



LIBRO BLANCO de SOSTENIBILIDAD de los MATERIALES COMPUESTOS



PRIMERA EDICIÓN

Editor principal:
José **Sánchez**

Editores:

Zulima **Moreno** | María Dolores **Vázquez** | Miguel Ángel **Castillo** | Alfredo **Güemes** | Fernando **Rodríguez** | Xavier **Martínez** | José María **Pintado** | Rafael **Ávila**

Es una enorme satisfacción ver materializada en este libro la iniciativa que surgió hace ya dos años en una Junta Directiva de la Asociación, donde se propuso la edición de esta publicación que seguro marcará un hito en la historia de los materiales compuestos en España.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todos los que han colaborado desinteresadamente haciendo posible que todo lo que está contenido en este libro sirva como referencia para la comunidad académica, la industria y el público en general que tenga interés en conocer quién y cómo se está trabajando en España para promocionar el uso sostenible de los materiales compuestos.

Además de como un referente, estoy convencido de que su publicación servirá para que tengan lugar futuras ediciones, y al mismo tiempo como punto de partida para nuevas iniciativas que fomenten la sostenibilidad y la innovación en cualquiera de los campos de aplicación que los materiales compuestos puedan tener.

Muchas gracias y que disfruten de su lectura.



Rafael Izquierdo,
Presidente de la Asociación Española de Materiales Compuestos AEMAC



INDICE

- Participantes en la redacción del libro blanco.
- Comité de edición.
- Capítulo 1: Motivación. *José Sánchez, Alfredo Güemes.*
- Capítulo 2: Ámbito de estudio y aplicación. *José Sánchez*
- Capítulo 3: Situación de materiales compuestos en España. *Iñigo Idareta.*
 - Capítulo 3.1: Materiales y estructura aeroespaciales. *Noelia Salmerón, Tamara Blanco*
 - Capítulo 3.2: Materiales y estructuras ferrocarril y automoción. *Eduardo de la Guerra, Marta Cerdeira*
 - Capítulo 3.3: Bienes de equipo. *Sebastián Díaz, Lucia Iniesta, Iñigo Idareta*
- Capítulo 4: Metodología de evaluación de ciclo de vida. *Eduarne Tellechea, María Lasheras, Itzar Ianda, Uxua Pérez de Larraya.*
- Capítulo 5: Identificación de composites para su reciclado. *Xoan Xosé Fernández Sánchez-Romate, María Sánchez Martínez.*
- Capítulo 6: Tecnologías de segregación y eliminación de materiales compuestos sin polimerizar, polimerizados y materiales auxiliares en áreas de producción y unidades de reparación: situación actual. *Agustín Chiminelli, Miguel Lizaranzu, Cristina Crespo.*
- Capítulo 7: Tecnologías de reciclado y recuperación de fibras de carbono y vidrio por pirólisis. *Olga Rodríguez Largo, Félix A. López.*
- Capítulo 8: Revalorización de productos de pirólisis. *Alejandro López-Urianbarrenechea, Adriana Serras-Malillos, Naia Gastelu, Borja Baltasar Pérez-Martínez, Esther Acha, Blanca María Caballero, Isabel de Marco.*
- Capítulo 9: Solvólisis y reciclado biológico de composites. Obtención de materias primas. *Pablo Ferrero Aguar, Nora Lardiés Miazza.*
- Capítulo 10: Reciclado mecánico de composites. *Silvia González Prolongo, Alberto Jiménez Suarez.*

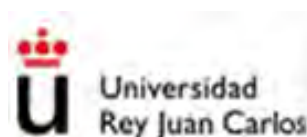
- **Capítulo 11: Tecnologías destinadas a la reutilización de fibras cortas recicladas. Semiproductos.** *Julio Vidal Navarro, Lidia García Quiles, Berta Gonzalvo Bas, Iván Doménech.*
- **Capítulo 12: Reducción de residuos en producción y reutilización de materiales compuestos preimpregnados.** *Laura Medina Coronado, Irene Díaz Raboso.*
- **Capítulo 13: Gestión del residuo y tecnologías de reuso de materiales compuestos no polimerizados.** *Nuria Fanegas Martín, Álvaro Calero Casanova.*
- **Capítulo 14: Reutilización de materiales compuestos polimerizados.** *Jose-María de la Puente Calvo, Jui Jhala, Romain Planche.*
- **Capítulo 15: Reutilización de fibras y resinas en elementos estructurales. Propuestas de uso.** *Roberto Estal Vera.*
- **Capítulo 16: Nuevos materiales biobasados y con formulaciones que permitan mejorar la recuperación y reciclabilidad y reducir la huella de carbono. Biopolímeros.** *S. G. Prolongo, A. Jiménez Suarez.*
- **Capítulo 17: Vitrímeros.** *Nerea Markaida, Alaitz Ruiz.*
- **Capítulo 18: Resinas termoplásticas reactivas.** *C. Elitzexea, S. García-Arrieta, A. de la Calle, M.A. López Machado, R. Verdejo Márquez, A. Santiago Bethencour.*
- **Capítulo 19: Materiales compuestos basados en fibras naturales.** *Ángel Renato Pozo Morales, Antonio Fernández López, Alfredo Güemes.*
- **Capítulo 20: Calentamiento rápido y de bajo consumo energético.** *Xabier Irastorza Arregui, Miguel Seguras Moreno, Aroa Iriarte Legarreta, Ricardo Mezzacasa Lasarte.*
- **Capítulo 21: Materiales auxiliares alternativos. Bolsa de vacío alternativas.** *María Eugenia Rodríguez.*
- **Capítulo 22: Conceptos de diseño basados en consideraciones y metodologías de baja huella de carbono, facilidad de segregación y recuperación.** *Blanca Lekube, Pablo Larreategi.*
- **Capítulo 23: Revalorización de fibras de refuerzo recicladas mediante tecnologías textiles.** *Iván Doménech Martínez, Javier Pascual Bernabéu.*
- **Capítulo 24: Legislación actual en España, E.U., U.K., E.E.U.U., y Japón: presente y futuro.** *Teresa de Bernardo López.*
- **Capítulo 25: Conclusiones.**
- **Anexo 1: Relación de empresas, centros tecnológicos, universidades y operadores relacionadas con materiales compuestos en España.** *Martín Flores.*
- **Anexo 2: Relación de proyectos relativos a sostenibilidad.** *Helena Abril Lanzuela.*



Relación de organismos y empresas que han participado en la redacción de capítulos:



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID





COMITÉ DE EDICIÓN

EDITOR PRINCIPAL

JOSE SANCHEZ

EDITORES

ZULIMA MORENO

MARIA DOLORES VAZQUEZ

MIGUEL ANGEL CASTILLO

ALFREDO GUEMES

FERNANDO RODRIGUEZ

XAVIER MARTINEZ

JOSE MARIA PINTADO

RAFAEL AVILA



Capítulo 1: MOTIVACIÓN

Jose Sánchez, Alfredo Güemes

 OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - INTRODUCCIÓN

La utilización de materiales compuestos de altas prestaciones en la industria ha sufrido un incremento espectacular durante las últimas cuatro décadas. Este incremento ha estado basado principalmente en unas propiedades específicas de los materiales compuestos muy elevadas y unas enormes ventajas de utilización frente a otras soluciones estructurales. Estas altas propiedades mecánicas justificaban su utilización a pesar de su alto coste, tanto en la materia prima como en los procesos de certificación y calificación y las altas inversiones necesarias para automatizar los métodos de fabricación. La prioridad durante este periodo de tiempo siempre estuvo basada en mejorar los procesos productivos, desarrollar nuevos materiales, incluyendo fibras, resinas y arquitectura del material y mejorar los métodos de cálculo de estructuras complejas. Nunca fue la prioridad anticipar el tratamiento y reciclado de las piezas rechazadas, materiales sobrantes de fabricación, materiales auxiliares o materiales fuera de su tiempo de vida, ni por supuesto elementos estructurales al final de su periodo de vida útil. El concepto de sostenibilidad era secundario o directamente no existía. Aunque no fuera lógico desechar materiales de alto coste, enterrándolos o incinerándolos y desde luego utilizar procedimientos de fabricación con altos niveles de desperdicio de materia prima, superiores en algunos casos al 50%.

Esta situación cambió a finales de la década 2010-2020, debido a diversos motivos, siendo el principal el alto precio de los materiales compuestos y la percepción pública de la falta de soluciones de reciclado o reutilización por parte de la industria. A partir de este punto, la sostenibilidad de los materiales y soluciones estructurales pasó a formar parte de los criterios de selección de tecnologías y materiales. Como consecuencia se realizaron diversas iniciativas con el fin de desarrollar tecnologías de reutilización, disminución de residuos y por supuesto, reciclado de materiales sobrantes de fabricación y elementos fabricados al final de su periodo de vida, así como de desarrollo de materiales más sostenibles, siempre dentro de los requerimientos básicos de utilización.

En este contexto, aparecen tres conceptos fundamentales: Sostenibilidad, economía circular y análisis del ciclo de vida (ACV). A continuación se desarrollan brevemente los dos primeros, dedicando el Capítulo 2 a las herramientas y ejemplos de ACV.

De manera general, la sostenibilidad se refiere a la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades. La sostenibilidad abarca tres dimensiones interrelacionadas: ambiental (centrada en la conservación y protección de los recursos naturales y los ecosistemas), social (mejorar la calidad de vida de las personas y promover sociedades inclusivas y cohesionadas) y económica (mantener una economía próspera y equitativa a largo plazo), también conocidas como los pilares de la sostenibilidad.

Lograr la sostenibilidad requiere un enfoque integrado que considere estas tres dimensiones y busque equilibrar las necesidades presentes con las necesidades futuras. Esto implica tomar decisiones informadas que tengan en cuenta los impactos ambientales, sociales y económicos a corto y largo plazo, así como promover la colaboración entre diferentes sectores de la sociedad.

La sostenibilidad en los compuestos se refiere a los esfuerzos y consideraciones realizados para garantizar que los materiales compuestos se produzcan, utilicen y eliminen de una manera que minimice el impacto ambiental, promueva la responsabilidad social y mantenga la viabilidad económica. A continuación se detallan varios aspectos



clave de la sostenibilidad en los composites:

- Selección de materias primas: La elección de materias primas sostenibles es crucial para la producción de compuestos. Esto implica seleccionar fibras, resinas y aditivos que tengan un impacto ambiental mínimo, como fuentes renovables o recicladas.
- Procesos de fabricación: Los procesos de fabricación sostenibles tienen como objetivo minimizar el consumo de energía, la generación de residuos y las emisiones. La implementación de métodos de producción eficientes, sistemas de reciclaje y fuentes de energía renovables puede reducir significativamente la huella ambiental de la fabricación de compuestos.
- Evaluación del ciclo de vida: realizar una evaluación integral del ciclo de vida ayuda a evaluar el impacto ambiental de los compuestos desde la extracción de la materia prima hasta su eliminación. Comprender los puntos críticos ambientales permite realizar mejoras específicas en la sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida del producto.
- Durabilidad y longevidad: el diseño de compuestos para mayor durabilidad y longevidad garantiza que los productos tengan una vida útil más larga, lo que reduce la necesidad de reemplazos frecuentes y minimiza la generación de desechos. Esto incluye optimizar las propiedades del material y utilizar revestimientos protectores para mejorar la durabilidad.
- Reciclaje y gestión del final de su vida útil: el desarrollo de tecnologías de reciclaje eficaces para materiales compuestos es esencial para cerrar el ciclo de materiales y minimizar los residuos en vertederos. Estrategias como el reciclaje termomecánico, el reciclaje químico y la recuperación de compuestos permiten la recuperación de materiales valiosos para su reutilización en nuevos productos.
- Biocompuestos y resinas de base biológica: los biocompuestos, elaborados a partir de fibras naturales y resinas de base biológica, ofrecen una alternativa respetuosa con el medio ambiente a los materiales compuestos tradicionales. Estos materiales utilizan recursos renovables, reducen la dependencia de los combustibles fósiles y, a menudo, tienen una huella de carbono más baja.
- Prácticas de economía circular: adoptar los principios de la economía circular implica diseñar compuestos teniendo en cuenta consideraciones sobre el final de su vida útil, facilitando la recuperación y reutilización de materiales. Los sistemas de circuito cerrado, los programas de devolución de productos y las iniciativas de remanufactura contribuyen a una industria de compuestos más sostenible.
- Cumplimiento normativo y estándares: el cumplimiento de las regulaciones ambientales y los estándares de la industria garantiza que la producción de compuestos cumpla con los requisitos legales y siga las mejores prácticas para la sostenibilidad. Certificaciones como la ISO 14001 y las etiquetas ecológicas garantizan la responsabilidad medioambiental.

La economía circular es un concepto económico y ambiental que se basa en la idea de minimizar el desperdicio y maximizar la utilización de recursos. En contraste con el modelo económico lineal tradicional de tomar, hacer, desechar", en el que los recursos se extraen, se utilizan y luego se eliminan, la economía circular promueve un enfoque más sostenible en el que los productos, materiales y recursos se mantienen en uso durante el mayor tiempo posible, y se valoran y recuperan al final de su vida útil. Algunos de los principios clave de la economía circular incluyen:

Diseño para la circularidad: Implica diseñar productos y sistemas con la intención de maximizar su vida útil, facilitar la reparación, el reacondicionamiento y el reciclaje, y minimizar los residuos y la contaminación.

Reutilización: Fomenta la reutilización de productos y componentes en su forma original o mediante la remanufactura, refabricación o reacondicionamiento para darles una segunda vida útil.

Reciclaje y recuperación de materiales: Promueve la recuperación de materiales y recursos valiosos de productos al final de su vida útil para su reintroducción en la cadena de suministro, cerrando así los bucles de material y reduciendo la dependencia de los recursos naturales.

Energía renovable y eficiencia energética: Incentiva el uso de fuentes de energía renovable y la mejora de la eficiencia energética en todos los procesos, desde la producción hasta la distribución y el consumo.

Colaboración y modelos de negocio circulares: Se centra en fomentar la colaboración entre diferentes actores, como empresas, gobiernos, instituciones académicas y sociedad civil, para promover la innovación y crear nuevos modelos de negocio que apoyen la transición hacia una economía circular.

La economía circular no solo ofrece beneficios ambientales al reducir el desperdicio y la presión sobre los recursos naturales, sino que también puede generar oportunidades económicas al impulsar la innovación, la creación de empleo y el desarrollo de nuevos mercados y productos. En resumen, la economía circular busca transformar los



sistemas económicos hacia un enfoque más regenerativo y sostenible que beneficie tanto al medio ambiente como a la sociedad.

Si bien los materiales compuestos sostenibles pueden tener costos iniciales más altos en comparación con los compuestos convencionales, ofrecen beneficios potenciales a largo plazo en términos de impacto ambiental reducido, eficiencia de recursos y ahorros en costos del ciclo de vida. A medida que la sostenibilidad se vuelve cada vez más importante y las tecnologías continúan evolucionando, es posible que la brecha de costos entre compuestos convencionales y sostenibles se reduzca con el tiempo.

Si queremos mantener una industria de materiales compuestos relevante en España, debemos desarrollar imperativamente tecnologías económicamente viables de reutilización, reciclado, nuevos materiales sostenibles y por supuesto técnicas de fabricación que permitan la reutilización o eliminación de materiales auxiliares, disminuyendo el consumo de energía durante el proceso productivo.

El presente documento, pretende dar una visión de la situación en España de las tecnologías de reutilización, fabricación, reciclado y desarrollo de nuevos materiales sostenibles, proponiendo posibles soluciones y vías de desarrollo, y manteniendo o incrementando, si cabe, el liderazgo español en el área de materiales compuestos de altas prestaciones, ampliando la base industrial de nuestro país a través de nuevos desarrollos tecnológicos y generación de sinergias entre los actores principales en este campo: Centros tecnológicos, Universidades y por supuesto Industria.



Capítulo 2: ÁMBITO DE ESTUDIO Y APLICACIÓN

Jose Sanchez

 OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - MATERIALES

La utilización de materiales compuestos en distintas áreas industriales ha tenido un desarrollo elevado en España durante las últimas décadas. Este desarrollo ha estado ligado a la utilización de materiales compuestos (composites) de fibra continua en varios sectores industriales, entre los que destacan el sector aeroespacial, el sector naval y la fabricación de palas eólicas para la producción de energía eléctrica. Otros sectores como el automóvil, ferrocarril, la fabricación de productos deportivos y diversos elementos industriales, civiles o militares han jugado un papel destacado también, pero a mucha distancia en lo referente a cantidades y productos producidos, de los tres sectores indicados anteriormente.

El presente documento se centrará, por tanto principalmente, en las principales áreas indicadas anteriormente y en especial en los sectores aeroespacial, eólico, naval y ferroviario por su actual proyección. En estos sectores, la utilización de materiales compuestos está basada en materiales compuestos de matriz polimérica y fibras continuas de refuerzo principalmente de carbono y vidrio.

Adicionalmente, y no menos importante tanto en cantidad producida, como en el posible valor económico de los residuos, se produce una muy importante cantidad de residuos de materiales auxiliares de fabricación. Estos materiales también serán objeto de estudio en este documento.

1.1 - MATRICES DE REFUERZO POLIMÉRICAS

Las principales matrices de refuerzo utilizadas en la industria española se basan en las siguientes resinas:

- Resinas de poliéster
- Resinas de vinil Ester
- Resinas epoxídicas
- Resinas epoxídicas con aditivos termoplásticos de diversa naturaleza
- Matrices termoplásticas de altas prestaciones (PAEK, PPS, PEI, PES) : muy minoritario
- Otras matrices termoplásticas (PA, PP, ...)

1.2 - FIBRAS DE REFUERZO

Las fibras de refuerzo se enmarcan en las siguientes categorías:

- Fibras de Carbono de Modulo Intermedio
- Fibras de carbono de muy Alto Modulo
- Fibras de carbono de Alta Resistencia
- Fibras de Vidrio tipo E
- Fibras de Vidrio tipo S
- Fibras de Poliaramida
- Fibras Cerámicas



1.3 - MATERIALES AUXILIARES DE FABRICACIÓN

Durante el proceso productivo se utiliza una gran cantidad de materiales auxiliares, los cuales se desechan, en la mayoría de los casos, después de un ciclo de polimerización o procesado. Los materiales más importantes son:

- Bolsas de vacío (PA, PET,...)
- Filmes separadores (Polímeros fluorados,...)
- Filmes de compactación (PE,..)
- Cintas de sellado
- Desmoldeantes
- Papeles soportes
- Tejidos aireadores (Tejidos de fibra de vidrio, PET,...)

Estos productos pueden estar contaminados con residuos de polimerización del material compuesto, recortes de producción y materiales sin contaminación, pero que han sufrido un ciclo térmico a alta temperatura.

2 - DESARROLLOS TECNOLÓGICOS

Adicionalmente al estudio de como reciclar o recuperar restos de fabricación y elementos estructurales fabricados con materiales compuestos al final de su ciclo de vida, en el presente documento se dedican varios capítulos a anticipar y describir los actuales desarrollos en matrices poliméricas y fibras de refuerzo, con el fin de desarrollar materiales compuestos sostenibles y reciclables al final de su tiempo de vida y durante el proceso productivo. Siempre considerando como un factor fundamental que estos materiales deben ser reciclables con procesos viables económicamente y por supuesto sostenibles.

Se describirán los desarrollos actuales de fibras naturales (vegetales y minerales) y resinas termoplásticas y termoestables biobasadas, así como resinas termoestables reparables y despolimerizables en determinadas condiciones fisicoquímicas.

Se dedica un capítulo a describir y proponer criterios de diseño y marcado de piezas con el fin último de facilitar el desmontaje final de las estructuras y facilitar su segregación en diversos materiales, evitando la mezcla de materiales de distinta naturaleza y elevar, por tanto, el valor de los residuos

Finalmente, indicar que no es parte de este estudio describir los métodos de fabricación de estructuras de materiales compuestos, pero se ha incluido un capítulo dedicado a las distintas metodologías desarrolladas tanto para reducir, como reutilizar, el residuo de materiales estructurales de alto valor añadido, durante el proceso productivo tanto manual como automático en materiales compuestos.



Capítulo 3: SITUACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS EN ESPAÑA

Iñigo Idareta¹, Noelia Salmerón², Tamara Blanco², Eduardo de la Guerra³, Marta Cerdeira³, Sebastián Díaz¹, Lucía Iniesta¹

1 - MTorres. 2 - Airbus Operaciones. 3 - Talgo.

