



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**VALORIZACIÓN DE FIBRA DE
CARBONO EN LA INDUSTRIA DEL
TRANSPORTE.**

Alumno: Mario Jesús Pámpano Godino

Tutor: Francisco Antonio Corpas Iglesias
Depto.: Ingeniería Química, Ambiental y de los
Materiales

Septiembre, 2017

Informe del Tutor/a del Trabajo Fin de Grado/Máster

Autor (Apellido1-Apellido2, Nombre)			
PÁMPANO GODINO, MARIO JESÚS			
Título del Trabajo			
Valorización de fibra de carbono en la industria del transporte			
Titulación	Grado en Ingeniería Mecánica	Especialidad/ Mención	-
Centro	Escuela Politécnica de Linares	Departamento	Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica
Tutor/a del TFG/TFM			Universidad/Institución
FRANCISCO CORPAS IGLESIAS			Universidad de Jaén
Resumen Castellano (máx. 150 palabras)			
<p>En el presente texto se analiza la tecnología de conformación de piezas mediante fibra de carbono y resinas (CFRP), sus aplicaciones actuales en la industria del transporte y otros usos, y los procesos seguidos para tratar los residuos generados. Se discuten las distintas opciones de reciclaje y valorización energética, y se trata intensivamente el proceso de reciclado por pirolisis, al considerarse de los diferentes métodos disponibles, el más completo, y aquel con más posibilidades de implantarse con éxito a escala industrial. Además, se estudian las relaciones del sector con la comunidad de Andalucía y los factores a tener en cuenta para aprovechar las oportunidades que brinda la tecnología.</p>			
Resumen Inglés (máx. 150 palabras)			
<p>In the present text, technology of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), his applications in the sector of transport and other uses are analyzed, as well as the process for treat generated waste. Different choices for recycling methods and energy valorization are discussed, and pyrolysis recycling process is treated intensively, for being considered the most complete, and the method with more possibilities of being successfully implanted at industrial scale. Furthermore, the relations of the sector whit the region of Andalusia, and the factors to consider for take advantage of the opportunities offered by the technology are studied.</p>			
Nomenclatura Internacional de Unesco para la Ciencia y Tecnología http://skos.um.es/unesco6/			
Códigos UNESCO	Descriptor castellano	Descriptor Inglés	
230424	Fibras sintéticas	Synthetic textiles	
330802	Residuos industriales	Industrial wastes	
330807	Eliminación de residuos	Refuse disposal	

No

Los/as Tutores/as dan el Visto Bueno para entregar y defender su Trabajo Fin de Grado/Máster

Jaén, a 1 de Septiembre de 2017

Fdo.: 

SR. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL EVALUADOR

Observaciones y Comentarios:

A mi madre, por su apoyo incondicional.
A mi hermano, por su constancia.
A mi abuela, por su cariño.
A Juan Carlos, por su inestimable amistad.

Y a mi abuelo, por mostrarme el camino.

Índice

1	RESUMEN	1
2	INTRODUCCIÓN	1
3	OBJETIVOS	1
4	ESTADO DEL ARTE	2
4.1	Definición	2
4.2	Importancia en el mercado	3
4.3	Reseña histórica	3
4.4	Factores que influyen en las propiedades de los CFRPs	6
4.4.1	Fibras	7
4.4.2	Tejidos	8
4.5	Propiedades generales de los CFRPs	10
4.6	Ventajas con respecto a los materiales convencionales	11
4.7	El preimpregnado, o como simplificar el proceso productivo	12
4.8	Aplicaciones	12
4.8.1	Transporte	13
4.8.2	Aerogeneradores	22
4.8.3	Combustibles	23
4.8.4	Depósitos de presión	23
4.8.5	Medicina	24
4.8.6	Deporte	24
4.8.7	Otros	24
4.9	Proyección en el futuro	25
5	RECICLADO DE CFRP	26
5.1	Residuos de CFRP	26
5.2	Procesos de reciclado de CFRP llevados a cabo en la actualidad	28
5.3	Impulsores del reciclaje de CFRP	29
5.4	Tipos de residuos	30
5.5	Requisitos y opciones en el reciclado a escala industrial	31
5.6	Análisis y justificación	34
5.7	El tamaño y la calidad del residuo, y sus consecuencias en el producto nuevo	35
5.7.1	Fibras cortas	37
5.7.2	Fibras largas	38
5.8	Procesos de conformado de piezas post-recuperación de fibras	38
5.8.1	Moldeo directo	38
5.8.2	Moldeo por compresión de productos intermedios no tejidos.	38
5.8.3	Alineación de la fibra.	39
5.8.4	Tejidos de fibras recuperadas.	39

6	PIRÓLISIS DE CFRP	39
6.1	Definición	39
6.2	Pirólisis aplicada a los CFRPs	40
6.3	Inconvenientes	43
6.4	Artículos de investigación: resultados obtenidos en ensayos	43
6.4.1	Meyer, Schulte y Grove-Nielsen (2009)	43
6.4.2	Pimenta et Al. (2011)	45
6.4.3	Onwudili, Miskolczi, Nagy y Lipóczi (2016)	46
6.4.4	Asmatulu, Twomey y Overcash (2014)	47
6.4.5	Jiang y Pickering (2016)	47
6.4.6	Pimenta et Al. (2010)	49
7	CONTEXTO	50
7.1	Introducción	50
7.2	Producción andaluza de materiales compuestos	50
7.2.1	Sevilla	51
7.2.2	Cádiz	54
7.2.3	Linares y Córdoba	56
7.3	Residuos de CFRP en Andalucía	56
7.4	Legislación	57
7.5	Implicaciones sanitarias	58
7.6	Implicaciones económicas	59
7.7	Sobre el futuro de la tecnología	60
8	CONCLUSIONES	61

1. RESUMEN

En el presente texto se analiza la tecnología de conformación de piezas mediante fibra de carbono y resinas (CFRP), sus aplicaciones actuales en la industria del transporte y otros usos, y los procesos seguidos para tratar los residuos generados. Se discuten las distintas opciones de reciclaje y valorización energética, y se trata intensivamente el proceso de reciclado por pirólisis; al considerarse de los diferentes métodos disponibles el más completo, y aquel con más posibilidades de implantarse exitosamente a escala industrial. Además, se estudian las relaciones del sector con la comunidad de Andalucía y los factores a tener en cuenta para aprovechar las oportunidades que brinda la tecnología.

Abstract In the present text, technology of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), his applications in the sector of transport and other uses are analyzed, as well as the process for treat generated waste. Different choices for recycling methods and energy valorization are discussed, and pyrolysis recycling process is treated intensively, for being considered the most complete, and the method with more possibilities of being successfully implanted at industrial scale. Furthermore, the relations of the sector whit the region of Andalusia, and the factors to consider for take advantage of the opportunities offered by the technology are studied

2. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, una revolución drástica ha afectado a la fabricación de aeronaves. Desde sus inicios, los aviones se han construido con materiales cuya historia es mucho más antigua que ellos, al igual que la inmensa mayoría de ingenios humanos: metales, madera, vidrio, tejidos naturales y un breve etcetera. Pero a partir de las invenciones de la fibra de carbono y de las resinas plásticas, y de su conjunción para formar plásticos reforzados, la manufactura de aeronaves ha cambiado drásticamente; se ha pasado de seleccionar el material que mejor se adecue al uso deseado, a diseñar y sintetizar un material adecuado para cada función. Esta línea de actuación, nacida en los años 80, lleva el suficiente tiempo en desarrollo para haber supuesto un antes y un después en el sector aeroespacial, y ahora, promete cambiar las reglas de la movilidad terrestre, creando vehículos más ligeros y seguros. Pero con su proliferación, deja por el camino pequeñas cantidades de residuos de difícil tratamiento que con la expansión de la tecnología se van haciendo más grandes, y pueden llegar a plantear problemas. En este Trabajo de Fin de Grado se tratará esta problemática, y se buscará obtener conclusiones fundadas sobre cómo convertir estos residuos en materiales adecuados para los sectores que empiezan a rendirse ante la fibra de carbono.

3. OBJETIVOS

- Analizar el estado actual de la tecnología de fabricación de materiales plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP). Entender cómo se generan, cuáles son sus propiedades, y dónde se emplean actualmente, focalizando los sectores relacionados con el transporte, en los que las predicciones aseguran una expansión imparable.
- Valorar cómo, cuándo, dónde y por qué se generan residuos de CFRP, la naturaleza de estos,

y las maneras existentes de aprovechar los materiales desechados para crear nuevas materias primas con valor industrial.

- Seleccionar un método de reciclado válido de CFRP, a partir de la información existente, y desarrollarlo para conocer sus ventajas e inconvenientes, así como la forma óptima de llevarlo a cabo, con el fin de potenciar la industria en general, y el sector del transporte en particular.
- Relacionar la información obtenida con la Comunidad Autónoma de Andalucía, para conocer cuáles son las oportunidades industriales del sector del reciclaje de CFRP en la región.

4. ESTADO DEL ARTE: Fibra de carbono

4.1. Definición

Se ha optado por incluir este apartado para tratar los conceptos sobre los que versa el presente Trabajo de Fin de Grado, y distinguir entre los dos posibles significados que se le dan al término «fibra de carbono».

Primeramente, en el sentido más literal de la expresión, se designa con este término a una fibra de largas cadenas de carbono obtenida artificialmente.

En otra acepción, también se emplea comúnmente para designar a las resinas epoxi reforzadas con este tipo de fibra, o CFRP por sus siglas en inglés (*Carbon Fiber Reinforced Plastic* o *Carbon Fiber Reinforced Polimer*). Otras denominaciones son PRFC (Plásticos Reforzados con Fibra de Carbono), CRP (*Carbon Reinforced Plastic*), FRP (*Fibre Reinforced Plastic*) o CFRTP (*Carbon Fibre Reinforced Thermal Plastic*). Se usará en este texto, para referirnos al composite, las siglas CFRP, las más extendidas.

Una fibra de carbono es una hebra larga y delgada con un contenido de carbono entre el 80% y el 99%, formada por carbono amorfo y carbono cristalino (o grafito) [55], y un diámetro que oscila entre 5 y 8 micrómetros [80]. La orientación de estos cristales de carbono, en paralelo al eje largo de la fibra hace que dicha fibra posea una alta resistencia, que tiende a aumentar cuanto mayor es su diámetro (Fig.1). Esta fibra puede utilizarse en aplicaciones industriales, bien trenzando varios miles de fibras para dar lugar a un solo hilo, o bien entrelazándose estos siguiendo un patrón determinado y formando un tejido.

Por su parte los CFRPs se fabrican con las nombradas telas de fibras de carbono y generalmente una resina epoxi o poli epóxido, un polímero termoestable que después de mezclarse con un agente catalizador, adopta una forma fija definitiva. El tejido de fibras queda atrapado en la resina curada y aporta elasticidad y resistencia al conjunto, mientras que la resina protege a las fibras y distribuye las cargas a las que se somete al material por toda su extensión [66]. Al combinarse de este modo las propiedades de ambos materiales se crea uno nuevo que aúna las ventajas de los dos. Por lo tanto cuando se habla de fibra de carbono en productos cuya función es estructural o de refuerzo estructural nos referimos en realidad a un material compuesto reforzado por fibras: una matriz polimérica donde las fibras de carbono han sido embebidas, es decir, un CFRP (Fig.2).

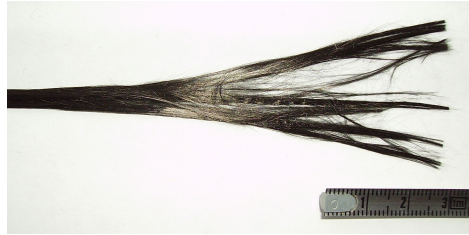


Figura 1: Fibras de carbono.

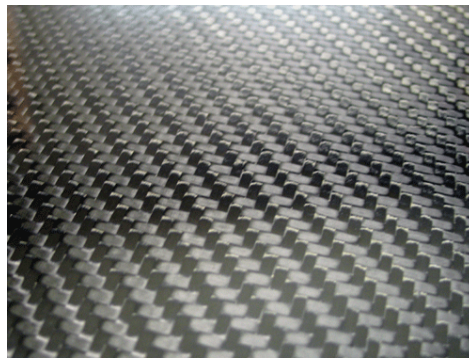


Figura 2: Aspecto típico de un CFRP con fibras tejidas.

4.2. Importancia en el mercado

Dentro del campo de los composites, la rama de los CFRPs es una de las más empleadas. Es el material de matriz de carbono que genera más ingresos, con un 49% del total [61]. Según el informe *Top 20 leading composites companies 2015* redactado por la consultora Visiongain, es el segundo material compuesto general más utilizado, con un 42,5% del mercado [118]; la fibra de vidrio se sitúa por encima a solo cuatro puntos, a pesar de ser un material mucho más antiguo, y de contar con un precio de mercado muy inferior. Frente a otros materiales compuestos con matriz de carbono, las uniones con resinas termoestables representan en la actualidad el 49% del total del mercado [63], manteniéndose esta cifra constante desde hace dos años [62].

4.3. Reseña histórica

Las primeras referencias históricas a fibras hechas con carbono datan del siglo XIX, cuando fueron desarrolladas como filamento incandescente para las primeras bombillas eléctricas creadas por Edison [7]. La idea de emplazar un hilo de carbono en una ampolla de vidrio surge en 1870 y da a lugar la presentación en la Exposición de París de 1881 de un bulbo transparente, en cuyo interior un filamento obtenido a partir de fibras carbonizadas de bambú japonés permanecía durante horas ardiendo sin llegar a consumirse [44]. Así pues las primeras bombillas suponen también el inicio de la comercialización de fibras de carbono. En 1890 empezaron a utilizarse filamentos metálicos de otros materiales como osmio y tantalio, capaces de aguantar más calor y, por tanto, de generar más luz. Las bombillas de carbono quedaron en consecuencia obsoletas, si bien actualmente algunos fabricantes las han rescatado, ya que producen una luz tenue y de una particular coloración, apreciada para su uso con fines decorativos.

Por otro lado, en 1934 se crea en Alemania la patente de la condensación química de epóxidos y

aminas, a nombre del Paul Schlack [18]. La síntesis de una resina basada en el bisfenol-a es patentada poco más tarde en dos sitios distintos de forma simultánea: por el Dr. Castan en Suiza y por el Dr. Greenlee en EEUU [71]. El suizo consiguió comercializar el producto con el nombre de «Araldite» [115].

La fibra de carbono tal y como la conocemos hoy, aparece en 1958, en Ohio, a raíz del trabajo desarrollado por Roger Bacon [9], buscando un refuerzo para plásticos moldeados a altas temperaturas, usados en la fabricación de misiles. Las primeras fibras se fabricaron calentando filamentos de rayón a altas temperaturas hasta que estas se carbonizaban. Sin embargo, el resultado obtenido eran unas fibras de resistencia y rigidez muy pobre. Siguiendo procesos análogos, en la década de los 60 se realizan multitud de procesos experimentales para obtener fibras de carbono con otras materias primas. En Japón, Akio Shindo prueba a utilizar el poliacrilonitrilo (*PAN*) para obtener fibras, y lo consigue con una notable mejora de las propiedades con respecto a los resultados anteriormente obtenidos por Bacon con el rayón [70]. A partir de entonces, el poliacrilonitrilo se convirtió en la materia prima principal para obtener fibras de carbono. Otros experimentos fueron llevados a cabo usando brea obtenida como subproducto de la producción de petróleo (fibras *Pitch*), en los que se obtuvo un material con mayor porcentaje de carbono, pero con una menor resistencia a la compresión.

El uso de las resinas, en fabricación desde años atrás, mezcladas junto con estas fibras de carbono, dio lugar a la familia de los CFRPs, de los que existen varios tipos según el género de fibras y/o resina empleadas. En 1963, el gobierno británico, intuyendo las posibilidades de estos nuevos materiales, facilitó que el Ministerio de Defensa patentará un proceso de fabricación y autorizará a tres empresas a su uso y desarrollo: Courtaulds, Morganita y Rolls-Royce [70]. Esta última equipó a ciertos motores de los aviones Vickers VC10 de la aerolínea británica BOAC con unas palas de fibra de carbono experimentales. El 30 de julio del 1968, un vuelo comercial sale del aeropuerto de Heathrow con destino Lagos, y escala en Kano. Hasta Kano el viaje discurrió sin problemas, pero en la última parte del viaje las condiciones meteorológicas fueron muy adversas, con fuertes tormentas eléctricas. Tras varios cambios de rumbo provocados por la fuerte lluvia, el motor número tres quedó de repente inutilizado, lo que provocó un aterrizaje no planificado en Accra. Se determinó que la exposición a la lluvia tropical había dañado las palas de fibra, que se habían roto y desmenuzado hasta casi desaparecer [47]. Intentando corregir los errores de unas hélices poco confiables, Rolls-Royce lanza el RB-211, un motor destinado a los fabricantes de aviones estadounidenses, con aspas fabricadas en fibra de carbono. La elección del material fue de nuevo un craso error. Después de múltiples complicaciones productivas, que colocaron a la empresa en una situación económica muy peligrosa, hubo que someter al motor al test de ingestión de pájaros. Lejos de aguantar, las aspas estallaron en pedazos [70], lo que supuso la cancelación automática del uso de fibra de carbono en las aspas. Éstas fueron reconstruidas en titanio, previo rediseño del motor, lo que provocó la bancarrota de Rolls-Royce, que tuvo que ser nacionalizada por el gobierno británico. Para reducir gastos a la marca, la sección de desarrollo de fibra de carbono fue vendida. Por su parte Morganite abandonó también la producción de fibra de carbono al no obtener los beneficios esperados, dejando solo a Courtaulds, empresa histórica de fabricación de tejidos, como única industria fuerte de composites en Gran Bretaña. Con el tiempo Courtaulds diversificó su proyecto de fibra de carbono en dos grandes campos: aeroespacial y equipamiento deportivo. Esta compañía continuó fabricando y desarrollando aplicaciones, con colaboraciones con empresas como Mitsubishi, hasta que tras realizar una mala inversión en California,

se vio forzada a abandonar la producción de fibra de carbono en 1991 [48]. Años antes, Mitsubishi creó su propia producción en Japón, que hoy en día sigue funcionando, siguiendo el ejemplo de otras empresas vecinas como Nippon Carbon y Toray.

En 1971, un Citroën SM gana el rally de Marruecos. Entre las múltiples innovaciones técnicas del coche, destacan unas llantas diseñadas por Michelin, fabricadas con resina reforzada con fibra de carbono y pequeños componentes metálicos. Es la primera aplicación de los CFRPs en el campo de la automoción. A partir del 1972, los compradores de la versión de calle del Citroën SM podían elegir como opción las “RR” (*roues resin*). Al ser caras, y no muy solicitadas, Michelin abandono la fabricación en 1975 al cesar Citroën la comercialización del coche [64].

Años más tarde la fibra de carbono logra atención mundial cuando en 1981 el equipo de fórmula uno McLaren presenta el MP4/1 [74], el primer coche de carreras que usa un chasis monocasco de fibra de carbono, suministrado por Hercules Aerospace, una compañía estadounidense. La empresa, que trabajaba para el Ministerio de Ejército de Estados Unidos, y que se especializaba en motores de alta potencia, llevaba años de investigación y desarrollo con fibra de carbono. Las primeras pruebas determinaron que la rigidez del monocasco era 2´5 veces mayor a otro de las mismas características fabricado en aluminio. Con respecto al McLaren F30, su antecesor, el coche era un 30% más ligero. Debido a su revolucionaria construcción fue acogido con cierto recelo; los desastrosos resultados de las aspas de Rolls-Royce era uno de los pocos antecedentes conocidos del uso de los CFRPs, y se especuló mucho con que el coche pudiera ser seguro en caso de accidente. Ese mismo año, en el Gran Prix de Monza, John Watson pierde el control de su MP4/1 a 250 kilómetros por hora en la salida de una curva. Hace un trompo atravesando la pista, y estrella la parte trasera del coche contra las barreras. Inmediatamente se produce una violenta explosión que impulsa el coche hacia delante y lo fragmenta en varios trozos. Pese a la gravedad del siniestro, Watson salió inmediatamente del habitáculo, que había quedado intacto, salvándole la vida, y probando la idoneidad del material para la protección del piloto en caso de accidente [96]. El MP4/1 se utilizó hasta 1983, destacando por ser el coche más ligero de la competición, y participando en cuarenta y tres carreras, de las que ganó seis. Pocos años más tarde, todos los coches participantes en fórmula uno estaban diseñados con un monocasco de fibra de carbono.

En cuanto a la aviación, donde los composites de fibra de vidrio se utilizaban desde 1957, el uso de la fibra de carbono a gran escala comienza en el 1985, con la construcción de la aleta de cola vertical para los Airbus 310-300 y algunas piezas móviles en las alas. Pronto Boeing se uniría a la corriente constructiva, marcando el inicio de una revolución en el modo de fabricar aviones, donde conforme la tecnología se establecía, el porcentaje de piezas aumentaba [18]. En la figura 3, puede apreciarse la evolución de la expansión de los CFRP en años posteriores en los modelos de Airbus.

En la actualidad el material se utiliza ampliamente, en piezas estructurales, mecánicas y de fuselaje. Por ejemplo, el 50% del peso de un Boeing 787 “*Dreamliner*” (2007- Actualidad) corresponde a materiales compuestos, formado en un alto porcentaje por CFRPs. Las mejoras en los procesos productivos han logrado que además de las grandes empresas del transporte, pequeñas factorías puedan utilizar esta tecnología con fines más diversificados, lo que ha supuesto la llegada de las CFRPs a cualquier tipo de productos, destacando los múltiples elementos usados como equipamiento deportivo en prácticamente cualquier disciplina.

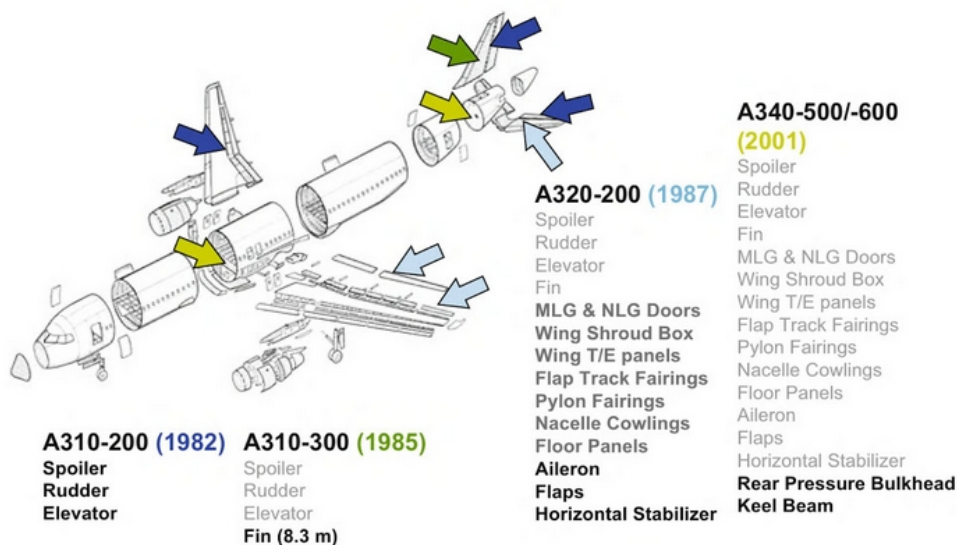


Figura 3: Piezas fabricadas en CFRP por Airbus, según año y modelo.

4.4. Factores que influyen en las propiedades de los CFRPs

Como introducción a este apartado, se ha de tener en cuenta que siempre que se habla de propiedades de un material se tiende a generalizar, pues todos los materiales cuentan con diversos factores que modifican el resultado final: el tipo y la calidad de la materia prima de la que se obtiene, las fórmulas químicas, el proceso productivo, los métodos de acabado, etc.

En el caso de los materiales compuestos, el abanico que se presenta es mucho mayor, puesto que no solo se ha de tener en cuenta todas estas variaciones en un solo material, sino en dos (como mínimo), y además cubrir las posibles combinaciones entre ellos, puesto que las diferencias químicas y físicas entre fibra y resina hacen que a nivel macroscópico no lleguen a formar parte de la misma estructura. Este concepto es fundamental para entender cómo trabajan los CFRPs, pues la unión de fibra y resina no generará un material nuevo de nuevas propiedades, sino que aglutinará las propiedades de sendos materiales en una sola entidad, sin modificar su estructura química. A diferencia de, por ejemplo, una aleación entre metales, cuyo resultado final no es ninguno de los componentes iniciales sino un producto uniforme y diferente, las piezas conformadas con CFRPs mantienen la dualidad de sus componentes prácticamente inalterada.

Esto es aún más complicado en los casos en los que se utilizan otros materiales en combinación con los CFRP, como espumas, plástico o aluminio, para generar piezas con núcleos más ligeros y/o paneles tipo sándwich (Fig.4)

Se incide tanto en este aspecto porque a la hora de reaprovechar piezas fuera de uso resultará crucial; la separación de los CFRP de lo otros materiales puede resultar complicada y en algunos casos hasta inviable. En piezas o residuos compuestos 100% por CFRP, la resina usada es un plástico termoestable en la mayoría de casos, por lo que conformar otra pieza con esa misma resina es imposible. Un proceso de reciclaje semejante al de los metales, al del vidrio o al de los plásticos termofusibles no puede existir para este material, por sus propiedades intrínsecas. Sin embargo, si hay procesos que podremos utilizar para disolver la resina, liberando a la fibra de carbono encofrada, que si podrá

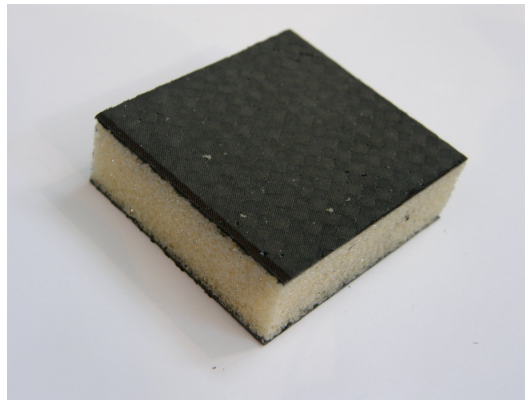


Figura 4: Material CFRP tipo sándwich, con relleno de espuma.

formar parte de una pieza nueva de CFRPs. Teóricamente, este proceso podría llevarse a cabo un número ilimitado de veces, generando piezas formadas siempre por las mismas fibras de carbono pero con una resina nueva en cada ocasión. Se ha añadido a la última frase el “teóricamente” porque el mismo proceso de recuperación afecta a las fibras de diversos modos, que se explicarán más adelante.

Además, en el caso particular de los CFRPs se ha de tener en cuenta otro factor más a la hora de definir las propiedades finales del material; cuando las fibras de carbono son trenzadas y tejidas, la disposición de los hilos varía el comportamiento final del material en función del proceso utilizado. No son ya solo las uniones de naturaleza química entre materiales las que se tienen que tener en cuenta, sino que además, las uniones macroscópicas entre hilos del mismo material hacen aumentar o disminuir factores como la resistencia, la elasticidad o la dureza.

A continuación el autor de este texto intentará dar una visión general de los distintos parámetros que modifican el material final obtenido (tipos de fibras, formas del tejido de carbono y tipos de resina). No se pretende realizar una lista intensiva de los diferentes CFRP existentes, pues cubrir todas las combinaciones posibles resulta prácticamente imposible y poco práctico; cada fabricante modifica el producto según sus criterios comerciales, existiendo infinidad de CFRPs con propiedades diferentes. El objetivo es únicamente conocer los parámetros que influyen en que el comportamiento del material.

