de I+D+i. En general, y a nivel nacional, puede afirmarse asimismo que la dedicación de recursos de I+D+i al sector de los materiales compuestos en la industria aeroespacial es todavía escasa comparada con otros países del entorno.

Finalmente hay que hacer hincapié en que es de suma importancia, para mantener y mejorar el nivel de competitividad del sector de los materiales compuestos estructurales, buscar y encontrar la forma de aprovechar de forma coordinada el relativamente buen nivel de equipamiento y capacidades de ensayos en universidades y centros tecnológicos y de I+D, integrándolos con el tejido de I+D de soporte a la industria y con una mejora necesaria de la oferta de formación específica en materiales compuestos.

6

Definición de una estrategia a medio y largo plazo

España, por tanto, posee aún un liderazgo en las tecnologías de materiales compuestos y su aplicación aeroespacial que debe mantener mediante el desarrollo de nuevas tecnologías que impliquen un salto tecnológico para poder conceder a su trabajo de fabricación de materiales, diseño, cálculo, fabricación, inspección y montaje un alto valor añadido que le permita seguir en condiciones de competitividad a escala mundial.

La estrategia a corto y medio plazo consiste en fortalecer el tejido industrial y establecer una red de centros y universidades con personal formado para poder mantener ese liderazgo y mejorar su posición con respecto a otros países. Además se debe mantener una coordinación con lo que se realiza en el resto de Europa.

Para ello se considera imprescindible alcanzar una serie de objetivos a corto, medio y largo plazo y se hace necesario destacar el desarrollo en España de los siguientes ámbitos: Investigación (mediante una red I+D+i incorporando universidades, institutos, centros tecnológicos e industria); materiales, ingeniería, fabricación de estructuras, maquinaria y formación.

Objetivos tecnológicos y propuestas de desarrollo

7

Objetivos organizativos del sector nacional

» **Definición de una acción nacional coordinada.**

- Mejorar la relación entre los diferentes actores (empresas, centros de investigación, universidades, OPIs...)
- Coordinación entre los diferentes centros de investigación.
- Mejorar la coordinación interregional.

» **Definición de una estrategia clara del sector español con el fin de reforzar su posicionamiento internacional.**

- Creación de unos Foros nacionales de diálogo sobre el sector (anuales/semestrales) en los que se involucren todos los actores. El objetivo de estos Foros, además de la generación de contactos y el intercambio de ideas, sería la definición, en mayor o menor detalle, de los pilares sobre a los que se debe ir adaptando la estrategia nacional.
- Definición de grandes proyectos por los que apuesta España. Estos podrían, en parte, ser acordados en estos Foros.
  * Sería recomendable considerar el lanzamiento de un programa como los desarrollados a nivel industrial e institucional en EE.UU. (como el CAI, *Composites Affordability Initiative* o el ACCA, *Advanced Composite Cargo Aircraft)* para estimular la búsqueda conjunta de soluciones de abaratamiento de costes y resolución de algunos de los problemas expuestos en el apartado 4.6. Este tipo de programas permite que la gestión de un proyecto común y la construcción de un demostrador tecnológico catalicen una coordinación que de otra forma puede verse cohibida por los intereses particulares de cada actor.
- Creación de una red de I+D+i cuyos miembros se vertebren alrededor de hitos o áreas con hojas de ruta definidas.

» **Aumentar la capacidad española de decisión en el sector.**

» **Detectar y cubrir las necesidades de formación del sector, tanto pensando en satisfacer al sector español como ofertar a terceros países.**

Objetivos tecnológicos

Se presentan a continuación los objetivos principales que demanda el sector aeroespacial español.

Objetivos a corto-medio plazo

» **Estructura y materiales.**

- Abaratar la utilización de materiales preimpregnados con una reducción del 30% en los costes recurrentes mediante:
  * La tendencia hacia la utilización de materiales compuestos termoplásticos en partes estructurales, bien sea por procesos de moldeo por compresión o bajo vacío. Son de especial interés los semi-cristalinos por su mayor resistencia química (tipo PEEK, PEKK o PPS) con refuerzo de fibra continua.
  * El desarrollo de formas y arquitecturas materiales de rápida deposición, como los tejidos tri-axiales de naturaleza cuasi-isotrópica.
  * La utilización de materiales compuestos, materiales auxiliares de menor coste.
    - En lanzadores, se tenderá a utilizar materiales de fibra de carbono calificados para componentes aeronáuticos, debido a las restricciones de fibras de módulo ultra alto UHM.