Abstract

Composite materials play a very relevant role in various sectors, thanks to the lightweighting they can accomplish. Their implementation has been steadily increasing in recent decades, accompanied by the development of processes and equipment that facilitate and optimize their implementation. Spain is one of the leading European countries in the implementation of these materials and technologies, with leading companies and research centers both in terms of application and technological innovation, which continue to work on expanding the use of composites and advancing their sustainability.

OPEN ACCESS

Published: 25/02/2025

Keywords:

Railway
Automotive
Lightweight
Transportation
Industry
Ferrocarri
Automoción
Aligeramiento
Transporte
Industria

1 - INTRODUCCIÓN AL SECTOR DE LOS COMPOSITOS EN ESPAÑA

Las primeras referencias de materiales compuestos en la historia se encuentran en Mesopotamia, con la fabricación de piezas de madera contrachapada en con fibras de madera en diferentes direcciones en torno al 3400 a.C. Su llegada a la península ibérica sin duda se retrasó algo más, y probablemente lo fue a través del adobe, mezclando barro y paja, para fabricar ladrillos, o incluso barcos, ya detectado hacia el 1500 a.C en Egipto y Mesopotamia. Algunas de estas configuraciones serían presumiblemente las primeras en aplicar materiales compuestos en la península y también requerir los primeros bienes de equipo para su fabricación.

Largo camino se ha recorrido desde ese punto, y España se ha convertido en un país de referencia en muchos casos para la aplicación de materiales compuestos y el desarrollo de sus tecnologías asociadas. El abanico es muy amplio, ya que además de las empresas que aplican los composites a sus productos y las dedicadas al suministro de bienes de equipo, existen un amplísimo número de iniciativas e investigaciones por parte de centros tecnológicos nacionales para el desarrollo de nuevos materiales y soluciones, e incluso las tecnologías propias desarrolladas para uso interno en múltiples fabricantes ibéricos de piezas en material compuesto.

El posicionamiento nacional en materiales compuesto ha estado impulsado por tres sectores preferentes: el sector aeronáutico, el sector transporte y el sector eólico, que forman tres sectores principales para la economía industrial del país. Las aplicaciones iniciales de composites en la era industrial llegaron a través del transporte marítimo, no solo por aligeramiento sino también por resistencia a la corrosión, pero cabe destacar el papel jugado por Construcciones Aeronáuticas S.A., hoy Airbus España, como promotor a nivel europeo del uso de materiales compuestos dentro del sector aeronáutico, impulsando el desarrollo de múltiples tecnologías asociadas, y el importante desarrollo e implantación de las renovables y de fabricantes de aerogeneradores en el seno de la península. Ambas acciones, junto a un sector del transporte cada vez más orientado al aligeramiento de vehículos, y sin duda una gran cantidad de pequeñas aportaciones en todos los sectores industriales, han generado un caldo de cultivo muy interesante tanto para el desarrollo de soluciones en material compuesto como para la innovación en procesos y bienes de equipo asociados.

En este capítulo, se presentan visiones paralelas dentro de los sectores aeronáutico y de transporte en relaciones a los materiales compuestos, y se analizan también el sector de los bienes de equipo ligados a estos materiales.

2 - MATERIALES Y ESTRUCTURA AEROESPACIALES

2.1 - EVOLUCIÓN DEL USO DE MATERIALES COMPUESTOS EN AERONÁUTICA

La principal característica que se busca alcanzar en desarrollos competitivos del Sector Aeroespacial es la reducción del peso de aeronaves, con el objetivo de aumentar la eficiencia y disminuir así el uso y los costes de combustible, y por lo tanto, la operación del avión, que se traduce a su vez en una disminución de emisiones de CO₂. Por tales motivos, el uso de los materiales compuestos, también conocidos en inglés como carbon fibre-reinforced polymers (CFRPs), se ha incrementado notablemente en la industria aeronáutica desde su primera incorporación a mediados de los años 60 [1].

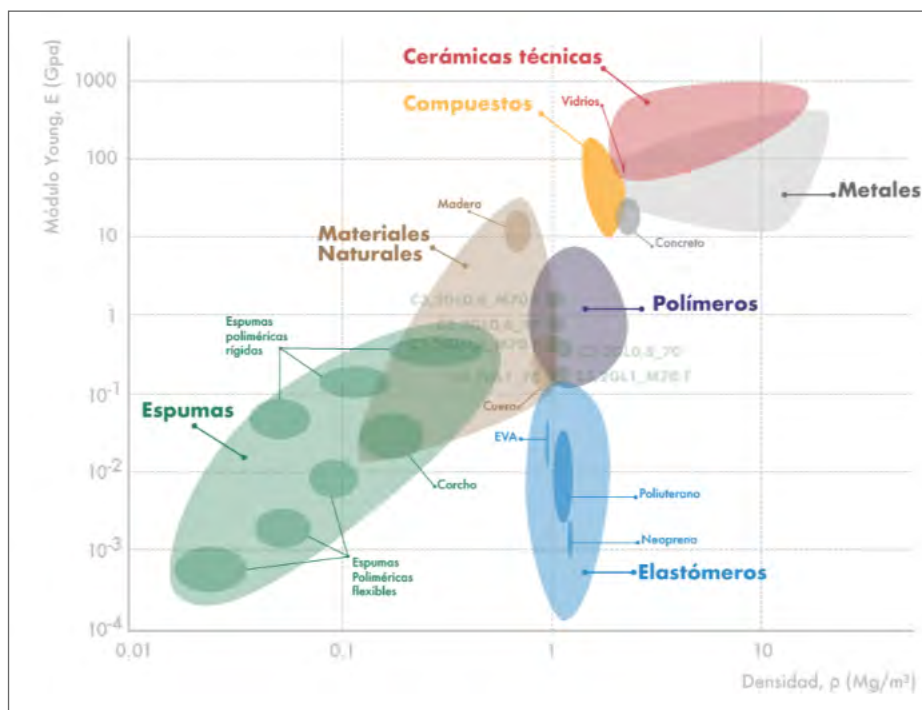


Figura 1: Diagrama de Ashby - Resistencia frente a densidad de materiales. Fuente [2].

A nivel mundial, la implementación del uso de materiales compuestos en la industria aeroespacial se llevó a cabo de manera gradual debido a los estrictos requerimientos de seguridad en vuelo, hasta alcanzar su incorporación en elementos estructurales a finales del siglo XX [1].

En los inicios, se comenzó utilizando Glass Fibre Reinforced Polymers (GFRPs), polímero reforzado con fibra de vidrio, en componentes sin requerimiento estructural, como partes interiores de la cabina, portaequipajes y cocinas; ya que no presentaban ningún riesgo. A finales de la década de 1960, fue cuando se inició el uso de los materiales compuestos en estructuras secundarias de aeronaves, como spoilers, timones, alerones y flaps. El carbono reemplazó a la fibra de vidrio en la mayoría de estas estructuras secundarias en los años 1970, aunque se siguió utilizando fibra de vidrio en muchas partes interiores y carenados. A principios de los años 80, la aviación comercial fue la primera en implementar estructuras primarias fabricadas en material compuesto, como estabilizadores, alas y barriles de fuselaje [1].

Airbus cuenta con una extensa experiencia en el uso de materiales compuestos de fibra de carbono desde 1983, cuando por primera vez se incorporaron los spoilers, aerofrenos y timón se fabricaron en sándwich CFRP del A310-200. Años más tarde, el modelo A310-300 fue pionero en la introducción de composites en una estructura primaria, el estabilizador vertical fabricado en CFRP monolítico. Años más tarde, se utilizaron materiales de fibra de carbono en flaps, alerones, spoilers y en los estabilizadores cola vertical y horizontal del A320, siendo el estabilizador horizontal o HTP producido por Airbus España. A principios de los años 90, en el A340-600 se incorpora el mamparo de presión trasera hecho de CFRP [3].

En el A380, a finales de los años 90, Airbus introdujo los CFRPs en la sección trasera del fuselaje, caja central del ala, además de en las costillas del ala.

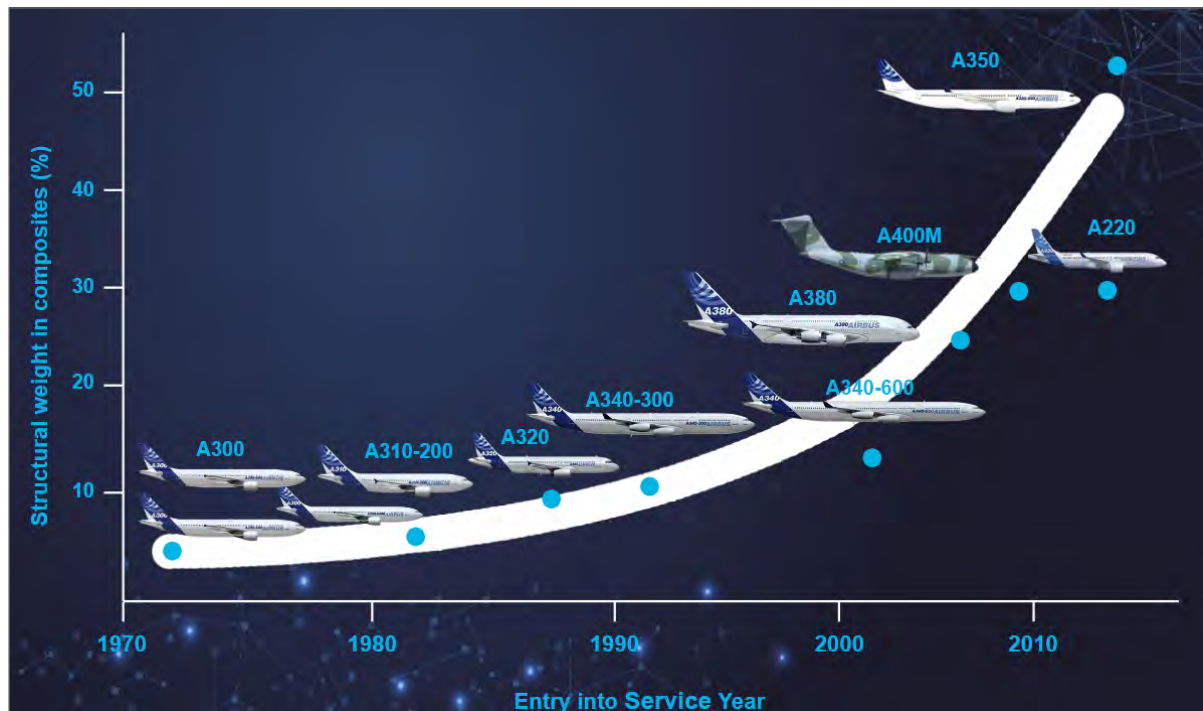


Figura 2: Año de introducción de las aeronaves del fabricante Airbus frente al peso total de estructuras fabricadas en composite. Fuente: Airbus.

Esta progresión tan significativa alcanzó un máximo histórico en el el A350 XWB, donde todo el fuselaje y los revestimientos de las alas, lo que equivale a más de la mitad de la estructura, está hecha de composites de fibra de carbono [3].

Debido a la multitud de beneficios reconocidos que ofrece el uso de Materiales Compuestos, como la ligereza, buenas propiedades mecánicas, conductividad eléctrica y baja densidad, entre otros; la presencia de los composites no ha dejado de crecer, desarrollarse e innovar, hasta llegar a contribuir en aviones de última generación fabricados con más del 50% de sus materiales en composite, como en el caso del Airbus A350 XWB.



Figura 3: Tipos de materiales utilizados en el A350 XWB. Fuente: [4]

En el sector defensa, desde principios de los 2000, Airbus ha implementado el uso de los materiales compuestos en una de las aeronaves de más relevancia militar, como el A400M. Se han utilizado hasta un 30% de sus componentes fabricados en material compuesto con el objetivo de reducir el peso de la aeronave, aumentar la eficiencia del combustible y ampliar el rango de servicio.

2.2 - MATERIALES COMPUESTOS EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL EN ESPAÑA

España consta con una larga trayectoria de reconocida relevancia a nivel mundial en el sector de los materiales compuestos. El número de empresas, organizaciones y centros tecnológicos españoles enfocados en el campo de los composites representan a día de hoy más de 500, y su función está dirigida principalmente al sector aeroespacial. Dentro de este sector, España se sitúa entre las tres industrias europeas con más volumen de producción de estructuras en material compuesto, inversión en I+D y trascendencia, junto con Alemania y Francia [5].

La industria aeroespacial en España, gracias a la presencia del gigante europeo de producción de aeronaves Airbus desde el año 2000, y previamente a la empresa nacional CASA (Construcciones Aeronáuticas, S.A.), es pionera en el uso de materiales compuestos para la fabricación de piezas y secciones de la aeronave, lo que ha llevado a la amplia difusión del uso de estos materiales [5].

Así Airbus España y su industria subsidiaria ha sido pionera en el diseño y fabricación de grandes estructuras aeronáuticas integradas en material compuesto, tales como el estabilizador horizontal de todos los modelos de Airbus, la sección de fuselaje trasero (Sección 19 y 19.1) del A380 y A350 (en este caso en un solo ciclo ('one-shot'), y el revestimiento inferior del ala de A350, entre otros.

España cuenta con algunas de las instalaciones de I+D y fabricación de estructuras de composite más grandes y punteras de Europa. Los métodos de fabricación predominantes en componentes aeroespaciales en España son: prepreg, incluyendo deposición principalmente automática por ATL ('Automated Tape Lay-up') o AFP ('Automated Fiber Placement') o bien 'hand lay-up' y posterior curado en autoclave, así como el proceso de RTM ('Resin Transfer Molding'). Principalmente con materiales compuestos de matriz termoestable, en su mayoría resina epoxi, y refuerzo de fibra de carbono. En la siguiente tabla se muestra un resumen general de los tipos de materiales compuestos utilizados en la industria aeroespacial en España:

Tipo	Definición	Aplicación	Uso	
			Actual	Tendencia
Prepreg termoestable	Fibra de carbono y resina epoxi (cintas unidireccionales / tejidos)	Estructura	Alto	Mantener o disminuir
	Fibra de vidrio y resina epoxi (tejido)	Aplicación superficial Estructura secundaria	Bajo	Mantener o disminuir
Resin Transfer Molding / Liquid Resin Infusion	Resina epoxi líquida	Estructura	Medio	Aumentar
	Tejidos secos de fibra de carbono / Non-Crimp fabrics			
Thermoplastic composites	Preimpregnados (cinta unidireccional): PEEK resin + fibra de carbono	Estructura	NO uso en España	Aumentar
	Prepregs (tejido): PEEK, PPS, PEI + fibra de carbono	Estructura		
	Inyección: PA, PPS, PEI + (fibra de carbono / fibra de vidrio)	Estructura Secundaria Soportes de sistemas		
Núcleos	Honeycomb - resina fenólica + papel de aramida / fibra de vidrio	Estructura secundaria	Bajo	Mantener o disminuir
Adhesivos	Films epoxi	Estructura	Medio	Disminuir
	Epoxi - adhesivos pasta, shims, fillers..	No estructural	Medio	Aumentar
Protección frente a impacto de rayo	Malla de bronce - prepreg resina epoxi Expanded copper foils - prepreg de resina epoxi Perforated copper foils - prepreg resina epoxi	Estructura - aplicación superficial	Alto	Mantener o disminuir

Tabla 1: Tipos de materiales compuestos más utilizados en la industria aeroespacial en España. Fuente: Airbus.

A día de hoy, Airbus Operaciones cuenta con la planta de Illescas, dedicada mayoritariamente a la fabricación automatizada de grandes componentes de aviación civil en material preimpregnando CFRP, junto con la planta de producción Getafe en la que mayoritariamente se utilizan métodos de RTM para producción de cuadernas de la sección de fuselaje trasero (Sección 19). Igualmente, en Getafe hay una línea de montaje de los estabilizadores horizontales de todos los modelos de Airbus y de la Sección 19 del A350. La fabricación de componentes de composite para aviación militar se lleva a cabo en las plantas de Airbus Defense en Sevilla y actualmente en la nueva planta de Airbus Operations en Cádiz [6].



España también ha formado parte de la introducción de materiales compuestos en el sector espacial. Mediante la fabricación de lanzadores para el programa Ariane 1 desde los años 70, y numerosas estructuras de satélites para el proyecto Olympus-1 desde principios de 1990, entre otros, se ha dado lugar a numerosos avances que han posicionado a Airbus España como centro de excelencia en la tecnología de materiales compuestos en desarrollos espaciales.

La nueva planta de Airbus Espacio de Getafe, inaugurada oficialmente en 2023, cuenta con equipos de última generación para llevar a cabo procesos de fabricación automatizada de composites, principalmente para lanzadores y satélites.

Dentro del mundo de los composites en la industria aeroespacial, cabe destacar las infraestructuras, desarrollo y expertise desarrolladas por proveedores aeroespaciales, conocidos como Tier 1, tales como Alestis, Aciturri y Aernnova.

Alestis Aerospace es un proveedor de aeroestructuras especializado en diseño, fabricación y montaje, líder en tecnologías de fabricación de materiales compuestos. Con sede en España, cuenta con un total de 5 plantas y 2 oficinas de ingeniería distribuidas entre Getafe, Vitoria, Cádiz y Sevilla y Sao Paulo, Brasil. Alestis ha sido recientemente adquirida por otro de los Tier 1, Aciturri [7].

Aciturri fue fundada en 1977 como una compañía familiar llegando a día de hoy a tener numerosas plantas en España: Miranda de Ebro, Valladolid, Madrid, Álava, Sevilla y Cádiz; además de en Rochefort, Francia; Casablanca, Marruecos y Sao Paulo en Brasil. Aciturri se dedica al desarrollo de estructuras aeronáuticas y motores desde la concepción y diseño del producto hasta su fabricación, montaje y certificación. Son expertos tanto en estructuras metálicas como de composites [8].

Aernnova cuenta con más de 35 años de experiencia en el diseño, fabricación y mantenimiento de aeroestructuras metálicas y de composite. Da soporte a numerosos clientes de manera global ya que cuenta con instalaciones en España, México, Brasil, EEUU, Reino Unido, Portugal y Rumanía [9].

A continuación se enumeran los principales componentes y estructuras aeroespaciales de composite fabricados en España dentro de programas de Airbus Operaciones, Defensa y Espacio:

Fabricante	Pieza	Tecnología	Fibra	Programa
Aernnova	Cajón central del ala	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	A220
Airbus Operaciones	Pieles del estabilizador horizontal	Prepreg - ATL	Fibra de carbono	A320
Airbus Operaciones	Largueros y larguerillos	Prepreg - ATL	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Rigidizadores	Prepreg - ATL	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Estabilizador horizontal	Prepreg - ATL	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Fan Cowl Door A320	Prepreg - AFP + elementales RTM	Fibra de carbono	
Alestis	Estabilizador horizontal	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aciturri	Estabilizador horizontal	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aciturri	VTP Dorsal fin	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Pieles del estabilizador horizontal	Prepreg - ATL	Fibra de carbono	A330
Airbus Operaciones	Estabilizador horizontal	Prepreg - ATL	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Largueros	Prepreg - ATL	Fibra de carbono	
Aernnova	Componentes del timón de profundidad	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Puerta del tren de aterrizaje principal	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Timones de profundidad	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Puertas del tren de aterrizaje principal	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Vigas y marco de la puerta inferior s19	RTM	Tejido fibra de carbono	A350XWB
Airbus Operaciones	Sección 19	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Wing lower cover	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Estabilizador horizontal	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Largueros y larguerillos	Prepreg - ATL	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones	Rigidizadores	Prepreg - ATL	Fibra de carbono	
Aernnova	Estabilizador horizontal	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Timón de profundidad	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Mamparo de presión	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Timón de dirección	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	



Aernnova	Puertas de pasajeros 2 y 4	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	A380
Alestis	Belly fairing	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	Tail Cone	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aciturri	Section 19	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aciturri	Estabilizador vertical	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aciturri	Outboard flaps	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Estabilizador Horizontal: bordes de ataque/salida y piezas de unión	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	Puertas del tren de aterrizaje principal	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	Belly fairing	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aciturri	S19.1	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aciturri	Elevator and Rudder	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	Beluga XL
Aernnova	Fuselaje trasero superior	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aciturri	Box extension & Aux Fins	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	

Tabla 2: Principales Aeroestructuras fabricadas en España dentro de los programas de Airbus Operaciones. Fuente: Fuente: Airbus, [7], 8 y 9.