4.4.1. Fibras

Las fibras de carbono suelen clasificarse según el tipo de materia prima del que se han obtenido, también denominado precursor, y el valor de su módulo de elasticidad.

4.4.1.1. Precursor Uno de los factores más decisivos a la hora de conocer las propiedades de una fibra de carbono es conocer la materia prima que se ha usado para su obtención. Como ya hemos tratado anteriormente, las primeras fibras se fabricaron a partir de rayón y no eran demasiado buenas; esto se debe a que el porcentaje de carbono que contenían era en realidad muy bajo, en torno al 20%.

Akio Shindo en sus pruebas pioneras con el poliacrilonitrilo (PAN) consiguió subir dicho porcentaje hasta el 55%, con la consiguiente mejora en las propiedades físicas. Desde entonces el porcentaje de carbono en las fibras se ha logrado aumentar casi hasta la totalidad (existen ya fibras con porcentajes mayores al 99% de carbono) y se ha establecido el PAN como materia prima en la obtención de

la mayoría de fibras de carbono comercializadas actualmente; en torno al 90% de las fibras comercializadas hoy provienen del PAN. El poliacrilonitrilo usado no es totalmente puro, sino que se trata de un copolímero con un 92% de carbono aproximadamente, cuyo porcentaje restante contiene trazas de metilacrilato, metilmetacrilato, cloruro de vinilo, vinilacetato o ácido itacónico, entre otros [73].

Por otro lado tenemos a las fibras *Pitch*, obtenidas tomando como base la brea que aparece como subproducto en la industria petrolífera. En los primeros experimentos con ellas el porcentaje de carbono de las fibras fue del 85%, lo cual las hacía *a priori* más interesantes que las fibras de PAN. No obstante, el hecho de que el material resultante no aguanta tan bien los esfuerzos de compresión relegó su uso a puntuales aplicaciones industriales. Actualmente, como en el caso del PAN, su proporción de carbono en la fibra también llegan a porcentajes superiores al 99% [102].

Otros procesos de obtención de fibras de carbono con diferentes materias primas llegaron a buen término, como el alquitrán o la celulosa, pero por motivos diversos no han llegado a formar parte de ningún proceso productivo de fabricación.

4.4.1.2. Módulo de elasticidad La clasificación que se utiliza generalmente en la industria para conocer las propiedades de una fibra en concreto es según su módulo de elasticidad. Esta clasificación depende también del tipo de precursor, así que podemos decir que está intrínsecamente unida al párrafo anterior como podemos ver a continuación.

En la actualidad, podemos destacar cinco tipos de fibras en fabricación y comercialización. Entre paréntesis se muestran las siglas usadas generalmente para identificarlas, provenientes de sus designaciones en inglés [7, 15].

- Ultra alto módulo (UHM). Cuentan con un módulo de elasticidad superior a los 500 GPa.
- Alto módulo (HM). Tienen un módulo de elasticidad superior a 300 GPa y una relación de resistencia a la tracción/módulo de tensión menor a 1.
- Alta fuerza (HT), o también llamadas de modulo intermedio (IM). Sus valores de resistencia a la tensión son superiores a 3 GPa y las relaciones entre resistencia a la tracción y módulo oscilan entre 0'015 y 0'02.
- Bajo módulo (LM). Tienen estructura isótropa, valores bajos del módulo de elasticidad y de resistencia a la tensión.
- Módulo estándar (SM). Estas a su vez se dividen en dos clases, una general y otra específica destinada a aplicaciones aeroespaciales. La primera tiene un módulo de Young fijo de 228 GPa, mientras que en la segunda, los valores son algo variables, entre 220 y 241 GPa.

La fabricación de fibras para la industria aeroespacial requiere fibras capaces de aguantar mayores sollicitaciones; en las siguientes tablas las separamos de las fibras creadas con fines generales, y las relacionamos con los factores que hemos tenido en cuenta, además de aportar más datos.

4.4.2. Tejidos

Abarcamos aquí los distintos factores relacionados con el modo en el que las fibras están tejidas.

Propiedades	SM – General	SM – Aeroespacial	IM – Aeroespacial	HM – Aeroespacial
Contenido en carbono (%)	95	95	95	>99
Diametro de la fibra (μm)	6-8	6-8	5-6	5-8
Densidad (gtm)	1,8	1,8	1,8	1,9
Módulo de Young (GPa)	228	220-241	290-297	345-448
Resistencia a la tracción (MPa)	3800	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Alargamiento a la ruptura (%)	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1
Resistividad eléctrica ($\mu\text{-cm}$)	1650	1650	1450	900
Conductividad térmica (W/m ² K)	20	20	20	50-80

Figura 5: Características de fibras PAN.

Propiedades	LM – General	HM – General	UHM – General
Contenido en carbono (%)	>97	>99	>99
Diametro de la fibra (μm)	11	11	10
Densidad (gtm)	1,9	2	2,2
Módulo de Young (GPa)	170-241	380-620	690-965
Resistencia a la tracción (MPa)	1380-3100	1900-2750	2410
Alargamiento a la ruptura (%)	0,9	0,5	0,4-0,27
Resistividad eléctrica ($\mu\text{-cm}$)	1300	900	220-130

Figura 6: Características de fibras *Pitch*.

4.4.2.1. Patrones Distinguimos tres tipos principales de composiciones con hilos de carbono, no muy diferentes a las utilizadas para conformar tejidos de uso más mundano; plano, *twill* y satinado (Fig.7) [66, 76].

En el tejido plano, cada hilado longitudinal y transversal pasa por encima de un hilo y por debajo del próximo. La constitución de esta tela, genera un entramado en el que los hilos quedan muy sujetos unos con otros, dejándoles el mínimo espacio para moverse, con lo cual el refuerzo es máximo. Se utiliza con frecuencia en laminados de espesor considerable. Es una tela muy estable, que difícilmente se distorsiona.

Para los tejidos *twill*, palabra que puede traducirse como “cruzado” o “asargado”, el número de hilados longitudinales que pasan por encima de los transversales puede variarse. La libertad de movimiento de los hilos es mayor, lo que facilita entre otras cosas que puedan humedecerse bien, facilitando la adhesión a la resina.

El tercer tipo es el tejido satinado, satén o satén. Su nombre proviene del tejido de algodón del mismo nombre, liso y brillante. En este tejido se sigue un entrelazado similar al *twill* pero es aún mayor el número de hilados de cualquier tipo que pasan unos por encima de otros sin entrelazarse, lo que genera que en un lado del tejido queden la inmensa mayoría de fibras con orientación transversal y en el otro lado estén las de orientación longitudinal. Así, destaca por su acabado superficial, brillo y consistencia.

4.4.2.2. Anchura Un dato crucial a la hora de saber qué tipo de tejido se trata es conocer la anchura de este. Las denominaciones más comunes son 1K, 3K, 6K, 12K, 24K y 50K, entendiendo K como 1000 unidades. Es decir en un tejido 1K, la anchura del tejido es la que ocupan 1000 fibras de carbono. En un tejido 3K, es la de 3000 fibras, y así sucesivamente. Conociendo además, que 1000 fibras de carbono colocadas en paralelo y pegadas unas a otras sin dejar espacios (al igual que ocurre cuando forman parte del tejido) tienen una anchura algo aproximada de 1mm, se nos proporciona una manera de medir la anchura del tejido de forma macroscópica.

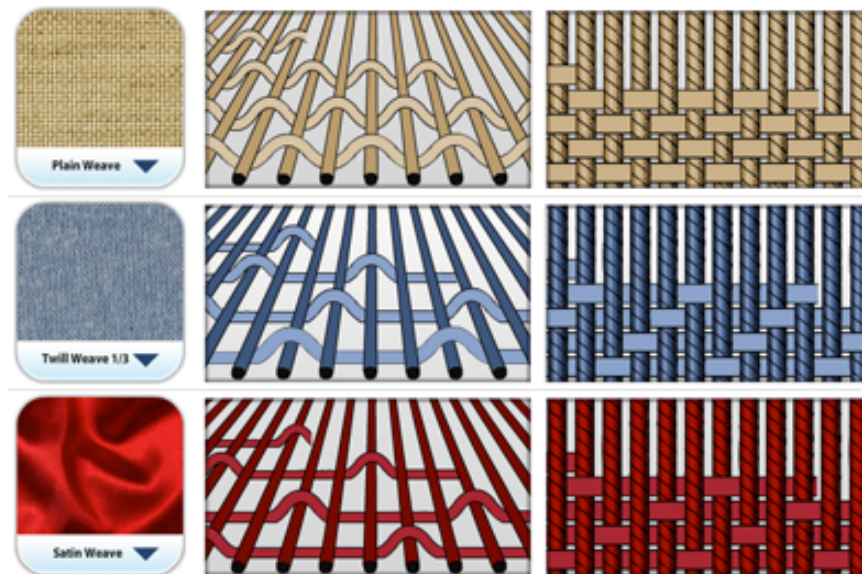


Figura 7: Tipos de tejidos de fibra de carbono; plano (marrón), *twill* (azul) y satinado (rojo).

4.5. Propiedades generales de los CFRPs

Como se ha mencionado, el comportamiento de los CFRP responde a los dos materiales utilizados para su fabricación. Las ventajas de la fibra contrarrestan los puntos débiles de la resina y viceversa. El resultado general del conjunto cumple las siguientes características [55, 62, 66, 116]:

- Elevada resistencia mecánica, con elevado módulo de elasticidad.
- Rigidez específica elevada.
- Muy buenas propiedades de amortiguación.
- Elevada resistencia a tracción.
- No presenta plasticidad, puesto que el límite elástico coincide con el límite plástico.
- Tenacidad alta.
- Peso muy bajo.
- Baja densidad.
- Estabilidad dimensional. Esto es, una vez conformada la pieza, no sufrirá alteraciones, conservando siempre su forma original.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia química alta.
- Resistencia térmica alta.
- Alta resistencia al impacto.
- Alta conductividad eléctrica.

- Compatibilidad biológica.
- Baja absorción de humedad.

4.6. Ventajas con respecto a los materiales convencionales

Principalmente, podemos decir que los CFRPs se están utilizando para sustituir a los metales allí donde su uso genera ciertos problemas, que se traducen en costes, averías y accidentes

En dos piezas equivalentes de CFRP y metal, el peso será muy superior en la pieza metálica: por ejemplo, el uso de una pieza de CFRP representa una reducción del 30% en peso frente a una pieza equivalente de aluminio y un 60% con respecto a una fabricada en acero [46]. Además, la fatiga de materiales se presenta mucho más tarde que en el caso de los metales, en el peor de los casos, cuando el material es sometido al 90% de la resistencia a tracción, frente a los metales, donde se presenta cuando se llega, generalizando, a la mitad de la resistencia a tracción. Esto se debe principalmente a que en los CFRPs el grosor de las fibras es diminuto, lo que disminuye la probabilidad de encontrar defectos, tanto a nivel microscópico como macroscópico, los cuales son los principales responsables de la aparición de grietas y fracturas. Además de que la probabilidad de encontrar defectos en las fibras sea menor, la unión uniforme de éstas a la matriz, les aporta una resistencia superior.

A la hora de diseñar las piezas, la manufactura metálica tiene una amplia serie de limitaciones. Por ejemplo, una pieza que haya de ser doblada en su proceso de fabricación, tiene que tener un material concreto y un espesor suficiente para no partirse durante la fabricación, ni obviamente después de esta. Además del mecanizado, cuando por alguna razón las piezas metálicas se componen de varias partes, estas tienen que unirse entre sí, dando lugar a mas procesos de fabricación (soldadura, remachado...) que aportan al conjunto final costes, probabilidades de fallo y peso extra. Por su parte, los CFRPs pueden fabricarse con formas muy específicas y caprichosas sin causar tantos problemas. Una vez emplazadas en el molde correspondiente, no habrán de presentar problemas ni por forma ni por extensión, obteniéndose una pieza final ligera y perfectamente adecuada a la función a la que se destina. Esto dota a los composites en general y a los CFRPs en particular de un potencial tecnológico imbatible en aplicaciones técnicas, donde la fidelidad de la pieza obtenida a una forma específica diseñada es la clave para obtener máquinas más eficientes (aerodinámica, mecánica de fluidos...).

En el caso de la resistencia química, la manufactura metálica, por lo general, se encuentra muy desprotegida frente al medio, teniendo que recurrir a pinturas y/o a tratamientos de acabado (galvanizado, pavonado, cromado, niquelado...) para garantizar su funcionalidad. El aire y el agua son los principales enemigos de los metales, causándoles corrosión, lo que se traduce en el mejor de los casos en gastos en concepto de arreglos y sustituciones, y en el peor, en roturas y colapsos con el consiguiente peligro potencial. Sin embargo, los composites son inmunes a estos agentes externos, e incluso en medios salinos, los más corrosivos, no presentan daños causados por estos agentes, puesto que la matriz polimérica protege a las fibras.

En el apartado anterior hablábamos de una estabilidad dimensional alta. Esto no solo se limita a que los esfuerzos mecánicos no deforman la pieza, sino a que el coeficiente de expansión térmica de los composites es muy bajo. En el caso de los CFRPs este coeficiente es de $2 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [69]. Esto elimina también todos los problemas relacionados con la dilatación que afectan a los metales; al igual que con la corrosión, la dilatación de los metales es ampliamente conocida y sus efectos pueden

anticiparse y paliarse. No obstante no deja de ser un problema grave que afecta a las estructuras y su funcionalidad, creando otro riesgo latente que se elimina con el uso de CFRPs.

Por último, una vez la pieza de CFRPs ha de instalarse en su ubicación final, dicha instalación requiere por lo general de herramientas y procesos más sencillos que en un caso análogo con piezas metálicas. Una vez más, debido a su menor peso, cualquier montaje será más simple. Esto cobra especial interés en aquellos casos con condiciones especiales que suponen un peligro potencial a las personas y los bienes (en terrenos irregulares, montajes a grandes alturas, en medios acuáticos...). Estas operaciones de montaje de la pieza en su ubicación final deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar la pieza, con el objetivo de reducir al mínimo la manipulación de los CFRPs con herramientas convencionales. Operaciones que eliminen fragmentos de la resina curada y hagan que las fibras de carbono estén en contacto con el medio, pueden provocar daños en el aspecto de la pieza y su rigidez. Además, el uso de herramientas que afecten a las fibras de carbono encofradas en la resina liberará al medio polvo de carbono, perjudicial para personas y organismos que puedan inhalarlo, y fuente de accidentes al interferir con los sistemas eléctricos [6, 45].

4.7. El preimpregnado, o como simplificar el proceso productivo

Como ya ha quedado claro, a los tejidos de fibra de carbono ha de añadirse una resina para que el producto final de CFRP quede conformado y con una forma fija. Este proceso se simplifica mucho con una forma específica de comerciar la fibra de carbono y la resina ya añadida en un mismo producto: a esta materia prima se la denomina «preimpregnado» o «prepreg». Esto no es más que el tejido de fibra de carbono, presentado en forma de carretes, a los que se les ha aportado previamente un añadido de resina reactiva. La matriz es curada de forma parcial, para mantener las fibras del tejido unidas entre sí y a la propia matriz, pero de un modo en el que el material mantiene la flexibilidad del tejido, lo que permite la manipulación y el modelado. A este estado se le denomina «estado B», en el cual la resina tiene una viscosidad media o alta. El prepreg se mantendrá así mientras la resina no se cure completamente, para lo cual el material habrá de conservarse en frío; además tiene una fecha de caducidad a partir de la cual la resina del prepreg comienza a perder propiedades. Para conformar la pieza final se requiere calor, aplicado en un horno o autoclave. Haciendo una analogía culinaria, podríamos decir que el prepreg es el equivalente en CFRP a un plato precocinado; minimiza los tiempos de preparación y el proceso es mucho más limpio al tener la resina ya incorporada, lo cual repercute también en la facilidad del proceso, en el que prácticamente solo hay que controlar el tiempo y la temperatura del curado, lo que asegura un resultado final siempre fiable, pues los porcentajes de la mezcla están ya predefinidos y optimizados.

4.8. Aplicaciones

Atendiendo a las propiedades enumeradas y a las ventajas que presentan con respecto a los metales, se pueden deducir muchas de las aplicaciones en las que se usan los CFRPs hoy. No obstante, pasamos a desgranarlas de manera pormenorizada. Si no obstante, usando el método inductivo formuláramos una descripción general de las manufacturas de CFRPs, podríamos decir que se trata de piezas y estructuras usadas donde la reducción de peso es fundamental, donde los esfuerzos a los que se someterá la pieza son muy exigentes, en elementos de alta tecnología que se encuentran muchas veces a la vanguardia de la técnica, y diseñados con ciclos de vida muy largos. En todos los ámbitos,

los productos fabricados con CFRPs, o que contienen piezas fabricadas con ellos, se sitúan en los escalafones más altos de su segmento. Como excepción muy notable hemos de citar a la aeronáutica, donde el uso de CFRPs es ya convencional, y un análisis actual de dicha industria sin tener en cuenta este material, resulta imposible.

4.8.1. Transporte

4.8.1.1. Aeronáutica Los CFRPs son hoy por hoy fundamentales en esta industria. El 30% de la fabricación mundial de CFRP se destina a esta industria, y el 61% de los ingresos que se generan gracias a este material están relacionados con aeronaves [63], repartiéndose entre un 60% en aplicaciones civiles y un 40% en militares [62]. Las tendencias actuales del mercado se basan en sustituir todo el metal posible por CFRPs y CMCs (Composites de matriz cerámica). Podemos mencionar como dato básico que desde 1980, el consumo de combustible en los aviones comerciales ha bajado en una media del 9% en aviones tipo “Jumbo”, un 27% en aviones de fuselaje ancho o de doble pasillo, y un 35% en fuselaje estrecho o de pasillo simple [95]. La piedra angular de este ahorro ha sido el uso intensivo del CFRPs, con lo cual nos podemos hacer una idea aproximada de lo que este material representa en esta industria. Pero si además, tenemos en cuenta que desde 1990 el precio del combustible de avión ha crecido anualmente un 7,7%, y que es el principal gasto de las aerolíneas (en la actualidad entre un 33 y un 40 del gasto es en concepto de combustible, aunque se espera que con la inflación futura se pueda llegar al 50%), la reducción de peso de las aeronaves se convierte en algo vital para todas las empresas relacionadas con la aeronáutica [95]. En el caso de aviones militares, ocurre algo análogo, pero es entonces el gobierno de cada país el que ha de hacerse responsable de estos gastos. No se exagera por lo tanto al decir que una reducción de peso muerto en los aviones, influye en cierto grado en la economía global. Visto esto, no es de extrañar que a pesar de los recientes años de crisis mundial que hemos sufrido, las cifras de producción y venta de aviones no haya sino aumentado, pues las aerolíneas y los gobiernos buscan aparatos de aerodinámicas, pesos y motores más eficientes, ya que el gasto inicial compensa el ahorro posterior.

Los aviones que se fabrican hoy, entre los que incluimos el Airbus A320neo -en servicio desde enero de 2016-, el Boeing 737 MAX -desde mayo de 2017- o los Bombardier CS100 -julio de 2016- y CS300 -diciembre de 2016-, son aproximadamente un 50% más eficientes que los aviones de características comparables presentados en la década de 1980 [58]. Este dato nos podría parecer prácticamente *de Perogrullo*; innecesario y carente de valor, al comparar máquinas actuales con otras de cerca de 40 años; pero en verdad, es un dato muy válido, pues hemos de tener en cuenta que muchos de estos aparatos “obsoletos” siguen en funcionamiento.

Esto puede parecer una contradicción: si utilizar aviones modernos es tan importante, ¿por qué máquinas tan antiguas siguen operando? Principalmente es debido al alto precio de una aeronave, que hace que esta sea utilizada durante muchos años para amortizarse. Los principales gobiernos y operadores aéreos tienen las facilidades económicas necesarias para sustituir sus flotas e incorporar aparatos más modernos, pero las aeronaves en buen estado generalmente pasan a otras instituciones que manejan menor presupuesto.

El ciclo de vida de un avión no está definido por ninguna normativa, y pueden volar mientras superen sus revisiones reglamentarias. Los aviones se someten a revisiones de distintos niveles, denominadas *A, B, C y D*, siendo la *A* la más sencilla y frecuente y la *D* una revisión pieza a pieza que dura

varios meses y en la que incluso se retira la pintura a la aeronave para comprobar si existen grietas por fatiga [98]. Cada una de estas revisiones ha de pasarse después de un determinado número de horas de vuelo. Si un avión no supera una revisión, que vuelva a la actividad generalmente es solo cuestión de gastar dinero en piezas y mano de obra; al ser una máquina compleja y costosa, la necesidad de sustituir piezas se plantea desde las mesas de diseño y no presenta un problema añadido, aunque lógicamente, a mayor edad del aparato, mayores serán los gastos. Por esto, los aviones pueden durar en funcionamiento muchos años sin poner en peligro a sus ocupantes y su edad, *per se*, no es un motivo para desgazar la aeronave. La retirada de cada aparato es decidida por su propietario, y está basada principalmente en argumentos económicos.

Dar una cifra que cuantifique la edad máxima de los aviones es por lo tanto muy subjetivo, pues no depende de factores técnicos sino humanos. Generalmente podríamos estimar la edad tope que alcanzan entre 30 y 35 años, o incluso más si se trata de un avión militar. La propia empresa Boeing, explica en su video documental *Boeing's Converted Freighters: 20 More Years Of Life* el proceso que siguen para convertir un avión de pasajeros en uno de carga. En palabras de Jens Steinhagen, director del programa de conversión en cargueros: “se puede fácilmente conseguir otros veinte años [de vida para el aparato], en ocasiones vuelan incluso más tiempo, con lo que se está duplicando su vida.” [16].

Como datos, y según la Asociación Internacional del Transporte Aéreo (IATA), el tiempo promedio de uso de un avión comercial supera los 25 años de servicio. Desde el origen de la aviación con turbina, en 1951, se han fabricado 31.000 aviones de pasajeros, de los cuales dos terceras partes, seguían en funcionamiento en 2012 [34].

Es decir, durante los últimos años, los aviones nuevos han sustituido a aviones antiguos, que estaban en funcionamiento incluso antes de que los CFRPs tuvieran aparición e impacto en la industria. Esto nos deja un dato importante; la inmensa mayoría de piezas de CFRPs fabricadas para la aviación siguen en funcionamiento, puesto que entre 1980 y 1990 la aplicación de composites en la aeronáutica era muy reducida, limitándose prácticamente a la góndola (termino aeronáutico para designar la carcasa exterior), la cascada de las turbinas, diversos carenados y las puertas del bloqueador. Después de los intentos infructuosos de Rolls-Royce que mencionamos anteriormente, en el año 1995 entra en el mercado el motor GE90, de General Electric [107], equipado entre otros en el Boeing 777, que destaca por ser el primeros en servicio en equipar aspas de CFRPs, fabricadas con más de 1700 piezas de prepreg. También el cárter, las plataformas del ventilador, los paneles acústicos, y una multitud de piezas generales están fabricados con el mismo material. Es el inicio de una era de uso masivo de CFRP en aeronaves.

Podemos destacar dos grandes grupos de aplicaciones de los CFRPs en la aviación: funciones estructurales y fabricación de motores. La primera resulta de comprensión muy básica: la estructura interna del avión, en un afán por reducir peso ha ido desplazándose hasta la fibra de carbono, y conforme la técnica ha conseguido crear piezas de mayor confiabilidad, el porcentaje de CFRPs empleado en estructuras primarias y secundarias ha aumentado enormemente por parte de los principales fabricantes de aviones comerciales. Sirva como ejemplo la progresión en cuanto a toneladas de CFRPs utilizadas: Boeing, emplea en su modelo 777 (1993) 10 toneladas de CFRPs por avión. Para el 787 (2007) la cifra sube hasta 35 toneladas por avión (Fig. 8). Por su parte, Airbus, ha pasado de 2 toneladas por aparato en el A320 (1987) a 35 toneladas por aparato en el A380 (2005) [83].

En cuanto a la fabricación de motores, las principales ventajas de los CFRPs frente al uso de

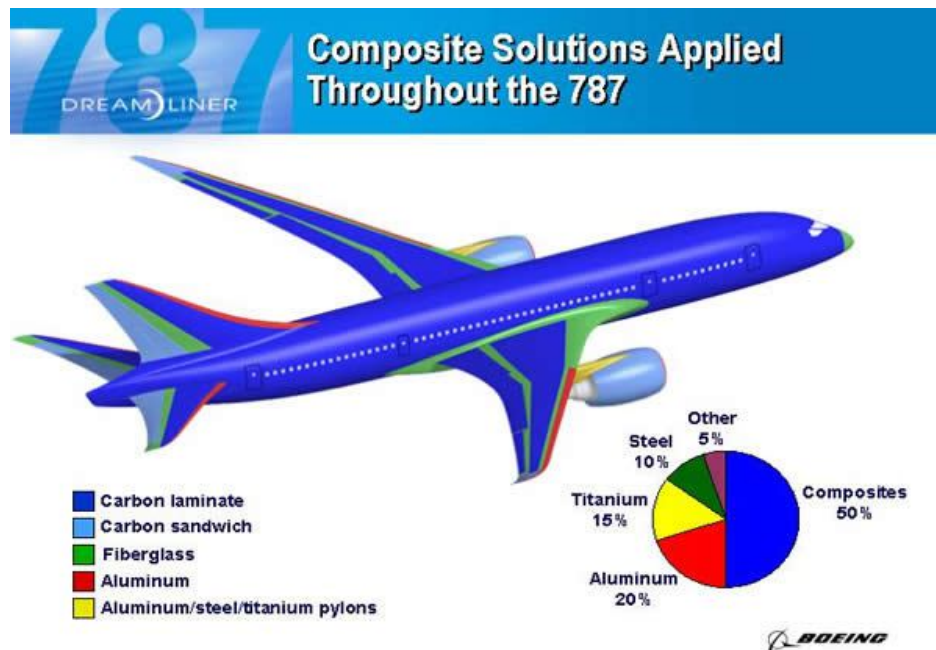


Figura 8: Boeing 787. Materiales empleados en el fuselaje. En el gráfico circular, los materiales empleados en todo el aparato.

los metales es que los composites no requieren de un sistema de refrigeración, al contrario que las piezas metálicas, y que el desgaste de los composites es muy inferior, por lo que la duración de los componentes y del motor en sí, es mayor.

Por esto, el mercado de materiales compuestos para motores aeronáuticos se ha triplicado desde 2005. En las fábricas de motores LEAP están equipando actualmente a los Airbus A320neo, Boeing 737 MAX y COMAC c919 (avión de una nueva empresa china de aeronáutica que aspira a rivalizar con Airbus y Boeing). Esto hace que solo en LEAP, la producción actual de aspas de CFRPs sea de 28.000 al año [37].

Además, según *Composites Forecasts and Consulting*, en sus previsiones sobre aviones tipo jets, turbohélices y aviones de motor de émbolo en el periodo 2014-2023, estiman que para saciar la demanda del mercado mundial se necesitarán 67.710 motores a reacción. Esto se traduce en aproximadamente 23.586 toneladas de materiales compuestos usados para piezas de motor. De estos componentes, un 60% serán fabricados en Estados Unidos, un 30% en Francia, y el 10% restante está repartido principalmente entre Japón, Irlanda, Italia, España, Bélgica y Austria [95].

Para el futuro, y no satisfechos con las cifras alcanzadas, las autoridades del sector buscan aún mayores reducciones de gasto de combustible. El Consejo Asesor para la Investigación Aeronáutica en Europa (ACARE) ha marcado pautas a seguir en su documento *Flightpath 2050*, a cumplir como fecha límite en ese año. Entre otras, piden la reducción del 75% como mínimo en emisiones de CO_2 por pasajero/km, reducciones del 90% en las emisiones de óxido nítrico (NO_x) y reducciones del ruido generado en el 65% [26]. Esto nos indica que se esperan grandes reformas en la construcción de aeronaves y que la reducción de peso resultará una vez más, fundamental.