» **Procesos de fabricación.**

- Mayor flexibilidad y disminución de tiempos en la cadencia de producción con procesos que permitan cadencias de hasta 40 aviones/mes.
- Fabricación de estructuras más integradas que eliminen operaciones y elementos de unión.
- Mayor automatización en los procesos u optimización de la automatización (corte y posicionamiento de telas, inspección, montaje, etc.).
- Una mayor atención a la evolución en la industria global de tecnologías de procesado fuera de autoclave, tanto con preimpregnados como con nuevos procesos de infusión de resina.
- Disminuir las temperaturas de curado.
- Aumento de la utilización de técnicas de moldeo por inyección/infusión.

- Desarrollo de utillaje de menor coste, incluyendo soluciones específicas para series cortas.

» **Procesos de inspección, mantenimiento y reparación.**

- Disminución de los tiempos de inspección mediante la proliferación de lectores de diodo array para la inspección de piezas de gran dimensión o técnicas de inspección sin contacto por técnicas láser en piezas pequeñas.
- Incremento de la automatización de los procesos de inspección por ultrasonidos, optimizando tiempos y costes, mediante la más intensiva aplicación de técnicas de pulso-eco, utilizando sistemas Phased Array para grandes componentes y sistemas basados en Láser (LUS) para piezas pequeñas de geometría compleja.
- Búsqueda de soluciones en sistema de reparación con menor temperatura de procesado, apuntando al desarrollo de sistemas de curado en frío para su uso en centros de servicio.

Objetivos a medio-largo plazo

Estructura y materiales.

» **Estructuras.**

* Desarrollo de nuevos conceptos de estructuras que aprovechen las posibilidades de los materiales compuestos, desarrollando las ideas antes expresadas de integración y multifuncionalidad: elementos de sensorización (por ejemplo fibras ópticas) así como elementos de actuación (como por ejemplo actuadores de materiales piezoeléctricos o SMA's) tanto para la reducción de ruido y vibraciones como para el control de formas *(morphing).*
* Estructuras primarias encoladas sin remaches 'antipelado'.

» **Materiales.**

- Desarrollar materiales compuestos con propiedades mejoradas: abaratamiento de los métodos de producción en un 50% en lo que se refiere a los costes recurrentes.
- Materiales compuestos para zonas de unión.
- Materiales compuestos para zonas calientes que eviten el uso de materiales tipo PMI, BMI. En este sentido existen ya materiales con química totalmente diferente, basados en benzoxacinas, que podrían adaptarse a estas aplicaciones mediante un trabajo de mejora en sus matrices para aumentar su temperatura de servicio.
- Resinas con propiedades estables en condiciones de humedad y temperatura.
- Materiales para estructuras que incorporen la funcionalidad de resistencia a fuego, conductividad, resistencia a erosión, resistencia/amortiguamiento de ruido y vibraciones, etc.
- Materiales termoplásticos tanto para termoconformado como de consolidación in situ.
- Materiales para estructuras sándwich que mejoren la estanqueidad.
- Materiales para fuselajes que resistan agentes químicos.
- Materiales con alta propiedad, especialmente en resistencia a impacto. Resinas de curado a menor temperatura o a demanda (capaces de curar por otros métodos de iniciación, radiación, inducción, etc.).
- Adhesivos estructurales que permitan aplicación automática en línea.
- Resinas con reología y cinética de curado ajustadas para reparaciones, que permitan curar a bajas temperaturas y que permitan mejorar el grado de compactación del laminado.
- Desarrollo de materiales multifuncionales.
- Continuar el desarrollo de materiales especialmente formulados para curado en vacío, que permitan además una prepolimerización previa a la polimerización final.

» **Fibras.**

- Desarrollo nanofibras y nanotubos de carbono que permitan alta conductividad tanto eléctrica como térmica para aplicaciones espaciales.
- Desarrollo e incorporación de nanocompuestos con el fin de conseguir diferentes mejoras de prestaciones.
- Nuevas fibras, por ejemplo tipo SiAl.
- Desarrollo de fibras europeas alternativas al UHM para satélites y aviones como alternativa a la fibra japonesa.

Procesos de fabricación.