Fabricante	Pieza	Tecnología	Fibra	Programa
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	Estabilizador horizontal	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	A400M
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	Pieles del empenaje	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	Costillas del estabilizador	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	Largueros HTP	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	Carenas FSF	Prepreg - AFP + sandwich	UD fibra de carbono	
Aernnova	Costillas y otros componentes del estabilizador	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Componentes del carenado del motor	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	Carenado	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	Carenados del ala al fuselaje	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	Elevator	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aciturri	Flaps & vanes	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Airbus Defense and Space	Pieles de alas	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	EFA
Airbus Defense and Space	Costillas y largueros	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	
Airbus Defense and Space	Wing Cover	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	
Airbus Defense and Space	Pieles de alas	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	
Aernnova	Conducto del ala	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Caja de munición	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Dispensador de bengalas	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Aernnova	Carenado del motor	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	C295
Aernnova	Puertas del tren de aterrizaje delantero	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	VTPA	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	AFT Fuselage	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	FLAPS	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Alestis	Elevator and Rudder	Prepreg - AFP	Fibra de carbono	
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	HTP F7X/8X	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	Dassault Falcon F7X/8X
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	Largueros HTP	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	



Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	HTP / VTP F10X	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	Dassault Falcon 10X
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	Largueros HTP/VTP	Prepreg - ATL	UD fibra de carbono	
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	Tapas B/S HTP y VTP	Infusión Sandwich	Tejido Fibra seca / foam core / LRI	
Airbus Operaciones Cádiz para Defensa	VTP / HTP	Infusión Monolítico	AFP Fibra seca / LRI	Eurodrone

Tabla 3: Principales Aeroestructuras fabricadas en España dentro de los programas de Airbus Defensa. Fuente: Airbus, [7], [8] y [9].

Fabricante	Pieza	Tecnología	Fibra	Programa
Airbus Space	Estructura central del lanzador	Prepreg - AFP	Carbono	Ariane 5
	Cilindro y cono de aviónica	Prepreg - AFP	Carbono	
	Cofia	Prepreg - AFP	Carbono	
	Lanzadores	Prepreg - AFP	Carbono	Ariane 6
	Punta de booster	Prepreg - AFP	Carbono	
	Espinas principales	AFP con núcleo de aluminio	Carbono	Satélites

Tabla 4: Principales estructuras fabricadas en España dentro de programas de Airbus Espacio. Fuente: Airbus.

Como se mencionaba al principio del capítulo, uno de los puntos fuertes en cuanto a la extensa experiencia de España en el campo de los composites dentro del sector aeroespacial es la innovación. Numerosos centros tecnológicos, universidades y organizaciones españolas centran gran parte de sus recursos en desarrollar materiales compuestos y estructuras aeroespaciales más ligeras, eficientes y sostenibles que permitan al sector cumplir con requisitos medioambientales y de eficiencia energética que hagan de la aviación un sector más sostenible.

Cabe destacar el gran trabajo de i+D en materia de composites que llevan a cabo centros tecnológicos españoles como FIDAMC (Fundación para la investigación, desarrollo y aplicación de materiales compuestos), INTA (Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial), IMDEA Materiales (Instituto Madrileño de Estudios Avanzados), AIMPLAS (Instituto Tecnológico del Plástico), TECNALIA, CIDETEC, GAIKER, AITIIP, AIMEN y universidades como AMADE (Analysis and Advanced Materials for Structural Design), UPM (Universidad Politécnica de Madrid), URJC (Universidad Rey Juan Carlos) y UC3M (Universidad Carlos III de Madrid), entre muchos otros.

Algunas de las líneas actuales de innovación y desarrollo de materiales compuestos más importantes dentro del sector aeroespacial se centran en los siguientes puntos:

- Protección ante fuego
- Protección ante corrosión
- Protección ante impactos rayos
- Protección superficial
- Termoplásticos
- Reciclabilidad
- Desarrollo de nuevas resinas y fibras bio- basadas y reciclables
- Reparaciones
- Composites para aplicaciones criogénicas

3 - MATERIALES Y ESTRUCTURA FERROCARRIL Y AUTOMOCIÓN

3.1 - INTRODUCCIÓN

El transporte es una actividad fundamental para el desarrollo de la economía española. (fuente: monografico_descarbonizacion_del_transporte). Además de garantizar la movilidad de las personas, resulta imprescindible para el aprovisionamiento y la distribución de mercancías, la exportación de bienes y el desarrollo de la

industria del turismo. La potente red de infraestructuras aéreas, terrestres y marítimas y la calidad de los servicios de éstas permiten el desarrollo.

El transporte consume aproximadamente un 39% de la energía final del país, y la mayor parte de esta energía procede del petróleo, lo que implica que es responsable de una parte relevante de las emisiones de los gases de efecto invernadero.

En particular, el sector del automóvil y del ferrocarril se enfrentan a un gran reto impuesto por las recientes directrices de Unión Europea (European green deal), donde la legislación es cada vez más restrictiva en cuanto a las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), y con una serie de hitos intermedios, reflejo de las políticas europea y nacional, de mitigación del cambio climático.

El Pacto Verde Europeo contiene iniciativas para la movilidad sostenible y establece los elementos claves que se deben estructurar para la gestión climática dentro de la Unión Europea, que persiguen alcanzar la neutralidad climática de la economía para el año 2050.



Figura 4: Hitos e iniciativas señaladas en la Comunicación "Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente: Encauzar el transporte europeo de cara al futuro". Fuente: Monográfico descarbonización del transporte

Y en esta estrategia de descarbonización, los materiales compuestos se convierten en unos aliados necesarios, pues una de las soluciones pasa por el aligeramiento en los vehículos de transporte en todo el espectro que abarca el término, ya que supone un ahorro en términos de emisiones de carbono, ya sea por el ahorro de material o por el ahorro de consumo de energía durante toda la vida útil, entre otros.

En los próximos años, las soluciones para la reducción de peso pasarán por la combinación de: metales ferrosos y no ferrosos, polímeros y materiales compuestos. Se debe pensar cada vez más en los sistemas multimaterial, desarrollando procesos que combinen distintos métodos de fabricación, así como de unión, y planteen desde el inicio soluciones orientadas al ecodiseño.

Además, la incorporación de nuevos materiales en la fabricación de piezas en cualquier sector debe ir de la mano de una mayor contribución a la sostenibilidad y eficiencia de los propios vehículos. Hoy en día, las innovaciones en materiales son la base para poder implementar nuevos conceptos de vehículos.

3.2 - SECTOR DEL FERROCARRIL

3.2.1 - SITUACIÓN ACTUAL

El transporte ferroviario es el modo de transporte público con menos emisiones por pasajero y kilómetro y, por lo tanto, tiene un papel decisivo en la lucha contra el cambio climático.

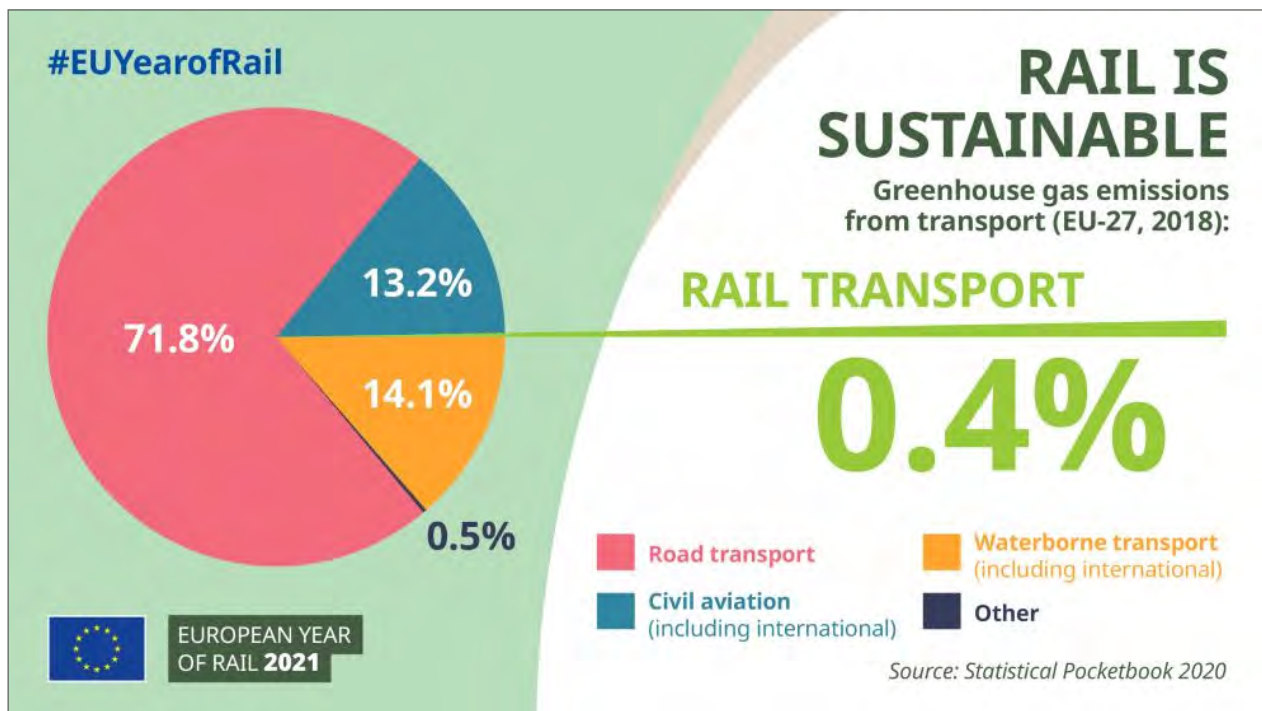


Figura 5: Año Europeo del ferrocarril. Fuente: https://europa.eu/year-of-rail/why-rail_en

De acuerdo con los datos proporcionados por el Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEI), el transporte ferroviario es el modo de transporte más electrificado, con un 81,6% de su consumo energético de origen eléctrico, frente al 18,4% proveniente del gasóleo. En la actualidad, la red 2021 de Adif y Adif AV está electrificada al 64,2%. (fuente: [monográfico_descarbonización del transporte](#)).

El sector del ferrocarril está apostando por nuevos materiales como aceros de muy altas prestaciones, titanio, aleaciones avanzadas de aluminio y, en especial, por materiales compuestos, como los reforzados con fibra de carbono (CFRP), para introducirlos en estructuras primarias, pues presentan una alternativa a los actuales por sus propiedades mecánicas, al ser materiales de altas prestaciones.

Por las características de los trenes y las limitaciones en la infraestructura en cuanto al peso por eje, sobre todo, a la hora de pasar por puentes, hace del requisito de peso una necesidad en el desarrollo de nuevos productos. El uso de los materiales compuestos en el sector permite la reducción del peso, posibilitando entre otros una mayor velocidad de circulación, un menor consumo energético y más capacidad de carga de pago, así como un menor daño de las infraestructuras.

En cuanto a la experiencia del pasajero, en los trenes donde se introducen estos materiales, se ve mejorado su confort, consiguiendo unos coches más amplios y aportando un valor estético a los trenes de nueva generación.

El mercado demanda trenes con una tasa de reciclabilidad y recuperabilidad superior al 95%, y esta tasa es calculada según kilogramo y familia de material según indicaciones de UNIFE (ver documento: "Recyclability and Recoverability Calculation Method Railway Rolling Stock", UNI-LCA-001:00, (01.03.2013, versión 00)). Por lo que actualmente en el sector hay preocupación por dar respuesta a los nuevos desafíos medioambientales a través del cambio a nuevos modelos circulares, para poder introducir estos materiales sin detrimento de estas tasas, ya que la tasa de reciclabilidad para todo tipo de polímeros reforzados con fibra es de tan solo el 66%.

Enfocados en el fin de vida útil de los trenes, se busca soluciones para reutilizarlos como productos de segunda generación con mínimas pérdidas de propiedades. Es impensable fabricar componentes con materiales que no presenten soluciones medioambientalmente aceptables. Cada una de las piezas que se incorporen al tren deben cumplir los requisitos ambientales, desde su concepción hasta su desarrollo y posterior utilización y fin de vida.

3.2.2 - USO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

La madera, como material compuesto, ha estado empleándose para la estructura de los coches desde los primeros trenes, pero no ha sido hasta recientemente cuando los materiales compuestos de origen polimérico han empezado a utilizarse en zonas del tren que demandan requisitos estructurales y semiestructurales, como son: los frontales o

morros, en el carenado inferior e interior del tren y en paneles del bastidor del suelo.

Para estructuras con responsabilidad estructural, después de haber sustituido el acero por el aluminio, el avance natural en la línea de reducción de peso es la utilización de materiales compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP), con una densidad un 40% menor a la del aluminio y una resistencia mecánica comparable a la del acero. Esto convierte al CFRP en el material avanzado con mayor potencial en la reducción de peso. Además, entre sus ventajas, destacan que son materiales con propiedades configurables y buena conformabilidad, con un buen comportamiento ante cargas variables, ante agentes ambientales y a baja temperatura, requisitos atractivos para el sector.

De hecho, en los últimos años, para el techo, paneles laterales y bastidor, así como elementos de rodadura u otras partes de los elementos de la estructura externa del tren construidos tradicionalmente en metal, se ha demostrado que se pueden sustituir por diferentes materiales compuestos, siempre y cuando cumplan la restrictiva normativa de fuego para la certificación de los trenes (EN 45545-2).



Figura 6: Morro del modelo 106 de Talgo, una combinación de varias piezas de fibra de carbono y resina epoxy y faldón en fibra de vidrio

También se pueden encontrar algunos ejemplos del interiorismo del tren fabricados en material compuesto, en este caso, suele ser más utilizado como refuerzo la fibra de vidrio con alguna resina con cargas para fuego. También el carenado inferior del tren cuenta ya con las bondades de estos materiales.



Figura 7: Ejemplo de la carena interior del tren en fibra de vidrio con resina de poliéster con cargas de fuego

Para conocer la distribución de utilización de las diferentes familias de materiales en el sector, se va a tomar como ejemplo la declaración ambiental de producto de dos fabricantes nacionales, Talgo y CAF.

El primer ejemplo que se describe es la plataforma de producto Talgo AVRIL (EDP_TALGO) que tiene una capacidad de 581 plazas, con una vida útil planeada en 40 años y unos 17.000.000 km que recorrerá por las vías españolas peninsulares. Los materiales usados para su fabricación han sido seleccionados previamente de acuerdo con el ecodiseño del producto:

	MATERIAL	PERCENTAGE
1	FE metals	48,68%
2	Non-FE metals	31,37%
3	Elastomers (unfilled)	1,33%
4	Thermoplastics (unfilled)	2,95%
5	Thermoplastics (glass unfilled)	0,25%
6	Thermosets (unfilled)	1,99%
7	Thermosets (glass unfilled)	1,81%
8	Carbon or natural fiber reinforced polymers	1,46%
9	Glass	0,87%
10	Safety Glass (Shatterproof glass)	0,59%
11	Oil, grease or similar	0,16%
12	Acids and Cooling agents or similar	0,16%
13	MONM (leather, wood, cotton fleece...)	0,34%
14	Electric/Electronics	6,81%
15	Ceramics	0,44%
16	Mineral wool	0,79%

Figura 8: Distribución de los materiales utilizados en el tren por familias (de acuerdo con las 16 familias del criterio de UNIFE (UNI-LCA-001.00))

Y reclasificando en siete grupos de acuerdo con la naturaleza del material, quedaría:

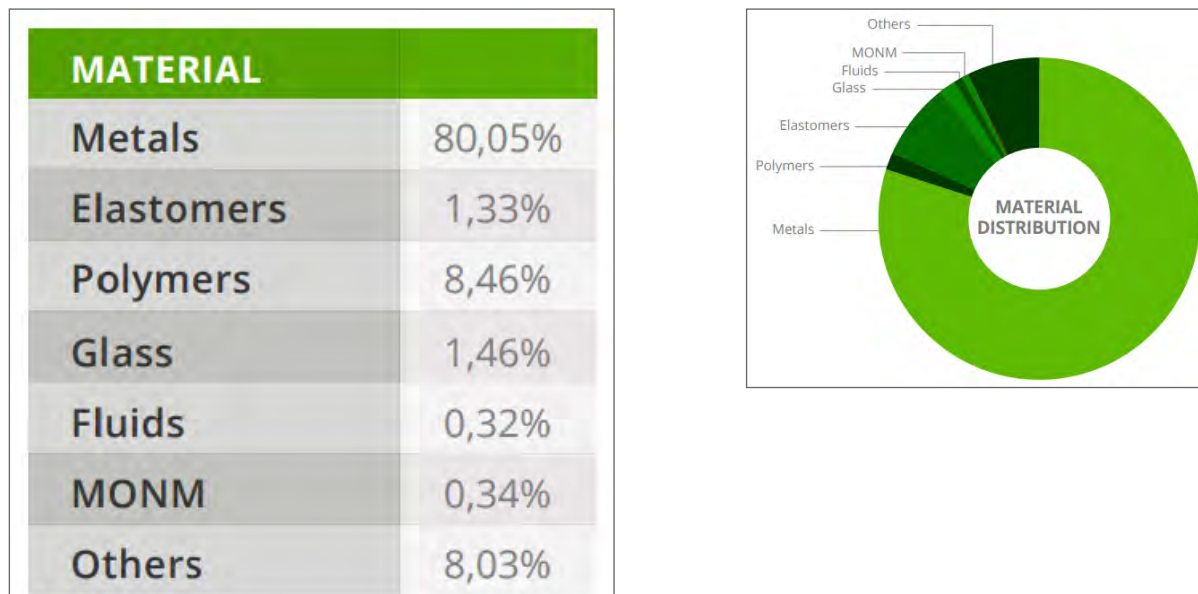


Figura 9: Distribución de los materiales por grupo (de acuerdo con la ISO 22628)

Según la EPD, cerca del 9% del peso total del tren (que en este caso es de 327 toneladas) está constituido por materiales de origen polimérico.

El segundo ejemplo vendría de la mano de Construcciones y Auxiliar de ferrocarriles (CAF) con la declaración ambiental de su producto B23 (EDP_CAF) con una longitud de 90 metros y una capacidad de 792 pasajeros. Para ver la distribución de los materiales empleados, se presenta en la siguiente figura:

VEHICLE MATERIALS						
MATERIAL CONTENT IN 1 VEHICLE (%)	CARBODY	INTERIOR, WINDOWS AND DOORS	BOGIES AND RUNNING GEARS	PROPULSION AND ELECTRIC EQUIPMENT	COMFORT SYSTEMS	TOTAL
Metals	22.07%	8.99%	42.32%	8.06%	3.55%	84.99%
Elastomers	0.82%	1.19%	0.80%	0.080%	0.076%	2.96%
Polymers	0.768%	0.45%	0.10%	1.14%	0.16%	2.63%
Composites	0.11%	3.57%	0.081%	0.093%	0%	3.85%
Electric and Electronic Equipment	0.00012%	0.09%	0.40%	0.33%	0.045%	0.86%
Glass	0%	0.00040%	0.00%	0.0055%	0%	0.006%
Safety glass	0%	2.59%	0.00%	0%	0%	2.59%
Oil, grease & similars	0.057%	0.021%	0.084%	0%	0.0070%	0.17%
Acids, cooling agentes or similar	0%	0%	0%	0.164%	0.030%	0.19%
Other inorganic materials	0.46%	0%	0.54%	0.092%	0.11%	1.20%
Mineral wool	0%	0.31%	0%	0.0039%	0.225%	0.54%
TOTAL	24.28%	17.22%	44.32%	9.97%	4.20%	112.674 Kg

Figura 10: Distribución de cada familia de material por zona de tren

Para este ejemplo, materiales de origen polimérico y materiales compuestos representan un porcentaje algo inferior, aunque está cerca del 7 % del peso total del tren.

3.3 - SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN

El transporte por carretera es una de las áreas de mayor consumo energético de los estados (representando hasta un 40 % en un país como España) y este consumo no deja de incrementarse año tras año. El transporte por carretera

supone el 80 % de esa energía y, en la actualidad, prácticamente toda esa energía proviene de recursos energéticos fósiles como el petróleo. (fuente: <https://enertic.org/transporte-inteligente-para-un-futuro-sostenible/>)

La industria de automoción y movilidad es estratégica para la economía española. Los componentes fabricados son exportados a todo el mundo, donde la Unión Europea es el primer destino de los vehículos españoles, pero con creciente presencia en mercados fuera de la Unión, como es África (Argelia, Marruecos y Sudáfrica), Estados Unidos, México y Chile, Japón y Emiratos Árabes Unidos, que son cada vez más relevantes.

Las mejores oportunidades de inversión son:

- Digitalización industria 4.0.
- Reciclaje en la industria de la automoción.
- Nuevos sistemas de propulsión de vehículos y almacenamiento de energía en baterías.
- Coches conectados y seguros.
- Nuevos modelos de comercialización.
- Aligeramiento de vehículos.