Según Henrik Runnemalm, director de ingeniería avanzada de *GKN Aerospace*: “los productos construidos con CFRP se están desplazando principalmente desde la parte delantera del motor hacia

la trasera, y también desde el exterior del motor hasta su interior”¹ [36]. Es decir, las piezas hechas con composites cada vez están situadas en zonas más críticas, donde sufren mayores esfuerzos y temperaturas. Los polímeros aguantan cada vez mayores temperaturas, pero conforme nos acercamos a las zonas calientes del motor, donde se llegan a alcanzar más de 1.100°C, los CFRPs no son una opción viable, y se recurre a materiales compuestos de matriz cerámica [90].

Para dentro de las aplicaciones civiles no limitarnos solo a los aviones, podemos destacar también la resurrección del dirigible; prácticamente abandonado desde el desastre del zepelín *Hindenburg* en 1937, actualmente nuevos modelos se encuentran en fase de pruebas, con el objetivo de convertirse en una especie de cargueros de mercancías aéreas, puesto que a pesar de que la velocidad de crucero no es muy alta, presentan grandes ventajas en este campo, como su gran capacidad de carga, la capacidad de despegue y aterrizaje vertical y en algunos casos, la posibilidad de implantar un sistema para cargar y descargar mercancía sin tener que aterrizar. Otros abogan por usarlos como cruceros aéreos para viajes de placer. Con un alto porcentaje de piezas de gran longitud fabricadas con CFRPs para mantener el peso de la nave al mínimo posible, se encuentran en fase de pruebas un nuevo zepelín, construido con fines promocionales conjuntamente por ZLT Zeppelin Luftschifftechnik y Goodyear [85], y el *Aeroscraft Worldwide Aeros*, fabricado por la empresa californiana *Aeros*, con el patrocinio de la NASA y el gobierno estadounidense [59].

En cuanto a aplicaciones militares, los CFRPs se utiliza en los aviones de combate y de transporte de tropas de forma similar a en aviación civil, aunque los fabricantes no están en estos caso tan dispuestos a facilitar datos. De hecho, es en el desarrollo de los cazas de combate donde muchos de los avances en ingeniería de CFRPs se han conseguido, buscando desarrollar al máximo las máquinas de guerra, de las que potencialmente puede depender el destino de una nación. Además, el uso de fibra de carbono en la confección de las cabinas en vez del metal, ha permitido aumentar la altura de vuelo de los aparatos desde 600 metros a 2400² [43]. Se estima que entre EEUU y Europa, se invierten 700 millones de dólares anualmente en CFRP utilizados en este tipo de aplicaciones [60]. Como caso particular señalaremos los VANT, vehículos aéreos no tripulados, UAV por sus siglas en inglés, o simplemente «dron», nombre popularizado por los medios de comunicación a raíz de su uso en recientes conflictos armados. Su uso en labores continuas de vigilancia que implican muchas horas de vuelo ininterrumpidas, requiere que en su diseño se apliquen los materiales que supongan una bajada de peso del aparato. Inicialmente construidos con fuselaje de fibra de vidrio, el hecho de requerir cada vez mayor capacidad de carga útil (armamento, material de vigilancia...), y sufrir fatiga y desgastes debidos a un uso prolongado, ha llevado a que en su diseño y fabricación se produzca un uso ingente de CFRPs. En un artículo sobre el tema de Ginger Gardiner, *The outlook for unmanned aircraft* (2009)[42], se dice que al menos existen 70 empresas con 200 proyectos realizados o en desarrollo, aunque se advierte que la lista no es intensiva, ya que la mayoría de proyectos de este tipo se mantienen en secreto. Además, preveía una fabricación de VANT en el periodo 2010-2015 de 13.000 naves aproximadamente, con un consumo de CFRPs de entre 45 a 50 toneladas.

Otro uso militar de los CFRPs es la construcción de partes de misiles, como los conos de tobera y las carcasas de los motores.

En el caso de los helicópteros, el uso de CFRP se encuentra mucho más atrasado que en los casos

¹Cita original: “CFRP products are moving mainly from the front of the engine towards the back and also from the outside, moving inward.” [36]

²En el texto original, medidas dadas en pies: desde 2000 hasta 8000 [43].

anteriores. Aproximadamente solo el 7% de las piezas fabricadas con este material y destinadas a fines aeronáuticos se emplaza en un helicóptero, tratándose en gran parte de las aspas, donde el uso de CFRPs conlleva una mejora de su vida útil mejorando su comportamiento frente a la fatiga, valor que prima en el diseño de dichas piezas frente a la rigidez, como en el caso del Sea King [75]. La marca Composites Helicopter Internacional lleva cierto tiempo realizando pruebas con el KC 518 Aventurer, el KC630 o el KC650, diferentes motorizaciones del primer modelo de helicóptero cuyo fuselaje estaría íntegramente fabricado en CRP y Kevlar. Por el momento, uno de los pocos modelos fabricados acabó hundido en Nueva Zelanda después de un amerizaje de emergencia tras perder el control en un vuelo para grabar imágenes promocionales [101], lo que ha provocado cambios en el diseño [109].

4.8.1.2. Automóviles En el campo de la automoción la fibra de carbono lleva usándose en la fabricación de deportivos de muy alta gama durante aproximadamente los últimos 25 años. Como ya se reflejó durante la reseña histórica, el uso de los CFRPs durante las competiciones de Fórmula 1 por parte de la firma McLaren, favoreció el uso y la percepción positiva de este material. Desde entonces McLaren, no ha vuelto a fabricar ningún automóvil sin chasis de fibra de carbono (Fig. 9), destacando en el 1992 el McLaren F1, un superdeportivo legalizado para su uso fuera de circuito, convirtiéndose en el primer automóvil de producción con chasis de CFRPs, y que ostentó hasta 2005 el récord de velocidad en automóviles de producción, con 386 km/h, marcando al resto de fabricantes del segmento el camino a seguir. En el presente, todas las marcas de deportivos de lujo incluyen elementos de fibra de carbono en aquellos modelos de grandes prestaciones para los cuales, el precio final del coche no es un problema para sus compradores. En ocasiones, segmentados de sus departamentos de I+D, se han formado centros específicos de desarrollo de procesos de fabricación de fibra de carbono, como el de Lamborghini -Lamborghini Advanced Composites Structural Laboratory, ACSL- o el de Pagani -Pagani Composite Research-. Las piezas conformadas con este material son innumerables en este campo. Se emplea en elementos secundarios como consolas y molduras con los que se persigue, además de la reducción de peso, un fin estético y un componente de exclusividad -Rolls Royce, Mercedes-Benz, Ferrari o Bentley-, la estructura interna de los asientos -Lotus Elise Cup 250, Porsche 911 R- o de la capota retráctil -Audi R8 Spyder-; no obstante, sin lugar a dudas sus aplicaciones más interesantes desde un punto de vista ingenieril son las de piezas fundamentales para el vehículo, como el chasis -todos los Lamborghini, Pagani y Bugatti-, piezas independientes de carrocería -Porsche Cayman, Lexus LC 500h-, carrocerías completas -Honda NSX, Aston Martin Vantage GT8- o llantas -Ford GT, BMW M4 GTS-. No solo se emplean de forma aislada, sino formando conjuntos con otros materiales; en el Audi A8 de 2017, el chasis está fabricado mayormente en aluminio, con algunas piezas en aceros de diversa dureza, y una sola pieza de CFRP, situada tras los asientos traseros y separando el habitáculo del maletero. Solo esta pieza, formada por 19 capas de fibra de carbono, aporta el 33% de la rigidez torsional del chasis [103]. El empleo de este material en esta porción del chasis garantiza que el espacio habitable del coche, llamado «célula de supervivencia», sufra la menor deformación posible en caso de accidente (Fig. 10).

Además, cada vez más fabricantes utilizan los CFRPs para piezas que conforman el motor, específicamente aquellas cuya cota en el coche es más alta, como las tapas de balancines y los tubos de alimentación de aire (todos los modelos de la marca Koenigsegg), para desplazar el centro de gravedad del motor hacia abajo, y mejorar el comportamiento dinámico del coche. El árbol de transmisión



Figura 9: Chasis. En primer plano, McLaren MP4/1 (1981), en segundo McLaren MP4-12C (2011).

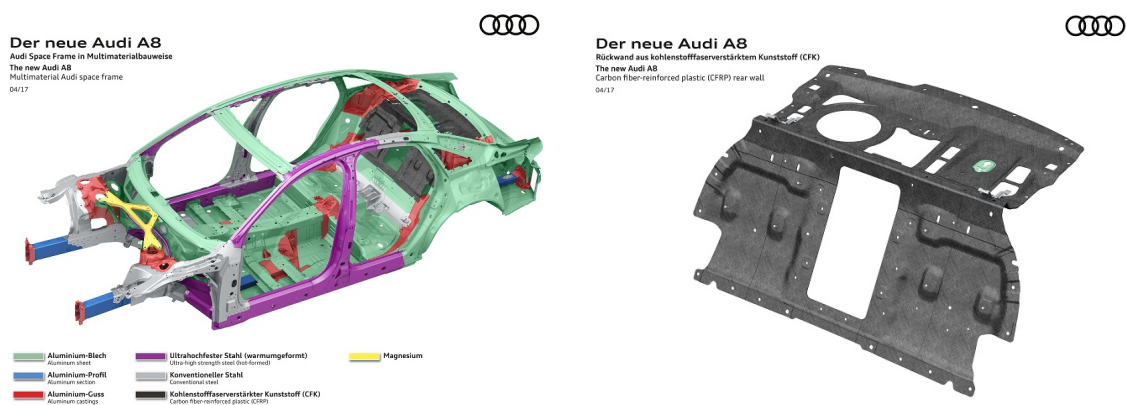


Figura 10: Chasis de Audi A8 2017 según el tipo de material (izquierda) y pieza de CFRP (derecha), según diagramas de la marca.

es otra pieza fabricada en CFRPs en el caso de algunos automóviles tipo Gran Turismo como el Alfa Romeo Giulia o el Aston Martin DB9.

Como tantas veces antes en la historia industrial, este despliegue de medios por partes de las marcas para tener los coches más veloces, más ligeros y más exclusivos, favorece mediante la competitividad la aparición de nuevos métodos y sistemas con el fin de buscar los procesos más económicos y con menor desperdicio de material, que permita abaratar los costes de fabricación y desarrollo. El fin mismo de este proceso será la inclusión intensiva de los CFRPs en automóviles generalistas, destinados a compradores de a pie. Cabe preguntarse: ¿es esto rentable para los fabricantes?

En una estimación para el año 2020 realizada por el grupo japonés Toray, fabricante de CFRPs, se estima la producción de “supercoches” en 5.000 unidades anuales, de modelos “súper-lujo” en 500.000 unidades anuales, de modelos “lujo” en 5 millones de unidades anuales y de coches de producción en serie en 95 millones de unidades anuales [83]. Conseguir que el uso de CFRPs baje peldaños de esta pirámide es garantía de mejorar las cifras de producción exponencialmente, y con ello las ganancias.

En la actualidad, el automóvil fabricado con CFRPs que más se aproxima al rango de vehículo de masas es el BMW i3, comercializado desde 2013, con una remodelación que se podrá adquirir a partir de noviembre de 2017, a la que se le unirá una versión más deportiva, denominada i3s. El fabricante alemán, al igual que muchos de sus competidores había utilizado CFRPs en ciertas piezas, sobre todo en paneles de carrocería de los vehículos de su serie M, la rama de vehículos potenciados, y destinados a usuarios que buscan una conducción más deportiva. Pero el BMW i3 es un turismo eléctrico del segmento B, de cinco puertas, que cuenta con un chasis monopieza fabricado con CFRPs, lo cual lo convierte en el primer vehículo de uso urbano con un chasis de fibra de carbono. Además, ciertas secciones del techo, y la estructura de los asientos traseros están conformadas con materiales que incorporan fibras de carbono recicladas, provenientes originalmente de residuos de producción, lo cual es también una novedad en el mercado [40] (Fig.15). Con un precio base en su lanzamiento de 35.500€ (en el mercado español), se sitúa en el sector de automóviles de lujo de su segmento, algo similar al tercer escalafón de la clasificación de Toray. Sin embargo sienta un precedente muy importante, introduciendo al CFRPs en vehículos urbanos, donde el coche se utiliza no para ganar carreras, sino para labores mucho más mundanas (Fig. 12). El hecho de que este automóvil sea eléctrico está íntimamente relacionado con el chasis escogido, buscando mejor comportamiento al tener que mover menos peso y sobre todo, aumentar la autonomía del vehículo. El lector de este TFG no debe pensar que el autor del mismo tiene una fijación concreta con la marca BMW; si se hace tanto hincapié en el fabricante bávaro es porque su nombre aparece desde hace unos años en prácticamente cualquier texto que trate sobre el uso industrial de los CFRP y sus aplicaciones futuras. Es una de las empresas que han apostado por la inclusión del material a sus productos, formando alianzas comerciales con Boeing para buscar métodos de reciclaje para los CFRPs, o realizando una inversión de 100 millones de dólares en la planta de Moses Lake (Washington, EEUU), que pertenece a la compañía SGL y se dedica exclusivamente a la producción de fibra de carbono, logrando triplicar la producción de ésta desde las 3000 a las 9000 toneladas [17]. Todas estas acciones son pasos encaminados a establecer el uso “masivo” de CFRPs en sus vehículos (Fig.11); además del comentado i3, BMW ya comercializa otros coches con chasis íntegros de CFRPs como el i8 (deportivo eléctrico) o con chasis construidos parcialmente con CFRP como el Serie 7 (berlina de representación de cuatro puertas del segmento

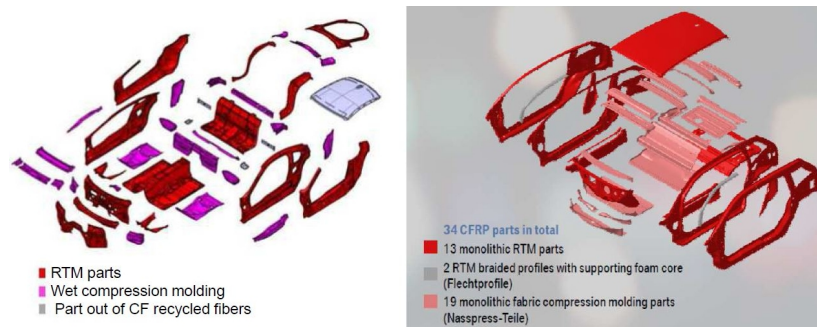


Figura 11: Despieces de chasis de BMW i8 (izquierda) y BMW i3 (derecha) [124].



Figura 12: Chasis de CFRP del BMW i3.

F). Además, se están desarrollando para ser comercializados en 2020 otros tres modelos, el Serie 3, el Serie 6 y el Serie 8 con una misma plataforma modular de CFRP. Para el mismo año se espera un BMW i5 motorizado con pila de combustible de hidrógeno; el uso de CFRP en este automóvil será en los paneles de la carrocería. Es decir, BMW ha aumentado enormemente la probabilidad de encontrarnos un coche fabricado con altas cantidades de CFRPs pasando a nuestro lado en la carretera o parado en un semáforo, y en los próximos años pretende hacer esta probabilidad aún mayor. Siendo esta marca un referente en el mundo de la automoción, no es de extrañar que otras firmas sigan en un futuro cercano sus pasos.

Aunque ninguna otra marca se ha acercado actualmente al nivel de BMW, muchas otras persiguen también desplazar el uso del CFRPs a los vehículos más cotidianos de sus respectivas gamas. Prueba de ello son las alianzas que cada vez más marcas están formando con fabricantes de fibras de carbono: Ford con DowAksa, General Motors con Teijin y Audi con Voith, entre otros. Y ya no solo son los fabricantes de coches lo que intentan introducir los CFRPs, sino los propios fabricantes de CFRPs los que intentan introducirse en el sector, como Toray, que con una *joint venture* con el fabricante alemán Daimler, se encuentra desarrollando un biplaza deportivo eléctrico, el TEEWAVE AR1 [83].

En cuanto a motocicletas, existen pocos ejemplos de momento. BMW tiene el modelo HP4 Race [2] y Ducati cuenta en su catálogo con la 1299 Superleggera [14]. Ambos son productos exclusivos con unidades limitadas en los que los CFRP se han usado en chasis, llantas, y protecciones, entre otras piezas, consiguiendo relaciones peso/potencia no vistas antes. Sus precios, respectivamente de 80.000€ y 92.000€, son dato suficiente para comprobar que los CFRP tampoco se usan en este sector en productos dirigidos a un público mayoritario.

Con otros tipos de vehículos terrestres, como camiones o autobuses, pese a los beneficios que la implantación del uso de CFRPs tiene, el precio del material aun no posibilita su uso de forma masiva, pues el encarecer el precio final de una maquinaria tan costosa no es aún demasiado rentable en estos campos, si bien la tendencia va en aumento de forma lenta, pero constante. Por el momento, se han usado profusamente en algunos vehículos conceptuales y proyectos, principalmente vinculados a motorizaciones alternativas y nuevos modelos de sistema que aprovechan tecnologías de autopilotaje; es decir, proyectos que ciertamente vaticinan nuevos modelos y sistemas pero que hoy en día no tienen ningún peso industrial.

4.8.1.3. Ferrocarriles. En este aspecto, los CFRPs no han tenido una repercusión tan grande como en la aviación y como la que se supone que está comenzando en la automoción. Quizás esta tendencia cambie en el futuro, pero en este medio de transporte la inclusión de los composites se ha centrado principalmente en la fibra de vidrio.

Destacamos el proyecto efWING desarrollado por la empresa Kawasaki Heavy Industries, un bogie para trenes con CFRPs como material base, un 40% más ligero que el sistema tradicional, que desde el 2014 se montan en vagones de trenes eléctricos en Japón [108].

También, en otro paso más por luchar contra el gasto de combustible, se han diseñado volantes de inercia para trenes diesel, cuyo rango de trabajo llega a 45.000 rpm, capaces de ahorrar un 10% del gasto total [13]. Para piezas menos sometidas a esfuerzos los ejemplos son algo más amplios, como paneles exteriores, interiores, escotillas de tolva de vagones de carga [104], puertas o “narices”, (piezas llamadas así por su posición predominante en el frontal de las locomotoras, cuya geometría sigue unas líneas altamente caprichosas, debido a que se diseñan buscando potenciar la aerodinámica). Podemos destacar la “nariz” del prototipo Transrapid TR08 tipo maglev, de levitación magnética [50].

4.8.1.4. Embarcaciones Podemos resumir esta industria como una análoga a la automoción aunque mucho menos desarrollada. Determinadas piezas pueden fabricarse con fibra de carbono, pero de momento el alto precio del material no compensa su uso comercialmente. Y al igual que con los ferrocarriles, otros composites de menor valor pueden utilizarse para reducir peso, y son más usados en el sector.

La fibra de carbono se utiliza en yates de lujo, para aplicaciones concretas y de forma muy limitada, puesto que la industria está dominada por la fibra de vidrio. Nuevamente, hemos de reservar un apartado para máquinas de competición; las carreras de catamaranes son una disciplina deportiva en la que las embarcaciones despegan literalmente del agua y planean sobre la superficie, para cubrir la distancia marcada minimizando el rozamiento. En esta unión del mundo naval y el aéreo, las construcciones de CFRP están plenamente establecidas, alimentándose del conocimiento de la industria aeroespacial: por ejemplo, el catamarán del equipo Oracle para las competiciones de 2017, de 23 metros de eslora y preparado para una tripulación de 11 personas, está fabricado por Airbus íntegramente en CFRP, usando los mismos diseños que en el fuselaje de A320 o el A350. Actualmente es capaz de volar durante el 90% de la prueba, si bien pronto se espera mejorar esta cifra [119].

Donde sí se emplean grandes cantidades de CFRP en este sector es en la fabricación de moldes, que se usaran posteriormente para obtener las piezas de otros materiales. Un molde fuera de uso puede suponer varias toneladas de residuos, pero como resulta evidente, los moldes de fabricación no son un residuo habitual en ninguna factoría.

4.8.1.5. Naves espaciales y satélites. Todas las ventajas anteriormente descritas para los CFRPs pueden aprovecharse en la construcción de máquinas que tienen como objetivo abandonar la atmósfera terrestre, tanto si se encuentran tripuladas como si no lo están. Estrictamente hablando, son un medio de transporte, pero al ser una aplicación con tan poco peso industrial en comparación con los puntos anteriores, no vamos a entrar en el tema en profundidad. Podemos simplificarlo diciendo que el uso de CFRPs en el sector se encuentra siguiendo los avances del sector aeronáutico y retroalimentándose de ellos. La experimentación en este campo es muy complicada por causas obvias, por lo que, basándose en los datos que se obtienen desde el campo de la manufactura de aeronaves convencionales, se intentan mejorar los diseños, modificándolos en los puntos necesarios. El hecho de ir al rebufo de la aeronáutica, unido a la complicación de prototipar en la industria espacial por el hecho de que resulta imposible reproducir las condiciones finales de funcionamiento del aparato desarrollado, hacen que el avance de cualquier tecnología en este campo se produzca a una velocidad distinta que en el resto. Por ello, las empresas y organizaciones implicadas participan en proyectos para avanzar tanto como sea posible: por ejemplo, la NASA, además de participar en proyectos como el del dirigible Aeros [59], realiza grandes experimentos relacionados con los CFRPs, principalmente para conocer la degradación de estos al encontrarse expuestos a ambientes extraterrestres. Como norma general, se prefiere confiar en materiales más convencionales, cuya respuesta a dichas solicitaciones está ya probada, aunque hay ejemplos pioneros, como las ruedas SR2 diseñadas para vehículos tipo Lunar Rover, y fabricadas en aluminio y fibra de carbono [78].

En la actualidad los CFRPs se utilizan en la construcción de satélites, con la manufactura de antenas, estructuras tubulares y paneles solares.

4.8.2. Aerogeneradores

Por detrás de la industria de la aeronáutica, podemos situar a la construcción de aerogeneradores como el segundo sector que más CFRPs requiere [60], en función de la fuente que consultemos, con el mismo porcentaje de mercado que las aplicaciones deportivas [22]. Aunque los composites presentan ventajas teóricas frente al uso del tradicional acero en la construcción de las torres, el estado de la tecnología aún no está lo suficientemente maduro en este aspecto [121], y solo se emplean para fabricar las hojas que mueven la turbina. Antiguamente fabricadas con aluminio, los fabricantes de palas de aerogenerador han ido migrando a los composites en los últimos años, pues presentan grandes ventajas con respecto al metal, principalmente el aumento del rendimiento consecuente a la bajada de peso, y una consiguiente simplificación de los procesos de instalación. Al contrario que en la aeronáutica, donde los CFRPs cubren parámetros que con otro material sería imposible abarcar manteniendo los estándares de calidad y precio, para construir molinos eólicos el sector se ha focalizado principalmente en la fibra de vidrio, debido a su menor precio, y puesto que en ciertas instalaciones su uso resulta viable. Pero fabricantes como Vestas Wind Systems A/S (Dinamarca) o Gamesa Technology Corp. (Vizcaya, España) llevan años usando piezas de CFRP para conformar palas para aerogeneradores cada vez de mayores dimensiones, y capaces de generar más potencia; este enfoque les ha servido para convertirse respectivamente en segundo y quinto fabricante mundial de aerogeneradores instalados en tierra en 2016 [20]. El uso de CFRP permite fabricar palas significativamente más largas, lo que genera que, aun con el mismo ancho de hoja, la superficie en contacto con el aire aumente más de un 50%, con el consiguiente aumento de potencia generada [122]. Algu-

nas de las palas de aerogenerador fabricadas hoy alcanzan las máximas dimensiones de la historia, concretamente aquellas destinadas a parques eólicos offshore; la fibra de carbono es de los pocos materiales capaces de soportar las sollicitaciones requeridas en estas aplicaciones. Debido al uso de estos composites, el diámetro medio de los rotores utilizados ha aumentado desde 15 metros (1985) hasta 150 metros (2017) [49]; esto ha conllevado lógicamente un aumento en la potencia producida, desde cantidades inferiores a 1MW en los primeros rotores hasta el último hito alcanzado: un aerogenerador Vesta V164 emplazado en Østerild (Dinamarca) que generó 216.000 kWh solo en su primer día de funcionamiento [117]. Esto marca nuevas tendencias en la construcción de parques eólicos a las que no se podría llegar sin usar composites, con menos turbinas, pero más grandes y potentes. Por ejemplo, las palas de la V164 pesan entre 35 y 38 toneladas cada una, y esto teniendo en cuenta el uso intensivo de CFRP para su fabricación; es obvio que no todo el progreso del sector se debe al uso de los CFRP, pero claramente es un factor detonante.

Dejando aparte las aspas, y dentro de las mejoras técnicas, en reciente desarrollo se encuentran ciertos modelos de volantes de inercia fabricados con CFRP, para el almacenamiento de la energía eólica y su liberación posterior en los momentos en que cambie el funcionamiento de la turbina debido a los cambios de viento, paliando los cambios de frecuencia de la energía obtenida y ayudando a mejorar la estabilidad del sistema, lo cual resulta crucial en pequeñas instalaciones. Cada volante de inercia, podría suponer hasta 500 kg de fibra de carbono [82].

Cabe destacar que España representa el 4º país a nivel mundial que más gasta en CFRP usados en esta aplicación, con un porcentaje global del 7%, y solo por detrás de China (29%), EEUU (19%) y Alemania (11%) [62].

4.8.3. Combustibles

En este campo, los CFRPs tienen aplicaciones reales y potenciales en la construcción de instalaciones en alta mar para la extracción de petróleo y gas. Generalmente, estas plantas son construidas con metal y después son transportadas hasta su ubicación final y ancladas al lecho marino. El coste del transporte es enorme, y casi desde el minuto cero requieren cuantiosas labores de conservación y reparación para evitar los efectos corrosivos del medio. Las propiedades físicas del CFRP garantiza la resistencia de los sistemas y sus propiedades como aislante térmico juegan en pro del bienestar del personal de la instalación. Según Brian Spencer, presidente de Spencer Composites Corporation, en una sola Plataforma con Piernas Tensionadas (TLP) en la que se utilizase de forma intensiva el CFRP, se emplearían algo más de 3.175 toneladas de material [22].

4.8.4. Depósitos de presión

Utilizados en varias de las aplicaciones antes descritas (automóviles, aeronáutica y combustibles) merecen un apartado especial por su uso en aplicaciones de la industria química. Son necesarios allí donde la naturaleza del proceso requiere ciertos componentes que se mantienen a grandes presiones. Con un uso más tangible, podemos destacar los tanques de aire comprimido usado por ciertos cuerpos de extinción de incendios. Además, la tecnología de vehículos motorizados por pila de hidrógeno se encuentra en nacimiento y algunos expertos le auguran un gran futuro; el CFRP es un material ideal para construir los depósitos en los que el hidrógeno se almacena, tanto en los vehículos como en las estaciones de recarga o hidrogeneras [57].