En general se persigue un abaratamiento de los costes recurrentes del orden del 50%.

» **Tecnologías de fabricación-procesos.**

- Investigar en técnicas que permitan la fabricación de estructuras con preimpregnados más integradas (por ejemplo tecnologías de fabricación flexibles para rigidizadores, estructuras "isogrid", tecnologías de preparación superficial para encolados, etc.).
- Continuar el desarrollo e incrementar la utilización de las tecnologías de Infusión y moldeo por vía líquida (como los procesos de RTM, VaRTM, SQRTM, etc.) en sustitución de la tecnología de autoclave para la fabricación de ciertos componentes de la estructura.
- Desarrollo de las tecnologías de preformas secas como el cosido u otros para generar preformas 3D que permitan llegar a formas complejas mediante fabricación directa y poder así reducir el nº de piezas y de uniones entre las mismas (con el objetivo dual de una deposición más rápida y una mejora de las propiedades interlaminares).
  * Automatización de preformas.
  * Desarrollo de tejidos 3D.
  * Preformas en espiral.
  * Preforma automatizada para el RTM.
- Reducir esfuerzos residuales mediante el curado a baja temperatura.
- Técnicas de moldeo y curado fuera de autoclave.
- Tecnologías de curado alternativo: microondas, inducción, haces de electrones, infrarrojos, etc.
- Completa automatización en la colocación de las telas.
- Sistemas o estructuras auto-reparables.
- Incrementos de productividad en tecnologías ATL/FP. Desarrollo para el uso de estos procesos con matrices termoplásticas y nuevos sistemas preimpregnados de procesado fuera de autoclave.
- Efectuar producción en serie, incluyendo el corte de telas, apilamiento, compactación, curado, preparación superficial para pintar o encolar, aplicación del adhesivo/pintura e inspección.
- Uniones pegadas para soportes de sistemas.

» **Tecnologías de corte y mecanizado.**

- Mecanizado con elementos intercambiables.
- Forma de fabricar sin necesidad de recantear.

» **Tecnologías de utillaje.**

- Corrección del spring-back.
- Mayor repetitividad en el proceso: piezas con mayor repetitividad dimensional.
- Materiales para utillaje de menor coeficiente de expansión térmica y coste.
- Continuar líneas de investigación en utillaje de menor coste y plazo para prototipado rápido.
- Desarrollo de tecnología relacionada con los "útiles flexibles" para acelerar los procesos de montaje.

Procesos de inspección, mantenimiento y reparación.

» **Tecnologías de inspección y evaluación.**

- Integrar inspección con técnicas de corte.
- Tratar de eliminar la inspección, mediante un aseguramiento por madurez del control de producción.
- Eliminación o disminución de la inspección de pieza terminada mediante la determinación de parámetros de control y su medida.
- Desarrollo de métodos ópticos y de visión artificial para control de la producción.
- Desarrollo de tecnologías para la visión de los objetos incrustados.
- Termografía espectral.
- Inspección de estructuras cerradas.

7

- Supervisión de Salud Estructural, tanto en laminados estructurales como en uniones encoladas.
- Eliminar inspección 100%, basándose en control de la producción y el desarrollo de métodos ópticos y visión artificial (NDT integrado).
- Desarrollo de sistemas de inspección para su uso en uniones encoladas (inspección de la preparación superficial y de la unión resultante).

» **Reparaciones.**

- Desarrollo de métodos de campo para el tratamiento superficial y su inspección.
- Mejora de los métodos de consolidación a baja presión (sólo bolsa de vacío) continuando esfuerzos para reducir la temperatura de procesado.
- Desarrollo de reparaciones estructurales encoladas.
- Reparaciones encoladas de CFRP.

» **Reciclado de materiales compuestos.**

- Reciclado de material preimpregnado o resinas sin curar provenientes del corte o con tiempo de vida expirado.
- Reciclado de material curado inservible.

Herramientas de diseño y ensayo.