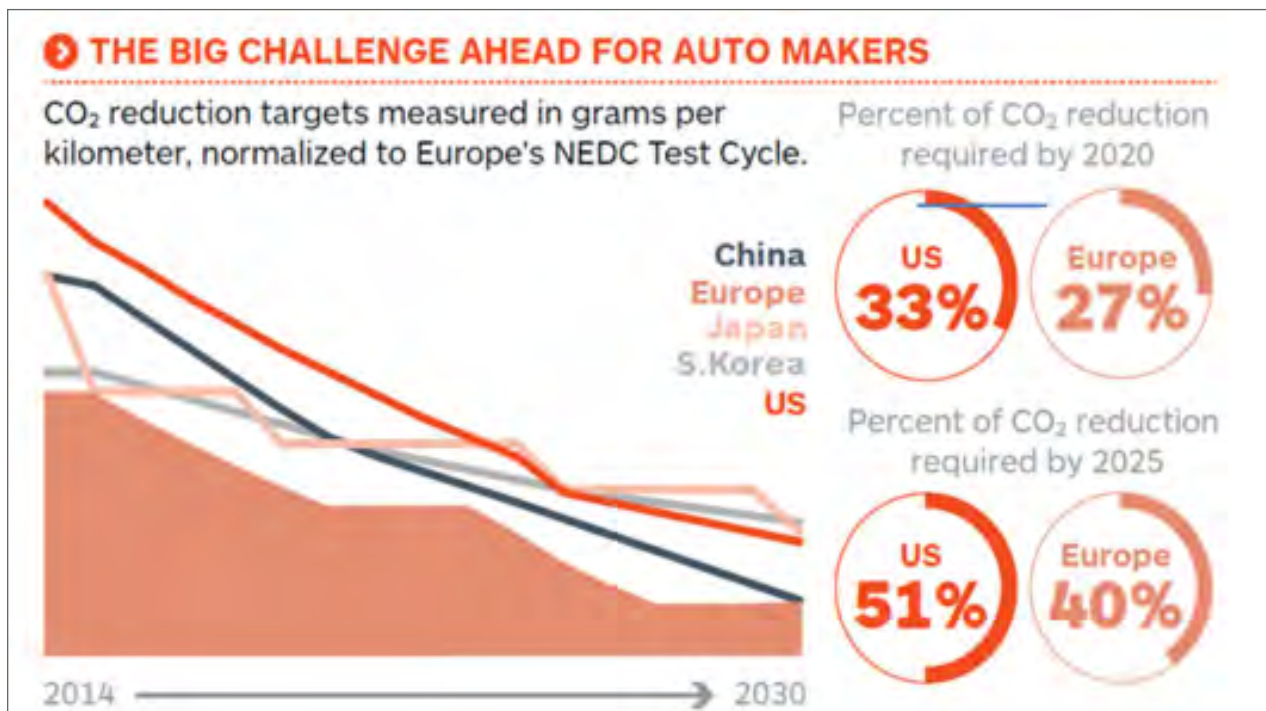


Figura 11: Grandes retos propuestos al sector de automóvil. Fuente: <https://www.move2future.es/images/pdf/documento-posicion-c.pdf>

La introducción de nuevos materiales para el aligeramiento de piezas de vehículos es además de un gran reto, una gran oportunidad. Un dato especialmente relevante es que, por cada 100 kg de reducción en el peso total de un vehículo, se reduce la emisión de unos 9 g CO₂/km y se reduce el consumo de 0,3 a 0,4 litros por cada 100 km. (fuente: <https://www.move2future.es/images/pdf/documento-posicion-c.pdf>). Este capítulo cuenta los avances del sector en cuanto al aligeramiento de vehículos (tanto automóviles como vehículos pesados).

Para llegar a cumplir objetivos de reducción de peso en el vehículo, existen varias alternativas: reducción de la proporción de materiales metálicos e incremento de la proporción de aleaciones ligeras, materiales poliméricos, materiales compuestos y estructuras híbridas metal-composite o metal-polímero.

Por otro lado, el estudio de las posibilidades de aligeramiento de los componentes de automoción exige el mantenimiento de las funciones específicas y de las prestaciones tanto mecánicas como estéticas de estos. Además, las soluciones de aligeramiento no deben afectar a la habilidad del vehículo ni a su grado de accesibilidad.

Los materiales que han permitido mayor aportación a la reducción de peso son los polímeros y los materiales compuestos de matrices poliméricas (tanto termoestables como termoplásticas) reforzadas con fibras técnicas (como

fibra de vidrio, de carbono y fibras de origen natural).

Se debe tener en cuenta que las nuevas tecnologías de combustión eléctrica añaden un peso extra en el vehículo híbrido debido a sus baterías, los nuevos motores y módulos de electrónica, por lo que es necesario la reducción al máximo del peso del vehículo eléctrico y aquí aparece de nuevo como candidatos a resolver el problema los materiales compuestos, por su baja densidad.

Otro aspecto que juega a favor de los materiales compuestos en este sector es la actual tendencia a la personalización, creando la nueva necesidad de hacer series más cortas con mayor inversión en equipos para su automatización, otro aspecto que juega a favor de los materiales compuestos frente a los metales.

3.3.1 - USO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

En 1885, Gottlieb Daimler junto a Wilhelm Maybach inventaron la primera motocicleta (si se considera motor de combustión interna) de madera, y pasó mucho tiempo hasta que en 1960 apareciera el vehículo Trabant, cuya carrocería se fabricaba con un tipo de plástico creado a partir de fibras naturales con algodón (Duroplast).

El material más utilizado en la fabricación de la carrocería de los coches era el acero (7800 kg/m^3), aunque actualmente ya se ha sustituido por aluminio (2700 kg/m^3) en una gran mayoría de los coches sobre todo en el panelado exterior. En los coches de competición de Fórmula 1 ya se fabrican con material compuesto con fibra de carbono (1700 kg/m^3), así como muchos superdeportivos.

Por otro lado, los materiales de origen bio (ya sea natural o reciclados) se están introduciendo en los nuevos automóviles (fuente: la importancia de los nuevos materiales):

- Cuero sintético que pesa mucho menos que el cuero genuino. Produce un 85% menos de emisiones de carbono y menos compuestos orgánicos volátiles.
- Plásticos de botellas recicladas para producir asientos y otros componentes.
- Fibras naturales para reforzar y aligerar piezas plásticas.
- Fibras vegetales de agave para piezas bioplásticas más sostenibles (arneses de cableado, unidades HVAC y contenedores de almacenamiento).

Para conocer la distribución de utilización de las diferentes familias de materiales en el sector, se va a tomar como ejemplo la declaración ambiental de producto de un fabricante nacional, Irizar (fabricante de vehículos pesados: autobuses).

La gran adaptabilidad a las necesidades de clientes y usuarios es la principal característica que define al Irizar i4 (EPD_Irizar), reconocido en el sector como líder en su segmento en cuanto a consumo se refiere.

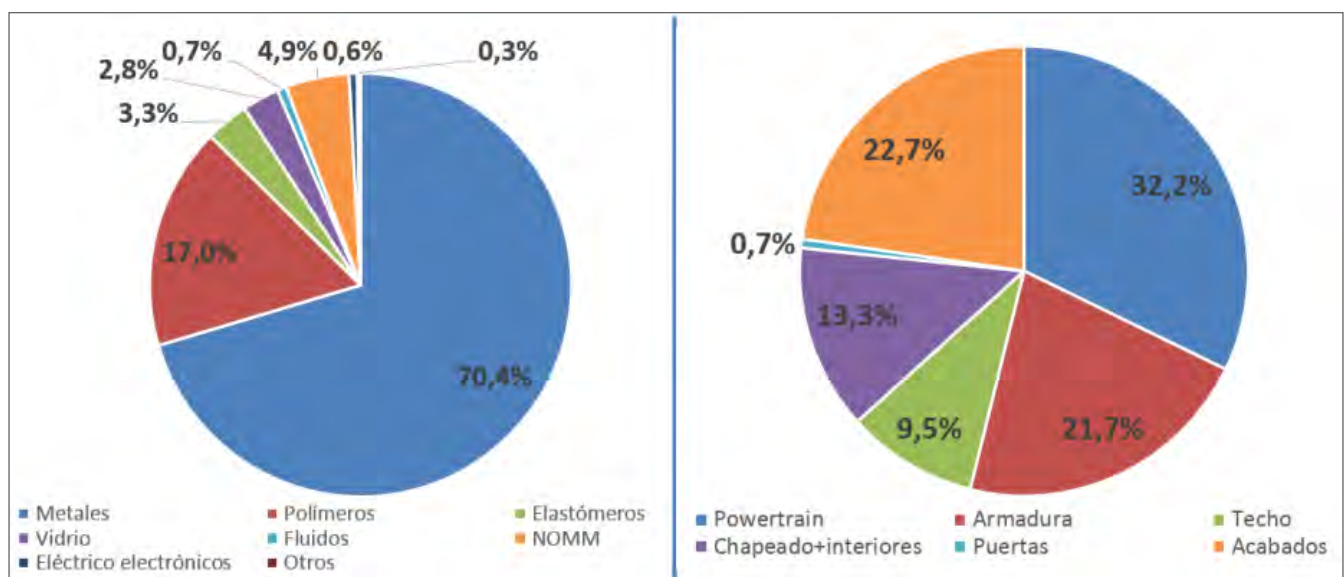


Figura 12: Contenido de materiales y desglose de pesos por grupos en el Irizar i4

3.4 - CONCLUSIONES

En el futuro próximo la utilización de materiales de altas prestaciones como son los materiales compuestos será un requerimiento indispensable en el desarrollo de las infraestructuras de los sectores que se tratan en este capítulo.

La utilización de los materiales compuestos posibilita la reducción de peso junto con una gran resistencia, lo que permite reducir el consumo energético y, por consiguiente, disminuir los impactos medioambientales del sector transporte.

Por el contrario, la introducción de los materiales compuestos tiene aún algunas limitaciones como son:

- El coste actual de estos materiales hace que no se estén utilizando de forma masiva en la industria. Se está cerca de llegar al momento en el que los beneficios económicos producidos por la reducción de peso superen los costes extras de estos materiales, y así se podrán utilizar de forma más generalizada.
- Y la evidente necesidad en cuanto a sostenibilidad y circularidad de estos, pues en la actualidad son requisitos que preocupan a todos los sectores. La comunidad científica junto con las empresas, trabajan conjuntamente en desarrollar nuevas tecnologías que reciclen, recuperen y reutilicen estos materiales una vez alcanzada su vida útil y/o los rechazos o restos de producción, así como de los materiales auxiliares. Los nuevos materiales deberán ser intrínsecamente reciclables.

Se ha de ser consciente de que los procesos de innovación no se detienen, la rueda permanece siempre girando. Es imperativo y muy necesario trabajar en mejorar cada proceso, cada componente y cada detalle. Cada paso, es un reto que superar.

4 - BIENES DE EQUIPO

4.1 - ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

A continuación, se agrupan y analizan los principales procesos de fabricación en el sector de los composites. Existen varias clasificaciones para estos procesos, desde sistemas de molde abierto y sistemas de molde cerrado [10], a otras en base al tipo de resina, continuidad de las fibras de refuerzo u otros. Se clasifican aquí en tres grupos: procesos manuales, procesos automáticos y sistemas auxiliares, clasificación adecuada para la descripción de bienes equipos, detallados para cada proceso.

4.1.1 - PROCESOS MANUALES

4.1.1.1 - LAMINACIÓN MANUAL

La laminación manual consiste en un proceso de aplicación sucesiva de capas de fibra, tras la cual se añade la resina, habitualmente tras la aplicación de cada capa de fibra, y con la ayuda de un sistema de compactación, como un rodillo, se hace que la resina moje completamente el laminado. Existe un notable número de estrategias diferentes en función de las geometrías locales de las diferentes piezas [11], con una aplicación aun relativamente común para piezas concretas y series cortas o medias.



Figura 13: Procesos de laminación manual y preparación de bolsa de vacío. Cortesía: Inpre



Moldes, mesas de corte para optimización del uso de material.

4.1.1.2 - PROYECCIÓN

Proceso por el cual se aplica a través de un spray la fibra, en formato corto, y la resina para ir cubriendo la superficie de un molde. El proceso, de adición, permite la aplicación manual o automatizada del material, y es comúnmente aplicado a piezas de dimensiones relevantes y pocos requisitos estructurales, debido principalmente a las bajas propiedades de los composites basados en fibra corta. Existe la opción de automatizar el movimiento del cabezal de proyección sobre el molde por medios robóticos [12].



Moldes de pieza, sistemas de bombeo y corte, robots para manipulación de cabezales de proyección

4.1.2 - PROCESOS AUTOMÁTICOS

4.1.2.1 - MOLDEO POR COMPRESIÓN

Proceso de consolidación por presión y temperatura, discontinuo, a través de la compresión de una preforma de material en un molde de dos caras [13], si bien en el caso más sencillo podría moldear con una bolsa de vacío (vacuum bag moulding). Se aplica presión y temperatura habitualmente a través de prensas calefactadas al conjunto y se obtiene la pieza consolidada tras un determinado tiempo, cubriendo todo tipo de geometrías [14].

Pueden operar sobre preformas planas (tejido, no tejido, laminados UD,...), si bien han sido tradicionalmente empleados en procesos de alta cadencia y bajo coste, basados en formatos BMC y SMC y recientemente combinando diferentes formatos [15]. También está integrando aspectos de fabricación aditiva [REF07] u otros procesos como el "Single Point Incremental Forming", no habituales en composites [16].



Prensa calefactada, moldes

4.1.2.2 - MOLDEO POR INYECCIÓN

Empleado en composite basados en fibra corta, se genera una mezcla previa de fibra de refuerzo y resina matriz, termoplástica, que se inyecta en un molde de inyección rígido. Se trata de un proceso análogo a la inyección habitual en plásticos, de reciente interés en aplicaciones sostenibles [17]. Es una estrategia empleada en procesos de sobremoldeo (*overmolding*), con base en un moldeo por compresión de una preforma habitualmente en fibra continua y al que se añade, en el mismo moldeo, una inyección de material reforzado por fibra corta para la generación de geometrías de refuerzo o soporte en la pieza.



Sistemas de inyección, moldes atemperados

4.1.2.3 - ROTOMOLDEO

Proceso en el que se introduce una mezcla o suspensión de materiales en el interior de un molde hembra, y a través del giro del molde, se genera una fuerza centrífuga que permite distribuir el material en la superficie interna del material y pasar a su consolidación a través de temperatura [18]. Extendido en el sector del plástico, es aplicado a la fabricación de composites con fibra discontinua.



Moldes de pieza (hembra), sistemas de rotación de moldes, sistemas de atemperación de moldes.

4.1.2.4 - PROCESOS DE CONFORMADO

Los procesos de conformado son procesos de consolidación, generalmente sin completar el curado de la matriz, en los que una preforma de material, habitualmente plana, se introduce en un sistema que, aplicando presión y/o temperatura, permite dotarle de una geometría tridimensional específica. Existen varias aproximaciones: en el *hot drape forming* (HDF) se calienta la preforma previo al proceso de presión, madurado en la última década [19] para trabajar con matriz termoestable, termoplástica y preformas secas; en el termoconformado [20], es el sistema de moldes el que se calienta y para el que existe todo un rango de variantes, desde el simple doblado de láminas a proceso más complejos de conformado por vacío y/o por presión, estampación [21] o moldeo por diafragma simple (SDF) o doble (DDF), o sistemas avanzados como el glide forming [22] para un conformado continuo deslizando preformas sobre un molde extendido.



Prensa, moldes, centros de HDF

4.1.2.5 - RESIN TRANSFER MOLDING

Proceso de adición de resina y consolidación, en el que la pieza inicial no trae la resina incorporada. Una preforma de material seco se coloca sobre un molde, que se cierra, y a través de un proceso de inyección, se consigue que la resina moje la pieza. A partir de ahí, se consolida el material, habitualmente aplicando calor.

Existen diversas variaciones más recientes del proceso, como el RTM-light, sin contramolde rígido; el RTM por compresión, en el que la resina se introduce previo al cierre de molde en la cavidad en lugar de inyectarse después; el VARTM, donde se aplica vacío al laminado; o el RTM de alta presión, alcanzando presiones de inyección de hasta 130bar y productividades elevadas. De especial interés para la sostenibilidad son los procesos RTM para termoplásticos [23], o T-RTM, donde se realiza una infusión de monómeros, con baja viscosidad, en una preforma seca para después llevar a cabo una polimerización in situ [24].



Moldes, sistemas de inyección de resina

4.1.2.6 - INFUSIÓN POR VACÍO

Proceso similar al RTM, aplicando vacío sobre un laminado cubierto por una bolsa. Se consigue así que la presión atmosférica empuje al laminado contra el molde a la vez que, por una serie de tomas distribuidas, hace que la resina penetre mojarlo completamente, pasando posteriormente a un proceso de consolidación por temperatura de la resina. Existe la opción también de incorporar la resina en láminas, conocida como Resin Film Infusion (RFI).

Se trata de un proceso que, gracias a la aplicación de vacío, permite eliminar la porosidad sin uso de autoclave, siendo ampliamente empleado y existiendo múltiples variaciones, como el método VAP, el método SCRIMP o el método CAPRI entre otros [10]. Recientemente está tendiendo a incrementar la automatización global, desde la aplicación de materiales a la monitorización del avance y curado.



Figura 14: Ejemplo de fabricación automatizada por infusión. Cortesía: MTorres



Moldes, bombas de vacío, bombas de inyección de resina

4.1.2.7 - PULTRISIÓN

Proceso continuo para la generación de piezas de sección homogénea. Fibras UD o formatos más complejos se alimentan continuamente a un molde con aperturas laterales y sección homogénea. El movimiento de las fibras a través del molde hace que se compriman y la resina (aplicada previamente en baño o inyectada) moja el material bajo

esa presión. El molde dispone de una zona calefactada posterior para el curado, generando un perfil de sección constante, también curvado [25]. El movimiento de las fibras se consigue tirando del producto curado a la salida del molde.



Sistemas de inyección, moldes, sistemas de tirado, sistemas de corte

4.1.2.8 - DEVANADO DE FILAMENTOS (FILAMENT WINDING)

Proceso automático de aplicación de fibra continua sobre una superficie en rotación, de modo que, a través de un desplazamiento de la alimentación de material, se consigue que éste cubra la superficie de revolución siguiendo trayectorias helicoidales.

La actual eclosión de aplicaciones de hidrógeno verde está llevando a la evolución de tecnologías aplicadas a la fabricación de depósitos presurizados [26], ampliando los límites de la tecnología en busca de procesos más eficientes con sistemas multitira, geometrías complejas o robotización para nuevas aplicaciones [27] entre otros.



Sistemas de devanado de filamentos completos: desbobinado, baño de resina, bobinado sobre molde, punto-contrapunto para giro de molde

4.1.2.9 - ENCINTADO AUTOMÁTICO

Medios altamente automatizados para la aplicación de composite, en formato de banda, para la generación de laminados. Inicialmente orientada a la aplicación de material unidireccional preimpregnado, se ha extendido a otros materiales, como los termoplásticos y los formatos de material secos, y ha incorporado capacidades adicionales, como la consolidación *in-situ* de termoplásticos [28].

Las tecnologías se dividen habitualmente entre ATL (*Automated Tape Laying*) y AFP (*Automated Fiber Placement*) [29], con diferentes aproximaciones en los sistemas de corte y arrastre de material, siendo la segunda habitualmente más orientada a las geometrías complejas y bandas más estrechas. Se trata de la tecnología más avanzada desde el punto de vista de calidad, flexibilidad y productividad en la fabricación de composites, también para la optimización de material (desecho por debajo del 3%) y la introducción de nuevos conceptos como *steering*.