4.8.5. Medicina

Una de las ventajas del CFRPs es que las piezas conformadas no resultan perjudiciales para las formas de vida que puedan encontrarse a su alrededor. Esto, unido a las propiedades que ya se han comentado, hace que el material sea muy útil en la fabricación de prótesis en caso de pérdida de miembros y órtesis para el tratamiento de diversas patologías. Solo como apunte, destacamos el brazo robótico BeBionic3 [38], o las prótesis de rodilla Genium [35]. En el caso de prótesis que requieren de cirugía, presentan una serie extra de ventajas frente al metal, por ejemplo, que el paciente pueda en un futuro someterse a pruebas diagnósticas como resonancias magnéticas o TAC, sin tener que retirar la prótesis. En los últimos tiempos, el material se está haciendo popular entre los protésicos dentales, ya que la buena capacidad de absorción del choque la hace muy útil para sustituir piezas de la dentadura. En cuanto a las órtesis, encontramos en el mercado desde aparatos convencionales como muletas y sillas de ruedas, a diseños de nueva creación asistidos robóticamente, como los bipedestadores, esqueletos mecánicos que levantan, sostienen y desplazan el cuerpo de un enfermo que no puede caminar por sí mismo.

Otro uso con el que cuentan en este campo, es en la construcción de pesada maquinaria hospitalaria, como equipos de rayos X o escáner de resonancia magnética. En este caso, su uso consigue aligerar el peso del conjunto, por lo cual las piezas sometidas a desgaste sufrirán menores tensiones y los motores destinados a articular los conjuntos requerirán ser de menor potencia, reduciendo gasto eléctrico, reparaciones y un menor nivel de ruido, este último un factor deseable en ámbitos sanitarios.

4.8.6. Deporte

En este apartado incluimos cualquier elemento necesario para la práctica de alguna disciplina deportiva, sometido a esfuerzos, y cuya ligereza puede suponer al deportista una ventaja competitiva, como bicicletas, raquetas, palos de golf, tablas de surf, remos, esquís, trineos, kayaks y un largo etcétera. El caso de las bicicletas es bastante notable; la incursión en el mercado de cuadros de bicicleta de CFRPs ha sido muy intensa, tanto a niveles profesionales como amateur, pues la reducción de peso conseguida es muy drástica. Los cuadros de las bicicletas están sometidos a altos niveles de estrés, que los CFRPs aguantan perfectamente. Además, la estructura tubular que los conforma se fabrica en una pieza por moldeo, al contrario que cuando se utilizan tubos metálicos que han de ser soldados, con lo que el resultado final con CFRPs es más estético y aerodinámico.

Aquí confluyen elementos muy similares a los de apartados anteriores, pero fabricados especialmente para ser usados en competiciones deportivas: piezas de automóviles de CFRPs que sustituyen a otras de serie para mejorar su rendimiento, prótesis específicamente diseñadas para ser utilizadas por deportistas discapacitados, embarcaciones de carreras y componentes de cualquier tipo de aparato volador destinado a competir, desde aeroplanos acrobáticos hasta aeromodelismo.

Otro gran mercado es el de elementos de protección deportiva, como cascos o espinilleras.

4.8.7. Otros

Con una tecnología en plena expansión como la que estamos tratando, este apartado podría ampliarse durante páginas y páginas. Para no extendernos más de lo necesario, podemos decir que casi cualquier cosa en la que el lector esté pensando es susceptible de fabricarse con CFRPs, ya sea bien

Mercado mundial del CFRPs en el presente y previsiones

(Unidades en miles de millones de dolares)

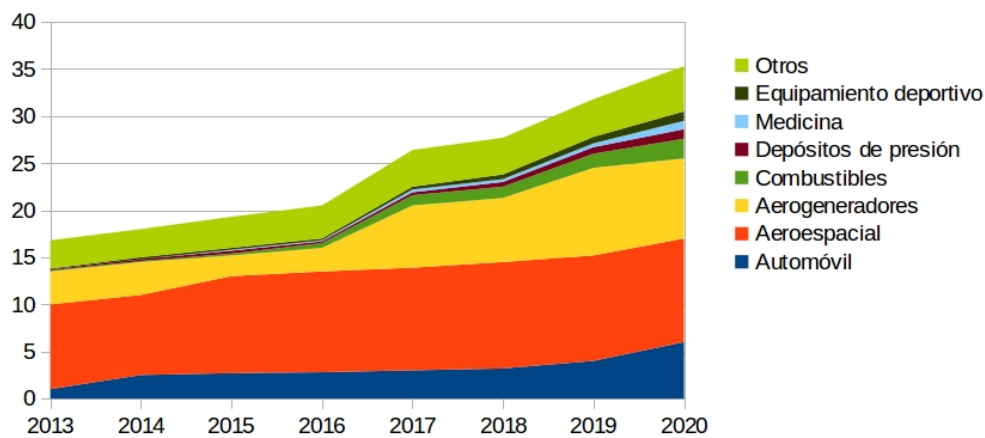


Figura 13: Mercado mundial de CFRP.

por practicidad o bien por excentricidad: casetas de perro, piezas de joyería, tiendas de campaña, mobiliario, paraguas, juegos de maletas o carcasas de aparatos electrónicos son solo parte de la amalgama de productos que podemos adquirir, siempre que estemos dispuestos a pagar los precios desorbitados que el material exige, al menos hoy.

En otro extremo menos banal, encontramos aplicaciones industriales para casos muy concretos; robots, altavoces, partes de bombas de impulsión, tubos de enriquecimiento de uranio o elementos constructivos para aplicaciones civiles, entre muchos otros.

4.9. Proyección en el futuro

La creencia generalizada para el futuro en lo que a CFRPs se refiere es que las aplicaciones seguirán aumentando, sustituyendo al metal allí donde sea industrialmente viable. El crecimiento anual del mercado total de composites en los primeros años del milenio ha sido de un 7% y en los próximos años no hay visos de que esto disminuya. De hecho la producción mundial de fibra de carbono en el 2014 fue de 104.600 toneladas [62] y de 130.900 toneladas dos años después [63]; como vimos previamente (ver 4.2 en la página 3), aproximadamente la mitad de estas fibras se destinarán a la fabricación de CFRP. Es decir, por ahora, el crecimiento es continuo y supera ampliamente las previsiones.

Como ya hemos visto, los CFRPs se encuentran bien posicionados en sectores de alto valor; industria aeroespacial, militar, y deportes o vehículos de alto rendimiento, entre otros. Sin embargo, en mercados de gran volumen, la CFRPs no podrá entrar hasta que el precio de las materias primas y de los procesos productivos no baje lo suficiente como para permitirlo. Según la compañía de investigación industrial *Lux Research*, según las ventas actuales y las previsiones futuras, para 2020 se espera un aumento del mercado de los productos reforzados con fibra de carbono hasta un valor de 35 mil millones de dólares [67]. Los datos obtenidos se presentan en la figura 13, ordenados según la industria a la que pertenecen. Podemos comprobar que los campos que más gasto va a suponer son la industria aeroespacial, los aerogeneradores y la automovilística.

Ya hemos visto que en la aeronáutica los CFRPs están plenamente establecidos; es un mercado de pocos fabricantes pero muy potentes, los cuales hacen ya un uso masivo de este material, y como cada día surgen nuevas aplicaciones, el mercado en este campo presenta un crecimiento firme. A la industria automovilística le corresponden unos 6 mil millones de dólares de ese total, pero si en un futuro el material se vuelve lo suficientemente económico para utilizarse en el grueso de la fabricación de coches, camiones y otros vehículos, se calcula que esta cifra podría subir enormemente, superando por mucho el valor total del resto de aplicaciones. Es, de lejos, el campo donde se espera un crecimiento mayor en los próximos años. La tendencia en el desarrollo de piezas tiende a sugerir que en alguna fecha cercana a 2025 será económica y técnicamente posible incorporar un gran porcentaje de piezas fabricadas en CFRPs en la fabricación de automóviles de gamas altas y medias, y en vehículos de transporte. Esta expectativa es fundamentalmente una consecuencia de la necesidad del sector de reducir peso para reducir combustible. Como ya hemos dejado patente, el uso de materiales compuestos para sustituir piezas metálicas repercute en un significativo ahorro de combustible: se estima que reducir un 10% el peso del vehículo genera un ahorro de combustible de entre el 6 y el 7 por ciento [19]; este dato es válido para vehículos ligeros, pues el ahorro energético a lo largo de la vida de un avión multiplica esta cifra por cien [1]. Con los vehículos eléctricos cada vez más establecidos, y siendo la autonomía de estos uno de los aspectos más discutidos y que más recelo generan en el comprador, también se espera que siguiendo el ejemplo de BMW, el resto de fabricantes utilicen CFRPs en sus gamas de vehículos eléctricos o de motorizaciones diferentes a las convencionales (gas natural, aire comprimido, biocombustibles o hidrógeno). En cuanto a las motorizaciones convencionales, comercializar vehículos de gasoil o gasolina con menores consumos y por ende menores emisiones, es una cuestión vital para cualquier fabricante; por ejemplo, la normativa en vigor para la Unión Europea impone que para 2020 la media de los vehículos de pasajeros comercializados por cada fabricante no exceda de 95 gramos de CO_2/km [88]. Los CFRPs pueden ser un potente aliado de los fabricantes en este caso, pero otras normativas pueden también jugar en su contra: la Comisión Europea también exige [25] que:

- a) El 85% del peso de los vehículos sea reutilizado o reciclado.
- b) El 95% del peso de los vehículos sea reutilizado, reciclado o recuperado -entendiendo esta “recuperación”, no del material en sí, sino en forma de energía [54].

Con lo cual, establecer procesos para dotar a los CFRP de una nueva vida después de su uso en la automoción es vital para los fabricantes si quieren emplear el material.

5. RECICLADO DE CFRP

5.1. Residuos de CFRP

Hasta ahora, un procedimiento de reciclaje de CFRPs no ha sido necesario, básicamente porque no existían residuos de este material. Con una industria recién surgida, con aplicaciones tan específicas, y tratándose de una material tan caro, la cantidad de residuos generados en la industria ha sido prácticamente nula. Además, los productos generados, ideados para tener ciclos de vida muy amplios, no han generado apenas residuos en cuestión de piezas obsoletas, estropeadas, o fuera de servicio. Sin embargo, y como hemos ido desgranando a lo largo del documento, la tendencia está cambiando; es

indiscutible el crecimiento actual del mercado de fibra de carbono, y las tendencias en el futuro son todas ascendentes, especialmente las vinculadas a la industria del transporte.

Como es lógico, a mayor producción, mayores serán los residuos de producción. Ya sea fabricando aviones o cuadros de bicicleta, la cantidad de rechazos y residuos industriales va a crecer de la mano del mercado. Además, después de varias décadas de fabricación de los primeros elementos CFRPs, es de suponer que los que finalicen su ciclo de vida vayan paulatinamente aumentando el porcentaje de residuos urbanos e industriales. Hemos también de añadir que aunque solo tratemos sobre los CFRPs en este texto, prácticamente todo lo que comentemos puede ser aplicable a otros composites, como los GPR; no obstante, hoy por hoy la recuperación de la fibra de vidrio no es viable económicamente, pues se trata de una fibra mucho más barata que la fibra de carbono. El desarrollo de tecnologías útiles, eficaces y económicas para el reciclaje de fibra de carbono traerá consigo la utilización de las mismas plantas para la recuperación de otros materiales compuestos.

Si la industria de los CFRPs está todavía en su infancia, los procesos de reciclaje se encuentran aún más atrás, prácticamente en una fase experimental. Se da el particular de que al tratarse de materiales diseñados para ser estables bajo casi cualquier circunstancia y resistir condiciones extremas, el material vuelca en contra de aquel que intenta destruirlo sus capacidades, y opone una resistencia que supera de largo la que presentan los materiales más sencillos cuyos procesos de reciclaje se encuentran establecidos actualmente.

Existen, además, problemas que han de resolverse para obtener un proceso viable. Por ejemplo, ha de plantearse que los CFRPs usualmente no son solo fibra de carbono y resina, sino que están mezclados con otros materiales, a saber [89]:

- Fibras diferentes a las de carbono.
- Relleno para aportarle propiedades al composite, por ejemplo, retardantes del fuego.
- Núcleos de espuma para reducir peso.
- Inserciones metálicas, usadas para conectar piezas entre sí.

La presencia de estos materiales dificulta o hace inviable el proceso de reciclado de estos tipos de desecho en concreto para las empresas que tratan con CFRPs [31]. Un proceso de reciclaje a nivel industrial para los CFRPs, capaz de resolver los inconvenientes planteados, es un paso clave en la actualidad de esta tecnología; conseguir recuperar la fibra de carbono fuera de uso a gran escala, generará un descenso del precio del material que facilitará a las compañías su uso.

En el plano medioambiental, resulta también importante limitar los residuos de hoy, y sobre todo, los del futuro. Por su naturaleza no biodegradable, los CFRPs acabarían bien quemados, o bien ocupando ingentes cantidades de espacio en vertederos, donde ya en 2007 el coste por depósito de una tonelada de residuos de CFRPs alcanzó los 200€ [99], aunque en los últimos años parece haber bajado hasta situarse en torno a los 150€³ [65]. En la actualidad, y mientras todavía los residuos de CFRPs se presentan en cantidades contenidas, desarrollar técnicas de reciclaje es una buena medida medioambiental y una buena apuesta comercial.

Debemos de aclarar que con “cantidades contenidas de residuos” nos referimos a 18.000 toneladas a nivel mundial en 2015 [11], frente a las solo 3.000 que se calculaban en 2010 entre EEUU y Europa

³En el texto original, £132, teniendo en cuenta los impuestos en Reino Unido. [65]

[72]; como con el resto de datos relativos a los CFRPs, aquí también se espera un alto y próximo crecimiento. Por ejemplo, las estimaciones más bajas en cuanto a desmantelamiento de aeronaves se cifran entre 6.000 y 8.000 aviones desguazados hasta el año 2030 [72]. Por otro lado, la Asociación Internacional del Transporte Aéreo (IATA) estimaba en el 2014 que en los siguientes 20 años, 12.000 aparatos comerciales dejarían de volar definitivamente [97]. Esta última cifra es compartida por la Asociación de Reciclaje de Flota de aviones (AFRA) [29]. Y para el 2025, se esperan 170.000 toneladas de residuos generados, solo a partir del desmantelamiento de aviones [84].

5.2. Procesos de reciclado de CFRP llevados a cabo en la actualidad

Los ejemplos que se conocen, al menos a escala industrial, son puntuales y aislados. La pionera en el sector es Adherent Technologies Inc. (ATI) una compañía estadounidense que lleva investigando este campo desde 1995, con fondos provenientes del departamento de defensa de EEUU. ATI comenzó su proceso de reciclaje experimentado solo con la pirólisis, pero consideraron que no era óptimo como proceso único. Por ello crearon un proceso que mezcla tres procedimientos; pirólisis, degradación química de matriz en húmedo a baja temperatura y un proceso similar a alta temperatura. Gracias a él han conseguido reducir el preprocesado de los residuos al máximo, donde solo trocean los materiales que llegan a su planta (pregreg y piezas de aviones fuera de uso) hasta que alcanzan unas dimensiones máximas de dos centímetros y medio aproximadamente. Después de realizar el proceso combinado, usando un catalizador desarrollado junto a Boeing [89], consiguen liberar algo más del 99% de la fibra, en fragmentos de dimensiones que llegan hasta los 5 cm, y conservando el 95% de la fuerza de las fibras vírgenes. Actualmente en su planta piloto son capaces de tratar 23 kg de material por hora. Según ellos mismos, calculan que el coste de una planta autónoma capaz de tratar dos toneladas diarias sería de cuatro millones de dólares aproximadamente. Boeing ha colaborado con ATI suministrándole los residuos generados durante las múltiples pruebas de desarrollo del 787 “Dreamliner”. El proceso fue efectivo pues el CFRP tenía añadido en su estructura un endurecedor: el proceso húmedo a baja temperatura disolvió la resina epoxi, pero no atacó al endurecedor, que fue eliminado posteriormente gracias al ciclo pirolítico [72].

La pirólisis fue aplicada por primera vez en una planta continua de tratamientos de residuos de CFRPs por ELG Carbon Fibre Ltd en el 2008, en Reino Unido. Según sus datos, procesan actualmente 2.000 toneladas de material al año, entre tejidos, pregreg y composites, siguiendo un proceso patentado, en un horno de 30x9 metros donde producen la pirólisis del material a temperaturas entre 500 y 900°C en una atmósfera controlada para impedir la aparición de carbón pirolítico. Las fibras recuperadas mantienen al menos el 90% de las fibras vírgenes, y en algunos casos, y según palabras de Steve Line, Director Ejecutivo de la planta, “Las propiedades superficiales del material recuperado superan en realidad a las de la fibra virgen”⁴ [29]. Actualmente, fabrican una línea de productos con nombre comercial *Carbiso*[®], utilizando la fibra recuperada como materia prima, y que se emplean como pinturas industriales, blindaje, revestimiento de carreteras o dispositivos de flotación entre otros.

Dos compañías que siguen un proceso similar al de RCF, y recuperan fibra mediante pirólisis desde 1998 son YF International BV (Países Bajos) y Apply Carbon (Francia). Curiosamente, también tienen procesos para reciclar otro tipo de composites de menor valor, como los basados en fibra de vidrio o aramida, pues el tener la instalación para fibra de carbono les permite trabajar con otros

⁴Cita original “In some cases, surface properties of the recycle are actually enhanced over VCF.”[29]

materiales. La Asociación de Fabricantes de Fibra de Carbono de Japón (JCMA) administra también una planta de reciclaje mediante pirólisis, pero apenas existen datos públicos [92].

En Martignano (Italia) se encuentra Karborek S.p.a. [56], que también lleva a cabo un proceso de pirólisis de CFRP y de posterior oxidación de las fibras recuperadas para comercializarlas fibras sueltas o en esteras.

Otra alternativa a la pirólisis convencional es la pirólisis por microondas, que se está desarrollando por entidades y universidades de EEUU, Reino Unido y Alemania. Las microondas calientan las fibras de carbono, que transmiten la energía a la resina, consiguiendo calentar los residuos desde dentro, y acelerando el proceso. La compañía Advanced Materials Inc. tiene ya una planta piloto con esta tecnología en Carolina del Norte, financiada entre la US Air Force, una fundación nacional para pequeñas industrias y la Universidad Estatal autóctona[72].

5.3. Impulsores del reciclaje de CFRP

Hoy en día, los principales impulsores del reciclaje de fibra de carbono son las empresas privadas que trabajan con la fibra virgen, que bajo la forma de organizaciones, colaboran buscando posibilidades de reciclar el material fuera de uso. Con este patrocinio de marcas, se va aportando poco a poco más luz sobre el tema, pero al tratarse de iniciativas privadas, los resultados no trascienden mucho más allá de lo que cada departamento de marketing estima necesario, con un fin mucho más publicitario que divulgativo. Las principales son AFRA y PAMELA [84].

AFRA, responde a las siglas de Asociación de Reciclaje de Flotas de Aviones. Agrupando a múltiples empresas de todo el mundo (tres de ellas españolas) y grupos de investigación y desarrollo, opera desde el 2006 con el fin de mejorar los procesos de desguace de las aeronaves y conectar empresas con fines comunes, para establecer sinergias y estandarizar procesos [5]. En 2009 controló el desmantelamiento del 30% de los aviones que dejaron de volar [120]. Uno de los miembros fundadores de AFRA es Boeing, que se ha nombrado a lo largo de todo el texto en referencia a sus relaciones con empresas para el reciclaje de CFRPs, como ATI o BMW, además de la Universidad de Nottingham. Boeing es sin duda uno de los pioneros en la materia del reciclaje de aviones, cuyo propósito empresarial para cumplir en el 2016 era aumentar el porcentaje de material que se recicla de sus aviones del 60-75% al 90% [94]. La labor de reciclar CFRP comenzó en 2005 con el desmantelamiento responsable de los F-18A, aeronaves militares retiradas del servicio. En unas declaraciones en 2010, el Director de Proyectos de Reciclaje de Aviones y Composites, William Carberry, auguraba estrictas leyes medioambientales europeas que impidieran los vertederos de materiales compuestos en un periodo de tres a cinco años⁵ [72]. Este temor fundado a normativas más duras les ha llevado, además de colaborar con las entidades reseñadas, a realizar sus propios proyectos, como el de convertir prototipos obsoletos de fuselaje del modelo 787 en reposabrazos para asientos y utillaje de moldeo para piezas nuevas [72].

Puede decirse que como rivales directos que son, los caminos de Boeing y Airbus discurren por sendas paralelas y muy semejantes entre sí. Airbus comienza con un proyecto de reciclaje de aviones al final de su vida útil en el 2005, igual que Boeing. El *Process for Advanced Management of End-of-Life*, llamado PAMELA por sus siglas, tiene como fin reciclar, reutilizar o recuperar entre un 85%

⁵Cita original: "The pending legislation in Europe to ban landfill disposal of composites will have significant impact in the next 3-5 years". [72]

y un 95 % del material proveniente de un avión, comenzando las acciones prácticas en 2006, con un A300-B4 que se hallaba fuera de servicio en suelo francés. En lo referente a CFRP, se pudo destinar al reciclado el 4 % del peso del avión, que estaba formado por este material. En 2008 formalizan una alianza estratégica con TARMAC Aerosave, empresa de almacenaje, mantenimiento y desguace de aeronaves. Estos se adhieren al programa de Airbus, que pasa a denominarse PAMELA-LIFE [72]. En la actualidad, poseen dos sedes, una de ellas en Teruel, habilitada en 2013 con 340 hectáreas de instalaciones donde almacenar aeronaves [93]. Según la propia compañía, han conseguido recuperar el 90 % de 40 aeronaves desguazadas [4, 105].

Además, Airbus colabora con CFK-Valley Stade Recycling GmbH & Co KG, una empresa alemana que ha desarrollado una planta de pirólisis continua para CFRP alimentada principalmente por restos de los aviones de Airbus, aunque otras empresas que trabajan con fibra de carbono la utilizan para reciclar sus desechos, como el fabricante de automóviles Bugatti; la planta es capaz de reciclar 1.000 toneladas anuales [24], y de obtener un producto final sin restos de char, al someterlas a oxidación [10]. Después, estas fibras recicladas son usadas como materia prima por carboNXT GmdH, una empresa del mismo conglomerado, que comercializa sus productos desde 2010 [23]; fibras de carbono picadas o molidas [100].

Por otra parte tenemos a la Universidad de Nottingham en Reino Unido, reconocida a nivel mundial por sus investigaciones en el reciclaje de residuos, particularmente en CFRP. Con miras en la fabricación de piezas de automóviles con fibra reciclada ha desarrollado los proyectos HIRECAR (High Value Composite Materials from Recycled Carbon Fibre), desde el 2005 al 2008 [113], y el más reciente AFRECAR (Affordable Recycled Carbon Fibres), un proyecto con valor de £900.000 con la ayuda entre otros de Ford Motor Company y el Ministerio de Defensa británico [112]. Con propósitos similares, estos trabajos de investigación se centran en el reciclado de los CFRP y las posteriores procesos que han de seguirse con la fibra recuperada para conseguir introducirla dentro de un producto nuevo en la industria aeronáutica o automovilística, por ejemplo, plásticos moldeados con una inclusión de fibra de carbono usada en la fabricación de compartimentos superiores para el equipaje en aviones y asientos o paneles interiores de aviones y automóviles. También se centran en cómo aprovechar los residuos procedentes de la resina una vez el CFRP pierde su integridad y la fibra ha quedado libre [112].

5.4. Tipos de residuos

Los residuos de fibra de carbono pueden generarse en distintas fases del sistema productivo, y en función de ello, presentarse en condiciones muy distintas, que requieren de distintos procesos para su máximo aprovechamiento. Hemos de añadir que en todos los casos (excepto generalmente, en el número uno de la siguiente lista), los residuos pueden estar contaminados con otras sustancias, contener trazas metálicas, rigidizadores, pinturas, o en el peor de los casos, haberse conformado con distintos tipos de tejidos, unos de fibra de carbono y otros no. La siguiente lista, de elaboración propia basada en las notas de Juan José Manso [68], incluye los distintos tipos de residuo y el estado de éste.

1. Tejidos de carbono y bobinas de hilo sin mezclar con resina. Generalmente son trozos de tejido que por sus dimensiones no han podido ser aprovechados en la industria de la que proceden, pero que no tienen ningún defecto ni tara.

2. Prepreg. Se presenta en bobinas completas, restos de bobinas o recortes. Pueden presentar tres estados;
 - a) En estado *B*, es decir, utilizable y con la resina conservando íntegramente sus propiedades.
 - b) En estado *B*, pero con la fecha de caducidad cumplida. Las propiedades del material para conformar piezas pueden encontrarse mermadas.
 - c) Polimerizado. Por haberse cumplido su fecha de caducidad o por no haberse conservado correctamente, la resina ha adoptado una forma fija y moldear el material ya no es posible.Según Thomas Hunter, presidente de la compañía Firebird Advanced Materials Inc, los residuos de prepreg en estos tres estados, representan el 50% de los residuos relacionados con fibra de carbono que se desechan [72].
3. Composites de carbono, lo que durante todo el texto venimos llamando CFRPs. Estos pueden ser;
 - a) Rechazos de producción. Piezas que no han pasado los controles de calidad, trozos sobrantes eliminados de la pieza final o moldes fuera de uso. Generalmente limpios de otras sustancias. El caso particular de los sobrantes es muy frecuente, por conformarse las piezas mediante procesos manuales, y porque la naturaleza termoestable del material no permite el aprovechamiento en la propia factoría.
 - b) Piezas desechadas o de desguace, con o sin daños, después de cumplir con su vida útil. Pueden encontrarse sucias, con adhesivos, pinturas, unidos a otras piezas de distinta naturaleza y un largo etcétera.
4. Polvo de composite de carbono. De igual composición química que la de los composites, pero en partículas de dimensiones diminutas. Este es generado en la industria durante el proceso de acabado de las piezas, al realizarse cortes, recanteados y otras funciones de refinado. Es absorbido por aspiradores en la industria y generalmente desechado en sacos o bidones.

5.5. Requisitos y opciones en el reciclado a escala industrial

Según Jan-Michael Gosau, administrador de programas de energía y medio ambiente de ATI (En 5.2 en la página 28), los requisitos necesarios para llevar a cabo este preproceso son “Tecnologías de reducción de tamaño adecuado para los residuos de CFRP, establecer los parámetros del proceso, la infraestructura para realizar operaciones secundarias, como la recogida del material directamente desde el fabricante, y, finalmente, estandarizar las propiedades del producto reciclado”⁶ [72].

A partir de estos datos, veremos los mínimos que han de cumplirse para generar una industria a partir de un residuo para convertirlo en un subproducto útil, aplicado al caso que nos ocupa.

1. Disponibilidad de residuos.

Para la existencia de una planta de reciclado, el suministro de residuos ha de ser continuo, pues una industria sin funcionar no es una industria rentable. Este requisito obvio, no debería

⁶Cita original: “consistent scrap availability, appropriate size reduction technologies for the CFRP waste, established process parameters, the infrastructure for secondary operations such as material collection at a manufacturer’s site, and eventually, creation of standardized recycle product properties.” [72]

presentar un problema a tenor de los datos que se han ido exponiendo en todo este texto; los residuos se generan a diario en varias partes del mundo. Se requiere que esta disponibilidad de residuos se produzca cerca del lugar donde van a reciclarse, para que los gastos de transporte sean soportables para el generador del residuo.