» **Desarrollo de metodología para la reducción de ensayos materiales, tanto para la verificación de proceso como para la inspección de recepción de la materia prima o las disposiciones de MRB.**

» **Desarrollar nuevas herramientas de modelizado de respuesta al impacto y de simulación de deformaciones termoelásticas en fabricación.**

» **Investigación de la tolerancia al daño, mecanismos de fallo y fatiga de materiales compuestos.**

» **Mejora de las metodologías de cálculo que se emplean para diseño.**

» **Armonización de valores de diseño y elaboración de bases de datos abiertas.**

» **Reducir el tiempo de ensayo de materiales: utilizar la simulación.**

» **Diseño sobre reglas semi-empíricas.**

» **Investigación de la relación entre efecto-defecto.**

8

Conclusiones y recomendaciones del panel de expertos

Una vez analizadas las capacidades del sector de materiales compuestos para el sector aeroespacial en España, cuyo alcance es el resumido en el Anexo II, y marcada una estrategia y objetivos definidos anteriormente, se plantean una serie de recomendaciones y conclusiones que han sido complementadas con las opiniones de los miembros del Grupo de Vigilancia Tecnológica de la Plataforma Aeroespacial Española y cuyo contenido se someterá al escrutinio de los expertos. Las conclusiones y recomendaciones obtenidas son las siguientes:

» Se quiere conseguir una completa automatización de los procesos de fabricación, desde la laminación automática con robotización del apilamiento y de la inspección, hasta integrar también control al RTM para hacerlo más automático.

» A más largo plazo se va a una producción en serie masiva, para lo cual es necesario el desarrollo de los materiales y tecnologías mencionados en el documento.

» Se debería realizar una evaluación de las posibles colaboraciones con otros países en el ámbito de la producción.

» Se resalta la falta de recursos con formación por lo que se debería hacer un esfuerzo en este sentido hasta conseguir núcleos formativos en áreas de excelencia determinadas dentro de las Universidades, Institutos del CSIC y Centros Tecnológicos que permitan el desarrollo de las tecnologías mencionadas con ideas de alto valor añadido en condiciones de continuidad.

- Asimismo debería incrementarse la coordinación entre los proveedores tecnológicos (universidades, centros públicos y privados de I+D) y la industria fabricante e integradora, de tal forma que estos centros se doten con capacidades en línea con la necesidad demandada por la industria.
- A este tejido para el conocimiento y desarrollo habría que incluir a los fabricantes de materiales con una participación más activa en la colaboración para el desarrollo, incluyendo el acceso a pequeñas cantidades de material (preimpregnados) y capacidades para la modificación de materiales.
- Más aún, en la actualidad existe una gran dependencia externa para el desarrollo de materia prima que, en cierta medida, frena el desarrollo nacional de nuevos procesos y aplicaciones. Se considera que debería aumentar considerablemente el esfuerzo en España en investigación básica en materiales compuestos a fin de conseguir superar las limitaciones mencionadas en el documento.
- Existe una gran dependencia con Toray como suministrador único para fibra de UHM necesaria en Espacio. Sería conveniente que la nueva planta de fabricación de Hexcel en España pudiera fabricar este tipo de fibras en España de tal forma que se eviten las posibles restricciones.
- Se plantea que debería haber una armonización de normativa y que las normas propias Airbus se alineen con las internacionales existentes o, en su defecto, pasen a ser normas europeas EN. Y cuando su necesidad surja de una excesiva ambigüedad de la norma internacional, en un apéndice de la misma. Una norma específica exige un esfuerzo extra en validaciones y además se crea una cierta barrera de entrada al no utilizarse exactamente los mismos procesos y protocolos de fabricación y ensayo por lo que debe hacerse un esfuerzo en la utilización de normativa internacional.

En resumen se podría decir que las conclusiones llevan a dos recomendaciones principales:

- Se debe tender a crear, gestionar e integrar los conocimientos.
- Se deben generar directivas *top-botton* para la priorización del I+D en materiales compuestos, que en alguna medida deberían provenir de acuerdos administraciones-industria tractora-principales socios industriales.

Todo ello con el objetivo de dotar a los fabricantes de estructuras de una mayor tecnología de valor añadido cuantitativo que asegure la continuidad de la competitividad española en este área que se puede lograr a través de una estrategia nacional que apunte por un lado a retener ciertas tecnologías y por otro a preparar al sector ante la pérdida de volumen de trabajo, y que requiere:

1. Potenciar la especialización a través de la automatización.
2. Potenciar las soluciones que requieran de alta especialización para su desarrollo y puesta a punto (como el diseño y la fabricación de estructuras integradas o los procesos de infusión de resina), aprovechando el conocimiento de base y capacidades en tecnología de los materiales compuestos a nivel nacional fruto de décadas de inversión.
3. Explorar las aplicaciones transversales industriales de esta tecnología para mantener un nivel de actividad industrial cuando inevitablemente un gran volumen del trabajo aeronáutico que se realiza ahora en España pase a países de menor coste de mano de obra.