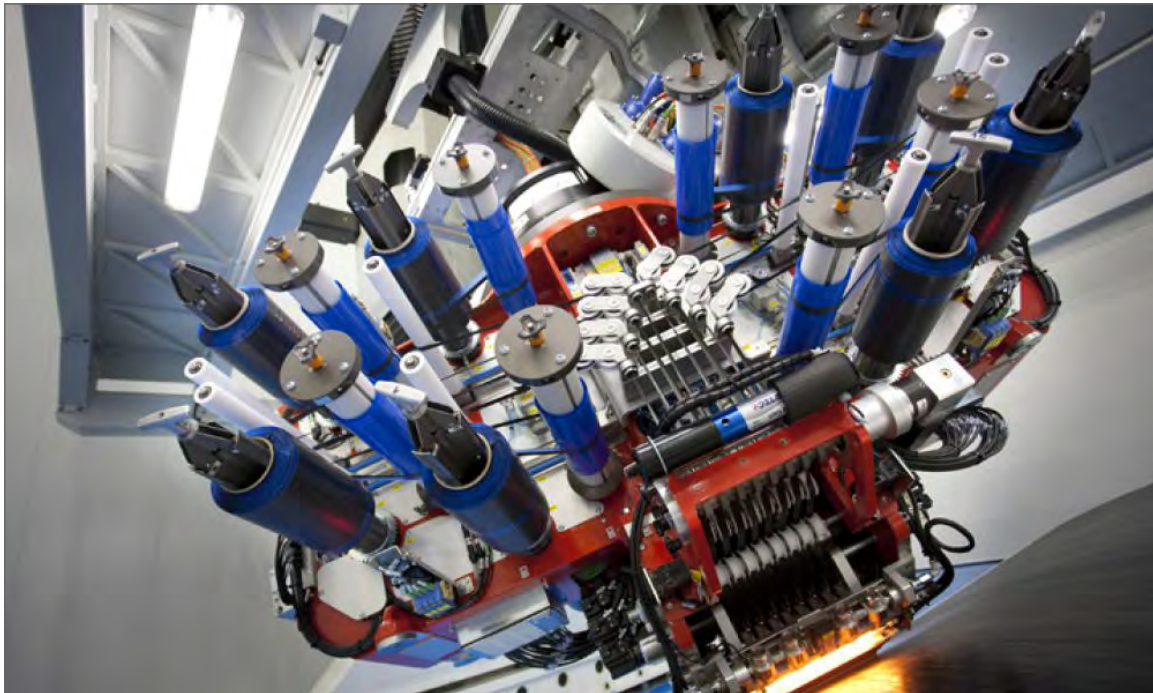


Figura 15: Cabezal de encintado AFP multitira. Cortesía: MTorres



Cabezales de encintado ATL, cabezales de encintado AFP, plataformas automáticas de posicionamiento, moldes de pieza.

4.1.2.10 - FABRICACIÓN ADITIVA

Proceso de adición y consolidación, actualmente en expansión con un gran número de métodos y materiales de aplicación [32]. En composites, las aplicaciones más habituales consisten en la alimentación de material a través de una boquilla de una mezcla de polímero y fibra corta. El polímero habitualmente se funde y se aplica sobre una base o una capa previa, consolidándose sobre ella, creciendo la pieza en la dirección perpendicular al plano de fabricación. Las propiedades obtenidas quedan habitualmente lejos de otros procesos, si bien se detectan buenos resultados en casos concretos [30]. La evolución de la tecnología propone el empleo de materiales basados en fibra continua por aplicación directa [33], o a través de procesos adicionales tras la fabricación aditiva base [31].



Figura 16: Equipo de fabricación para composites y para composites de grandes dimensiones: Cortesía: CNC Bárcenas y MTorres



Equipos de fabricación aditiva, cámaras atemperadas

4.1.2 - PROCESOS Y SISTEMAS AUXILIARES

4.1.2.1 - SISREMAS DE MECANIZADO DE COMPOSITES

Los procesos de mecanizado de composites son semejantes a los de otros materiales, si bien cuentan con características especiales: debido a la naturaleza de los estos materiales las herramientas de mecanizado sufren un notable desgaste, con mecanizados generalmente en seco, además de requerir un control cuidado en campos como el térmico o el respeto a la integridad de las fibras para evitar delaminaciones.

4.1.2.2 - MOLDES Y UTILLAJE

Los moldes son bienes de equipo clave en la fabricación de componentes composites, siendo comunes a prácticamente todos los procesos anteriormente presentados y en continua evolución [36]. Su casuística es amplia, existiendo moldes de laminación, moldes de curado, moldes calefactados, o soluciones más complejas como moldes flexibles. Adicionalmente, existe una variedad de utillajes como sistemas de ensamblaje, equipos de manipulación de componentes,... que ayudan diariamente a evolucionar el sector hacia escenarios más eficientes.



Figura 17: Mecanizado de composites en configuración de pótico con molde flexible. Cortesía: MTorres

4.1.2.3 - SISTEMAS DE INSPECCIÓN

Tradicionalmente, la inspección de piezas en composite, especialmente en sectores de altos requisitos como el aeronáutico, ha sido muy relevante. El desarrollo tecnológico ha permitido evolucionar los procesos y desarrollar sistemas automatizados de inspección on-line de proceso, o de inspección no destructiva de pieza una vez completada su fabricación, entre los que destacan ultrasonidos, sistemas termográficos, resonancia o rayos-X.



Figura 18: Sistema de inspección no destructivo. Cortesía: Tecnatom

4.1.2.4 - SISTEMA DE CURADO

Generalmente se trata de cámaras atemperadas para conseguir el curado de las resinas que impregnan una determinada pieza, cubriendo desde hornos y estufas a sistemas más complejos como los autoclaves, cámaras atemperadas presurizadas para llevar a cabo el curado o consolidación de la resina bajo la aplicación de una presión exterior sobre la pieza que permita la minimización de defectos internos en la misma, también aplicado a termoplásticos.



Figura 19: Horno autoclave. Cortesía: OLMAR

4.1.2.5 - SISTEMAS DE PEPARACIÓN DE FORMATOS

Los sistemas de preparación de formatos contemplan un amplio abanico de tecnologías que, a partir de la materia prima, habitualmente fibras continuas, ofrecen configuraciones avanzadas necesarias como elemento de entrada para múltiples procesos. Algunos son sistemas textiles: procesos de cosido, procesos de tejido, procesos de trenzado o braiding, que permiten configuraciones que facilitan operaciones posteriores. Por otro lado, están los sistemas de preimpregnación: procesos de mojado de bandas de composite, unidireccionales o con configuraciones textiles, que pueden requerir de un slitting posterior; también los sistemas de preparación de semipregs, tipología intermedia entre fibra seca y prepreg. Para generar preformas planas son además habituales las mesas de corte automáticas.

4.2 - SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR Y FUTUROS DESARROLLOS

De acuerdo a JEC Observer [REF28]28 en la actualidad un 40% del procesado de composites se realiza a través de procesos de moldeo por inyección, un 25% está relacionado con infusión de resina y con procesos continuos (pultrusión, filament winding,...), un 15% recoge procesos de compresión y laminación de preregs, y un 20% se mantiene a través de procesos manuales como la laminación manual o la proyección, si bien está reduciéndose. La figura X muestra una distribución de los mismos según sectores de aplicación:

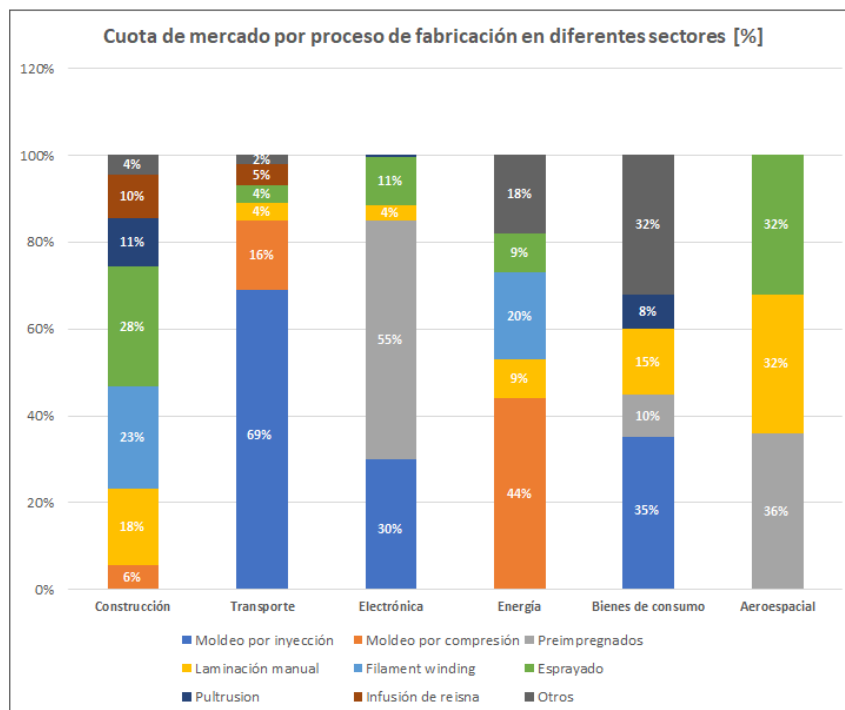


Figura 20: Estimación de implementación de procesos de fabricación por sector de aplicación de composites. Cortesía: Adaptado de JEC Observer

4.2.3 - DIGITALIZACIÓN DE PROCESOS

La digitalización de procesos es recurrente en prácticamente la totalidad de los medios productivos, aprovechando sus capacidades para mejorar el rendimiento de los equipos y/o mejorando la calidad de las piezas fabricadas [31], con la automatización desde los procesos de deposición y manipulación de materiales hasta, más recientemente, la inspección online de defectos en pieza. Estos últimos permiten la extracción de información que, unida a la sensorización de los equipos, permite generar un *big data* capaz de detectar nuevas oportunidades de mejoras, que se irán detectando y explotando en el futuro próximo.

No obstante, siguen existiendo un número relevante de procesos en un amplio número de sectores donde existen posibilidades, especialmente en sectores donde los procesos manuales siguen siendo hoy en día la opción más viable, con necesidad de incorporar automatización y la digitalización asociada.

Dentro de esta digitalización, se encuentra también, en cierto modo, la funcionalización de los propios materiales. Los bienes de equipo deberán adaptarse a estas tendencias para conseguir productos que sean capaces de incorporar y

potenciar las nuevas capacidades que la nanotecnología, la impresión funcional y otras tecnologías puedan aportar al sector.

4.2.4 - DIFUMINACIÓN DE FRONTERAS ENTRE PROCESOS

Los procesos de fabricación han comenzado a hibridarse, mezclando capacidades para ofrecer soluciones más ajustadas u optimizadas para necesidades concretas, y esta tendencia será previsiblemente una constante en el desarrollo de bienes de equipo futuros. Existen numerosos ejemplos relativos a esta difuminación de fronteras entre procesos, como se observa en la figura X, y es esperable que la tendencia continúe, y en parte, dirigidos hacia la democratización de los procesos: sistemas más personalizados, más adaptados a las necesidades concretas de un proceso o pieza específica, en base a una simplificación de procesos habitualmente complejos o en base a la combinación de procesos diferentes, que permitan desbloquear aplicaciones.



Figura 21: PProcesos hibridados: a) Procesos de pull-braiding, mezcla entre pultursión y braifing. Cortesía de: Birka; b) Procesos de inyección de resina con fibra continua en procesos aditivos. Cortesía: Reinforce 3D

En los procesos de conformado existe un notable campo de actuación, dado que, una vez los procesos de fabricación de grandes componentes están cubiertos, son las piezas de dimensiones más reducidas y de complejidad geométrica las siguientes en su optimización, y en este campo estos procesos tienen mayores posibilidades de adaptarse a los requisitos.

4.2.5 - SOSTENIBILIDAD

La orientación a la sostenibilidad está marcando la hoja de ruta reciente de muchos sectores, y los composites están entre ellos.

Las tecnologías de fabricación de termoplásticos están siendo uno de los principales focos de atención en el sector, en gran parte dado el carácter reciclable de estas resinas al ser fundibles y a priori recuperables, en contraposición a las resinas termoestables. Los procesos y bienes de equipo se continuarán adaptando a la operación con esta tipología de material. Los procesos de fabricación fuera de autoclave también están recibiendo un interés especial, tanto desde el punto de vista de reducción de costes de fabricación como del punto de vista de reducción de consumos energéticos, fomentando la evolución de procesos y equipamientos actuales para alcanzar requisitos más altos.

Las aplicaciones en los ámbitos de la sostenibilidad, como ya lo ha sido el sector eólico y lo continuará siendo la economía del hidrógeno, van a continuar fomentando el desarrollo de soluciones y tecnologías asociadas a estas casuísticas concretas, como es el caso del almacenamiento de hidrógeno, actualmente en plena eclosión.

5 - BIBLIOGRAFÍA

[1] Rajak, D.K.; Wagh, P.H.; Linul, E. Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers* **2021**, *13*, 3721. <https://doi.org/10.3390/polym13213721>

[2] Elkington, M., Bloom, D., Ward, C., Chatzimichali, A., & Potter, K. (2015). Hand layup: understanding the manual process. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, *1*(3), 138–151. <https://doi.org/10.1080/20550340.2015.1114801>

[3] Mazumdar, S. (2001). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420041989>



- [4] Greene, J., In *Plastics Design Library, Automotive Plastics and Composites*, William Andrew Publishing, 2021, Page iv, ISBN 9780128180082, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818008-2.09994-3>.
- [5] Eguemann, N., Giger, L., Roux, M., Dransfeld, C., Thiebaud, F., et al.. Compression moulding of complex parts for the aerospace with discontinuous novel and recycled thermoplastic composite materials. *19th International Conference on Composite Materials*, Jan 2013, France. pp.1 - 11. (hal-00983314)
- [6] D.M. Corbridge, L.T. Harper, D.S.A. De Focatiis, N.A. Warrior, Compression moulding of composites with hybrid fibre architectures, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 95, 2017, Pages 87-99, ISSN 1359-835X, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.12.018>.
- [7] <https://www.9tlabs.com/solutions/additive-fusion-solution>, consultada en 26/04/2024
- [8] G. Hussain, Malik Hassan, Hongyu Wei, J. Buhl, Maohua Xiao, Asif Iqbal, Hamza Qayyum, Asim Ahmed Riaz, Riaz Muhammad, Kostya (Ken) Ostrikov, *Advances on Incremental forming of composite materials*, Alexandria Engineering Journal, Volume 79, 2023, Pages 308-336, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.07.045>.
- [9] Rabbi, M.S., Islam, T. & Islam, G.M.S. Injection-molded natural fiber-reinforced polymer composites—a review. *Int J Mech Mater Eng* **16**, 15 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40712-021-00139-1>
- [10] Ortiz, J., Ambrosi, A., Hotza, D., Gómez, S., Understanding centrifugal casting in the manufacture of functionally graded materials, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 42, Issue 15, 2022, Pages 7089-7101, ISSN 0955-2219, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.08.042>.
- [11] <https://www.compositesworld.com/articles/hot-drape-forming>, consultada en 26/04/2024
- [12] Stack, Robert M. and Francis S.Y Lai. "DEVELOPMENT IN THERMOFORMING THERMOPLASTIC COMPOSITES." (2013).
- [13] Richard A. Brooks, Hongyan Wang, Zerong Ding, Jie Xu, Qinghua Song, Haibao Liu, John P. Dear, Nan Li, A review on stamp forming of continuous fibre-reinforced thermoplastics, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Volume 5, Issue 3, 2022, Pages 411-430, ISSN 2588-8404, <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.05.001>.
- [14] <https://www.compositesworld.com/articles/automated-preforming-glide-forming>, consultado en 26/04/2024
- [15] <https://www.compositesworld.com/articles/getting-real-thermoplastic-resin-transfer-molding>, consultado en 26/04/2024
- [16] <https://cms.tecnalia.com/uploads/2022/04/Caprocast.pdf>, consultado en 26/04/2024
- [17] <https://www.iiams.eu/>, consultado en 26/04/2024
- [18] Ismet Baran, *Pultrusion (Second Edition)*, Elsevier, 2023, Page iv, ISBN 9780323916134, <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-391613-4.00014-8>.
- [19] Mohammad Azeem, Hamdan Haji Ya, Mohammad Azad Alam, Mukesh Kumar, Paweł Stabla, Michał Smolnicki, Lokman Gemi, Rehan Khan, Tauseef Ahmed, Quanjin Ma, Md Rehan Sadique, Ainul Akmar Mokhtar, Mazli Mustapha, Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review, *Journal of Energy Storage*, Volume 49, 2022, 103468, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468>.
- [20] Luca Sorrentino, Emmanouel Anamateros, Costanzo Bellini, Luigi Carrino, Giuseppe Corcione, Antonio Leone, Gianluca Paris, Robotic filament winding: An innovative technology to manufacture complex shape structural parts, *Composite Structures*, Volume 220, 2019, Pages 699-707, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.055>.
- [21] Alex Brasington, Christopher Sacco, Joshua Halbritter, Roudy Wehbe, Ramy Harik, Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward, *Composites Part C: Open Access*, Volume 6, 2021, 100182, ISSN 2666-6820, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100182>.
- [22] Zhang, Leen & Wang, Xiaoping & Jingyu, Pei & Zhou, Yu. (2020). Review of automated fibre placement and its prospects for advanced composites. *Journal of Materials Science*. 55. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04090-7>.



- [23] Praveena B.A, Lokesh N, Abdulrajak Buradi, Santhosh N, Praveena B L, Vignesh R, A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential, *Materials Today: Proceedings*, Volume 52, Part 3, 2022, Pages 1309-1313, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.059>.
- [24] Daniel-Alexander Türk, Ralph Kussmaul, Markus Zogg, Christoph Klahn, Bastian Leutenecker-Twelsiek, Mirko Meboldt, *Composites Part Production with Additive Manufacturing Technologies*, *Procedia CIRP*,
- [25] Volume 66, 2017, Pages 306-311, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.359>.
- [26] <https://www.compositesworld.com/news/markforged-launches-first-fr-continuous-fiber-reinforced-plastic-for-3d-printing>, consultado en 26/04/2024
- [27] <https://reinforce3d.com/>, consultado en 26/04/2024
- [28] Yong Li, Yao Xiao, Long Yu, Kang Ji, Dongsheng Li, A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures: materials, structures and processes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 154, 2022, 106762, ISSN 1359-835X, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106762>.
- [29] JEC Observer 2024
- [30] JEC Observer 2021
- [31] Christopher Sacco, Anis Baz Radwan, Andrew Anderson, Ramy Harik, Elizabeth Gregory, Machine learning in composites manufacturing: A case study of Automated Fiber Placement inspection, *Composite Structures*, Volume 250, 2020, 112514, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112514>.
- [32] Rajak, D.K.; Wagh, P.H.; Linul, E. Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers* **2021**, *13*, 3721. <https://doi.org/10.3390/polym13213721>
- [33] Elkington, M., Bloom, D., Ward, C., Chatzimichali, A., & Potter, K. (2015). Hand layup: understanding the manual process. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, *1*(3), 138–151. <https://doi.org/10.1080/20550340.2015.1114801>
- [34] Mazumdar, S. (2001). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420041989>
- [35] Greene, J., In *Plastics Design Library, Automotive Plastics and Composites*, William Andrew Publishing, 2021, Page iv, ISBN 9780128180082, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818008-2.09994-3>.
- [36] Eguemann, N., Giger, L., Roux, M., Dransfeld, C., Thiebaud, F., et al.. Compression moulding of complex parts for the aerospace with discontinuous novel and recycled thermoplastic composite materials. *19th International Conference on Composite Materials*, Jan 2013, France. pp.1 - 11. (hal-00983314)
- [37] D.M. Corbridge, L.T. Harper, D.S.A. De Focatiis, N.A. Warrior, Compression moulding of composites with hybrid fibre architectures, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 95, 2017, Pages 87-99, ISSN 1359-835X, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.12.018>.
- [38] <https://www.9tlabs.com/solutions/additive-fusion-solution>, consultada en 26/04/2024
- [39] G. Hussain, Malik Hassan, Hongyu Wei, J. Buhl, Maohua Xiao, Asif Iqbal, Hamza Qayyum, Asim Ahmed Riaz, Riaz Muhammad, Kostya (Ken) Ostrikov, *Advances on Incremental forming of composite materials*, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 79, 2023, Pages 308-336, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.07.045>.
- [40] Rabbi, M.S., Islam, T. & Islam, G.M.S. Injection-molded natural fiber-reinforced polymer composites—a review. *Int J Mech Mater Eng* **16**, 15 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40712-021-00139-1>
- [41] Ortiz, J., Ambrosi, A., Hotza, D., Gómez, S., Understanding centrifugal casting in the manufacture of functionally graded materials, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 42, Issue 15, 2022, Pages 7089-7101, ISSN 0955-2219, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.08.042>.
- [42] <https://www.compositesworld.com/articles/hot-drape-forming>, consultada en 26/04/2024
- [43] Stack, Robert M. and Francis S.Y Lai. "DEVELOPMENT IN THERMOFORMING THERMOPLASTIC COMPOSITES." (2013).