2. Preprocesado.

Incluye las tareas previas al reciclado en sí, como son la recolección de residuos en los puntos donde se almacenen o se generen, el transporte hasta el centro de reciclado que acabamos de mencionar, la separación en función del tipo de residuo o la eliminación del sistema de rechazos y materiales distintos a los que se destina la planta de reciclado. Es uno de los principales problemas de un reciclaje a escala industrial. En el caso del CFRP, aparte de los inconvenientes que se presentan usualmente en cualquier proceso de reciclado, el transporte supone un problema añadido en ciertos casos donde el tamaño de las piezas excede las cotas que le permitirían ser transportadas por medios convencionales; las piezas de aviación requieren generalmente un proceso de troceado *in situ* antes de ser transportadas. Con las palas de aerogeneradores, incurrimos en la misma problemática; cuando son nuevas se recurre a transportes de largo especial para transportarse por carretera, pero es algo poco probable contratar el mismo servicio cuando para el responsable de la instalación solo va a suponer gastos. La lógica nos dicta entonces que han de ser troceados previamente a su transporte; si tenemos en cuenta que el residuo se produce en un parque eólico, que generalmente está situado en lugares poco accesibles, el instalar temporalmente una maquinaria para triturar el desecho será también un proceso muy costoso.

3. Reciclado.

Es el paso clave. Debe existir un proceso cuyo coste sea asumible y que permita recuperar cuanta mayor cantidad de material sea posible, con el objetivo final de obtener un resto cero. Hoy por hoy, y en relación con el tema que tratamos, encontramos los siguientes métodos, adaptando la clasificación usada por Palmer [86].

a) Métodos térmicos

1) Combustión.

No es como tal un proceso de reciclado, sino solo de eliminación de residuos, pero si se produce en instalaciones adecuadas, donde la generación de calor viene acompañada de un sistema de aprovechamiento de la energía liberada, podría considerarse un método para revalorizar este tipo de residuos. Si bien *a priori* es el método menos deseable, pues solo genera un aprovechamiento del desecho, y no una recuperación del material, puede ser preferible a otras alternativas, como la eliminación por medios no controlados o el depósito en vertederos.

2) Procesos de lecho fluidizado.

Con muchas aplicaciones en la industria, el proceso de lecho fluidizado fue utilizado para el tratamiento de CFRP por la Universidad de Nottingham, con un amplio historial en investigación sobre procesos de tratamiento de residuos; de hecho fue en Nottingham en 1874 donde se construye el primer incinerador de basuras de la historia, [12]. La fluidización es el proceso de hacer comportarse a partículas sólidas de

pequeño tamaño como si se hallasen en una fase líquida, al introducir una corriente de gas de forma ascendente. A nivel macroscópico, el comportamiento del sólido será semejante al de un fluido, y por ello recibe el nombre de lecho fluidizado. Es utilizado con múltiples propósitos industriales, como clasificar partículas según sus propiedades físicas, el lavado de éstas, o provocar reacciones catalíticas. Introduciendo CFRP triturado en forma de polvo, la corriente ascendente de gas puede ser utilizada para disolver la resina y recuperar la fibra de carbono. Según Steve Pickering, profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica, Materiales e Ingeniería de Fabricación, el proceso es definido como "inherentemente sencillo e ideado para adaptarse perfectamente a materiales fuera de uso, pues es medioambientalmente sostenible". Se puede usar para procesar cualquier tipo de polímero [89].

3) Pirólisis.

Resumiendo someramente, diremos que la pirólisis es un proceso a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, lo que impide la combustión. Por su resistencia al calor, las fibras se recuperan prácticamente inalteradas y la resina se gasifica.

4) Hidrólisis en agua supercrítica.

Se trata de un proceso de efectos similares a la pirólisis. Se basa en los principios de que una sustancia, sometida a una temperatura alta, cuyo valor varía según la presión a la que se encuentre, se vuelve gas. Por otra parte, la misma sustancia, conforme la presión aumenta se convierte en líquido. Pero si aumentamos la presión y la temperatura a la vez y situamos los valores por encima de unos valores concretos que dependen de la sustancia, logramos un cambio de fases y se alcanza el estado supercrítico, donde las propiedades de dicha sustancia son una amalgama entre las propiedades típicas del líquido y las del gas. En el caso del agua, los valores a superar son de 221 atmósferas y 374°C de temperatura [110]. Ubicado el residuo en un recipiente a propósito, junto con agua en condiciones supercríticas, el agua tiene propiedades de movilidad propias del vapor pero la capacidad de disolver del líquido, con lo que se provoca la penetración en el residuo y la descomposición de éste. Este proceso, utilizado entre otros fines para descafeinar el café, en el caso de los CFRP permite la separación de la fibra y de la resina.

b) Métodos químicos.

1) Solvólisis.

Aunque con potencial para usos industriales, no está aún lo suficientemente estudiado en el campo de los CFRP. Se basa en que es posible, con la adición de un disolvente, lograr deshacer la resina curada y recuperar la fibra de carbono libre de restos de la resina. Los polímeros se descomponen en oligómeros que pueden recogerse y usarse como materia prima en otros procesos. Como desventajas, señalamos que aunque las fibras se recuperan inalteradas, la superficie de éstas puede albergar aún resinas plásticas, lo que dificulta enormemente la reutilización. Además, los disolventes que se requieren pueden resultar peligrosos para el medio ambiente, produciéndose en el proceso residuos de difícil tratamiento.

c) Métodos mecánicos.

1) Métodos basados en la recuperación de fibras.

Se basan en trocear progresivamente los residuos para facilitar su separación. Pueden usarse con algunos materiales en los que se mezcla el CFRP con rellenos. En un primer paso, son machacados hasta que se obtienen pequeños fragmentos de entre 5 y 10 centímetros [89] que se denominan *flakes*, es decir, escamas. Este proceso es útil para retirar inserciones metálicas y favorecer el transporte hasta la instalación de reciclado. Posteriormente, con procesos de amartillado o en molinos de bolas de alta velocidad, se vuelve a fragmentar el CFRP hasta que las partículas tienen un tamaño final comprendido en un abanico entre 1 cm y $50\mu m$ [89]. Con este nuevo tamaño, el material es ya tan pequeño que, simplificando su naturaleza, podríamos decir de un fragmento en concreto que está compuesto íntegramente, bien por fibra de carbono, bien por resina epoxi o bien por los materiales de relleno. Siguiendo este principio, y utilizando ciclones o tamices, se separan los fragmentos más pesados, que son los que contienen una mayor parte de fibra de carbono, de los más ligeros, formados mayoritariamente por resina o rellenos.

2) Métodos basados en la generación de material de relleno.

Aquí no se busca la separación de las fibras; se trata de machacar el material hasta que se genere un polvo capaz de ser usado para conformar materiales de relleno, para usarlo en funciones aislantes, rigidizadoras...

4. Existencia de mercado para el material reciclado o recuperado.

El material ha de tener calidad suficiente para usarse en aplicaciones industriales y el precio ha de ser competitivo.

La disponibilidad de residuos no depende del proceso, y poco podemos hacer para modificarlo. El preprocesado también se debe principalmente a factores externos, aunque se verán modificados por el proceso de reciclaje que se elija, del que obviamente dependerá el punto cuatro, existencia de mercado para el material reciclado o recuperado. El coste por kilo en 2008 de las fibras de carbono oscilaba entre 22 y 45 euros por material virgen y entre 12 y 18 euros por fibras recuperadas⁷. Si bien el diferencial económico es evidente, se ha de tener en cuenta el ahorro en gastos energéticos: para las fibras vírgenes se requiere entre 55 y 165 kWh por cada kilo de fibras, mientras que para tratar fibras recuperadas, solo se requiere de 3 a 10 kWh. [21].

Así pues, cuantificada la ventaja económica, solo queda saber si las fibras recuperadas tienen la calidad necesaria para ser incluidas en algún proceso productivo, y esto vendrá dado por la elección del proceso en el tercer punto, del cual depende la viabilidad, o no, del proceso.

5.6. Análisis y justificación

A partir de este punto, el presente proyecto se centrará en buscar el método de reciclaje de CFRP que se crea más conveniente. Desde un primer momento ha sido descartada la combustión por no ser un método de reciclaje como tal. El método químico también ha sido descartado por no permitir

⁷Cifras originales dadas en libras.[21]

un aprovechamiento óptimo y generar residuos. Los métodos mecánicos, además de ser utilizados pobremente a escala industrial, suponen una recuperación parcial y no optimizada de las fibras, que al no hallarse completamente libres de resina solo pueden utilizarse como material de relleno o refuerzos adicionales para plásticos. Suponen generar un producto pobre, cuyos usos se encuentran muy limitados. Los procesos de lecho fluidizado permiten recuperar la fibra, y convertir la resina en una fuente de energía, aprovechando de una forma u otra la totalidad del residuo; no obstante, para que el proceso se produzca, el residuo ha de ser previamente triturado para permitir “fluir” al sólido. Esto limita el producto final obtenido, pues no se podrán recuperar fibras de una longitud larga (ver 5.7.1 en la página 37 y 5.7.2 en la página 38). Por esta razón tampoco se considera óptimo en líneas generales. Quedan por lo tanto dos métodos, cuyo aprovechamiento del residuo es muy similar. Al ser la pirólisis un método más experimentado, utilizado por las plantas que actualmente reciclan fibra de carbono de forma experimental y comercial, y que requiere de unas instalaciones con un nivel de sofisticación mucho menor que la hidrólisis por agua supercrítica, se ha decidido descartar el último proceso y centrar el resto del trabajo en la pirólisis. Este razonamiento se basa en los criterios referidos, y es además una de las principales corrientes hoy entre los que buscan las formas más efectivas de reciclar los CFRP. Por ejemplo, en un artículo titulado “Recuperando fibras de carbono. ¿Qué manera es la correcta para reciclar CFRP?” [33] se dice: “Se considera actualmente que la pirólisis es el único proceso para reciclar plásticos reforzados con fibras de carbono (CFRP) que es realizable a escala industrial”. Prueba de ello es que ya lo realizan, entre otros la Japan Carbon Fiber Manufacturers Association (JCMA), Materials Innovation Technologies LLC (MIT) o la Recycled Carbon Fibre Ltd, entre otros.

En la lista anterior se ha dado una visión meramente esquemática del proceso, pero en las sucesivas partes de este trabajo va a ser tratado en profundidad.

5.7. El tamaño y la calidad del residuo, y sus consecuencias en el producto nuevo

Ya hemos recalcado en este texto que parte de las propiedades de los CFRP provienen del modo en que el carbono es fabricado, pues en forma de fibra es cuando se magnifica la resistencia del material, y al tejer estas fibras, es cuando se obtiene una resistencia máxima potenciada por el entrelazado. Sin embargo, al reciclar material con el objeto de recuperar fibras de carbono, la longitud de las fibras que obtendremos se verá condicionada en función del tamaño del residuo. Por ejemplo, cuando se recicla un trozo de prepreg proveniente de un pliegue sobrante de producción de solo unos centímetros cuadrados, es obvio que la fibra obtenida en el proceso no tendrá una longitud suficiente para constituir el aspa de un aerogenerador, u otra pieza de dimensiones muy grandes. Así pues, el tamaño de las fibras obtenidas depende fundamentalmente de las dimensiones de los residuos y serán mayores conforme mayor sea el deshecho sometido al proceso de reciclaje. Esta variable depende de dos factores:

- Tamaño original del residuo.

O lo que es lo mismo, no podemos alargar las fibras. Si el desecho tiene una longitud X , al liberar las fibras de la resina y deshacer el tejido, las fibras se podrán obtener de forma independiente y podrán ser estiradas. Podrán entonces alcanzar dimensiones algo mayores que el residuo, pero no mucho más. Las aplicaciones a las que se destinen las fibras estarán condicionadas por este factor.

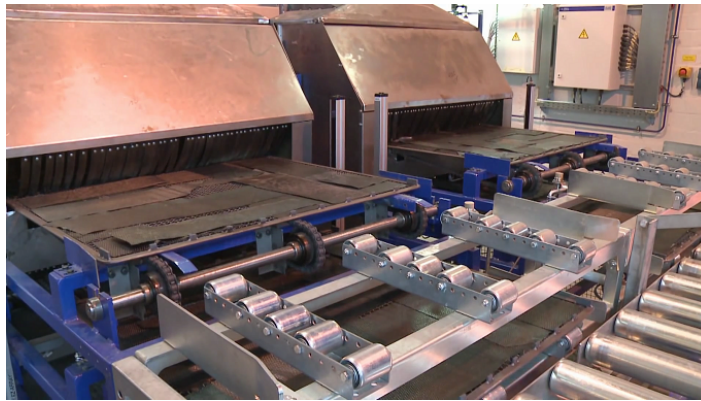


Figura 14: Residuos tejidos de CFRP, cortados y entrando a un horno pirolítico para su recuperación.

- Tamaño con el que el residuo se somete al reciclaje.

Aunque *a priori* puede parecer lo mismo que se ha tratado en el apartado anterior, en muchas ocasiones residuos de dimensiones considerables, de los que potencialmente pueden extraerse fibras de una longitud relativamente grande, son triturados en pasos previos al proceso. En el caso de residuos que contengan fibras continuas, el método más deseable es el de alterar las dimensiones del residuo en el menor grado posible, con el fin de conseguir recuperar las fibras con una longitud máxima, dentro de unos límites, y caracterizar el producto obtenido posteriormente según este hecho con la consiguiente mayor valorización en el mercado; no obstante hoy en día la mayoría de las operaciones de reciclado de materiales compuestos recuperan las fibras en forma corta, pues el material ha de ser sometido a un preproceso que fragmenta los residuos usados. Unas veces esto ocurre para facilitar el transporte; es el caso ya comentado de las piezas de aviación y las palas de aerogenerador, cuyo transporte directo es inviable. Otras veces, el proceso de triturado es desarrollado en la misma planta, con el objeto de separar el material útil para generar fibras de carbono recicladas de otros materiales que pueden venir mezclados con este. También se produce, si se está tratando con tejidos de grandes dimensiones, porque es preferible someterlos al reciclado en trozos simples, para no recuperar las fibras enmarañadas (Fig.14) Y en otras ocasiones, como se ha visto, es el propio método de reciclado el que requiere de un proceso de triturado, como condición *sine qua non*.

Otra razón para realizar este triturado es que permite la homogeneización de residuos de diversos tipos o procedencias. Así, residuos con fibras de distintas calidades son mezclados para obtener un producto recuperado de unas propiedades homogéneas. La parte negativa de este procedimiento es que se consigue un producto final de menor precio en el mercado, ya que las características del conjunto de fibras recuperadas se verán limitadas por la fibra componente de menor calidad, de un modo análogo a como dicta la frase acuñada por el filósofo Thomas Reid en el siglo XVIII: Una cadena es tan fuerte como su eslabón más débil. La solución a este particular es la inmersión de los generadores de residuos en el mismo proceso de reciclaje. Una buena relación entre el proveedor del residuo y el encargado de eliminarlo es vital para aumentar el precio final del producto recuperado, ya que si se consigue mantener la trazabilidad, conociendo cual es la procedencia del residuo y la calidad de éste, se conseguirá simplificar la clasificación y reciclar los CFRP en lotes de características similares. En otras palabras, ha de

tratarse al residuo de CFRP como a un subproducto, y conservarlo en condiciones que permitan a la entidad encargada del reciclaje el mayor conocimiento posible sobre las características del material que se está tratando, por ejemplo, conservando el prepreg destinado al reciclaje en las mejores condiciones posibles que eviten su polimerización. Almacenar sin control y a discreción cualquier elemento del que se puedan recuperar fibras de carbono, y esperar obtener posteriormente un producto de calidad, no es posible. Solo con el manejo de la mayor cantidad de información por parte de la empresa recuperadora se conseguirá la revalorización máxima de las fibras rescatadas.

- Reducción de tamaño durante la pirólisis.

Es posible que las fibras sufran roturas durante su paso por el horno. De un proceso optimizado se espera reducir los daños a las fibras, previniendo su integridad.

- Reducción de tamaño una vez recuperadas.

Depende del uso que se le quiera dar, las fibras sufrirán un postproceso u otro. En los casos en que las fibras son prensadas, lo cual es un caso muy común, existen rupturas que repercuten negativamente en la resistencia del conjunto.

En resumen; si se trata con residuos de fibras largas correctamente tratados, podrán obtenerse fibras largas. Si por el contrario el residuo contiene fibras más cortas, su fin sólo podrá ser la fabricación de materiales compuestos de fibra corta. Y si el material no es lo suficientemente bien tratado desde el momento en el que se le empieza a considerar residuo, independientemente de sus dimensiones originales, lo más probable es que las fibras terminen recuperándose en forma corta.

Es por esto, que podemos clasificar los productos obtenidos con el reciclaje en función del tamaño de la fibra recuperada.

5.7.1. Fibras cortas

- Estopa molida.

Tienen las longitudes más largas dentro de las fibras cortas (variables en función del fabricante, pero generalmente entre 6 y 12mm). Al provenir de un residuo en el que la fibra de carbono se encontraba tejida y no haber sido desenredada posteriormente, las fibras no se encuentran sueltas, sino enmarañadas con otras fibras con las que compartieron destino en su anterior uso. Son utilizados para reforzar plásticos termoestables y termofusibles.

- Fibras sueltas de carbono.

De dimensiones entre 1 y 6mm. Usualmente se usan para construir materiales plásticos, o como elemento de refuerzo mezclado con pinturas, hormigones, caucho o papel.

- Fibra molida.

También llamado MLD, por Milled Carbon Fiber. Son fibras reducidas a polvo. La longitud oscila entre 80 y 160 micras. Añadidas en un polímero, mejoran la resistencia mecánica y añaden estabilidad dimensional.

5.7.2. Fibras largas

Con ellas pueden conformarse esteras no tejidas. La fibra no tiene dimensiones que le permitan conformar un tejido, así que se entrecruzan en forma de estera. Si solo contiene fibras de carbono, la estera podrá ser utilizada en la fabricación de nuevos CFRP cuya proceso no difiere en nada de los procedimientos con fibra de carbono virgen; solo hemos de tener en cuenta que la resistencia que presentara este CFRP será menor que en el caso de fibras tejidas, por lo que las aplicaciones a las que se destine habrán de estar sometidas a menores requisitos. Por otro lado, si la estera se forma incluyendo además fibras termoplásticas, el conglomerado podrá usarse en procesos de moldeo a presión.

De esta clasificación, y lo que hemos tratado a lo largo del presente texto podemos inferir que una fibra de carbono en concreto tiene un número limitado de ciclos de reciclado, pues en cada ciclo sus probabilidades de disminuir de longitud son elevadas. En el momento en que la fibra recuperada se considere corta, se destinará previsiblemente a otras aplicaciones en los cuales su reciclaje no está asegurado, al menos en la fecha de redacción de este texto. Incluso en el caso de un futuro en el que los residuos de CFRPs sean tratados sistemáticamente para la recuperación de fibras en cualquiera de los medios vistos hasta ahora, se ha de tener en cuenta que las fibras de carbono tendrán una cierta “memoria”; al contrario del metal o del vidrio, cuyo reciclaje mediante fundido devuelve al material prácticamente a su estado virgen, las fibras de carbono acusarán los ciclos de vida, disminuyendo junto con su longitud, las aplicaciones para las que son válidas.

5.8. Procesos de conformado de piezas post-recuperación de fibras

Se presenta a continuación una aproximación de los procesos que se pueden seguir con las fibras recuperadas como materia prima [92].

5.8.1. Moldeo directo

- Por inyección.

Mezcla de fibras cortas o molidas con una resina termoplástica y demás aditivos, que se mezclan en forma de pellets, y posteriormente se inyectan en un molde.

- Compresión a granel.

Denominado en inglés BMC Compression por las siglas de Bulk Molding Compounds. Mezcla de las fibras picadas con una resina termoestable y demás aditivos necesarios constituido como una masa en forma de pellets, para conformar generalmente láminas de grandes extensiones, destinadas a un posterior proceso de fabricación mediante inyección o compresión.

5.8.2. Moldeo por compresión de productos intermedios no tejidos.

Generación de piezas 2D y 3D con fibras sin tejer, añadiendo aditivos para que conserven la forma dada sin procesos de horneado, y su posterior preimpregnación. De entre todas las acciones comerciales para rescatar fibras de carbono, es uno de las más frecuentes; por ejemplo es la utilizado en la, ya nombrada en este texto, fabricación de techos y paneles de carrocería de los BMW i3 e i8 (Fig.15). Además, la creación de rCFRP usando *flakes* de fibra de carbono, generan patrones estéticos distintos

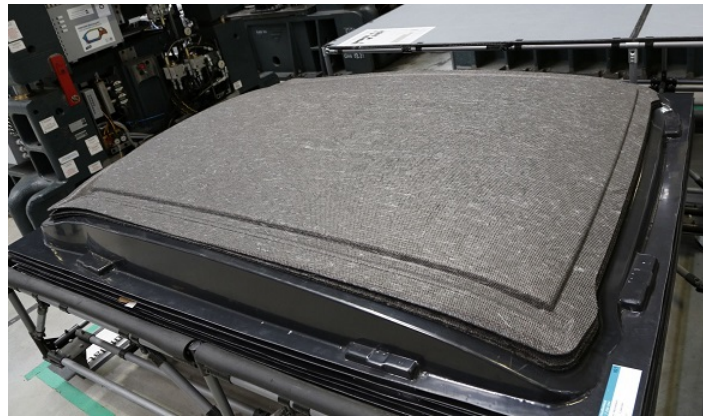


Figura 15: Techo de BMW i3, realizado con fibras de carbono recuperadas.

de los de los tejidos visibles; esto ya ha sido utilizado en las consolas centrales del Aston Martin DB11 o el Lamborghini Huracán [39].

5.8.3. Alineación de la fibra.

Se engloban bajo este nombre varias técnicas de “peinado” de fibras, con el objetivo de dotar a la manufactura, no solo de las propiedades físicas de la fibra recuperada, sino de las derivadas de las relaciones fibra-fibra que se producen al ordenarlas siguiendo la misma orientación. Esto revierte en mejores propiedades finales del producto, y de un menor coste energético durante su producción mediante procesos de moldeo.

5.8.4. Tejidos de fibras recuperadas.

Si el material original es una pieza de dimensiones considerables, como piezas de fuselaje o aspas de aerogeneradores, es posible, si se cuenta con maquinaria de las dimensiones adecuadas, someter a la pieza completa a la pirólisis, y rescatar las fibras manteniendo su tejido original. A mayor dimensión del fragmento pirolizado, menor eliminación de la resina original, con lo cual las fibras recuperadas mediante este procedimiento obtienen las mayores pérdidas de propiedades con respecto a las fibras vírgenes. Por ejemplo, es la solución óptima para recuperar rollos de prepreg cuya resina ya no se encuentre en estado reactivo; técnicamente, la fibra contenida en el prepreg sigue siendo virgen y el tejido original no tiene que ser modificado para ser nuevamente valioso en el mercado; solo será necesario retirar la resina en mal estado y agregar una nueva.

6. PIRÓLISIS DE CFRP

6.1. Definición

A riesgo de pecar de poco original, el autor de este TFG recurrirá a la etimología de la palabra para ayudarle a definir el proceso; de origen griego, *piro* significa fuego, y *lisis* ruptura. Es decir, romper mediante el fuego, como un proceso para simplificar las entidades de la sustancia sometida al proceso [32]. Desde un punto de vista más técnico, podemos definir la pirólisis como el proceso de

conversión energética a alta temperatura, que se basa en la descomposición térmica de un material en un ambiente libre de oxígeno, o con poco porcentaje de él.

Cuando un combustible sólido se calienta a temperaturas entre 300 y 500°C en ausencia de un agente oxidante, este piroliza; esto significa que los enlaces de la sustancia se rompen y se obtienen distintas sustancias de fácil separación, como el carbón (coque o char), hidrocarburos condensables o alquitrán y gases. Las proporciones relativas de los diferentes productos dependen en gran medida de la velocidad de calentamiento y de la temperatura final a la que se produce el proceso. En general, la pirólisis tiene lugar mucho más rápidamente que la gasificación, siendo esta última la etapa que controla la velocidad a la que se realiza el proceso [32].

El proceso pirolítico se conoce desde la antigüedad, y ya era usado en el Antiguo Egipto para pirolizar madera con la que obtenían carbón, alquitrán fluido y un ácido piroleñoso utilizado en los ritos de embalsamamiento funerario. Con los siglos, el proceso pirolítico se utilizó en diversas aplicaciones pero fue dejándose de lado paulatinamente hasta casi abandonarse. Sin embargo, en los últimos tiempos se ha encontrado en la pirólisis un método de tratamiento de residuos cuyo tratamiento resulta complicado. En la actualidad es el método más efectivo para valorizar las fracciones más complicadas provenientes de la recogida de residuos sólidos urbanos, que no pueden ser tratados con métodos más convencionales y cuya otra única alternativa viable es sepultar en un vertedero. Es un método efectivo y no particularmente complicado para convertir desechos en compuestos de una naturaleza química más simple, lo que permite asimilar una mayor cantidad de materia por parte del sistema, con un mayor aprovechamiento y una minimización de la fracción restante no aprovechable [32].

6.2. Pirólisis aplicada a los CFRPs

Cuando se somete a los residuos de CFRP a un proceso de pirólisis, la matriz polimérica de estos debe descomponerse en la ausencia de oxígeno al ser calentado el material. El autor del presente TFG se encuentra abrumado por no poder dar el dato concreto que revele a que temperatura se suele realizar este proceso, pero ha llegado a la conclusión de que es muy dependiente del tipo de composite al que se someta al proceso; cada autor aporta datos distintos, podríamos llegar a suponer, que en virtud a sus experiencias y a las características concretas del CFRP tratado, pero incluso así, la diversidad entre los datos aportados resulta francamente curiosa. A falta de más criterios de juicio para decidir cuál es el más aplicable, se opta por reflejarlos aquí: la cifra más baja dada es de 200°C [89], pero otros defienden que se produce a partir de 350°C [77]; también podemos encontrar quien lo fija entre 500° y 600°C [33, 52], o entre 450°C y 700°C [92], o yendo incluso más lejos, entre 400°C y 1000°C [8].

Afortunadamente el resto de información que se detalla es más concreta. El proceso es conceptualmente muy simple; los CFRPs han de ser almacenados y separados en función de su estado (Fig. 16). Los CFRPs se introducen en la atmósfera del horno pirolítico (Fig 17) o autoclave, lo que provoca su disminución de tamaño, al evaporarse las moléculas de resina (Fig 18). Al finalizar el proceso en el interior del horno permanecen las fibras y una cantidad de carbón pirolítico, el último remanente de resina, unido a las fibras superficiales. Estas, cuya temperatura de fabricación es mucho más alta que las temperaturas a las que se realiza la pirólisis, no se ven gravemente afectadas y mantienen su integridad estructural [84] y sus propiedades, especialmente la rigidez [92] (Fig 19). Por su parte los restos de resina en estado gaseoso pueden ser recogidos mediante un condensador, donde al enfriarse se convertirán en bio-óleo o biopetroleo, que con tratamientos posteriores podrá tener múltiples usos



Figura 16: Residuos de fibra de carbono: prepeg, tejidos, CFRP formados, paneles sándwich...



Figura 17: Cuadro de bicicleta de CFRP dañado, camino del horno pirólítico.

como combustible, generación de energía o en procesos de fabricación química [51]; de hecho suele usarse como combustible del mismo proceso de pirólisis (Fig 20).