9 Anexos

ANEXO I. Análisis DAFO

Oportunidades

- Evolución hacia un incremento del empleo de materiales compuestos en estructuras aeroespaciales.
- Tecnología no totalmente madura con capacidad importante de mejora tanto en propiedades, como procesos, integración y sistemas de inspección.
- La evolución hacia materiales compuestos precisará de nuevas metodologías de mantenimiento.
- Demanda de mayor automatización.
- Aumento en la demanda de fibras UHM.
- Demanda de nuevas tecnologías y metodologías de reparación de estructuras de materiales compuestos.
- Existencia de nuevos grupos industriales españoles con posibilidad de trabajar a riesgo con socios a nivel mundial.
- Potenciales nichos de mercado (UAS, aviación general, espacio...) que pueden representar una fuente de innovación y coordinación entre los diferentes actores en España.

Amenazas

- Aumento de competencia a nivel global y en particular en economías emergentes.
- Proliferación de Centros Tecnológicos a nivel europeo.
- Reducida influencia española en la toma de decisiones de las empresas tractoras transnacionales.
- Desarrollo de tecnologías a nivel mundial por las que no está apostando España (p. ej. Termoplásticos).
- Excesivo consumo energético y problemas de reciclado en relación con otros materiales competidores.
- Recuperación de inversiones a muy largo plazo.
- Total dependencia de productores de materia prima exteriores.

Fortalezas

- El sector ha acumulado una amplia experiencia en diseño y producción.
- Significativa disponibilidad a escala nacional de equipamientos para procesos productivos avanzados y de fabricación automatizada.
- Existencia de fabricantes de equipos de producción e inspección en España con proyección internacional.
- Hay una alta capacidad tecnológica en la cadena de valor.
- Buen nivel de equipamiento y capacidad de ensayos en universidades y centros de I+D.
- La concienciación medioambiental es favorable (ligereza, ahorro combustible, etc.).
- Existencia en España de una planta de fabricación de fibra de carbono y otra de preimpregnados.

Debilidades

- Escaso nivel de desarrollo de la estrategia establecida para el sector, que debe incluir a universidades y centros de I+D.
- Insuficiente capacidad de coordinación interregional e inversiones aplicables a materiales compuestos en la I+D del sector aeroespacial.
- Falta de armonización de las capacidades y el conocimiento entre universidades, centros de investigación e industria.
- Pocas empresas subcontratistas han desarrollado suficiente ingeniería de diseño.
- Insuficiente disponibilidad de formación media y superior específica en Materiales Compuestos. Riesgo de escasez de recursos con capacidades adecuadas.
- Escasa inversión en I+D comparada con los países del entorno.
- Esfuerzo en I+D no coordinado.
- Muchas empresas centran su interés en la producción y dedican poco esfuerzo a la innovación.
- Coste elevado de los materiales.

ANEXO II: Mapa de capacidades

EMPRESAS

	Sub-área	AIRBUS OPERATIOS	EADS MAS	EADS AIRBUS MILITARY	EADS CASA ESPACIO	ACITURRI	TECNATOM	AERNNOVA	ALESTIS	SENER	HEXCEL	SOFITEC	IBERIA MANTENIMIENTO
Área Tecnológica	Aeronáutica - Aviación Civil	■				■	■	■	■	■		■	■
	Aeronáutica - Aviación Militar		■	■		■	■	■	■	■		■	■
	Aeronáutica - Helicópteros					■	■	■	■	■		■	
	Espacio - Lanzadores				■		■		■			■	
	Espacio - Satélites				■			METÁLICO	■	■		■	
Materiales		■						■	COMPOSITES		■		
Tecnologías de fabricación-procesos	Moldeo por autoclave	■		■	■	■		■	■	■		■	
	Devanado por filamentos							■	■				
	Moldeo por transferencia de resina (RTM)	■		■	■	■		■	SUBCONTRATADO			■	
	Moldeo por Compresión					■		■	■			■	
	Posicionado de fibras (Fibre Placement)	■		■	■				■				
	Encintado (Tape Laying)	■		■	■	■		■	■				
	Rapid manufacturing											■	
Tecnologías de preformas	Braiding (Trenzado)												
	Cosido de preformas (Stitching)												
Tecnologías de corte y mecanizado	Tecnologías de corte y preimpregnados o tejidos	■		■	■	■		■	■			■	
	Tecnologías de corte y mecanizado de piezas finales	■		■	■	■		SUBCO DELTAVIGO	■			■	■