- [44] Richard A. Brooks, Hongyan Wang, Zerong Ding, Jie Xu, Qinghua Song, Haibao Liu, John P. Dear, Nan Li, A review on stamp forming of continuous fibre-reinforced thermoplastics, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Volume 5, Issue 3, 2022, Pages 411-430, ISSN 2588-8404, <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.05.001>.
- [45] <https://www.compositesworld.com/articles/automated-preforming-glide-forming>, consultado en 26/04/2024
- [46] <https://www.compositesworld.com/articles/getting-real-thermoplastic-resin-transfer-molding>, consultado en 26/04/2024
- [47] <https://cms.tecnalia.com/uploads/2022/04/Caprocast.pdf>, consultado en 26/04/2024
- [48] <https://www.iiams.eu/>, consultado en 26/04/2024
- [49] Ismet Baran, Pultrusion (Second Edition), Elsevier, 2023, Page iv, ISBN 9780323916134, <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-391613-4.00014-8>.
- [50] Mohammad Azeem, Hamdan Haji Ya, Mohammad Azad Alam, Mukesh Kumar, Paweł Stabla, Michał Smolnicki, Lokman Gemi, Rehan Khan, Tauseef Ahmed, Qianjin Ma, Md Rehan Sadique, Ainul Akmar Mokhtar, Mazli Mustapha, Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review, *Journal of Energy Storage*, Volume 49, 2022, 103468, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468>.
- [51] Luca Sorrentino, Emmanouel Anamateros, Costanzo Bellini, Luigi Carrino, Giuseppe Corcione, Antonio Leone, Gianluca Paris, Robotic filament winding: An innovative technology to manufacture complex shape structural parts, *Composite Structures*, Volume 220, 2019, Pages 699-707, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.055>.
- [52] Alex Brasington, Christopher Sacco, Joshua Halbritter, Roudy Wehbe, Ramy Harik, Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward, *Composites Part C: Open Access*, Volume 6, 2021, 100182, ISSN 2666-6820, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100182>.
- [53] Zhang, Leen & Wang, Xiaoping & Jingyu, Pei & Zhou, Yu. (2020). Review of automated fibre placement and its prospects for advanced composites. *Journal of Materials Science*. 55. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04090-7>.
- [54] Praveena B.A, Lokesh N, Abdulrajak Buradi, Santhosh N, Praveena B L, Vignesh R, A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential, *Materials Today: Proceedings*, Volume 52, Part 3, 2022, Pages 1309-1313, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.059>.
- [55] Daniel-Alexander Türk, Ralph Kussmaul, Markus Zogg, Christoph Klahn, Bastian Leutenecker-Twelsiek, Mirko Meboldt, *Composites Part Production with Additive Manufacturing Technologies*, *Procedia CIRP*, Volume 66, 2017, Pages 306-311, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.359>.
- [56] <https://www.compositesworld.com/news/markforged-launches-first-fr-continuous-fiber-reinforced-plastic-for-3d-printing>, consultado en 26/04/2024
- [57] <https://reinforce3d.com/>, consultado en 26/04/2024
- [58] Yong Li, Yao Xiao, Long Yu, Kang Ji, Dongsheng Li, A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures: materials, structures and processes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 154, 2022, 106762, ISSN 1359-835X, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106762>.
- [59] JEC Observer 2024
- [60] JEC Observer 2021
- [61] Christopher Sacco, Anis Baz Radwan, Andrew Anderson, Ramy Harik, Elizabeth Gregory, Machine learning in composites manufacturing: A case study of Automated Fiber Placement inspection, *Composite Structures*, Volume 250, 2020, 112514, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112514>.
- [62] COMPOSITE STRUCTURES: THE FIRST 100 YEARS William G. Roeseler, Branko Sarh, Max U. Kismarton The Boeing Company Microsoft Word - Compos Struct 0427-PlanC Figs3b-13 & 21 - final.doc (iccm-central.org)
- [63] Diagrama de Ashby – Lugae
- [64] Safe operations with composite aircraft [safe-operations-with-composite-aircraft.pdf](#) (mms-safetyfirst.s3.eu-west-



3.amazonaws.com)

[65] <https://aircraft.airbus.com/sites/g/files/jlcbta126/files/2023-02/Airbus-A350-XWB-Airframe-Composite-guide-for-firefighters.pdf>

[66] Europe Composites Resource Guide (trade.gov)

[67] The Plane in Spain | CompositesWorld

[68] Programas y Productos | Alestis Aerospace

[69] Empenaje (aciturri.com)

[70] Programas de Airbus - Aernnova | Web Corporativa



Capítulo 4: METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE CICLO DE VIDA

Edurne Tellechea¹, María Lasheras¹, Itzar Landa¹, Uxua Pérez de Larraya¹

¹ Centro Tecnológico de Automoción y Mecatrónica (NAITEC)

Abstract

Life Cycle Assessment (LCA) of composite materials is the use of a systematic approach to assess environmental impacts throughout all stages of the life cycle. This methodology includes defining the objectives and scope of the study, data collection, impact assessment and interpretation of results. This chapter presents the specific considerations for the LCA of composite materials, analyzing related works on this topic. It is concluded that most of the work published to date uses LCA as a tool for comparative studies between traditional solutions (mostly metallic structures) and lightweight composite solutions. The authors observe that there has also been an increase in the use of green or bio-based composites in the recent years, made from natural fibers and/or resins.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords:

Análisis del ciclo de vida
Análisis
Simulación
Interpretación
Desde la cuna hasta la tumba
Composites biobasados
Final de vida útil

1 - INTRODUCCIÓN

En el contexto global actual donde la sostenibilidad y la eficiencia ambiental son prioritarias, resulta crucial considerar un capítulo en el que abordar la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) al mundo de los materiales compuestos.

Los materiales compuestos se han convertido en aliados estratégicos en muchas de las soluciones ambientales que se están considerando, contribuyendo de manera significativa a la reducción de emisiones de carbono y al fomento de prácticas más sostenibles. Su excepcional relación resistencia-peso y su versatilidad han impulsado su introducción en sectores clave, desde la generación de energía renovable hasta la eficiencia en el transporte y la construcción, en su búsqueda de soluciones ambientalmente responsables.

En este capítulo se pretende recoger una metodología para la evaluación de los impactos ambientales causados a lo largo del ciclo completo de la vida de los materiales compuestos. Resulta imprescindible calcular y estudiar estos impactos ambientales para definir estrategias que permitan reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente y potenciar los efectos positivos.

Los impactos ambientales se calculan empleando herramientas de ACV que estudian los productos, procesos y servicios desde la extracción de las materias primas hasta su tratamiento una vez finalizada su vida útil o función. Emplear la filosofía del ciclo de vida resulta fundamental para evitar que los impactos ambientales se desplacen de una etapa a otra de la vida de un producto.

Por su naturaleza compleja, investigar el impacto ambiental de los materiales compuestos supone un desafío puesto que existe una amplia gama de combinaciones de materiales disponibles y procesos de fabricación para satisfacer la ingeniería personalizada en diferentes sectores, entre otros: aeronáutica, automoción, eólico y ferroviario.

2 - ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El ACV es una herramienta de gestión medioambiental que permite analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y

científica, el impacto ambiental originado por un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida. En la Figura 1 se recoge un ejemplo de un ciclo de vida incluyendo las diferentes etapas del mismo.



Figura 1: Esquema de ciclo de vida de un producto, proceso o actividad

Al realizar un ACV es importante definir los límites del sistema esto es, definir qué procesos del ciclo de vida deben considerarse. Los límites de sistemas típicos que se utilizan incluyen las siguientes etapas:

- De la **puerta a la puerta**: se considera únicamente la etapa de fabricación de un producto.
- De la **cuna a la puerta**: considera las etapas desde la extracción de materias primas hasta la fabricación del producto.
- De la **cuna a la tumba**: considera las etapas desde la extracción de materias primas hasta la eliminación del producto.
- De la **cuna a la cuna**: considera las etapas desde la extracción de materias primas hasta su reconversión en nuevas materias primas tras su vida útil.

Una vez que se han definido los límites del sistema (etapas de interés), se deben identificar y cuantificar todas las entradas y salidas ambientales en cada etapa, siendo entradas ambientales típicas el uso de materiales, energía o agua, y siendo las salidas ambientales las emisiones al aire, agua y suelo.

A todas estas entradas y salidas se les conoce como flujos elementales, y se cuantifican y agrupan en categorías de impacto en función de su efecto sobre el medio ambiente. Hay muchas categorías de impacto diferentes y el ACV permite analizar diferentes categorías de impacto a la vez para un mismo producto, proceso o actividad.

2.1 - METODOLOGÍA DEL ACV

2.1.1 - ESTÁNDARES Y ETAPAS DEL ACV

La Organización Internacional de Normalización (ISO) estableció el marco para la estandarización de la metodología de ACV en 2006 mediante la familia de normas ISO 14040:

- **UNE-EN ISO 14040:2006 | Gestión ambiental. ACV. Principios y marco de referencia.** Esta norma describe los principios y el marco de referencia del ACV entre los que se encuentran: la definición del objetivo y el alcance, el análisis del inventario del ciclo de vida, la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida, el informe y la revisión crítica, las limitaciones y la relación entre las fases del ACV [1].
- **UNE-EN ISO 14044:2006 | Gestión ambiental. ACV. Requisitos y directrices.** Esta norma describe las directrices concretas para la realización de un ACV y especifica metodología para las fases individuales de ACV [2].

La metodología de ACV descrita en ambas normas incluye cuatro etapas clave: 1) definición de objetivo y alcance, 2) desarrollo de inventario de ciclo de vida (ICV), 3) evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV), y 4) interpretación. Estas etapas están relacionadas entre sí y se pueden revisar según se realiza el estudio (Figura 2).



Figura 2: Etapas de la metodología de ACV

Además, existe una Plataforma Europea de Evaluación del Ciclo de Vida (<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>) donde el International Life Cycle Data system (ILCD) ha publicado varios documentos que complementan las normas internacionales, el más significativo de ellos es ILCD Handbook [3]. También han desarrollado una base de datos propia, la ILCD Data Network. Esta plataforma europea fue creada para promocionar el trabajo y la aplicación del ACV tanto en la industria como en la administración. Su objetivo es trabajar en la homogeneización metodológica y de tratamiento de datos para obtener herramientas de trabajo comunes para todos los ACVs. En los siguientes apartados se describen los aspectos más importantes de las etapas del ACV.

2.1.2 - ETAPA 1: OBJETIVO Y ALCANCE

La primera fase del ACV consiste en definir el objetivo y alcance del estudio.

El **objetivo** del estudio debe especificar de forma clara y coherente la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio (marketing, ecodiseño de producto, comparación de productos, etc.), las personas a las que va dirigido y si se pretende utilizar los resultados en aseveraciones comparativas previstas para su divulgación.

El **alcance** debe definir la extensión del estudio, los **límites del sistema** (etapas de interés del ciclo de vida) y las categorías de impacto que serán analizadas. En función del objetivo del estudio, se definirá si el modelado es atribucional (para conocer los impactos asociados a cada etapa del ciclo de vida) o consecuencial (para estimar la variación prevista de los impactos, por ejemplo, al implantar una nueva tecnología). También identifica la función del producto y la **unidad funcional** que es una característica de desempeño cuantificable de un sistema de producto relacionada con su función. La unidad funcional debe describir el sistema de acuerdo con el objetivo y debe permitir comparar diferentes productos que cumplen una misma función. También debe considerar la vida útil del producto.

Adicionalmente, en el alcance se consideran las suposiciones, los juicios de valor, las limitaciones, los requisitos de calidad de los datos, el tipo de revisión crítica - si la hay - y el tipo y formato del informe requerido para el estudio.

Por la naturaleza iterativa del ACV, en algunos casos el objetivo y el alcance del estudio deben revisarse por limitaciones imprevistas o por haber obtenido más información.

2.1.3 - ETAPA 2: ANÁLISIS DE INVENTARIO

El análisis de inventario es la fase del ACV que consiste en identificar y cuantificar todas las entradas (materias primas

y energía) y las salidas (emisiones al aire, al agua y al suelo) de cada uno de los procesos unitarios definidos. Se considera que es el paso que más tiempo requiere en el ACV.

En esta etapa es habitual realizar diagramas de flujo que proporcionan una indicación visual de los procesos que se consideran dentro del alcance del estudio de ACV y, por tanto, qué flujos de entrada y salida (flujos elementales) deben recopilarse en cada etapa. La Figura 3 recoge un ejemplo de diagrama de flujo para un componente de material compuesto.

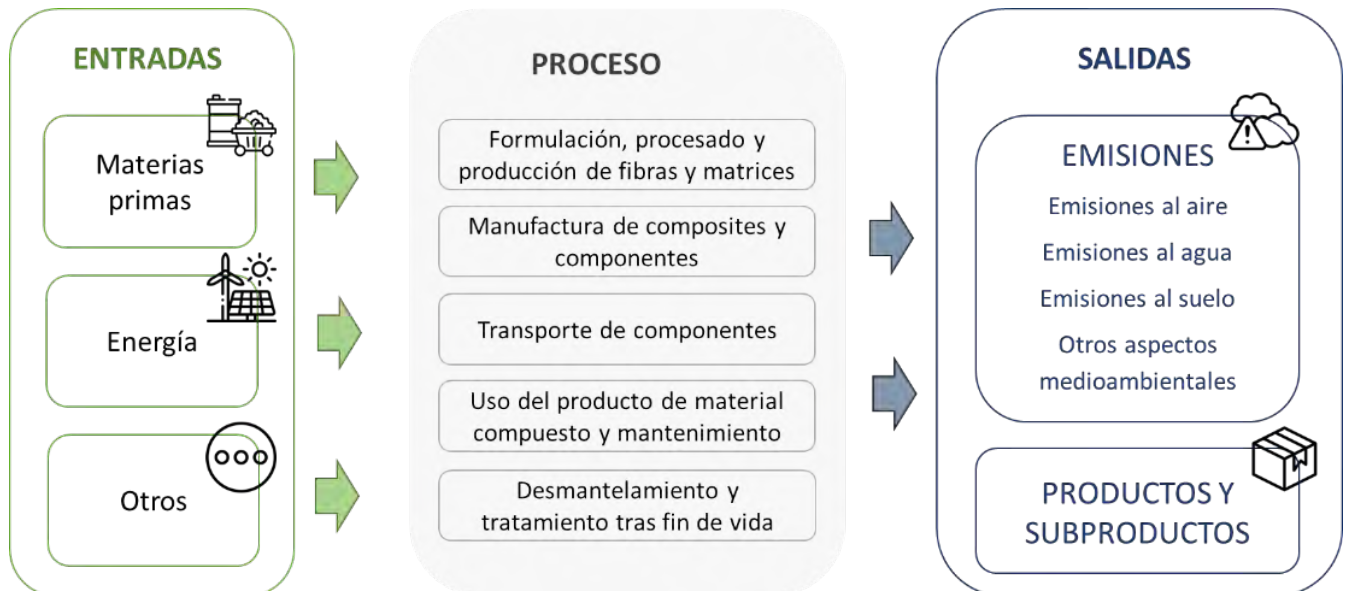


Figura 3: Flujos elementales en la fabricación de un componente de material compuesto

Todos los datos de entradas y salidas deben ir referenciados a las unidades de proceso. Los datos pueden ser primarios (obtenidos directamente del proceso), secundarios (bibliográficos, de bases de datos, modelados a partir de otros procesos, etc.), o pueden provenir de suposiciones cuando no es posible su identificación y/o cuantificación. Los datos primarios son una representación más precisa de los procesos específicos a analizar. Los datos secundarios se utilizan cuando no es posible medir los datos primarios. Es importante utilizar datos secundarios que sean lo más similares posible al proceso analizado para garantizar que los resultados reflejen lo más fielmente posible el escenario real. Cualquier fuente de datos utilizada dentro de un análisis de ACV debe registrarse en el informe de ACV.

Teniendo en cuenta la cantidad de datos necesarios para realizar un ACV y la influencia de los datos en el resultado final, es muy importante que los datos utilizados en el estudio sean de calidad, y estos deben analizarse y validarse. Para garantizar la calidad de los datos se deben documentar una serie de requisitos, tales como la correlación geográfica, temporal y tecnológica, la confiabilidad e integridad de los datos, etc.

2.1.4 - ETAPA 3: EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

La evaluación de impactos ambientales es la fase del ACV en la que el inventario de entradas y salidas es transformado en indicadores de potenciales impactos ambientales. Estos indicadores se suelen expresar en “unidades equivalentes”. Las categorías de impacto ambiental a su vez se pueden agrupar en tres áreas de protección: Salud humana, Ecosistemas y Disponibilidad de recursos (Figura 4) o, más aún, se pueden agrupar en un impacto ambiental total.

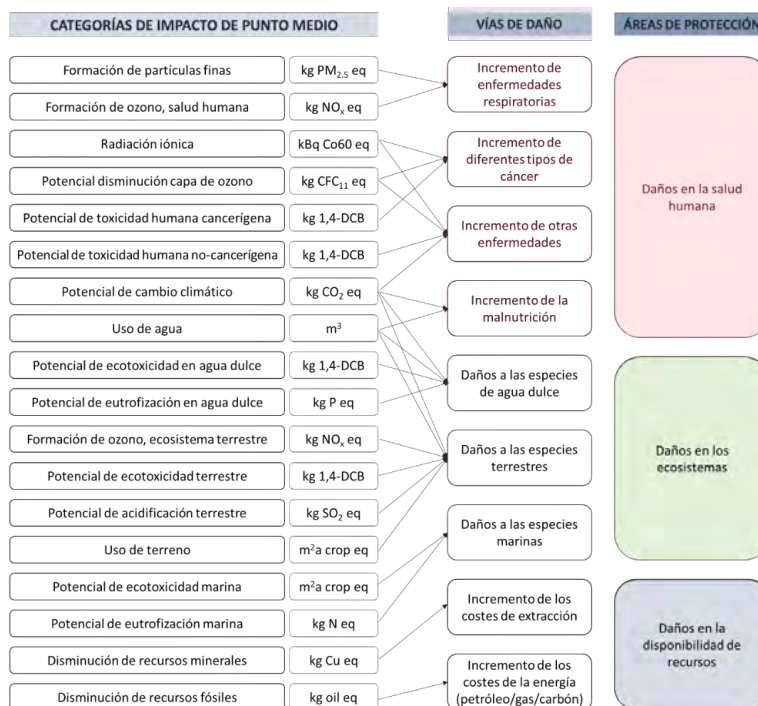


Figura 4: Resumen de las categorías de impacto que se contemplan en el método ReCiPe2016 y su relación con las áreas de protección.

En la fase de evaluación de impactos ambientales se distinguen elementos obligatorios y elementos opcionales a realizar. El primero de los elementos obligatorios es definir qué categorías de impacto son de interés (Potencial de cambio climático, Potencial de acidificación terrestre, Potencial de eutrofización en agua dulce, etc.). Esto se suele decidir en la fase de definición de objetivos y alcance. El segundo elemento obligatorio es la clasificación, que consiste en asignar los datos del inventario a cada categoría de impacto, por ejemplo: CO₂, CH₄, N₂O, CFC, HFCs, CH₃Br pertenecen a la categoría de Potencial de cambio climático. Y, finalmente, el tercer elemento es la caracterización, que consiste en el cálculo de los resultados de los indicadores de categoría, y se expresa en “unidades equivalentes” (por ejemplo: kg CO₂ equivalente para el Potencial de cambio climático).

Dependiendo del objetivo y alcance del ACV, la etapa de evaluación de impactos ambientales también puede incluir una serie de elementos opcionales que son la normalización, la agrupación, la ponderación y el análisis de la calidad de los datos.

Existe cierta controversia sobre cómo mostrar los resultados de la evaluación de impactos ambientales, si con indicadores de punto medio, punto final o de puntuación única. Los indicadores de punto medio presentan potenciales de impacto basados en métodos científicamente sólidos. Sin embargo, los métodos de punto final crean incertidumbre ya que su modelado de las rutas de impacto es más complejo. La puntuación única permite una comparación rápida de diferentes productos o escenarios; el inconveniente de este enfoque es que se pierde mucha información y difícilmente se pueden identificar los puntos críticos del estudio.

Para el desarrollo de los pasos descritos anteriormente existen metodologías de aplicación a nivel científico. La selección de la metodología adecuada para el análisis dependerá de las categorías de impacto de interés en el estudio, la validez regional y la validez temporal.

Algunas metodologías de evaluación de impacto más importantes y actualizadas son: IMPACT2002+, ILCD 2011 Midpoint+, IPCC 2013, CML – IA baseline 2016, ReCiPe 2016, y TRACI. Algunos de estos métodos permiten calcular los resultados de los indicadores en punto medio y final (IMPACT2002+ y ReCiPe 2016).

2.1.4.1 - HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS PARA EL ACV

Existen diferentes herramientas informáticas para el cálculo de ACV de productos, servicios o procesos basados en la metodología de ACV. Las principales herramientas más desarrolladas y con un mayor nivel de detalle son SimaPro (PRé Sustainability B.V.), GaBi (Sphera Solutions, Inc.), y OpenLCA (GreenDelta). SimaPro y GaBi son herramientas de pago, mientras que OpenLCA es una herramienta gratuita y de software de código abierto. Comúnmente,

profesionales especializados en ACV suelen emplear una de estas tres herramientas, requiriendo un conocimiento de la metodología de ACV para utilizarlas con eficacia.