Una variante del proceso es la pirólisis por microondas, en la cual se somete a los residuos a un proceso de calentamiento por ondas cuyas frecuencias oscilan entre 300 MHz y 300 GHz . Como las fibras de carbono son conductoras eléctricas, absorben las microondas, lo cual genera un calentamiento óhmico del material, lo que permite la separación de las partes que lo componen. [33]. El proceso es definido por algunos autores como “flexible, fácil de controlar y eficiente”⁸ [53]. Según han demostrado algunos artículos [33], las fibras recuperadas por este proceso, en comparación con otras a las que se ha sometido a una pirólisis convencional, presentan propiedades mecánicas claramente peores. La resistencia a la tracción se redujo desde $4'111\text{ MPa}$ en las fibras vírgenes, a $1'004\text{ MPa}$ en las recuperadas por pirólisis por microondas, mientras que las que sufrieron una pirólisis convencional soportaban $2'643\text{ MPa}$. Aunque ambos procesos pirolíticos dañan las fibras y hacen que su diámetro se reduzca, la reducción en pirólisis convencional fue de $-11,3\%$; en cuanto al proceso por microondas, aquí se presenta una ventaja, pues las fibras situadas lejos de los bordes de la muestra solo redujeron su diámetro un $-4,4\%$, pero por otro lado, las más expuestas a las microondas, fueron mucho más dañadas y redujeron su diámetro hasta en una quinta parte ($-20,4\%$).

⁸Cita original: “we found that microwave irradiation was a flexible, easy-to-control, efficient technique to reclaim the carbon fiber from CFRP composites”[53]

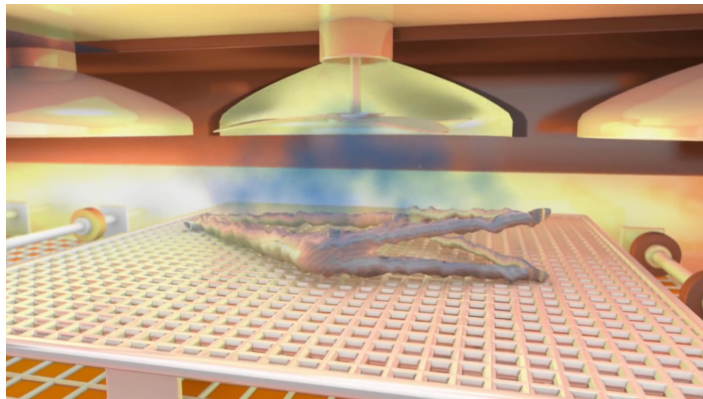


Figura 18: Ilustración de pirólisis sobre cuadro de bicicleta. La resina se elimina y permanece la fibra.



Figura 19: Fibras de carbono recuperadas del cuadro de bicicleta, una vez terminado el proceso de pirólisis.

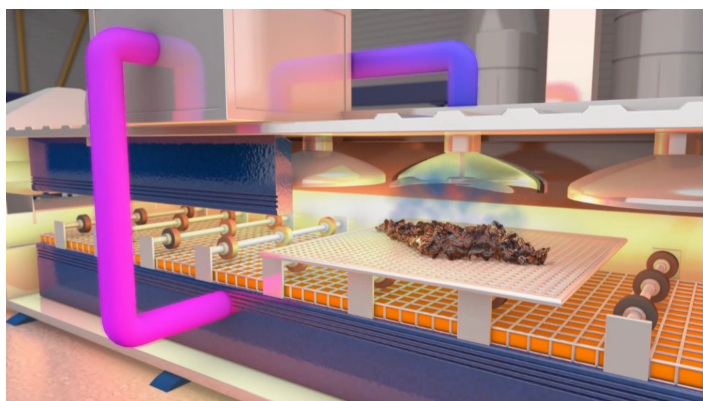


Figura 20: Reinyección de los gases obtenidos a partir de la resina en el sistema como combustible.

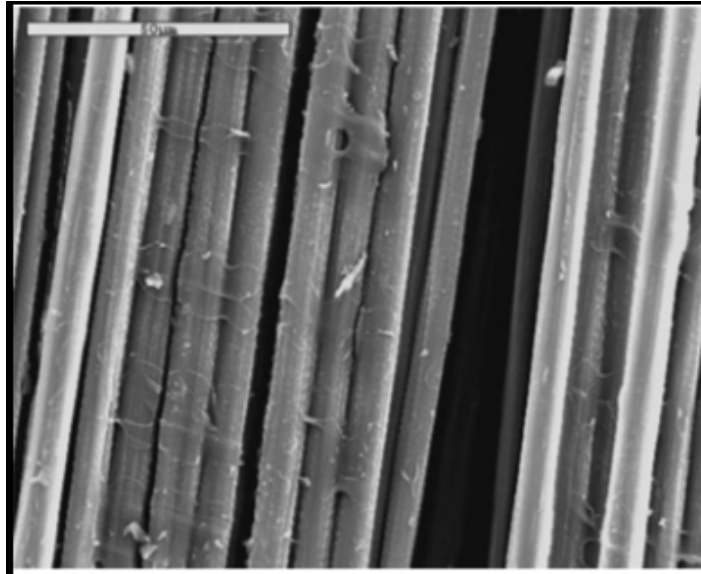


Figura 21: Char o carbón pirolítico en fibras de carbono recuperadas mediante pirólisis. Se percibe como la película que une dos o más fibras.

6.3. Inconvenientes

Los puntos negativos que presenta el reciclado de CFRPs mediante pirólisis son los siguientes.

- Aparición de char en la superficie de las fibras recuperadas (Fig. 21).
- Las propiedades de la fibra pueden verse afectadas por el proceso, que aún no se encuentra debidamente optimizado [77].
- Emisión de gases medioambientalmente peligrosos. Las dos primeras desventajas del proceso pueden ser subsanadas, o al menos minimizadas, con un correcto diseño y elección del proceso, en cuanto a tiempos y temperaturas. Por su parte, la emisión de gases es inevitable cuando se produce una combustión, y aunque puede ser también minimizada por los parámetros del proceso y el equipo usado, no es subsanable.

6.4. Artículos de investigación: resultados obtenidos en ensayos

En un intento por acercarnos al método ideal de reciclaje de CFRP vamos a analizar los datos existentes obtenidos en ensayos en cuanto a procesos de pirólisis, para intentar hallar un proceso efectivo. Se exponen a continuación, ordenados según la importancia de sus conclusiones bajo el criterio personal del autor de este TFG.

6.4.1. Meyer, Schulte y Grove-Nielsen (2009)

Artículo original reseñado en la bibliografía [77].

Proceso: Se realizan dos tipos de ensayos distintos a escala de laboratorio en un analizador termogravimétrico (TGA) con variación de temperatura de pirólisis, tiempo de permanencia isotérmico y atmósfera del horno. Análisis de fibras recuperadas fueron realizados con microscopía

Tª Pirolización	Resistencia de contacto	P. Unión matriz-fibra	Char
700	Mayor	Menor	Mayor
900			
1100			Menor
1300	Menor	Mayor	Ninguno

Figura 22: Comparativa entre fibras recuperadas.

electrónica y espectroscopia Raman. Con los datos obtenidos, se realiza una tercera prueba de pirólisis a escala semindustrial, para probar la viabilidad técnica.

Ensayo número 1

Se desarrollan cuatro procesos experimentales: muestras similares de 50 kg de prepreg, pirolizadas a 700, 900, 1100 y 1300°C en un horno de gas. Con ellos prueban que existe influencia entre cómo se lleva a cabo el proceso pirolítico y el aspecto superficial que presentan las fibras recuperadas. Esto afecta y modifica las propiedades eléctricas, las propiedades de unión matriz-fibra y la resistencia de la siguiente manera.

Se recuperaron cantidades de entre 10 y 15 mg, demasiado pequeñas para medir propiedades físicas o eléctricas, así que la caracterización de la fibra se realiza en función de la superficie: se usó la microscopia electrónica de barrido (SEM) para los residuos de carbón pirolítico, y la espectroscopia Raman para determinar la densidad de defectos en las fibras. (Fig. 22).

Ensayo número 2

Los parámetros óptimos para la pirólisis fueron determinados por los resultados de los análisis de laboratorio y la caracterización de la superficie de las fibras. Más tarde se llevaron a cabo a escala semi-industrial en un horno rotatorio.

Se separó la resina del prepreg para realizar investigaciones previas para conocer el comportamiento de la degradación de esta en pirólisis en dos ambientes distintos: aire sintético y nitrógeno. Sintetizando los resultados de ambos experimentos, se teorizó que entre los 580°C y los 600°C se podría realizar un proceso en el cual se podría separar el carbón pirolítico de las fibras por oxidación parcial, y las fibras no se dañarían en el proceso.

A partir de entonces se procedió a las pruebas con prepreg variando la temperatura máxima y los tiempos de permanencia isotérmica. Los experimentos han sido llevados a cabo con un incremento fijo de temperatura de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Los investigadores obtuvieron los siguientes datos:

- En aire sintético (Presencia de oxígeno):
 - A temperaturas aproximadas de 600°C se consigue la completa eliminación de la matriz resinosa. Si la temperatura supera los 650°C, las fibras sufren oxidación y se degradan las propiedades mecánicas de las fibras; el artículo especifica por lo tanto que estas temperaturas han de ser evitadas en pirólisis en presencia de oxígeno.
 - A 600°C, el proceso ha de ser corto para no producir en las fibras daños por oxidación.
 - La influencia de tiempo de permanencia isotérmica es comparable con la de la temperatura; después de 120 minutos de permanencia en el horno a 500°C, se redujo

ampliamente la cantidad de carbón pirolítico. (También se da en atmósfera inerte)

- En atmósfera inerte (Presencia de nitrógeno):
 - Siempre se produce carbón pirolítico, incluso a temperaturas superiores a 900°C.
 - No es necesario realizar el proceso a temperaturas mayores de 600°C, ni tiempos de exposición prolongados más de 30 minutos, pues no supone diferencia.
 - La influencia de tiempo de permanencia isotérmica es comparable con la de la temperatura; después de 120 minutos de permanencia en el horno a 500°C, se redujo ampliamente la cantidad de carbón pirolítico. (También se da en aire sintético).

De lo cual se obtienen dos conclusiones

1. En atmósfera inerte, las reacciones de descomposición dependen solo de la temperatura del proceso, y en presencia de oxígeno, dependen del tiempo y de la temperatura.
2. Mientras que en atmósferas con nitrógeno no se consigue eliminar totalmente los residuos orgánicos, en una atmósfera con oxígeno es posible hacerlo a temperaturas entre 500 y 600°C: a 500°C el tiempo de exposición debe ser de dos horas o superior. A 600°C, existe riesgo de dañar las fibras.

Ensayo a escala semi-industrial

Llegados a este punto, hubo que cambiar ciertos parámetros, debido principalmente a que la oxidación de material orgánico a alta temperatura es exotérmico, y para prevenir un crecimiento incontrolado de la temperatura se sometió primeramente al material a una pirólisis en nitrógeno de dos horas a 550°C. Más tarde el material se enfrió por debajo de los 200°C y en un segundo paso se eliminó el carbón pirolítico por oxidación parcial de nuevo a 550°C.

La resistencia a la tracción soportada por las fibras recuperadas fue de 3589 *MPa*, frente a los 3712 *MPa* de la fibra original: es decir, fibras muy similares a las originales.

Con este proceso se consiguió obtener fibras sin daños por oxidación, sin presencia de residuos de carbón pirolítico y con las mismas propiedades que la fibra virgen, a una escala semi-industrial, probando que los parámetros utilizados eran un método válido.

Curiosamente, existe otro artículo (Ushikoshi, Komatsu, Sugino, 1995) [114] en el que se realizan prácticamente las pruebas y se llega casi a las mismas conclusiones, recogidas a su vez en (Pickering, 2006) [89]. También en Yin Ye, 2013 [123], se utilizan parámetros similares para pirolizar CFRP.

6.4.2. Pimenta et Al. (2011)

Artículo original reseñado en la bibliografía [92].

En un abundante texto que ha servido de referencia en varias ocasiones durante la redacción del presente TFG, se comparan distintos métodos de recuperación de CFRP. Aquí solo tendremos en cuenta los estudios analizados sobre pirólisis. Los autores examinan varios artículos de investigación y reúnen los resultados para obtener conclusiones del estudio combinado. Entre otros, recogen los datos referenciados en la figura 23.

Autor	Tipo de fibra	Modulo de Young (GPa)	Resistencia a la tracción de las fibras (Gpa)	S _{IF} (MPa)
RCFL (2009)	Hexcel AS4	231 (+0,4%)	3,69 (+2%)	42 (-2%)
Meyer et al. (2009)	Toho HTA	?	3,57 (-4%)	?
Karborek (1999)	Toray T800	222 (-12%)	4,62 (-10%)	99 (+41%)
Lester et al. (2004)	Grafil 34-700	210 (-13%)	3,26 (-20%)	?

Figura 23: Comparativa entre fibras recuperadas en distintos artículos.

Del análisis de estos, y otros datos provenientes de distintos sistemas de reciclaje, los autores coinciden en que las propiedades de la mayoría de fibras recuperadas son similares a la de la fibra virgen, y por lo tanto las aplicaciones pueden ser las mismas. No obstante, los diversos artículos analizados revelan que las fibras recuperadas tienen una mayor debilidad que las fibras vírgenes. Las relaciones fibra-fibra son distintas en función del proceso y postproceso seguido para su recuperación, y las posibilidades son muy diversas, por lo que el desconocimiento sobre la materia es aún elevado.

Se llega también a la conclusión de que si existen pequeños manojos de fibras que permanecen juntos durante el proceso de reciclado sin separarse, unidos por pequeñas cantidades sin disolver de resina, cuando conformen un rCFRP le aportarán resistencia extra. Esto podría sugerir que es viable mezclar en un mismo rCFRP fibras cortas y manojos de fibras más largas, para crear materiales capaces con una mayor tenacidad.

En este artículo se analizan también los datos de otro texto de los mismos autores [91], que trataremos más adelante de forma completa.

6.4.3. Onwudili, Miskolczi, Nagy y Lipóczy (2016)

Artículo original reseñado en la bibliografía [84].

En este texto se trata la pirolización de CFRP y GFRP, y el posterior uso de las fibras en sintetización de otro polímero, esta vez con polietileno de baja densidad (LDPE). Solo analizaremos la parte del artículo que abarca la pirólisis de los CFRP y la caracterización de la fibra obtenida.

Los residuos de CFRP fueron facilitados por Recycled Carbon Fibre, provenientes de la fabricación de interiores en automoción. Fueron machados, para poder encajar en el reactor, y sufrieron un proceso de purga y sellado con nitrógeno. Después se pirolizaron 200 gramos de residuo a 500°C, también en atmósfera de nitrógeno, durante aproximadamente 45 minutos. Durante el proceso, los gases fueron barridos por el flujo de nitrógeno y llevados a un condensador, para obtener aceites de pirólisis. Las fibras obtenidas fueron separadas en dos muestras, y solo a una de ellas se le sometió a un proceso de oxidación suave, a 500°C, por 30 minutos. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 24.

Como era de esperar, al comparar ambas muestras, se comprobó que la muestra sometida a oxidación, había perdido la película residual de resina que había resistido la pirólisis, y las fibras tenían mejor aspecto superficial. Después de los análisis se determina que el módulo de tracción es muy superior al de las fibras sin oxidación e incluso supera al de las fibras vírgenes. Además los módulos de flexión aumentan en ambos casos, y la resistencia a tracción lo hace también levemente. Por otro lado, y en la posterior formación de polímeros de polietileno, los experimentos realizados con las fibras sometidas a oxidación tienen mucho mejor comportamiento que aquellos no tratados. Se com-

Tipo de CF	Resistencia a la tracción de las fibras (MPa)	Alargamiento a la Ruptura (%)	Módulo de Tracción (MPa)	Resistencia a la Flexión (MPa)	Módulo de Flexión (MPa)
Virgen	12,6	3,19	530	8,3	663
Recuperada – Sin oxidación	14 (+11,1%)	8,45 (+164,9%)	485 (-8,5%)	8,2 (-1,2%)	815 (+21,8%)
Recuperada – Con oxidación	13,2 (+4,8%)	2,35 (-26,3%)	792 (+49,4%)	7,7 (-7,2%)	779 (+16,4%)

Figura 24: Comparativa entre fibras vírgenes y fibras recuperadas.

	Resistencia a la tracción de las fibras (MPa)	Modulo de tracción (Gpa)	Elongación por Tracción (%)
GFRP	63,8	5,7	3,7
rCFRP	89,7 (+40,6%)	5,5 (-3,5%)	4 (+8,1%)

Figura 25: Comparativa entre materiales reforzados con fibras: vidrio virgen vs carbono recuperado.

probó que las fibras a las que se les practico la oxidación no estaban completamente limpias, pues quedaban entre ellas diminutas partículas de ceniza que, por otro lado, no interferían negativamente en la formulación del nuevo composite.

6.4.4. Asmatulu, Twomey y Overcash (2014)

Artículo original reseñado en la bibliografía [8].

De este extenso artículo, que abarca distintos tipos de composite, solo destacaremos estos breves datos que enfrentan a los rCFRP con los GFRP.

Lo cual prueba que, al menos de forma general y teórica, es posible la sustitución de polímeros de fibra de vidrio por otros realizados con fibras de carbono recuperadas.

Aunque ajeno a este artículo, viene a colación insertar la imagen generada por Tassilo Witte, investigador del Composite Technology Center, en el que se muestran los resultados obtenidos al someter a esteras no trenzadas de fibras de vidrio y de fibras de carbono a cargas para probar sus módulos de tensión. Las fibras de carbono (línea roja) sometidas a fuertes esfuerzos arrojan los mismos resultados que la fibra de vidrio sometida a cargas mucho menores (línea naranja). Además, las esteras de fibra de carbono superan en la mayoría de casos de carga a muestras de GFRP ya sintetizadas (línea azul) [41].

6.4.5. Jiang y Pickering (2016)

Artículo original reseñado en la bibliografía [52].

Los autores sostienen que existen dos factores importantes que modifican a las fibras durante los procesos de reciclado: el efecto oxidativo, que provoca defectos superficiales con la consiguiente reducción de resistencia a la tracción, y el efecto térmico, que causa una expansión entre las capas de grafito con un detrimento de la concentración de oxígeno en la superficie de las fibras. En este texto se tratan las diferencias entre las fibras de carbono vírgenes y las recicladas teniendo en cuenta las consecuencias de estos efectos, con el objeto de entender la relación la estructura de las fibras de

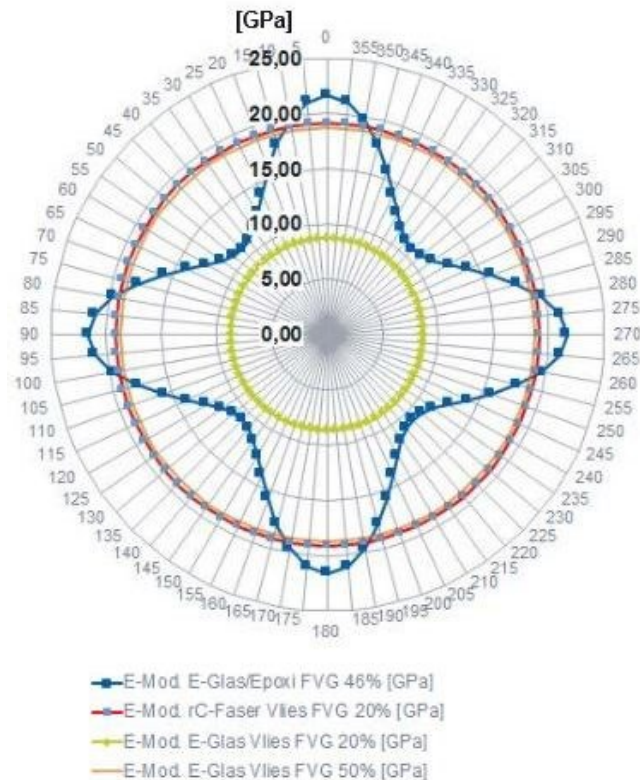


Figura 26: Resistencia de fibras de carbono recuperadas frente a fibra de vidrio y GFRP.

carbono y sus propiedades.

Se tomaron dos muestras de fibras recuperadas en el proceso de ELG Carbon Fibre Ltd., originalmente pertenecientes a material prepreg polimerizado del tipo epoxi/T800. El proceso de recuperación consistió en pirólisis a 500°C y su posterior oxidación. Finalizada la recuperación, las fibras fueron molidas hasta que midieron 12mm. Por otra parte, las fibras vírgenes con las que se compararon las muestras fueron obtenidas de un prepreg en estado *B*, al cual se le retiró la resina.

En una primera comparación de las muestras se distingue una superficie limpia y suave, sin distinción con las fibras vírgenes. La relación entre los radios atómicos del oxígeno y el carbono ha descendido. Se cree que esto es debido a que el proceso pirolítico descompone el oxígeno de la superficie de las fibras en forma de CO y CO_2 , pero durante la oxidación, se crean nuevas uniones atómicas con el oxígeno, aunque en menor número. Uno de los parámetros obtenidos por espectrografía Raman, el ratio entre bandas D y G, que designa la relación entre la intensidad del pico de defecto dividido por la suma de la intensidad del defecto y del pico de grafito, es mayor para las fibras recuperadas, lo que conlleva en último término una menor resistencia a la tracción.

Como conclusiones, las fibras recuperadas pierden entre un 26% y un 42% del oxígeno en la superficie después de la pirólisis, lo que reduce en un 24% la calidad de la conexión fibra-resina para un rCFRP. Por su parte la resistencia a la tracción se reduce entre un 2% y un 16%. El proceso de oxidación es altamente recomendable para evitar esta pérdida de propiedades. Con aumentos en el ratio entre las bandas D y G, la resistencia a tracción decrece de forma lineal.

Tipo de CF	Diametro de las fibras (μm)	Modulo de Young (GPa)	Resistencia a la tracción de las fibras (GPa)	S_{IF} (MPa)
Virgen	7,03	227,80	4,24	83,3
Reciclada	7,2 (+2,4%)	217,79 (-4,4%)	4,16 (-1,9%)	86,9 (+4,3%)

Figura 27: Comparativa fibras virgenes vs recuperadas.

6.4.6. Pimenta et Al. (2010)

Artículo original reseñado en la bibliografía [91].

En este artículo se trata la respuesta a distintos ensayos de un CFRP generado a partir de fibra de carbono, recuperada mediante pirólisis de un CFRP previo. Por esto denotan durante el texto al material como rCFRP, donde la *r* designa *recycled*. El proceso de parametrizar este tipo de material es complicado: la fibra recuperada que ha vuelto a quedar sellada en resina, lo hace de una manera desordenada y aleatoria, coexistiendo en una misma entidad filamentos independientes y haces de fibra que permanecen unidos desde la confección del tejido original con el que se formó un CFRP por primera vez, y fragmentos de dimensiones muy dispares.

El precursor usado para obtener el rCFRP fue un prepreg de fibra T-300 y resina epoxi, residuo de producción de Boeing, cuya fibra fue recuperada por Recycled Carbon Fibre Ltd, en forma de estopa molida, de 12 mm, en una estera sin tejer. En la tabla correspondiente (Fig. 27) se muestran datos referentes a ambas fibras, antes y después del proceso de reciclaje, en cuanto al diámetro de las fibras, su módulo de Young, la resistencia a tracción de las fibras, y la resistencia a la separación por cizalladura que presentan la resina y la fibra, S_{IF} .

Resulta llamativo que después de todo el proceso que sigue la fibra, algunas propiedades mejoren con respecto a una fibra limpia y recién fabricada, pero es lógico porque después de someterse a la pirólisis, una pequeña capa de resina cubre las fibras, potenciando algunas de sus propiedades.

A partir de la fibra, se conforma el rCFRP con resina epoxi ACG XMTM 257, obteniendo un material con el 30% aproximado de fibra y un espesor, también aproximado, de 2,5 mm.

El artículo muestra en unas gráficas la comparativa entre aluminio (2024-T4, de uso aeroespacial), fibra de vidrio (con resina fenólica, usada en interiores de aviones) y tres posibilidades distintas de rCFRP, en función de cómo se ha preparado la fibra antes de incorporar la resina: estructura moldeada en 2D sin tejer, moldeo en 3D y estera de fibras alineadas.

- Rigidez específica E/ρ ($10^6 \text{m}^2/\text{s}^2$).

Estera de fibras alineadas (52) > *Moldeo en 2D sin tejer* (26) > *Aluminio* (25) > *Moldeo en 3D* (18) > *Fibra de vidrio* (12)

- Fuerza específica X/ρ ($10^3 \text{m}^2/\text{s}^2$).

Moldeo en 3D (300) > *Estera de fibras alineadas* (275) > *Aluminio* (225) > *Moldeo en 2D sin tejer* (220) > *Fibra de vidrio* (100)

Esto nos permite identificar que material usar sabiendo los requerimientos tensionales a los que va a estar sometida la pieza que deseamos confeccionar en rCFRP: no es una decisión correcta usar moldeo en 3D si la pieza requiere rigidez específica, ni moldeo en 2D sin tejer si prevemos sollicitaciones altas de fuerza específica; sin embargo, hacerlo al contrario sería mucho más correcto. Por su parte, las esteras de fibra alineadas se presentan como una opción muy buena en cualquiera de los dos casos.

Después de una serie de ensayos en los que se testea en el plano la tensión, la compresión y la cizalla, y se vuelve a comparar con los mismos materiales. Se obtiene que, dependiendo del caso de carga, el comportamiento del rCFRP es similar al del aluminio, y supera ampliamente a la fibra de vidrio, luego, puede usarse para las mismas aplicaciones y se reducirá el peso del conjunto. El reciclaje fue mucho más fuerte bajo compresión que bajo tensión, porque el compuesto reciclado incluía demasiados haces de fibras y secciones de fibras fracturadas: más del 60% de las fibras presentaban longitudes insuficientes. Esto es provocado, tanto por los procesos de recuperación de fibras como por los procesos de fabricación del rCFRP.

Por lo tanto, el artículo concluye con que es fundamental reducir las fracturas de fibra que se producen durante el reciclado; debido a las altas presiones que son necesarias para moldear las fibras recuperadas, muchas de ellas se fracturan, lo que provoca una pérdida de propiedades, que es mayor cuanto mayor es el porcentaje de fibra del rCFRP. Se ha de actuar, bien con otros métodos para reimpregnar las fibras, o potenciando la alineación de fibras para evitar su rotura.

Y siguiendo el mismo razonamiento, el composite presentará mejores prioridades si se mantiene durante el proceso un número alto de haces de fibras. Al igual que las fibras aisladas y desordenadas tienden a fracturarse, las hebras que finalizan el proceso sin haberse separado las unas de otras tienden a actuar como una unidad frente a los esfuerzos y resistirlos mejor. A contrario de lo que los autores afirman que es una creencia generalizada, los haces de fibras no son un defecto del material, sino una ventaja que previene las fracturas.

7. CONTEXTO

7.1. Introducción

Para conocer las posibilidades de realizar una actividad remunerada en el campo del reciclaje de CFRP en la comunidad de Andalucía, no nos basta solo con conocer el estado de la tecnología y los procesos que se han de seguir. El factor marco es vital para encontrar si una actividad resultaría rentable, realizable, o permitida. En esta sección, vamos a analizar los factores conyunturales y sociales que se han de tener en cuenta en este aspecto.

7.2. Producción andaluza de materiales compuestos

Son muchos los ejemplos de fabricantes establecidos en Andalucía que centran sus funciones productivas en la fabricación de materiales compuestos en general, y en los CFRPs en particular. En este apartado vamos a tratar de confeccionar una visión general de ellas.