Continúa en página siguiente >>

>> *Viene de página anterior*

EMPRESAS

	Sub-área	AIRBUS OPERATIOS	EADS MAS	EADS AIRBUS MILITARY	EADS CASA ESPACIO	ACITURRI	TECNATOM	AERNNOVA	ALESTIS	SENER	HEXCEL	SOFITEC	IBERIA MANTENIMIENTO
Tecnologías de inspección	Inspección mediante ultrasonidos	■	■	■	■	■	■	■	■			■	■
	Radiografía (Rayos X)	■	■			■		■				■	■
	Termografía (Cámara IR)	■						A TRAVÉS DE CTA				■	■
	Holografía (Láser)	■										■	
	Shearography												
	Tomografía por rayos X												
Tecnologías de ensayo	Impacto sobre probetas	■	BASÍLICAS UC3M					A TRAVÉS DE CTA					
	Impacto sobre componentes	■						A TRAVÉS DE CTA					
	Fuegos sobre probetas			■				A TRAVÉS DE CTA					
	Fuegos sobre Componentes			■				A TRAVÉS DE CTA					
	Estructurales. Cupones	■		■	■	■		A TRAVÉS DE CTA					
	Estructurales. Paneles	■		■	■	■		A TRAVÉS DE CTA					
	Estructurales. Componentes (3D)			■	■			A TRAVÉS DE CTA					
	Estructurales. Full Scale			■	■			A TRAVÉS DE CTA					
Diseño de Estructuras de material compuesto	Caracterización y modelado numérico	■	■	■	■	■		■	■	■			
	Unión de materiales compuestos	■	■	■	■	■		■	■	■			
Monitorización estructural	Sensorización, adquisición y procesado de señal	■	■	■	■		■	■		■			
	Verificación, validación y actualización de modelos	■	■	■	■	■		■		■			
Tecnologías de reparación-procesos	Moldeo y curado con equipo portátil o en estufa con control de ciclo	■	■	■		■		■					■

		EMPRESAS				AGENTES TECNOLÓGICOS								
	Sub-área	ITD	SERTEC	EASY INDUSTRIAL SOLUTIONS	TEAMS	CIDAUT	UPM / ETSIA	FIDAMC	INTA	TECNALIA	IK4	CTA	CATEC	IMDEA Materiales
Área Tecnológica	Aeronáutica - Aviación Civil	■		■	■	■	■		■	■	■	■	■	■
	Aeronáutica - Aviación Militar			■	■	■	■		■			■	■	■
	Aeronáutica - Helicópteros			■	■	■	■		■			■	■	■
	Espacio - Lanzadores				■				■	■	■		■	■
	Espacio - Satélites				■				■	■	■	■		■
Materiales			■		■	■			■		■		■	
Tecnologías de fabricación-procesos	Moldeo por autoclave			■	■	■		■	■	■			LAB. ASOCIADO	
	Devanado por filamentos								■					
	Moldeo por transferencia de resina (RTM)			■		■		■		■	■			■
	Moldeo por Compresión					■				■	■			■
	Posicionado de fibras (Fibre Placement)			■				■		■	■			
	Encintado (Tape Laying)							■		■	■			■
	Rapid manufacturing					■							■	
Tecnologías de preformas	Braiding (Trenzado)										■			
	Cosido de preformas (Stitching)			■				■		■	■			
Tecnologías de corte y mecanizado	Tecnologías de corte y preimpregnados o tejidos			■				■	■		■			
	Tecnologías de corte y mecanizado de piezas finales			■		■				■	■			