El software GaBi tiene su base de datos propia, mientras que los softwares SimaPro y OpenLCA no lo tienen. Los tres pueden trabajar con una gran variedad de bases de datos libres o de pago tales como: ecoinvent, ELCD, Agri-footprint, ESU world food LCA database, Carbon Minds, etc.

Las tres herramientas permiten utilizar las metodologías de evaluación de impacto más importantes mencionadas anteriormente. Además de estudios detallados de ACV, las tres permiten calcular la huella de carbono, huella de agua y huella hídrica, la declaración ambiental de producto y la huella ambiental de la Unión Europea.

Por otro lado, también se han desarrollado numerosas herramientas de ACV simplificadas de acceso libre en la web. Algunas de ellas calculan únicamente la huella de carbono y/o la energía, y otras calculan una serie de categorías de impacto. Estas herramientas presentan simplificaciones en diferentes niveles, como en los datos de entrada, los métodos de cálculo y en la interfaz gráfica, y se debe tener cuidado al utilizarlas ya que quizás no cumplan los requisitos del proyecto. La elección de la herramienta dependerá de las necesidades específicas del usuario, la complejidad del análisis y la disponibilidad de datos.

2.1.5 - ETAPA 4: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La interpretación de resultados es la fase del ACV en la que los resultados del inventario y la evaluación son interpretados de acuerdo con el objetivo y alcance definidos inicialmente. En esta fase se analizan los resultados obtenidos, se identifican los elementos más significativos y las limitaciones, se obtienen conclusiones y pueden emitirse recomendaciones dirigidas a la reducción de los impactos ambientales.

La etapa de interpretación de resultados también puede incluir la evaluación de la calidad de los resultados obtenidos: verificación de integridad, sensibilidad, incertidumbre y coherencia. Puesto que el ACV es un proceso iterativo, puede ser necesario revisar las etapas anteriores para garantizar que los resultados obtenidos son coherentes con el objetivo y alcance planteados y que la calidad de los datos es aceptable para el estudio.

3 - ACV DE COMPOSITES

En el ámbito de los materiales compuestos, la aplicación de la metodología de ACV se ha vuelto esencial en los últimos años para comprender los impactos ambientales tanto positivos como negativos asociados a su integración en diferentes sectores. A continuación, se recoge una visión general de esta aplicación derivada de la revisión bibliográfica realizada sobre investigaciones vinculadas a los sectores aeroespacial, automotriz, ferroviario y eólico.

En la mayoría de los trabajos analizados se realiza una **comparación entre la solución tradicional** (por ejemplo, basada en materiales metálicos) **y su alternativa** empleando materiales compuestos [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. La realización de esta comparativa desde una perspectiva medioambiental es esencial para evaluar la ventaja del uso de los materiales compuestos. En general, los materiales compuestos ofrecen beneficios medioambientales significativos en comparación con las soluciones tradicionales siempre que se considere todo el ciclo de vida: desde la fabricación hasta la disposición final, incluyendo la fase de uso del producto. Esto se debe a varias razones: los materiales compuestos suelen ser más ligeros que los metales, lo que puede reducir significativamente el consumo de energía durante la fase de uso, especialmente en el sector aeroespacial y automoción, donde la eficiencia del combustible se relaciona directamente con el peso. Además, el aligeramiento debido al uso de los materiales compuestos puede conllevar un menor desgaste de componentes. Los materiales compuestos a menudo son más resistentes a la corrosión que los metales, lo que puede traducirse en una menor necesidad de reemplazo o mantenimiento durante la fase de uso y, por lo tanto, una vida útil más larga. Sin embargo, la obtención de las materias primas (resinas y fibras) y la fabricación de los materiales compuestos implican también procesos químicos intensivos con grandes consumos energéticos. Además, en los materiales compuestos resulta difícil separarlos en los componentes originales, lo que dificulta el proceso de reciclaje, pudiendo derivar en grandes cantidades de residuos. Estos impactos negativos están siendo compensados con los últimos avances: tecnologías de reciclaje, investigación en materiales más ventajosos ambientalmente (fibras naturales, resinas biobasadas, resinas reciclables, termoplásticos, etc.) y en prácticas de fabricación más eficientes.

La **unidad funcional más utilizada** en estos estudios suele ser un 1 kg de material [8], [9], [11] o una pieza concreta (una puerta de coche, una pala de un aerogenerador, parte de un fuselaje de un avión, etc.) [4], [7], [12], [13] que permite evaluar y comparar el impacto ambiental entre diferentes materiales o diseños. La elección de una pieza refleja las cantidades típicas manejadas en la producción y uso de materiales compuestos, facilitando la comprensión y la toma de decisiones para profesionales del sector.

La tendencia actual es realizar los estudios de ACV **desde la cuna hasta la tumba** [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12],

[13]. Esto supone una evaluación integral que abarca todas las etapas del ciclo de vida incluida la fase de uso, que implica una mayor reducción de impactos ambientales al emplear materiales compuestos ligeros frente a otros más pesados.

En lo que se refiere al **inventario** de los estudios analizados, se identifican cuatro orígenes de datos: 1) datos medidos in situ, 2) datos extraídos de bases de datos (ej.: Ecoinvent), 3) datos obtenidos de literatura y 4) datos estimados por los autores.

En los artículos revisados los **programas** más utilizados para el cálculo de impactos ambientales son el Simapro [4], [6], [8], [9], [12], [13], OpenLCA [10] y GaBi [11]. Además, la Asociación europea de la industria de materiales compuestos (EuCIA) desarrolló una herramienta gratuita (Eco Impact Calculator) específicamente para materiales compuestos que cubre una variedad de categorías de impacto y utiliza datos de fabricantes y proveedores de materiales de toda Europa, así como bases de datos como Ecoinvent.

Existen diferentes **metodologías** que se pueden aplicar a los datos de inventario para calcular los resultados finales de ACV. En los artículos analizados el más utilizado es el método IMPACT 2002+ [4], [7], [8], [9], [12], [14]. Los métodos ReCiPe [6], [13] y el TRACI [10], [11] también se suelen utilizar habitualmente. Los estudios analizados suelen presentar o bien los indicadores de punto medio, o los de punto final o de daño.

De entre los estudios analizados, se han identificado trabajos donde comparan los impactos ambientales originados por composites termoestables y composites termoplásticos [7], [15]. Aunque los composites termoplásticos se pueden reciclar y reutilizar, no siempre presentan mejores impactos ambientales. El material del termoplástico (PA, PC, PPS, etc.) y el proceso de fabricación pueden variar el resultado [7]. Además, la mayoría de los estudios se centran en el análisis de los indicadores de energía, el potencial de cambio climático, y en los indicadores de punto final [7], pero también es importante tener en cuenta los diferentes impactos ambientales, ya que estos proporcionan una mejor representación global del desempeño ambiental del composite. Así, por ejemplo, para composites de resina epoxi y composite termoplástico de sulfuro de polifenileno (PPS) se ha concluido que en el ACV en punto medio, de los 18 indicadores estudiados, 9 indicadores son mejores para el composite termoestable y los otros 9 para el composite termoplástico, siendo el potencial de cambio climático uno de ellos [15].

En los últimos años los estudios de LCA relacionados con **composites biobasados** o verdes se han incrementado considerablemente [16]. A diferencia de los compuestos sintéticos convencionales, los compuestos verdes están fabricados con materiales naturales, tanto la fibra como la matriz. En estos materiales resulta interesante realizar un estudio completo de la cuna a la tumba, ya que son materiales que presentan menor impacto en las fases de producción y fin de vida, pero sus propiedades mecánicas no igualan la de los materiales compuestos tradicionales, lo cual deriva en una menor eficiencia durante su uso en comparación con compuestos tradicionales. Al seleccionar las categorías de impacto es importante considerar que estos composites provienen de cultivos naturales y se deberían incluir o tener en cuenta los impactos relacionados con la agricultura, como el potencial de cambio climático, la acidificación, la eutrofización, el agotamiento abiótico y el uso de la tierra. En la bibliografía se afirma que tienen menores impactos ambientales debido a su origen renovable y su fácil reciclaje [17].

En cuanto al **final de vida útil** de los composites, el reciclaje industrial no está extendido y, en la mayoría de los casos, la gestión de estos residuos consiste en transportarlos a vertederos de residuos no peligrosos. Este tratamiento puede generar emisiones tóxicas y contribuye a la acumulación de residuos. Para resolver este problema se han desarrollado tecnologías para el reciclaje de materiales compuestos que se tratan en otros capítulos de este libro blanco. En esta línea se han realizado estudios de ACV de las diferentes opciones de reciclaje y fin de vida de los composites con el objetivo de analizar desde un punto de vista medioambiental los distintos escenarios y así poder identificar los procesos más prometedores [8], [12], [18]. Por ejemplo, se han analizado varias rutas de tratamiento de residuos de composite tales como deposición en vertedero, incineración, procesos de reciclaje mecánico, pirólisis, reciclaje de lecho fluidizado y procesos de reciclaje químico. Los resultados obtenidos en los ACV no siempre están alineados, ya que muchos de estos procesos de reciclaje necesitan de fuentes de energía y dependiendo de la fuente que se seleccione las conclusiones pueden variar [6], [14]. Algunos resultados muestran que en las categorías de punto final los procesos de pirólisis, reciclaje de lecho fluidizado y reciclaje químico tienen menor impacto debido a la recuperación de energía y la cogeneración de calor y electricidad. Esto también se debe al mayor grado de recuperación de un posible producto reutilizable con un alto contenido de energía incorporado cuando se compara con las rutas de reciclaje mecánico [8], [12].

En la siguiente tabla se resumen los principales aspectos del ACV de materiales compuestos de los trabajos analizados.



Autor (Año)	Sector	Unidad funcional	Límites del sistema	Software / BBDD / metodología de evaluación
Wu, M. et al. (2023) [4]	Aeroespacial	Fabricación de una puerta para el avión ATR 72.	Cuna a la puerta	* SimaPro 9.3. * Datos primarios y datos secundarios: Ecoinvent 3.8 y ELCD * Impact 2002+
Valizadeh, A. et al. (2022) [5]	Construcción	100 pies lineales de SAFRAIL Polímero reforzado con fibra	Cuna a la Tumba	* eTool software. * Datos primarios. Datos Secundarios: Australasian Database. Ecoinvent * EN 15978
La Rosa, A.D. et al. (2013) [6]	Construcción	Codo de tubería	Cuna a la Tumba	* SimaPro * Datos primarios: Procesos de fabricación de composites. Datos secundarios: Ecoinvent * ReCiPe 2008. Punto final
Wegmann, S. et al. (2022) [7]	Automoción	Un capó de coche, dimensiones exteriores de 1,6 × 1,5 m2	Cuna a la Tumba	* No mencionan el software. * Datos secundarios: Experimentos, literatura y Ecoinvent. * Impact 2002+. Punto final
Stergiou, V. et al. (2022) [8]	Aeroespacial	1 kg of CFRP	Cuna a la Tumba	* SimaPro 8.3 * Ecoinvent v3.3 * IMPACT 2002+. Punto final
Xiarchos, I. (2019) [9]	Aeroespacial	1 kg de a) GFRP y b) CFRP	Cuna a la Tumba	* SimaPro * Datos primarios * IMPACT 2002+. Punto medio y final
Ramachandran, K. et al. (2023) [11]	General	Producción de 1 kg de compuestos de fibra de carbono	Cuna a la Tumba	* GaBi * Datos primarios. Datos secundarios: bases de datos y literatura. * TRACI 2.0 y CML-IA. Punto medio
Khalil, Y.F. (2017) [10]	Aeroespacial	Producción de 1 m ³ de material de aeronaves.	Cuna a la Tumba	* OpenLCA * Datos secundarios: Ecoinvent * TRACI 2.1. Punto medio
Timmis, A. et al. (2014) [12]	Aeroespacial	Sección 46 del fuselaje del Boeing 787	Cuna a la Tumba	* SimaPro 7.2 * Datos secundarios: Ecoinvent y Literatura * Eco-indicator 99 (E) V2.05
Atescan-Yuksel, Y. (2024) [13]	Aeroespacial	Paneles de revestimiento de ala	Cuna a la Tumba	* SimaPro 9.2. * Ecoinvent 3 y estudios previos * ReCiPe 2016 Punto Medio
Merugula, L.A. et al. (2010) [19]	Eólico	Actividad por kWh de electricidad generada	Cuna a la Puerta	* SimaPro * Literatura * Demanda acumulativa de energía
Özdemir, A. et al. (2020) [20]	Ferroviario	Producción de un panel sándwich para carrocería	Cuna a la Tumba	* SimaPro * Ecoinvent y Literatura * CML-IA v3.0

Tabla 1: Principales aspectos del ACV de materiales compuestos.

4 - CONCLUSIONES

El ACV es cada vez más importantes para procurar la preservación del medio ambiente. El cálculo de impactos ambientales es fundamental para introducir cambios en los materiales compuestos que promuevan la sostenibilidad ambiental de cualquier producto o proceso.

Al realizar este tipo de estudio es importante definir el objetivo y alcance del análisis. Una vez que se han identificado los límites del sistema, se identifican y cuantifican todas las entradas y salidas ambientales de cada una de las etapas de interés. A partir de ello se realiza la evaluación de los impactos ambientales y la interpretación de resultados con el objetivo de analizar los resultados obtenidos, identificar los elementos más significativos y las limitaciones, obtener conclusiones y de poder emitir recomendaciones dirigidas a la reducción de los impactos ambientales.



En España, tanto empresas como centros tecnológicos han integrado ya el análisis ambiental de productos y procesos en sus prácticas de desarrollo. Además, desde hace años, en las convocatorias de proyectos nacionales y europeas se precisa un ACV de las soluciones desarrolladas. Esta consideración del ACV refleja una concienciación del sector de materiales compuestos con la sostenibilidad y la necesidad de implementar prácticas más respetuosas con el medio ambiente.

De la revisión de los artículos analizados para preparar este capítulo cabe resaltar que la mayoría de los trabajos emplea el ACV como herramienta para estudios comparativos entre soluciones tradicionales (mayoritariamente estructuras metálicas) y soluciones aligeradas de material compuesto. El objetivo principal de estos estudios es obtener datos para la selección, diseño y optimización de componentes, así como generar información sobre puntos críticos ambientales, oportunidades de ahorro y compensaciones.

En general, los materiales compuestos ofrecen beneficios medioambientales significativos en comparación con las soluciones tradicionales siempre que se considere todo el ciclo de vida, desde la fabricación hasta la disposición final, incluyendo la fase de uso del producto. La durabilidad y ligereza de los materiales compuestos contribuyen a la eficiencia energética, reduciendo el consumo de combustible en sectores como el aeroespacial y la automoción.

Merece mención especial el reciente incremento del uso de composites verdes o biobasados, fabricados con materiales naturales, tanto fibras como resinas. Aunque los materiales biobasados tienen un impacto medioambiental menor en las fases de producción y fin de vida, su uso en los diferentes campos todavía es limitado debido principalmente al aumento de peso con respecto a los compuestos tradicionales.

En resumen, el ACV se ha convertido en una herramienta indispensable en el desarrollo de materiales compuestos en España, contribuyendo significativamente a la integración de prácticas sostenibles y al cumplimiento de estándares ambientales en el sector.

5 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] «UNE-EN ISO 14040:2006. | Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.» Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- [2] «UNE-EN ISO 14044:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices.» Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- [3] *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps*. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/>
- [4] M. Wu, J. Sadhukhan, R. Murphy, U. Bharadwaj, y X. Cui, «A novel life cycle assessment and life cycle costing framework for carbon fibre-reinforced composite materials in the aviation industry», *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 28, n.º 5, pp. 566-589, may 2023, doi: 10.1007/s11367-023-02164-y.
- [5] A. Valizadeh y F. Aslani, «Life-Cycle Assessment of Fibre-Reinforced Polymers Dwellings Compared to Traditional Structures», *Sustainability*, vol. 14, n.º 19, 2022, doi: 10.3390/su141911887.
- [6] A. D. La Rosa *et al.*, «Life cycle assessment of a novel hybrid glass-hemp/thermoset composite», *Journal of Cleaner Production*, vol. 44, pp. 69-76, abr. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.11.038.
- [7] S. Wegmann *et al.*, «A life cycle analysis of novel lightweight composite processes: Reducing the environmental footprint of automotive structures», *Journal of Cleaner Production*, vol. 330, p. 129808, ene. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129808.
- [8] V. Stergiou, G. Konstantopoulos, y C. A. Charitidis, «Carbon Fiber Reinforced Plastics in Space: Life Cycle Assessment towards Improved Sustainability of Space Vehicles», *Journal of Composites Science*, vol. 6, n.º 5, 2022, doi: 10.3390/jcs6050144.
- [9] Xiarchos, Ioannis, Morozinis, Athanasios K., y Charitidis, Costas, «Life cycle assessment and possible impacts of CFRPs for space applications», *MATEC Web Conf.*, vol. 304, p. 07006, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201930407006.
- [10] Y. Khalil, «Eco-efficient lightweight carbon-fiber reinforced polymer for environmentally greener commercial aviation industry», *Sustainable Production and Consumption*, vol. 12, pp. 16-26, 2017.
- [11] K. Ramachandran, C. L. Gnanasagaran, y A. Vekariya, «Life cycle assessment of carbon fiber and bio-fiber composites prepared via vacuum bagging technique», *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 89, pp. 124-131, mar.



2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.01.068.

[12] A. J. Timmis, A. Hod\vzić, L. S. C. Koh, M. S. Bonner, A. W. Schäfer, y L. M. Dray, «LIFECYCLE ASSESSMENT OF CFRP AIRCRAFT FUSELAGE», 2014. [En línea]. Disponible en: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:224397658>

[13] Y. Atescan-Yukse, A. Mills, D. Ayre, K. Koziol, y K. Salonitis, «Comparative life cycle assessment of aluminium and CFRP composites: the case of aerospace manufacturing», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, feb. 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13241-3.

[14] R. J. Tapper, M. L. Longana, A. Norton, K. D. Potter, y I. Hamerton, «An evaluation of life cycle assessment and its application to the closed-loop recycling of carbon fibre reinforced polymers», *Composites Part B: Engineering*, vol. 184, p. 107665, mar. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107665.

[15] O. C.J., S. J., y D. C.A., «Comparative life cycle assessment of thermoplastic and thermosetting CFRP in aerospace applications», presentado en Proceedings of the 20th European Conference on Composite Materials: Composites Meet Sustainability, EPFL Lausanne, Composite Construction Laboratory., jun. 2022, pp. 331-338.

[16] *Life Cycle Assessment of Eco-Friendly Composites. Book: Sustainability of Green and Eco-friendly Composites*, 1st Edition. CRC Press, 2023.

[17] A. S. Ead, R. Appel, N. Alex, C. Ayranci, y J. P. Carey, «Life cycle analysis for green composites: A review of literature including considerations for local and global agricultural use», *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 16, p. 15589250211026940, ene. 2021, doi: 10.1177/15589250211026940.

[18] P. A. Vo Dong, C. Azzaro-Pantel, y A.-L. Cadene, «Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 133, pp. 63-75, jun. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.024.

[19] A. Özdemir, A. Önder, "An environmental life cycle comparison of various sandwich composite panels for railway passenger vehicles applications", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, pp. 45076-45094, may 2020, doi: 10.1007/s11356-020-10352-8

[20] L. A. Merugula, V. Khanna and B. R. Bakshi, "Comparative life cycle assessment: Reinforcing wind turbine blades with carbon nanofibers, "Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, Arlington, VA, USA", pp. 1-6, 2010, doi: 10.1109/ISSST.2010.5507724.



Capítulo 5: IDENTIFICACIÓN DE LOS COMPOSITOS PARA SU RECICLADO

Xoan Xosé Fernández Sánchez-Romate¹, María Sánchez Martínez¹

¹ Área de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos

Abstract

Currently, there is a growing interest in the development of reusable polymer matrix composite materials. In this regard, it is commonly known that although thermoplastic matrices can be reprocessed, they generally have worse mechanical properties, and their processing is much more complex than that of thermoset matrices, due to the high viscosities involved during manufacturing processes [1]. Therefore, the development of new thermoset matrices that can be reused is key. In this context, solutions such as polymers based on dynamic covalent bonds emerge, which allow the material to be reprocessed by heating it above its T_g [2], as seen in previous chapters. This would allow reprocessing similar to that of thermoplastic polymers, enabling these composite materials to be used again for new applications.