Es obligado mencionar al clúster aeronáutico HÉLICE [106], un conjunto de empresas situadas en Andalucía que trabajan en la fabricación de aparatos aéreos. Su función es la desarrollar el sector aeronáutico en Andalucía. Las actualmente 114 industrias que lo conforman suponen el 1,58% del PIB de la provincia, y es uno de los grandes núcleos donde se concentran las industrias de este sector en todo el país. La inmensa mayoría de las empresas que se tratan a continuación pertenecen a dicho clúster, ya que dentro de su individualidad, la unión dentro de una misma organización les aporta mayor fortaleza a nivel internacional. Tanto es así que Andalucía es uno de los referentes en fabricantes de CFRPs con fines aeronáuticos a nivel mundial. De hecho, fue en Sevilla, donde se encuentran la inmensa mayoría de empresas de HÉLICE, donde se celebró en 2014 la *ECCM16*, la

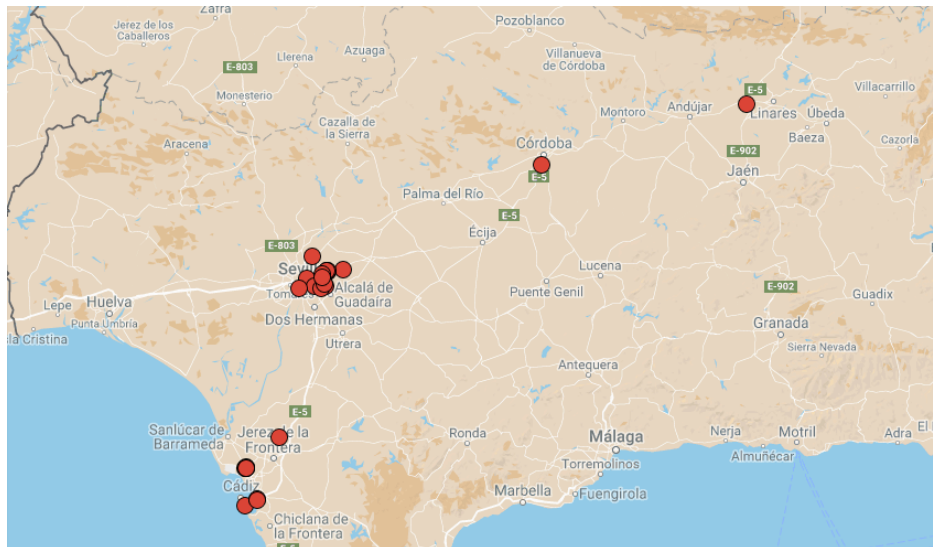


Figura 28: Mapa de Andalucía. Señaladas las empresas que trabajan con CFRP.

Conferencia Europea de Materiales Compuestos, (*European Conference on Composite Materials*) en su XVI edición. En este encuentro, que se realiza bianualmente, participaron más de 1000 invitados de 69 países distintos, en una serie de ponencias y encuentros entre los que realizó además, una visita a la línea de ensamblaje final del Airbus Military A400M, que era en aquel momento el Airbus en servicio fabricado con mayor cantidad de materiales compuestos. Esto da idea del peso de dicha actividad en la zona no solo a nivel local o nacional. La existencia de ocho aeropuertos en la zona -Sevilla, Jerez, Almería, Málaga, Córdoba y Granada en Andalucía, mas el de Gibraltar y el de Faro, en Portugal- juegan un papel importante en ello.

Para empezar a situarnos, tengamos en cuenta un mapa de confección propia (Fig. 28), en el cual se han situado las empresas que basan todo o parte de su trabajo en la fabricación de materiales compuestos o actividades relacionadas con ellos en Andalucía.

Podemos ver que existen multitud de empresas relacionadas con el sector en Sevilla y Cádiz, siendo núcleos muy importantes a nivel industrial en la provincia. En Jaén y Córdoba también existe representación de esta industria, pero a una escala mucho menor. Vamos a estudiar cada zona por separado.

7.2.1. Sevilla

Las empresas de fabricación de CFRP se han instalado en Sevilla utilizando el espacio existente en las inmediaciones del aeropuerto; de esta manera, los aparatos pasan directamente de las líneas finales de ensamblaje a las instalaciones aeroportuarias, donde pueden surcar los cielos por primera vez. Esto ha llevado a que en la actualidad el aeropuerto se encuentre “rodeado” de empresas nacionales e internacionales (Fig. 29).

TRC Composite. Fundada en Sevilla en 1998, realizan proyectos de ingeniería para piezas de aeronaves, utilizando todo tipo de composites. Sus instalaciones, con 8.000 metros cuadrados y 70 empleados se dividen en dos sectores distintos; división de composites y División de núcleos. Las piezas diseñadas suelen acabar en aviones de Airbus, Airbus Military y Bombardier.

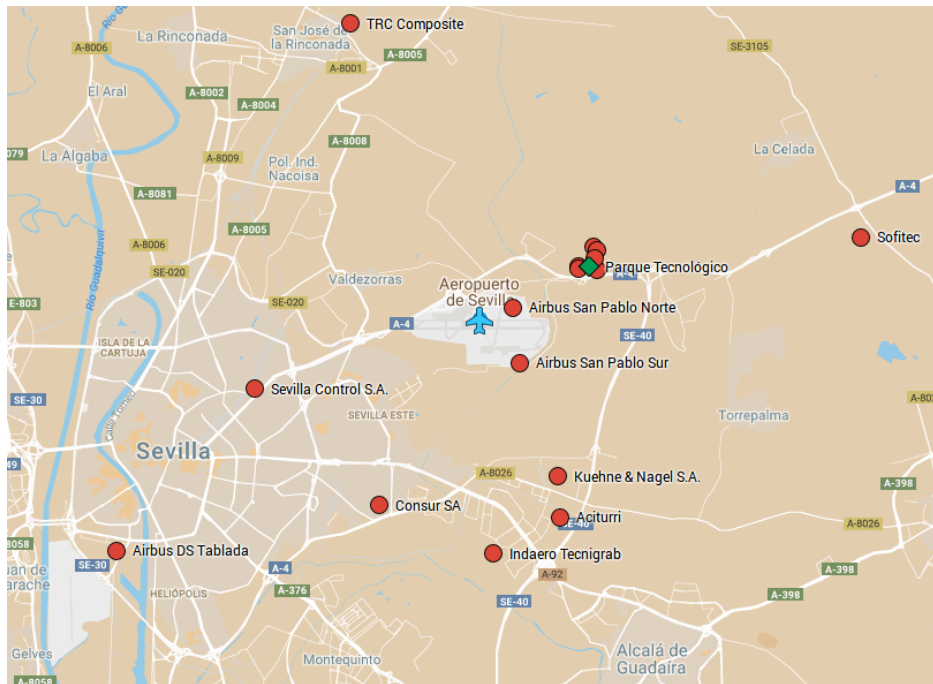


Figura 29: Empresas de aeronáutica en Sevilla.

SevillaControl. Es la empresa encargada del mecanizado en territorio español dentro de la corporación Grupo Sevilla Control (GSC), que además cuenta con otra empresa en Polonia destinada a este fin. Con cuatro centros de producción en Sevilla, se dedica casi en exclusiva a la fabricación de piezas de hasta seis metros de largo para Airbus Military, Assistance Aéronautique & Aérospatiale y Alestis Aerospace.

Consur SA. Trata la gestión integral de grandes mecanizados de piezas para aeronaves, para los programas de construcción de aeronaves de Airbus, Airbus Military, Eurofighter, Embraer y Bombardier.

Kuehne + Nagel. Una compañía de transporte y logística fundada en Bremen (Alemania) en el 1890, cuya sede actual se encuentra en Suiza. Con más de 1000 oficinas por todo el mundo, cuenta con presencia en el mercado español desde 1966. Paulatinamente ha ido diversificando sus funciones y adquiriendo otras empresas hasta abarcar muchos campos distintos. Dentro de la aeronáutica colabora proveyendo de materiales y piezas concretamente a Airbus y Airbus Military y HÉLICE lo sitúa en su clasificación, dentro de los fabricantes de composites.

Aciturri. Es un proveedor aeronáutico de primer nivel, o *Tier 1*. En funcionamiento desde 1984, trabaja para Airbus, Airbus Military, Boeing, Eurofighter y Fokker, entre otros. En la actualidad cuentan con siete autoclaves y tres máquinas de moldeo automático, en 70.000 metros cuadrados de superficie de trabajo cubierta.

Indaero Aircraft Industries. Fundada en Sevilla, fabrica covers y piezas de interior para aviones Airbus, Airbus Military y Lockheed. Se encarga del diseño y la gestión del proyecto ingeniería, además de las funciones de ensamblado, verificación y validación.



Figura 30: Parque Tecnológico y Aeronáutico de Sevilla.

Sofitec. Es una industria aeroespacial con presencia internacional que fabrica distintos tipos de piezas en metal y composites para prácticamente todos los fabricantes de aviones: desde los omnipresentes Airbus, Airbus Military y Boeing, a otras marcas de producción más limitada como Bombardier, Embraer y Eurofighter.

Parque Tecnológico y Aeronáutico de Andalucía S.L. Destaca “Aerópolis”, gestionado por el Parque Tecnológico y Aeronáutico de Andalucía S.L., que se encuentra situado justo al este del aeropuerto. Inaugurado en 2003 es un parque construido exclusivamente para empresas del sector, el único de su clase en Europa [3].

Las siguientes empresas se encuentran en el interior de este parque. Vamos a incluir solamente aquellas que cuentan con fábricas de composites dentro de las instalaciones, es decir, aquellas que trabajan con este tipo de material de forma tangible dentro del parque industrial. Además de estas empresas, otras multinacionales de los composites cuentan con oficinas en el recinto, como Comher, Hutchinson Aerospace o Maquinser. (Fig.30)

Aerotecnic. Forma un grupo con la empresa Mecatecnic, para realizar un tratamiento integral de piezas fabricadas con fibra de carbono; abarcan su fabricación, montaje, y funciones de verificación, control y calidad. Trabajan tanto para Airbus Military, como para otros proveedores de aviación (Alestis, Grupo Aciturri, Aernnova o CESA). Cuentan con 25.500 metros cuadrados de instalaciones entre Sevilla y Cádiz

Mecatecnic. Ver Aerotecnic en esta misma sección.

Alestic Aerospace. Nacida en 2009, cuando se unieron el Grupo Alcor y la Sociedad Andaluza de Componentes Especiales (SACESA), es un *Tier 1* para fabricantes como Airbus, Airbus Military, Boeing, CASA y Embraer. Actualmente, Airbus es su primer accionista, mientras que la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI) y la entidad financiera Unicaja controlan el resto de las acciones. Cuenta con dos plantas en Sevilla (Aerópolis y San Pablo), otras dos en Cádiz (Puerto Real y Tecnobahía), además de una



Figura 31: Empresas de aeronáutica en Cádiz.

en Vitoria, y dos más en Brasil. Tanto en Madrid como en Huelva, cuentan con un Centro de Tecnología.

Carbures. Ver “Carbures”, dentro de las empresas de Cádiz.

TEAMS SL. Empresa cuyas siglas pertenecen a Testing and Engineering of Aeronautical Materials and Structures, se dedica a realizar funciones de apoyo técnico industrial en el comportamiento de los materiales, composites incluidos, desde 2006. Realizan distintos tipos de pruebas destructivas y no destructivas que sirven para testar el material y conocer sus limitaciones. Con acceso a CFRPs, las pruebas efectuadas generan cierta cantidad de residuos de este material.

Aernova Andalucía. Aernova es un *Tier 1*, para marcas como Airbus, Bombardier, Eurocopter o Embraer. Aernova Andalucía es una de las planta de montaje de la compañía, que tiene otras tres en Álava, Querétaro (México) y Sao José dos Campos (Brasil).

7.2.2. Cádiz

Las empresas en esta zona se aglutinan en la ciudad de Cádiz y poblaciones aledañas, como Jerez de la Frontera, El Puerto de Santa María y Puerto Real. (Fig.31)

Carbures. Surgida de un *spin off* entre la Universidad de Cádiz y Airbus en 1999, es hoy un grupo industrial especializado en la construcción y el desarrollo de piezas y estructuras en fibra de carbono, y otros composites, con clasificación *Tier 2*. En el sector de la aviación solo trabaja



Figura 32: Parque Tecnológico TecnoBahía.

con Airbus y Airbus Military, pero además opera en distintos sectores, como obra civil, ferrocarriles, y automoción, donde ha destacado por patentar una línea de fabricación de piezas de fibra de carbono para coches en largas series. Tiene en Jerez de la Frontera su sede, aprovechando que dicha localidad cuenta con aeropuerto, y plantas de producción en El Puerto de Santa María y en Sevilla, además de en Soria, Toledo, Barcelona, Polonia, China, EEUU y dos más en México.

AERCAD Ingeniería Aeronáutica Composites SL. Consultoría que ofrece soluciones tecnológicas ingenieriles en competencia de composites y procesos de fabricación. También cuentan con oficinas en Aerópolis.

Airbus Defence & Space. Centro Puerto Real. Realiza el ensamblaje de aviones, en la actualidad el A380, y efectúan las pruebas finales. Para el resto de gama de Airbus, realizan el ensamblaje de estructuras de metal y CFRP, puertas para pasajeros, compuertas de los trenes de aterrizaje y fuselaje.

Aero-Avance SL. Una empresa pequeña, fabricante de piezas en metal y en composites, cuyos productos se destinan a aeronaves de Airbus, Airbus Military y Boeing.

Parque TecnoBahía. Promovido por la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía, es un conjunto de infraestructuras y servicios para empresas tecnológicas. En él, se encuentran diferentes empresas relacionadas con la aeronáutica.

GECI Española S.A. Parte de GECI GROUP, presta multitud de servicios en varios ámbitos como outsourcing industrial, automoción, aeronáutica, reparaciones de electrónica, o calibraciones. Además gestiona de forma integral flotas de aviones, con lo cual uno de sus cometidos es retirar de la circulación aparatos obsoletos.

Aerotecnic Composites. Ver “Aerotecnic”, dentro de las empresas de Sevilla.



Figura 33: Empresas en Linares y Córdoba.

Airbus Defence & Space. Centro Bahía de Cádiz. Ubicado en El Puerto de Santa María, abarca 79.000 metros cuadrados, y está dividido en cuatro tecnologías, una de ellas Materiales Compuestos. El centro se especializa en la fabricación de componentes de CFRP de grandes dimensiones, incluyendo I+D+i y productos en serie. Trabajan en todos los proyectos actuales de Airbus (A400M, A330 MRTT, A340/500-600...) y realizan colaboraciones externas con fabricantes como Boeing o Dassault.

Alethic Aerospace. Ver “Alethic Aerospace”, dentro de las empresas de Sevilla.

7.2.3. Linares y Córdoba

COMPOSITES AEROPOXY Andalucía S.L. Situada en Linares, ha fabricado piezas de automoción para la producción de automóviles Suzuki e Iveco en la extinta factoría de Santana, así como para los automóviles de nombre homónimo fabricados en ésta. Posteriormente se focalizó en fabricar frontales de locomotoras de tren en materiales de fibra y piezas funcionales para Airbus Military, Eurocopter y Eurofighter. Actualmente sus trabajadores se encuentran en un complicado proceso de Expediente de Regulación Temporal de Empleo.

Avia Composites S.L. Situada en la ciudad de Córdoba, trabaja con fibra de vidrio y de carbono, en diferentes aplicaciones, destacando componentes de aviación comercial, deportiva, y prototipos de UAV. Es una empresa pequeña de la que no existe demasiada información.

7.3. Residuos de CFRP en Andalucía

Se ha intentado averiguar a donde van a parar los residuos generados en los procesos productivos de las empresas que se han ido exponiendo a lo largo del texto, y lamentablemente, no se ha podido determinar. El autor del texto se ha puesto en contacto con los generadores del residuo para conocer más información sobre el destino final de los residuos, y, o bien no han contestado, o bien han transmitido que el responsable de los residuos es un gestor externo e ignoran este dato. Por su parte, los centros parques tecnológicos de Sevilla y Cádiz, contestan que las empresas trabajan de forma independiente y no hay ningún sistema implantado a nivel parque para la retirada de residuos de este tipo, ni elemento de control.

Por otro lado, se remitió una consulta formal a la Dirección General de Prevención y Calidad Ambiental, en la Secretaría General de Medio Ambiente y Cambio Climático, solicitando los datos que pudiera haber sobre el tema con motivo de reflejar el máximo de información útil en este TFG

y averiguar si la administración andaluza conoce el destino final de estos residuos. Como resultado a la petición, fue concertada una reunión con el Departamento de Residuos en la Delegación Territorial de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de Jaén. La conclusión después de todas estas pesquisas es que los residuos de CFRPs, al no ser considerados materiales peligrosos, y suponer una fracción tan pequeña del total de desechos generados, no son susceptibles de recibir un protocolo especial de eliminación, como el que se sigue por ejemplo con los aparatos electrónicos o los neumáticos. Por lo tanto, no se tiene actualmente constancia de las rutas de eliminación que se siguen, ni constancia sobre almacenes o instalaciones para su almacenamiento o su tratamiento.

También se ha contactado con Sigrauto (Asociación Española para el Tratamiento Medioambiental de los Vehículos Fuera de Uso), para conocer si a nivel nacional, los centros de tratamiento de vehículos fuera de uso, tienen directrices para tratar vehículos con alto porcentaje de CFRP, si llegan a sus instalaciones. En este caso tampoco hay nada planteado, y según el personal de Sigrauto, “ni se espera”.

Como puede verse, este apartado presenta más preguntas que respuestas. La ruta de los residuos generados en la Comunidad Autónoma -e incluso, en España- no está clara, y los organismos encargados de su control, tanto a nivel local como estatal, aún no han estimado que sea un problema que requiera tomar medidas.

7.4. Legislación

La legislación aplicable es más bien escueta, y no específica. Se ha de recurrir a manuales generales de eliminación de residuos, pues la tecnología que tratamos en este texto es demasiado joven para haber sido advertida aún por la legislación y el sistema. Desde la Delegación Territorial de Medio Ambiente se nos remite a los siguientes textos:

- Directiva marco de la Unión Europea 2008/98/CE [87], en el que se recoge el principio de “quien contamina paga”, conocido como responsabilidad extendida del productor, formulado en la Conferencia de Estocolmo de 1972 [116]. Exige que los estados miembros de la Unión Europea apliquen la jerarquía de gestión de residuos, en el siguiente orden: prevención, reutilización, reciclado, recuperación y eliminación [54].
- Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos [79], donde se codifica el residuo con una nomenclatura compartida a nivel europeo, y se determina si es peligroso o no. Encontramos una codificación específica (04 02 09) para “Residuos de materiales compuestos (tejidos impregnados, elastómeros, plastómeros).” que no está codificada como material peligroso.
- Decreto 73/2012, de la Consejería de Medio Ambiente [27]. En él especifican los procesos de eliminación aprobados para los códigos de residuos dados en la orden MAM en la comunidad autónoma de Andalucía. La norma informa de que hay un periodo transitorio de cinco años a partir de su entrada en vigor, en el cual se podrá eliminar los materiales de unas determinadas formas, y otros procesos para cuando este periodo de plazo acabe. Ajustando plazos, puede calcularse que el periodo transitorio finalizó el 26 de mayo del 2017.

Para el código que nos interesa, en el periodo transitorio se nos permitía el “Vertido en lugares especialmente diseñados (por ejemplo, colocación en celdas estancas separadas, recubiertas y

aisladas entre sí y el medio ambiente, etc.)” según la nomenclatura D5. Pero ya hemos dicho que este periodo está agotado; ahora solo se nos dan las posibilidades R1 y R3, a saber:

R1: Utilización principal como combustible o como otro medio de generar energía.

R3: Reciclado o recuperación de sustancias orgánicas que no se utilizan como disolventes (incluidas las operaciones de formación de abono y otras transformaciones biológicas).

Más una tercera posibilidad (R12), que puede llevarse a cabo con un producto cualquiera, siempre que no se considere peligroso:

R12: Intercambio de residuos para someterlos a cualquiera de las operaciones enumeradas entre R1 y R11.

Es decir, la norma andaluza contempla el intercambio de residuos de CFRP, y solo da dos salidas para su eliminación: combustión o reciclaje. El vertido en vertederos no está permitido y va contra la ley.

- Por último, el Plan Estatal Marco 2010-2019, que recoge las acciones y protocolos a llevar a cabo en la comunidad autónoma, y una serie de objetivos a cumplir. Este plan se reformuló en 2016, estando ahora en vigor su modificación de esta fecha [28].

7.5. Implicaciones sanitarias

Como se ha visto, la legislación no contempla los residuos de materiales compuestos como peligrosos. Sin embargo, la aspiración de fibras artificiales es causa de diversos tipos de enfermedades del sistema respiratorio, algunas de considerable gravedad. Por ejemplo, estudios muestran que los nanotubos de carbono aspirados pueden producir fibrosis pulmonar [15]. Es cierto que las fibras de carbono tienen un diámetro muy superior a los nanotubos de carbono, pero está probado que cualquier exposición a largo plazo a partículas en suspensión en el aire provocan o agravan problemas respiratorios [81].

Durante los procesos de fabricación los trabajadores deben cubrir su piel y mucosas para protegerlas de las irritaciones que causan las resinas, y usar mascarillas y sistemas que eviten la inhalación de las partículas de fibra que puedan llegar al aire. Al formar el CFRP sin embargo, las fibras quedan selladas y la resina alcanza una naturaleza estable que no perjudica a organismos vivos. Pero, ¿puede ser perjudicial para la salud un CFRP dañado por un accidente o envejecido por el paso del tiempo?

Si se produce como se plantea, un escenario en el que los CFRP sean usados profusamente, se producirá una mayor exposición a las fibras de carbono en distintos ámbitos, en el que las fibras de carbono pueden quedar libres y expuestas al medio en escenarios no controlados, por ejemplo, un accidente de circulación o el desmontaje de piezas fuera de uso (talleres de reparación de automóviles, labores de peritaje de accidentes, centros de tratamiento de VFU, procesos de transporte de residuos, sanitarios, cuerpos de seguridad del estado, bomberos...). ¿Cuáles son los efectos a exposiciones continuadas, si es que existen?

Aún no existen estudios que den respuestas a estas preguntas, para crear protocolos de uso y protección en las profesiones afectadas. Por el momento si se plantean medidas específicas en caso de accidente, por el cual el personal de rescate debe protegerse de formas más específicas que en un rescate general, así como medidas de protección extra para las víctimas (Fig. 34). Pero, una vez fuera de



Figura 34: Simulacro de excarcelación de un herido en un coche de fibra de carbono. El personal de asistencia equipa gafas de protección y mascarillas y protege a la víctima haciéndole respirar aire no contaminado (con los útiles sobre el techo del coche) y cubriéndolo completamente con un film plástico para evitar contacto con fibras de carbono.

los momentos críticos en los que se excarcela a los afectados, ¿siguen siendo necesarios métodos de protección para aquellos que traten con el automóvil siniestrado? ¿Sigue suponiendo un peligro a la salud para las personas que trabajen, o se encuentren en las inmediaciones de un centro de tratamiento de VFU? Son preguntas que habrán de ser respondidas con investigaciones pertinentes, antes de que puedan presentarse problemas graves.

7.6. Implicaciones económicas

Li, Bai y McKechnie (2016)

Artículo original reseñado en la bibliografía [65].

No sería coherente pensar en un sistema industrializado de reciclaje si no resulta viable económicamente. Dilucidar la viabilidad de un sistema de reciclado cuando la tecnología se encuentra en este estado tan inicial es muy complicado. Sin duda nos faltan datos en cuanto a la producción que se podría manejar, y a los recursos necesarios, pero al menos podremos comparar el sistema con otros métodos empleados para saber los márgenes existentes y la competencia de procesos. Reflejamos tres posibilidades recogidas en este artículo: depósito en vertedero, incineración con recuperación de energía y reciclaje mecánico, método generador de materiales para usarse como refuerzo de fibra y/o elementos de relleno. Los autores del texto han tenido en cuenta todos los gastos asociados a cada método de eliminación, como transporte, energía, tasas e impuestos, pero el artículo está desarrollado por personal de la Universidad de Nottingham, por lo que los datos serían solo aplicables al cien por cien en Reino Unido; no obstante, podemos obtener datos que pueden aplicarse a otros países similares, *mutatis mutandi*.

En el depósito en vertederos, el impacto medioambiental es limitado, pues al ser un material con alta resistencia a degradarse con el paso del tiempo y con alta resistencia al medio, no debe suponer problemas medioambientales añadidos graves, más allá del espacio ocupado en el vertedero (Si suponemos que no existen peligros relacionados con la liberación de fibras de carbono en el ambiente, o esta no se produce). No obstante, a fecha de la redacción de este TFG, es ya una práctica contraria

a las políticas medioambientales de la UE [27]. Gasto aproximado, 66 €/tonelada sin contabilizar impuestos, 146 €/tonelada, impuestos incluidos.

La incineración consigue eliminar gran parte de los residuos, pero la combustión de las fibras de carbono es una enorme fuente de GEI (gases de efecto invernadero). Con la imposibilidad legislativa de depositar residuos en vertederos, queda como el método más simple allí donde no haya otros mecanismos de tratamiento. Gasto aproximado, 127 €/tonelada.

Los autores del artículo dicen probar que el reciclaje mecánico es capaz de reducir las emisiones de GEI, el uso de energía primaria y la generación de residuos de vertederos; por otra parte, los costes comparativamente elevados del reciclado mecánico y los bajos ingresos cuando se utilizan fibras de carbono recuperadas para sustituir fibras de vidrio son impedimentos sustanciales a la viabilidad financiera del proceso, que de los tres planteados, es lógicamente el más caro. Gasto aproximado de 2.545 €/tonelada. Aunque el coste del proceso se calcula más caro (en torno a 2.766 €/tonelada), se le descuenta los ingresos obtenidos con la venta de las fibras recuperadas, a razón de 221 €/tonelada.

7.7. Sobre el futuro de la tecnología

En este apartado, se recogen los principales retos a los que la comercialización de fibras recuperadas se enfrenta, a partir de la información obtenida en un artículo destinado a tal fin (Pimenta, 2011)[92]:

1. Estrategia global. Colaboración entre fabricantes, investigadores, los responsables del proceso de reciclado y los usuarios, con el objetivo de compartir información y desarrollar metas comunes.
2. Incentivos al reciclaje. Vista su importancia, pero su enorme coste, los gobiernos podrían potenciar las investigaciones y los procesos de reciclado, o gravar los procesos perjudiciales para el medio, lo cual potenciaría su avance.
3. Normativas específicas. Actualmente no existen.
4. Logística y cooperación durante las fases de vida de los CFRPs. Por su enrevesada naturaleza, este material debe ir acompañado a su proceso de reciclado de la mayor cantidad de información posible sobre su ciclo de uso.
5. Identificación del mercado de las fibras recuperadas. Una vez comprobado que las capacidades de las fibras recuperadas son muy buenas, comparables a las de otros materiales, y en ocasiones comparables a las de la fibra original, el mercado de las fibras recuperadas está en prácticamente cualquiera de los campos tratados en este texto. La posibilidad de poder adquirir fibras de carbono a un valor inferior al de las fibras vírgenes, potencialmente favorecería la inclusión y expansión en cualquier sector.
 - a) Aeronáutica: seguirá requiriendo fibras de carbono vírgenes de alto nivel para la conformación de piezas sometidas a esfuerzos críticos para el aparato, pero aquellas que no sean de valor crítico, podrían conformarse con fibras recuperadas: interiores, elementos auxiliares, estructuras de asientos...
 - b) Vehículos terrestres: posiblemente, el mercado ideal. Las fibras recuperadas aportan ligereza, resistencia, ahorro energético, e incluso, un plus intangible en cuanto a la percepción

del producto; son todos los valores que los fabricantes de automóviles quieren tener presentes en sus vehículos. Además, con las fibras recuperadas se pueden fabricar piezas que se encuentren a la vista, sin perjudicar el aspecto del conjunto, lo cual las hace válidas para múltiples funciones.