Continúa en página siguiente >>

>> *Viene de página anterior*

		EMPRESAS				AGENTES TECNOLÓGICOS								
	Sub-área	ITD	SERTEC	EASY INDUSTRIAL SOLUTIONS	TEAMS	CIDAUT	UPM / ETSIA	FIDAMC	INTA	TECNALIA	IK4	CTA	CATEC	IMDEA Materiales
Tecnologías de inspección	Inspección mediante ultrasonidos				■	■	■	■	■		■	■	■	■
	Radiografía (Rayos X)								■		■		■	
	Termografía (Cámara IR)					■	■			■	■	■	■	
	Holografía (Láser)										■			
	Shearography										■		■	
	Tomografía por rayos X												■	■
Tecnologías de ensayo	Impacto sobre probetas				■	■	■	■	■	■		■	■	■
	Impacto sobre componentes				■	■			■			■		
	Fuegos sobre probetas					■	■			■		■		■
	Fuegos sobre Componentes									■		■		
	Estructurales. Cupones				■		■		■	■		■	■	■
	Estructurales. Paneles				■	■	■		■	■		■	■	■
	Estructurales. Componentes (3D)				■	■			■	■		■	■	■
	Estructurales. Full Scale				■				■			■	■	
Diseño de Estructuras de material compuesto	Caracterización y modelado numérico				■	■	■	■	■	■	■			■
	Unión de materiales compuestos				■	■	■	■	■	■	■			■
Monitorización estructural	Sensorización, adquisición y procesado de señal					■	■		■	■	■			
	Verificación, validación y actualización de modelos					■	■			■	■			■
Tecnologías de reparación-procesos	Moldeo y curado con equipo portátil o en estufa con control de ciclo													

ANEXO III: Mapa de capacidades. Otros centros

Empresas

- APPLUS-LGAI
- ARITEX
- ATOS ORIGIN
- BURDINBERRI
- CADTECH
- DANOBAT Fibra
- DELTA VIGO
- EINA
- Eurocopter
- GRUPO ANTOLÍN
- GRUPO TAM
- IDEC
- IDESA
- INMAPA
- LOXIN 2002
- M. TORRES
- MAGLINE COMPOSITES Y SISTEMAS
- MECANIZADOS ESCRIBANO
- MOLDEO Y DISEÑO OLMAR
- ONAPRES
- TEICE
- CT Ingenieros

Centros Tecnológicos

- TCA
- CIDAUT
- AIN
- Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (CSIC)
- Instituto de Acústica (CSIC)
- Instituto de Automática (CSIC)
- Universidad de Sevilla
- Universidad de Málaga
- Universidad Carlos III
- Universidad Rey Juan Carlos
- Universidad de Zaragoza
- Universidad de Gerona
- Universidad de Oviedo

ANEXO IV: Proyectos relevantes

La industria aeroespacial y los grupos tecnológicos españoles están participando en prácticamente todos los programas europeos, nacionales y regionales dirigidos al desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación y desarrollo de nuevas aplicaciones de los materiales compuestos en aeronáutica y espacio. En particular a escala nacional el programa CENIT ICARO (2008-2011) ha integrado a todos los actores españoles en la innovación de materiales compuestos avanzados y rear-end (cola del avión) reoptimizado, dirigido a desarrollar nuevos diseños y tecnología de materiales compuestos para el rear-end del avión de pasillo único. Se han aprobado posteriormente tres nuevos Proyectos CENIT: SINTONIA (2009-2012) que investiga soluciones en materiales compuestos con un concepto de recuperación-reciclaje y eco-sostenible, TARGET (2010-2013) sobre eficiencia en procesos de materiales compuestos y PROSAVE2 (2010-2013) sobre aplicaciones de estos materiales en sistemas aeronáuticos.

En el contexto europeo FP6 los grupos aeroespaciales españoles participaron en programas integrados tales como ALCAS de nivel I dirigido a reducir costes en operación mediante la utilización de materiales compuestos en estructuras primarias de avión. También la industria y grupos tecnológicos participaron en este programa en varios proyectos de nivel 2 como LAYSA dirigido al desarrollo de materiales multifuncionales integrando soluciones de capas de protección contra el hielo y el fuego, y sistemas de monitorización de la integridad estructural dentro de estructuras basadas en materiales compuestos, ADVITAC dirigido al desarrollo del cono de cola en material compuesto, que integra los sistemas auxiliares APU, o el IAPETUS dirigido a las tecnologías de reparación del compuesto en aeronáutica.

En el FP7, se consiguió representación española en el programa integrado Clean Sky y dentro del mismo se han contratado actividades como REMFOS, dirigida al desarrollo y evaluación de sensores de Fibra óptica embebidos en estructuras aeroespaciales de material compuesto, y programas grandes nivel 2 como MAAXIMUS dirigido a la optimización de un fuselaje en fibra de carbono.

Figura 16. Pieza moldeada por el proceso RTM. (Fuente CIDAUT)

En ámbito espacial los principales programas de I+D e innovación relacionados con los materiales compuestos en fibra de carbono se dirigen al desarrollo de estructuras de alta estabilidad dimensional en los nuevos satélites e instrumentos científicos, a la evolución de los reflectores de las antenas en material compuesto (Programa ESA SCIR), así como proyectos de investigación en la reingeniería de aluminio por material compuesto multifuncional (Programas ESA como MULFUN; AMFSS, AED, HTLHP) En el campo de los lanzadores, los nuevos programas en desarrollo y evolución de los lanzadores NGL /FLPP estudian el uso de técnicas de fabricación automatizas como posicionado de fibras o RTM para estructuras de tanques y estructuras inter-etapas. También hay un grupo de proyectos con participación española dirigidos al desarrollo (diseño, modelizado y monitorización) de uniones híbridas metal-compuesto aplicable a los anillos del Ariane (Proyecto BoJo).

ANEXO V. Lista de acrónimos

- **ASTM** American Section of the International Association for Testing of Materials
- **ATL** Automatic Tape Layup (Encintado Automático)
- **BMI** Bismaleimida
- **CFRP** Carbon Fibre Reinforced Polymer (Polímero reforzado con Fibra de Carbono)
- **CNC** Computer Numerical Control (Control Numérico por Ordenador)
- **CSIC** Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- **DAFO** Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades
- **EADS** European Aeronautic, Defence and Space Company
- **END** Ensayos No Destructivos
- **FP** Fibre Placement (Posicionado de Fibras)
- **IND** Inspección No Destructiva
- **LUS** Laser Ultra Sounds (Ultrasonidos por Láser)
- **MRB** Material Review Board (Junta de Revisión de Materiales)
- **NDT** Non Destructive Testing (Ensayos No destructivos)
- **PMI** Polymer Metil Imida
- **RFI** Resin Film Infusion (Infusión de Resina)
- **RTM** Resin Transfer Moulding (Moldeo por Transferencia de Resina)
- **SMA** Shaper Memory Alloy (Aleaciones con Memoria de Forma)
- **SQRTM** Same Qualified Resin Transfer Moulding (RTM que no precisa nueva calificación)
- **UAS** Unmanned Aerial Systems (Sistemas de Vehículos Aéreos no Tripulados)
- **UHM** Ultra High Modulus (Módulo Ultra Alto)
- **VaRTM** Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (RTM Asistido por Vacío)

ANEXO VI. Definición de términos

- **Fibra de UHM** Fibra de muy alto módulo
- **Fibre placement** Posicionado de fibras
- **Filament winding** Devanado de filamentos
- **Honeycomb** Núcleo de nido de abeja
- **Morphing** Modificación de forma
- **Prepregs** Preimpregnados
- **Shearography** Serigrafía
- **Sensorización** Monitorización con sensores
- **Stitching** Cosido de preformas
- **Tape laying** Encintado

PLATAFORMA
AEROESPACIAL
ESPAÑOLA

Plataforma Aeroespacial Española
C/ Monte Esquinza, 30 - 6º Izq.
28010 Madrid

Tel.: + 34 91 700 17 24
Fax. + 34 91 310 61 81

e-mail: mallorca@plataforma-aeroespacial.org
www.plataforma-aeroespacial.org

DGAM Dirección General de Armamento y Material

tedae Asociación Española de Empresas Tecnológicas de Defensa, Aeronáutica y Espacio

CDTI Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

FUNDACIÓN AEROESPACIO PARA LA INNOVACIÓN Y LA TECNOLOGÍA

proEspacio Asociación Española de Empresas del Sector Espacial
Spanish Association of Space Companies

MINISTERIO DE DEFENSA
SECRETARÍA DE ESTADO DE DEFENSA
INTA INSTITUTO NACIONAL DE TÉCNICA AEROESPACIAL

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE FOMENTO

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO

Con la financiación de:

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

UNIÓN EUROPEA
FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL
"Una manera de hacer Europa"

RET: 370000-2009-9