- c) Otros transportes: en el resto de aplicaciones, hacer suposiciones es más arriesgado. Por el momento no hay sendas claras, pero la fibra de carbono auna todas las propiedades que debe tener un material usado en medios de transporte, con un único problema; su precio. La existencia de fibras recuperadas podría suponer el despertar en estos sectores.
6. Análisis completos de ciclos de vida. En un material con ciclos de vida muy largos, actualmente existe literatura que se basa en periodos concretos de la vida del material; se requiere aumentar los periodos de estudio para caracterizar los CFRP en todas sus facetas, y conocer la influencia de la vida del CFRP en las fibras que se recuperarán de él.
7. Establecerse en el mercado. Para tener un proceso viable económicamente, necesitamos clientes dispuestos a pagar por lo que ofrecemos: las fibras recuperadas necesitan ser percibidas como un material que podría encajar en sistemas productivos de diversas índoles.

8. CONCLUSIONES

A lo largo de este texto se han desarrollado todos los aspectos relativos a la fibra de carbono y los composites generados con ella. Se han reflejado todos los aspectos que confluyen para que, en la actualidad, sea uno de los materiales que presenta más posibilidades de crecimiento y expansión, puesto que lo que es capaz de ofrecer es precisamente lo que ciertos mercados necesitan. Así pues, podemos resumir la información consignada en el presente Trabajo de Fin de Grado con las siguientes conclusiones:

- El estado de la tecnología de fabricación de CFRP no está plenamente desarrollado aún. Se usa extensamente en productos muy específicos y de elevado nivel tecnológico (aeronáutica y aerogeneradores) o en productos que buscan ventajas técnicas concretas frente a productos similares y donde el precio final no es un problema (automóviles, material deportivo). Su uso se extenderá conforme la tecnología se abarate.
- Hoy los residuos de CFRP se producen principalmente en los centros de producción, pues los productos finales tienen ciclos de vida muy largos. En los años venideros, los aviones que se retiren definitivamente habrán sido fabricados en los periodos iniciales de uso de CFRP, con lo cual se generaran múltiples residuos de este material. Los aviones fabricados hoy, generarán grandes cantidades de CFRP a la hora de su desmantelamiento.
- En los chasis de automóviles existen dos tendencias en el uso de CFRP: fabricación del chasis o el habitáculo íntegros o fabricación de piezas para conjugar con otros materiales.
- Ya existen piezas de automóviles realizadas con fibras de carbono recuperadas, a veces ubicadas en lugares visibles, y en ocasiones, aportando al conjunto valor estético.

- Se espera un crecimiento fuerte del sector, en el momento en que la tecnología pueda aplicarse en la fabricación de automóviles generalistas de gamas altas o medias. Esto provocará un inmediato incremento de residuos de producción, y en años venideros un aumento paulatino en cuestión de tratamiento de VFU.
- El reciclado de CFRP surge por motivaciones económicas, intentando rentabilizar los residuos de un material muy costoso. Los ensayos técnicos aún son escasos y las experiencias comerciales contadas. Es importante seguir desarrollando tecnologías de reciclado efectivas para no convertir la generación de residuos de CFRP en un problema serio.
- Los procesos de reciclado y recuperación posibles son diversos, se encuentran en varios grados de madurez, y permiten recuperar el material de diversas formas. Los métodos más usados son el triturado mecánico, los procesos de lecho fluidizado y la pirólisis.
- Los procesos de reciclado de los CFRP son complicados y requieren manejar información sobre el tipo de residuo que se está tratando, para obtener fibras recicladas de calidad.
- El comportamiento del CFRP depende en cierto grado de la longitud de las fibras que no conforman. A mayor longitud de las fibras, mejores propiedades. Un proceso de recuperación de fibras ideal debería recuperar las fibras con una longitud suficiente para ser utilizadas en aplicaciones de alto nivel.
- El tratamiento de CFRP con pirólisis es utilizado en la actualidad con fines comerciales por varias empresas para la recuperación de las fibras de carbono, que generan productos a partir de las fibras recuperadas.
- La pirólisis no afecta gravemente la naturaleza de las fibras de carbono, pero le hace perder átomos de oxígeno situados en sus capas superficiales.
- Para eliminar completamente la resina de las fibras mediante pirólisis, se debe someter a los CFRP a temperaturas que perjudican su capacidad posterior de volver a ser usadas en la fabricación de un rCFRP.
- Tanto la problemática con la pérdida de oxígeno de las fibras, como la de los restos de resina en forma de carbón pirolítico o char, pueden ser solventadas sometiendo a las fibras recuperadas mediante pirólisis a un proceso posterior de oxidación.
- En general, un proceso general de reciclaje válido para CFRP sería, o bien
 - Someterlo a pirólisis en atmósfera pobre de oxígeno, en un proceso isoterma a 500°C durante 120 minutos, o bien;
 - Pirólisis en el que se incrementara la temperatura paulatinamente, pero sin exceder los 600°C, y durante menos tiempo.

Después de realizar una de las dos opciones, habría que someter a las fibras a oxidación a 500°C. Este proceso constituye un buen método general para obtener fibras con potencial industrial, pero modificando el proceso, podrían obtenerse fibras de carbono optimizadas para aplicaciones concretas.

- Con el proceso reseñado se obtendrían fibras recuperadas que, por sus características, podrían conformar un rCFRP que sustituyera, entre otros, piezas de aluminio, fibra de vidrio, o CFRP generados con fibras vírgenes.
- Las fibras correctamente recicladas tienen un potencial muy grande en la creación de piezas de automoción, pues cumplen perfectamente las solicitudes requeridas para estos fines.
- En productos generados con fibras recuperadas de longitud corta, la presencia de manojos de fibras no separadas procedentes de CFRP anteriores, no perjudica el comportamiento del material, sino que por el contrario le aporta tenacidad.
- Sin lugar a dudas se pueden crear piezas de rCFRP con fines estructurales en medios de transporte.
- Los rCFRP pueden usarse en piezas de carrocería o en interiores de automóviles, puesto que su aspecto, a pesar de no presentar el típico tejido de fibras, puede ser tratado para generar piezas con valor estético.
- La longitud de la fibra recuperada influye en su valor de mercado. A mayor longitud de la fibra, de mayor nivel serán sus aplicaciones en la industria.
- A la hora de diseñar una planta de pirólisis para CFRPs, se debería tener en cuenta que las dimensiones del horno fueran amplias para permitir recuperar fibras largas, por lo menos si se planea que el residuo tratado las contiene.
- Andalucía cuenta con empresas de gran calado internacional trabajando con CFRPs, que generan productos a escala mundial. Hoy, una planta de reciclado cercana, que minimizara los costes que a estas empresas les suponen tratar sus residuos, podría tener éxito. Asimismo, un proveedor de fibras recuperadas que abaratara los costes de fabricación de algunas piezas, es muy deseable.
- La legislación aplicable es la general para todos los residuos, donde el productor de ellos es aquel que debe establecer los medios para eliminarlos de una forma segura y respetuosa medioambientalmente. En la legislación actual, los CFRPs no se consideran un residuo peligroso, lo que da ciertas concesiones a su tratamiento.
- La viabilidad presente de un centro de reciclado de CFRP radica en poder procesar los residuos de producción de empresas que utilicen estos materiales. Podrá ampliar su producción a medio plazo, con los residuos generados con el desmantelado y reciclado de aeronaves, y a largo plazo, por la gestión de residuos obtenidos del tratamiento de automóviles fuera de uso.
- La exposición prolongada a fibras de carbono podría tener perjuicios para la salud; conviene extremar medidas, ya no solo en los procesos productivos, sino allí donde por cualquier causa, las fibras de carbono confinadas en un CFRP hayan quedado de nuevo libres y expuestas al medio. Se requieren estudios sobre este particular que ayuden a confeccionar protocolos de actuación.

Referencias

- [1] ABEL, P., LAUTER, C., GRIES, T., TROESTER, T. *Textile composites in the automotive industry. Fatigue os Textile Composites*. Cambridge, UK, Elsevier, 2015, 383-401, ISBN: 978-1-78242-281-5
- [2] ADAMS, B. *BMW Unveils Carbon Fiber-Framed HP4 Race Advanced Prototype*, www.cycleworld.com. 8 de noviembre de 2016
- [3] AERÓPOLIS, Parque tecnológico aeroespacial de Andalucía. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.aeropolis.es
- [4] AEROPUERTO de Teruel, Tarmac Aragón. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.aerpuertodeteruel.com
- [5] AFRA, AFRA Mission. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.afraassociation.org
- [6] AFRA, *Best Management Practice for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies and for Recycling of Aircraft Materials*, Aircraft Fleet Recycling Association, Texto revisado 8 de marzo de 2016, 33
- [7] ALCARAZ LORENTE, D. J., Carbono y Aramida, del concepto a la producción, 16 de junio de 2007, Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.interempresas.net
- [8] ASMATULU, E., TWOMEY, J., OVERCASH, M., Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept. *Journal os Composite Materials*. 2014, Vol 48(5), 593-608
- [9] BACON, R., *Filementary graphite and method for producing the same*, US2957756 A, 25 de octubre de 1960
- [10] BAJPAI, P, *Update on Carbon Fibre*, UK, Smithers Rapra, 2013, ISBN: 978-1-90903-025-1
- [11] BAKEWELL, J., Recycle route for carbon fibre, *Automotive Manufacturing Solutions*, 30 de septiembre de 2016
- [12] BALDASANO Recio, J. M., La incineración de residuos, ¿es una alternativa?, *Medi Ambient, Tecnologia i Cultura*, julio 2001, num 29
- [13] BARROW, K., Flywheel technology generates DMU fuel savings, *International Railway Journal*; New York 2015, 55.7 Julio
- [14] BEELER, J. Ducati 1299 Superleggera – A 215hp Carbon Fiber Superbike. 11 de julio de 2016. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.asphatandrubber.com
- [15] BESEDNJAK, A., *Materiales Compuestos*, Edicions UPC, 2005, Barcelona (España), ISBN: 84-8301-820-9

- [16] BOEING, *Boeing's Converted Freighters: 20 More Years Of Life*. (Video, 1:22). 16 de mayo de 2016. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.boeing.com
- [17] BOERIU, H. BMW Group and SGL Group to triple production capacities at Moses Lake carbon fiber plant, 9 de mayo de 2014. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.bmwblog.com.
- [18] BREUER, U. P., *Commercial Aircraft Technology*, Kaiserslautern (Alemania), Springer, 2016, ISBN: 978-3-319-31917-9
- [19] BULLIS, K., Los coches adelgazan para cumplir los estándares energéticos, *MIT Technology Review*, 23 de febrero de 2013
- [20] CALIENDO, H., Chinese firm tops annual ranking of onshore wind turbine manufacturers, *Composites World*, 29 de febrero de 2016. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [21] CARBERRY, W., Airplane Recycling Efforts Benefit Boeing Operators. *Boeing AERO Magazine QRT*, 2008, 4.08, 6–13.
- [22] CARBON fiber use in offshore oil and gas applications, *Composites World*, 16 de diciembre de 2009. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com,
- [23] CFK Valley Stade Recycling, carboNXT product. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.cfk-recycling.com
- [24] CFK Valley Stade Recycling, References. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.cfk-recycling.com
- [25] COMISIÓN Europea, *Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles*, junio de 2005.
- [26] COMISIÓN Europea, *Flightpath 2050. Europe's Vision for Aviation. Report of the High Level Group on Aviation Research*. Dirección General de Investigación e Innovación. Dirección General de Movilidad y Transporte. Luxembourg. Publications Office of the European Union, 2011. ISBN 978-92-79-19724-6
- [27] CONSEJERÍA de Medio Ambiente, *Decreto 73/2012, de 20 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía*, BOJA núm. 81, 74-225
- [28] CONSEJERÍA de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, *Orden de 30 de diciembre de 2016, por la que se aprueban las modificaciones del Plan Director Territorial de Residuos No Peligrosos de Andalucía (2010-2019), como consecuencia de la revisión intermedia de 2016*, BOJA número 6 del 11 de enero de 2017, 8-139
- [29] DICKSTEIN, J., *Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA). Best Management Practices*.
- [30] /DRIVE, *CARBON Fiber Construction - /Inside Koenigsegg*, (Video, 8:32), 8 de enero de 2013. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.youtube.com/watch?v=504I_hJDFck

- [31] ELG Carbon Fibre LTD. *Guidelines for the Packaging and Delivery of Carbon Fibre Composite Waste to ELG CARBON FIBRE LTD.* Junio de 2013
- [32] ELIAS Castells, X., *Tratamiento y valorización energética de residuos*, España, Díaz de Santos, 2005, ISBN: 84-7978-694-9
- [33] EMMERICH, R., KUPPINGER, J. Recovering Carbon fibers. Which Way is the Right Way to Recycle CFRP?. *Kunststoffe international*, 2014, 6, 62-65
- [34] FORSBERG, D. *Aircraft Retirement Trends & Outlook*. Avolon Holdings Limited. Dublin, Ireland. Septiembre de 2012
- [35] GARCIA, D., ESPINOZA, M. J., Avances en prótesis: una mirada al presente y al futuro, *Revista Médica Clínica Las Condes*, marzo 2014, No. 2, vol. 25, 281-285
- [36] GARDINER, G. Aeroengine Composites, Part 1: The CMC invasion, *Composites World*, 31 de julio de 2015. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [37] GARDINER, G. Aeroengine Composites, Part 2: CFRPs expand, *Composites World*, 31 de agosto de 2015. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [38] GARDINER, G., CFRP: Opportunities in orthopedics, *Composites World*, 15 de abril de 2016. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositeworld.com
- [39] GARDINER, G., Compression molding: New materials and markets, *Composites World*, 13 de febrero de 2017. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [40] GARDINER, G. Recycled carbon fiber update: Closing the CFRP lifecycle loop, *Composites World*, 30 de noviembre de 2014. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [41] GARDINER, G., Recycling carbon fiber for structural applications, *Composites World*, 4 de diciembre de 2014. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [42] GARDINER, G. The outlook for unmanned aircraft, *Composites World*, 20 de abril de 2009. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [43] GOURDIN, K. N., Getting about. *Defense Transportation Journal*, 2011, No. 4, Vol. 67, ISSN: 0011-7625
- [44] HANDLEY, B. A., MARSHALL, D. M., COON, C., *Principles of Engineering*, Delmar Cengage Learning, Nueva York (USA), 2012, ISBN: 13-978-1-435-42836-2
- [45] HASHISH, M. Trimming of CRFP Aircraft Components. Conferencia y Expo WJTA-IMCA, Houston, Texas. 9-11 de septiembre de 2013

- [46] HAZELL, J. *Getting it right from the start. Developing a circular economy for novel materials*. UK: Green Alliance, 2017
- [47] HENDERSON, S., *Silent, Swift, Superb: The Story of the Vickers VC10*, Scoval, 1998 ISBN: 9781902236025
- [48] ICIS Chemical Business, Courtaulds' exit foretells future of carbon fibres, *ICIS*, 1 de julio de 1991. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.icis.com
- [49] IEA-ETSAP, IRENA, *Wind Power Technology Brief*. marzo de 2016
- [50] INVENT GmbH, *Innovative fibre composite technology*. Alemania, 2013
- [51] JAHIRUL, M. I., RASUL, M. G., CHOWDHURY, A. A., ASHWATH, N., Biofuels Production through Biomass Pyrolysis – A Technological Review, *Energies* 2012, 5(12), 4952-5001
- [52] JIANG, G., PICKERING, S. J. Structure-property relationship of recycled carbon fibres revealed by pyrolysis recycling process. *Journal of Materials Science*. 2016, 51, 1949-1958
- [53] JIANG, L. et al. Recycling carbon fiber composites using microwave irradiation: Reinforcement study of the recycled fiber in new composites. *Journal of Applied Polymer*. 2015, 132, 42658 (1-9)
- [54] JOB, S. et al, Composites recycling: Where are we now?, *Composites UK*, Reino Unido, 7 de julio de 2016.
- [55] KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. R., *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Prentice Hall, 4ª edición, Nueva Jersey (USA), 2002, 225, ISBN: 970-26-0137-1
- [56] KARBOREK S.P.A., Recycling centre. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.karborekrcf.it
- [57] KHAN, T. I., MONDE, M., Characteristics of CFRP hydrogen storage vessel on rising temperature in the filling process, *Procedia Engineering* 56, 2013, 719-724
- [58] KHARINA, A., RUTHERFORD, D., Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014, *International Council on Clean Transportation*, Washington DC (USA), agosto de 2015
- [59] KIEHLE, J., IRIGOYEN, E. *Aeroscraft Information Kit*. Aeros.
- [60] KRAUS, T., KÜHNEL, M. Global carbon fibre market remains on upward trend. *Reinforced Plastics*, 2014, noviembre/diciembre, 38-45
- [61] KRAUS, T., KÜHNEL, M. The global CFRP market 2016. *Experience Composites*, Augsburg, Alemania. 21 de septiembre de 2016
- [62] KRAUS, T., KÜHNEL, M., The Global CRP Market, en *Composites Market Report 2014*. Market developments, trends, challenges and opportunities, *Carbon Composites*, 6 de octubre de 2014, 19-44

- [63] KRAUS, T., KÜHNEL, M., The Global CRP Market, en Composites Market Report 2016. Market developments, trends, outlook and challenges, *Carbon Composites*, 28 de noviembre de 2016, 22-46
- [64] LA CHANCE, D., Reinventing the Wheel, Leave it to Citroën to bring the world's first resin wheels to market, Abril 2007. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.hemmings.com
- [65] LI, X., BAI, R., McKECHNIE, J. Environmental and financial performance of mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers and comparison with conventional disposal routes. *Journal of Cleaner Production*, 2016, n.º 127, 451-460
- [66] LLANO Uribe, C., Fibra de Carbono. Presente y futuro de un material revolucionario, *Metal Actual*, febrero-abril 2009, 10-15
- [67] LUX Research, Carbon Fiber Composites Market Update, *State of the Market Report*, 3 de octubre de 2014
- [68] MANSO, J. J., Aprovechamiento integral de los composites fuera de uso -artículo del 18 de febrero de 2013, sobre la conferencia del mismo nombre, del 13 de noviembre de 2012, en el marco de las XXI Jornadas Internacionales de Materiales Compuestos organizadas por el Centro Español de Plásticos (CEP) en Barcelona-. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.interempresas.net
- [69] MATEOS, F., BELÉNDEZ, A., FUENTES, R. *Medida del coeficiente de dilatación térmica de tubos de fibra de carbono (C.F.R.P.)*. XXII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física. Palma, España. Universitat de les Illes Balears. 1999. ISBN: 84-7632-062-0
- [70] MATHUR, R. B., SINGH, B. P., PANDE, S., *Carbon Nanomaterials: Synthesis, Structure, Properties and Applications*, CRC Press, Boca Raton, Florida (USA), 2017 ISBN: 13-978-1-4987-0210-2
- [71] MAY, C., Epoxy Resins, *Chemistry and Technology*, Marcel Dekker Inc, 2ª edición, Nueva York (USA), 1988, ISBN: 0-8247-7690-9
- [72] McCONNELL, V., Launching the carbon fibre recycling industry, *Reinforced Plastics magazine*, 2010, marzo-abril
- [73] McCONNELL, V., The making of carbon fibre, *Composites World*, 19 de diciembre de 2008. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [74] McLaren MP4/1, el mensajero del futuro, *Auto Bild*, 23 de febrero de 2012. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.autobild.es
- [75] MEGSON, T. H. G. *Introduction to Aircraft Structural Analysis*. Segunda edición. Oxford, UK, Elsevier, 2014. Pag 354
- [76] MEOLA, C., BOCCARDI, S., CARLOMAGNO, G., *Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials*, Woodhead Publishing, 2016, ISBN: 9781782421726

- [77] MEYER, L. O., SCHULTE, K., GROVE-NIELSEN, E., CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route: Process Optimization and Potentials. *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, 2009, n.º 9 (vol 43), 1121-1132
- [78] MILLER, D.P., HUNT, T., Experiments with a long-range planetary rover. Proceeding of the 7th International-Symposium on Artificial Intelligence, *Robotics and Automation in Space*, Nary, Japan, 2013
- [79] MINISTERIO de Medio Ambiente, *BOE 43, de 19 de febrero de 2002*, 6494-6515
- [80] MIRAVETE, A., *Los nuevos materiales en la construcción*, Editorial Reverté, S.A. 2ª edición, Barcelona, España, 1995, 26, ISBN:84-605-0823-4
- [81] NASA, *Reference Document: Carbon Structure Hazard Control*. Lyndon B. Johnson Space Center, Las Cruces, Nuevo Mexico (USA), Document No. WSTF-RD-1219-001-15
- [82] NEWTON, D. E., *Wind Energy: A Reference Handbook*, Santa Barbara, California, ABC-CLIO, 2015, ISBN: 978-1-61069-690-6
- [83] ONISHI, M. *Toray's Business Strategy for carbon Fiber Composite Materials*. Toray Industries. 21 de septiembre de 2012
- [84] ONWUDILI, J. A., MISKOLCZI, N., NAGY, T., LIPÓCZI, G. Recovery of glass fibre and carbon fibres from reinforced thermosets by batch pyrolysis and investigation of fibre re-using as reinforcement in LDPE matrix. *Composites Part B: engineering*. 2016, 91, 154-161
- [85] ORF, D. Goodyear Zeppelin to Replace the Blimp. *Popular Mechanics*, 22 de julio de 2013. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.popularmechanics.com
- [86] PALMER, J. A. T., *Mechanical Recycling of Automotive Composites for Use as Reinforcement in Thermoset Composites* (Degree of Doctor of Philosophy in Engineering), Exeter, Universidad de Exeter, mayo del 2009, 47-50
- [87] PARLAMENTO Europeo, Consejo de la Unión Europea, *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (versión en español)*, Diario Oficial de la Unión Europea, 22 de noviembre de 2008, 312/3 – 312/30
- [88] PARLAMENTO Europeo, Consejo de la Unión Europea, *Reglamento (CE) N.º 443/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de los turismos nuevos como parte del enfoque integrado de la Comunidad para reducir las emisiones de CO₂ de los vehículos ligeros (versión en español)*, Diario Oficial de la Unión Europea, 5 de junio de 2009, 140/1 – 140/15
- [89] PICKERING, S. J. Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 2006, n.º 37, 1206-1215
- [90] PIGGOTT, M. R., *Load Bearing Fibre Composites*. Second edition: Web version. Ontario, Canada. Merp Comaco. 2016

- [91] PIMENTA, S. et al. Mechanical analysis and toughening mechanisms of a multiphase recycled CFRP, *Composites Science and Technology*, 70 (2010), 1713-1725
- [92] PIMENTA, S., PINHO, S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*, 2011, n.º 31, 378-392
- [93] PRYZBYL, H., El aeropuerto de Teruel se transforma en una rentable plataforma industrial aeronáutica, *Zoom News*, 16 de agosto de 2013. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.zoomnews.es
- [94] REALS, Aviation industry under pressure to reduce landfill waste from scrapped airliners, *Flight International*, 10 de enero de 2011. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.flightglobal.com
- [95] RED, C. Composites in commercial aircraft engines, 2014-2023. *Composites World*, 6 de enero de 2015. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [96] REIMAN, S., Remembering John Watson's fiery crash at Monza, *Fox Sports*, 13 de septiembre de 2015 Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.foxsports.com
- [97] RÖTGER, T., *Aircraft decommissioning and dismantling: A global airline view*. ICAO Environment Seminar, Montréal, Canada, 9-10 de septiembre de 2014
- [98] SALTOĞLU, R., HUMAIRA, N., İNALHAN, G., *Aircraft Scheduled Airframe Maintenance and Downtime Integrated Cost Model*, Department of Aeronautical Engineering Faculty of Aeronautics and Astronautics, Estambul (Turquía), 2016
- [99] SCHULTE, K., MEYER, L. O., GROVE-NIELSEN, E. Optimisation of a pyrolysis process for recycling of CFRP's. 16th International Conference of Composite Materials, 2007, Kyoto, Japon
- [100] SEILER, E., STARK, A., FORBERGER, J. Recycling von Textilien aus carbonfaserverstärkten Kunststoff-Bauteilen und deren Produktion. *Chemie Ingenieur Technik*. 2016, 88, No. 4, 500-505
- [101] SHURY, J. World's First Carbon Fibre Helicopter Crashes and Sinks. *Composites Today*, 8 de mayo de 2013. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositestoday.com
- [102] SLOAN, J., Coming to carbon fiber: Low-cost mesophase pitch precursor, *Composites World*, 9 de mayo de 2016. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com www.compositeworld.com
- [103] SLOAN, J., Multimaterialism is back in the Audi A8, *Composites World*, 4 de mayo de 2017. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [104] SWEENEY, S., Freight cars' major metals, *Trains* 75.3, marzo 2015, 20
- [105] TARMAC, Main features os Tarmac Aerosave Aircraft Recycling service. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.tarmacaerosave.aero

- [106] The Andalusian Aerospace Cluster. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Helice. Disponible en: www.helicecluster.com
- [107] The GE90 Engine. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. *GE Aviation*. Disponible en: www.geaviation.com
- [108] TRAHAN, T., Kawasaki's cool take on carbon, *Trains*. 2017. 77.5, mayo, 22
- [109] TRIMBLE, S. Composite Helicopters to revive KC630 flight test after crash. *Flight Global*. 4 de marzo de 2015. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.flightglobal.com
- [110] Una sola instalación para tratar lodos, residuos agroalimentarios, lixiviados y plaguicidas, *Residuos Profesional*. 5 de noviembre de 2013. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.residuosprofesional.com
- [111] Uniting Behind Aviation's Environment Efforts - Time for Global Framework. *IATA*. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.iata.org
- [112] UNIVERSIDAD de Nottingham, AFordable REcycled CARbon fibres (AFRECAR). Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.nottingham.ac.uk/afrecar
- [113] UNIVERSIDAD de Nottingham, HIGh value composite materials from REcycled CARbon fibre (HIRECAR). Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.http://www.nottingham.ac.uk/hirecar/index.html
- [114] USHIKOSHI, K., KOMATSU, N., SUGINO, M., Recycling of CFRP by pyrolysis method. *J Soc Mater Sci Jpn* 1995;44(499):428-31.
- [115] UTRACKI, L. A., *Commercial Polymer Blends*, McGill University, Montreal, Quebec (Canadá), 1998, ISBN: 978-1-4615-5789-0
- [116] VÉLEZ Moreno, L. M., *Materiales industriales. Teoría y aplicaciones*. Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín (Colombia), 2008
- [117] Vestas V164: La turbina eólica que bate récords. *Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico, REVE*. 4 de febrero de 2017. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.evwind.com
- [118] VISIONGAIN, *Top 20 Leading Composites Companies 2015, Leaders in the Carbon Fibre (CFRP), Glass Fibre (GFRP) & Aramid Fibre Reinforced Plastics (AFRP)*. 2015
- [119] WALKER, K., PLANE sailing. *Air Transport World*; Cleveland 54.4, 2017
- [120] WHITE, K., Bombardier Becomes First OEM to Eam Accreditation From Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA), *CAMP InSight*, abril de 2010, 11
- [121] WOOD, K., Blades? Yes! Towers... maybe, *Composites World*, 30 de julio de 2010. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com
- [122] WOOD, K., Wind turbine blades: Glass vs Carbon fiber, *Composites World*, 31 de mayo de 2012. Fecha consulta: 8 de agosto de 2017. Disponible en: www.compositesworld.com

- [123] YIN YE, S. et al. Parameter Optimization of the Steam Thermolysis: A Process to Recover Carbon Fibers from Polymer-Matrix Composites. *Waste Boimass Valor*, 2013, n.º 4, 73-86
- [124] ZAREMBA, S., STEIB, P., BEHRENS, B., LANG, B., Multi-Material Approach for More Robust RTM Processing, Sicomp Conference, 6 de enero de 2015.