Therefore, considering the development of these new materials and the existing concerns about developing more sustainable manufacturing techniques and materials, the need arises to establish new methods for the proper identification of both the composite material waste generated and those composite materials that are recycled, i.e., those that are reused. Products can be labeled to facilitate better recovery at the end of their useful life (End of Life, EOL), especially due to the wide variety of possible material compositions in composite materials. Labeling is mandatory for certain plastic products in the automotive industry (including composite materials) according to the End-of-Life Vehicle (ELV) directive [3]. There are standards for labeling products in other sectors. Some high-value products in the aerospace and automotive industries now incorporate Radio Frequency Identification (RFID) tags for tracking product life cycle management (Product Life Management, PLM) and ensuring provenance and traceability. These tags may contain data about the material to facilitate higher-value recycling and could be linked to virtual databases that include material origin, manufacturing, and usage data throughout the entire life cycle.

Proper identification of components can also be done through the Digital Product Passport proposed as part of the ESPR (Ecodesign for Sustainable Products Regulation) [4], to maintain adequate traceability of products in terms of material technical characteristics, repair information, etc., so that consumers have a complete understanding of the materials and their environmental impact, in order to establish appropriate reuse techniques. The ESPR, in turn, aims to design components that result in more reliable, durable, reusable, repairable, easy-to-maintain, recyclable, and energy-sustainable products.

In addition, waste can be classified using EWC codes (European Waste Catalogue). This can enable proper identification of waste that may be more hazardous or waste that could be reused at the end of its first life cycle.

Therefore, this chapter aims to address, in a simple manner, those methods for identifying composite materials, both focused on the traceability of products through digital passports, and for managing the waste generated during their service life using EWC codes.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe un creciente interés en el desarrollo de materiales compuestos de matriz polimérica que sean reutilizables. En ese sentido, es comúnmente sabido que, aunque las matrices termoplásticas pueden ser reprocesadas, generalmente presentan peores propiedades mecánicas y su procesamiento es bastante más complejo que en el caso de las matrices termoestables, debido a las altas viscosidades involucradas durante los procesos de fabricación [1]. Por lo tanto, el desarrollo de nuevas matrices termoestables que puedan volver a ser aprovechadas es clave. En ese contexto, surgen soluciones como los polímeros basados en enlaces covalentes dinámicos, que permiten un reprocesado del material al calentar por encima de su T_v [2], tal y como se ha visto en capítulos anteriores. Esto permitiría un reprocesado similar al de los polímeros termoplásticos, pudiendo estos materiales compuestos volver a



ser utilizados para nuevas aplicaciones.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el desarrollo de estos nuevos materiales y las preocupaciones existentes por desarrollar técnicas de fabricación y materiales que sean más sostenibles, surge la necesidad de establecer nuevos métodos para la identificación adecuada tanto de los residuos de materiales compuestos generados, como de aquellos materiales compuestos que sean reciclados, es decir, que vuelvan a tener un aprovechamiento.

Los productos pueden ser etiquetados para facilitar una mejor recuperación al final de su vida útil (*End of Life*, EOL), especialmente debido a la amplia variedad de composiciones de materiales posibles con los materiales compuestos. El marcado es obligatorio para algunos productos de plástico de la industria automotriz (incluidos los materiales compuestos) según la directiva *End-of-Life Vehicle* (ELV) [3]. Existen normas para el marcado de productos en otros sectores. Algunos productos de alto valor en la industria aeroespacial y automotriz ahora incorporan etiquetas de Identificación por Radiofrecuencia (*Radio Frequency Identification*, RFID) para el seguimiento de la gestión del ciclo de vida del producto (*Product Life Management*, PLM) y la garantía de la procedencia y trazabilidad. Estas etiquetas pueden contener datos sobre el material para facilitar un reciclaje de mayor valor, y podrían vincularse a bases de datos virtuales que incluyan la procedencia del material, la fabricación y los datos de uso durante toda la vida útil.

La adecuada identificación de componentes también se puede hacer mediante el pasaporte digital de producto (*Digital Product Passport*) propuesto como parte del ESPR (*Ecodesign for Sustainable Products Regulation*) [4], para mantener una adecuada trazabilidad de los productos en cuanto a las características técnicas de los materiales, su información en términos de reparación, etc., de manera que los consumidores tengan un completo conocimiento de los materiales y de su impacto en el medio ambiente, para poder establecer técnicas de reaprovechamiento adecuadas. El ESPR, por su parte, persigue, desde el propio diseño de los componentes, obtener productos más fiables, duraderos, reusables, reparables, fáciles de mantener, reciclables y energéticamente sostenibles.

A su vez, los desechos pueden ser clasificados mediante códigos EWC (*European Waste Catalogue*). Esto puede permitir una adecuada identificación de aquellos desechos que puedan ser más peligrosos o aquellos que puedan ser reutilizados al final de su primera vida útil.

Por lo tanto, en este capítulo se pretende abordar, de manera muy simple, aquellos métodos de identificación de materiales compuestos, tanto enfocados en la propia trazabilidad de los productos mediante los pasaportes digitales, como para la gestión de los residuos generados durante su vida en servicio a través de los códigos EWC.

2 - MARCADO DE LOS PRODUCTOS

El marcado de productos permitiría mejores opciones para la reutilización y recuperación al final de la vida útil, particularmente debido a la amplia variedad de composiciones de materiales posibles con materiales compuestos. El software de gestión del ciclo de vida del producto (*Product lifecycle management*, PLM) puede integrarse en la etapa de diseño y continuar hasta la fase de uso, hasta el final de la vida útil, potencialmente integrando datos en gemelos digitales o virtuales. Esto podría contener datos como: procedencia del material, información de fabricación (lotes, operadores, maquinaria), métodos de unión e instrucciones de desmontaje, so (por ejemplo, ciclos de carga), mantenimiento y reparación, y tratamiento al final de la vida útil, para la validación del reciclaje.

Actualmente, se registra poca información relevante para el final de la vida útil, pero comprender los materiales y las técnicas de unión utilizadas podría mejorar significativamente el potencial para el reciclaje, y los datos diagnósticos y de carga podrían proporcionar información sobre la validez de una pieza para su reutilización o reacondicionamiento. Requeriría estandarización del almacenamiento de datos, como se ha desarrollado para el sector de la construcción, y podría necesitar regulación o coordinación entre actores principales para incentivar el cumplimiento y la consistencia.

El marcado es requerido según la directiva de vehículos al final de su vida útil para productos de plástico del sector de la automoción (incluidos los materiales compuestos) de más de 100 g.

Existen normas relacionadas con el marcado de productos:

- Para plásticos de la automoción, pero relevantes para materiales termoplásticos o termoestables rellenos y reforzados en cualquier sector:
 - ISO 11469: Plastics — Generic identification and marking of plastics products.
 - ISO 1043: Plastics — Symbols and abbreviated terms. Parts 1 to 4 cover basic polymers, fillers and reinforcing materials, plasticizers, flame retardants.
 - BS EN 15343: on recycling traceability is relevant if there is recycled content.
- Productos de la construcción:

- BIM proporciona un marco para un "gemelo virtual" como parte del trabajo colaborativo para edificios y obras de ingeniería civil, con la norma BS EN ISO 19650 que define la organización y la digitalización de la información a lo largo del ciclo de vida (reemplaza partes de PAS 1192 y BS 1192).
- Esto puede utilizarse con el Intercambio de Información de Construcción de Operaciones (COBie) definido en BS 1192-4, que pronto podría ser reemplazado por BS EN ISO 19650-4.

3 - IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA, RFID

La adopción de la economía circular es fundamental para prolongar la vida útil de los recursos y mantener su valor dentro de la cadena de suministro. Además, el cambio hacia una economía más circular tiene el potencial de fortalecer la competitividad, fomentar la innovación, impulsar el crecimiento y generar oportunidades de empleo, todo ello mientras se reducen los problemas ambientales y se mejora la seguridad de la cadena de suministro de materias primas [5]. Sin embargo, la transparencia respecto a la naturaleza y calidad de los flujos de materiales, en forma de un Pasaporte de Materiales (*Passport Material*, PM) digital y legible por máquina, es un requisito esencial para alcanzar estos objetivos. Los PMs funcionan como un sistema de información integrado, que enlaza eficazmente los materiales físicos con diversas bases de datos digitales.

Una opción convincente para lograr un PM sólido y seguro es la integración de tecnologías de identificación automática y captura de datos, especialmente RFID. Con sus ventajas únicas, la RFID proporciona un método eficiente para gestionar el flujo de materiales e información.

La tecnología RFID facilita la recuperación de datos sin necesidad de contacto físico, lo que la posiciona como una alternativa más avanzada y efectiva. Además, ofrece capacidades de almacenamiento de datos seguros y encriptados [6]. Con estos avances, la tecnología RFID se ha establecido firmemente como un componente fundamental en sistemas contemporáneos destinados a la monitorización de activos y la gestión de la cadena de suministro. Tanto su rentabilidad como su seguimiento en tiempo real la han convertido en una opción atractiva en diversas industrias [7,8]. Un sistema RFID efectivo requiere un lector, etiquetas y antenas para la transmisión de datos [9]. Las etiquetas RFID pueden ser activas o pasivas, cada una con ventajas específicas [10]. Es importante considerar varios factores al elegir la etiqueta más adecuada, como la frecuencia de operación y la capacidad de memoria [11].

4 - PASAPORTE DIGITAL DE PRODUCTO, DPP

El Pasaporte Digital del Producto (DPP) es un concepto que encarna una representación digital de la información de un producto a lo largo de su ciclo de vida, desde su creación hasta su eliminación. Sirve como un repositorio de datos que incluye el origen del producto, los materiales, las pautas de uso, los impactos ambientales y más. Se prevé que el DPP juegue un papel fundamental en mejorar la trazabilidad del producto, promover la sostenibilidad y facilitar una economía circular. Un tema clave en la literatura es la necesidad urgente de un marco estandarizado para los DPP. Jensen et al. [12] enumeran siete conjuntos de datos cruciales para un DPP: uso y mantenimiento, identificación de productos, productos y materiales, pautas y manuales, cadena de suministro y logística inversa, datos ambientales y cumplimiento. Por otro lado, Adisorn et al. [13] defienden que el diseño preliminar de un DPP debe consistir principalmente en datos relacionados con el producto proporcionados por los fabricantes para estimular una economía más circular.

Como sugiere su nombre, el DPP no posee una presencia física; es una entidad digital diseñada para capturar y almacenar datos esenciales a lo largo del ciclo de vida del producto, adaptados según los requisitos del fabricante. El fabricante diseña el DPP con varios propósitos en mente, ya sea para uso interno o para su utilización en diferentes nodos a lo largo del ciclo de vida del producto e incluso más allá del final de la vida útil del producto. Al crear el DPP de un producto, la decisión crítica inicial del fabricante implica identificar las especificaciones clave del DPP, ya que estos parámetros también darán forma a su tipo, propósito y capacidades. El papel del DPP puede ser informativo, instructivo, correctivo o predictivo. Esto significa que sirve como fuente de información para el producto, proporciona instrucciones para acciones específicas en el producto, o utiliza la información para corregir problemas del producto o prever futuras fallas del producto u optimización de la producción.

4.1 - RELACIÓN DEL PASAPORTE DIGITAL DE PRODUCTO CON EL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO

El DPP desempeña un papel importante en el almacenamiento de datos de diversas etapas del ciclo de vida de un producto. Utilizando los pasos del ciclo de vida del producto como guía [14], se han identificado ocho etapas donde el DPP puede ser desplegado eficazmente, como se muestra en la Figura 1. El propietario del DPP, típicamente el Fabricante de Equipos, puede decidir en qué etapas se utilizará el DPP, dependiendo de su propósito previsto. El DPP es responsable de almacenar datos para una única instancia de un producto, por lo tanto, las etapas de diseño o prototipo incluidas en el ciclo de vida del producto se omiten [14,15]. Las etapas recomendadas cubren el producto

desde su proceso de fabricación hasta su final de vida, culminando en el reciclaje.



Figura 1: Etapas del ciclo de vida del producto involucrados en el DPP.

Existen varias categorías distintas de tipos de datos genéricos involucrados en el DPP. En concreto, la Circularidad de los Datos se encarga de almacenar datos relacionados con la implementación de la circularidad, como la reutilización del producto, su reutilización con otro propósito o datos de reciclaje. Más específicamente, cuando ocurre un cambio en el ciclo de vida del producto después de su uso inicial, este cambio debe registrarse para llevar un registro de los pasos exactos que se siguieron para cada producto. Tales datos deben ayudar tanto en una implementación más efectiva y eficiente de la circularidad como en la evaluación precisa de su efectividad. Además, el fabricante debería incluir información sobre protocolos o procedimientos para la reutilización, reutilización con otro propósito o reciclaje de un producto aquí. Por ejemplo, estos datos podrían ser una secuencia de desmontaje para un desmontaje más eficiente. Además, el fabricante debería especificar qué componentes deben ser devueltos al fabricante después del fin de vida útil del producto para fines de reutilización.

4.2 - NIVEL DE DETALLE DEL PASAPORTE DIGITAL DE PRODUCTO

Como se ha explicado anteriormente, existen múltiples fuentes de datos potenciales para el DPP. Los propietarios del DPP deben decidir qué nivel de detalle de datos debe almacenarse en él, lo cual es un proceso complejo. Los pasos del ciclo de vida del producto se dividen en tres grupos principales: fabricación, operación y circularidad. La fabricación abarca desde la producción hasta el inicio de la operación del producto. La operación se refiere al período de funcionamiento del producto, mientras que la circularidad implica acciones como la reutilización y el reciclaje después del uso del producto.

Esta clasificación en diferentes etapas del ciclo de vida del producto se utilizar para determinar el nivel de detalle del DPP. Estas categorías son independientes y pueden tener diferentes niveles de detalle, según los requisitos del propietario del DPP. Psarommatis *et al.* [16] definieron la Tabla 1 para la etapa de circularidad del producto.

Niveles	Nombre	Descripción
Nivel C0	Sin DPP	No se guarda información para la fase de circularidad del producto.
Nivel C1	Información básica de reciclaje	Este nivel incluye diferentes materiales involucrados en el producto para facilitar el reciclaje. En este nivel, no se realizarán actualizaciones al DPP; la información del DPP es fija.
Nivel C2	Información básica de reutilización del producto	El Nivel C2 incluye toda la información de C1, además de instrucciones sobre cómo reutilizar el producto, incluidas listas de verificación genéricas



		con problemas comunes y prácticas para reutilizar el producto específico. No se realizarán actualizaciones al DPP en este nivel; la información del DPP es fija.
Nivel C3	Información detallada de reutilización del producto	El Nivel C3 incluye toda la información de C2. Además, proporciona secuencias de desmontaje y procedimientos para la reparación adecuada o mejora del producto. También especifica dónde debe ir el producto para ser remanufacturado para su reutilización. Cualquier cambio realizado en el producto en el proceso de reutilización se documenta en el DPP.
Nivel C4	Información detallada de reutilización del producto	El Nivel C4 incluye toda la información de C3. Además de toda esta información, si el producto se reutiliza, se incluyen instrucciones detalladas sobre qué debe suceder con cada uno de los componentes del producto según sus DPP individuales. Cualquier cambio realizado en el producto en el proceso de reutilización se documenta en el DPP.
Nivel C5	Circularidad interactiva del producto	El Nivel C5 incluye toda la información de C4. En este nivel, los datos del producto se envían al DPP de manera interactiva. El propietario del producto es informado sobre el estado del producto y se sugieren soluciones, mantenimiento para reutilización o cualquier otra información que el OEM desee comunicar al propietario del producto relacionada con la circularidad.

Tabla 1: Niveles de detalle de la fase de circularidad de un producto [16].

5 - CÓDIGOS EWC

Tal y como se ha comentado anteriormente, los códigos EWC permiten una clasificación rápida de los desechos generados. Describen tanto el desecho, como quien lo ha producido, así como el punto de eliminación. En la Tabla 2 se dispone una lista no exhaustiva de desechos generados relacionados con la industria de los materiales compuestos de diferentes tipos.

En ese sentido, es importante destacar que las cuatro primeras cifras de los códigos indican los sectores de producción o la familia de materiales (por ejemplo, el 04 02 corresponde a la industria textil, mientras que el 10 11 está relacionado con la fabricación de fibra de vidrio y productos vítreos), mientras que el último par de números del código se refieren a los componentes específicos dentro del sector general. Por lo tanto, mediante estos códigos es posible una identificación rápida de los residuos.

Código EWC	Descripción	Comentarios
04 02	Industria textil	Desechos de fabricación en la industria textil
04 02 09	Desechos de materiales compuestos (textiles impregnados, elastómeros...)	Desechos de preimpregnados curados
04 02 21	Desechos de fibras textiles no procesadas	Desechos de preimpregnados curados
04 02 22	Desechos de fibras procesadas	Bordes, desechos de recantado
07 02	Fabricación – formulación – provisión y uso (MFSU) de plásticos – sintéticos y fibras	Bordes, desechos de recantado
07 02 13	Desechos de plásticos	Desechos de polímeros curados
08 04	Desechos del MFSU de adhesivos y sellantes	Desechos de polímeros curados
08 04 09	Desechos de adhesivos y sellantes que contengan disolventes orgánicos u otras sustancias nocivas.	Adhesivos no curados
10 11	Desechos de la fabricación de vidrio y productos con vidrio	Adhesivos no curados
10 11 03	Desechos de productos de fibra de vidrio	Desechos de fabricación de las fibras de vidrio
15 01	Empaquetamiento	Desechos de fabricación de las fibras de vidrio



15 01 10	Envases que contengan residuos contaminados por sustancias nocivas	Contenedores con residuos de resinas y químicos
16 01	Vehículos al final de su vida (de diferentes medios de transporte) y componentes de desmantelamiento de vehículos	Barcos, automóviles, aeronaves, etc.
16 01 19	Plásticos	Materiales compuestos de vehículos
16 01 20	Vidrio	Materiales compuestos de vehículos
16 02	Desechos de componentes eléctricos y electrónicos	Materiales compuestos de vehículos
16 02 16	Componentes eliminados de equipamiento que ya no está en uso	Materiales compuestos de vehículos
16 03	Lotes y productos que no están en uso	Materiales compuestos de vehículos
16 03 05	Desechos orgánicos que contienen sustancias nocivas	Resina sin usar en estado líquido
16 03 06	Otros desechos no incluidos en 16 03 05	Resina sin usar en estado sólido / curada
17 02	Desechos de construcción y demolición: madera, plástico y vidrio	Resina sin usar en estado sólido / curada
17 02 02	Vidrio	GFRP
17 02 03	Plástico	Desechos de materiales compuestos poliméricos
19 12	Desechos del tratamiento mecánico de los residuos	Desechos de materiales compuestos poliméricos
19 12 04	Plásticos y gomas	Desechos de materiales compuestos poliméricos
19 12 08	Textiles	Desechos de materiales compuestos poliméricos
19 12 10	Residuos de combustible	Desechos de materiales compuestos poliméricos
19 12 12	Otros desechos (incluyendo mezclas de materiales)	Desechos de materiales compuestos poliméricos

Tabla 2: Códigos EWC que pueden aplicar a materiales compuestos. En rojo se marcan aquellos desechos generados que pueden ser especialmente nocivos.

6 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kim JW, Lee JS. The effect of the melt viscosity and impregnation of a film on the mechanical properties of thermoplastic composites. *Materials* 2016;9:448.
- [2] Yang Y, Xu Y, Ji Y, Wei Y. Functional epoxy vitrimers and composites. *Progress in Materials Science* 2021;120:100710.
- [3] Job Stella. The sustainability of fiber reinforced polymer composites. A good practice guide. : Composites UK Ltd, 2022.
- [4] Palma RA, Beltran BD, Brotons LA, Arriba PZ, Mengual SE. Ecodesign for Sustainable Products Regulation- Preliminary Study on New Product Priorities Technical Report (Draft) Circular Economy and Sustainable Industry. 2023.
- [5] Ding Z, Wang X, Zou PXW. Barriers and countermeasures of construction and demolition waste recycling enterprises under circular economy. *J.Clean.Prod.* 2023;420:138235.
- [6] Tu Y, Zhou W, Piramuthu S. Critical risk considerations in auto-ID security: Barcode vs. RFID. *Decis.Support Syst.* 2021;142:113471.
- [7] Tajima M. Strategic value of RFID in supply chain management. 2007;13:261-73.



- [8] Suresh S, Chakaravarthi G. RFID technology and its diverse applications: A brief exposition with a proposed Machine Learning approach. 2022;195:111197.
- [9] Domdouzis K, Kumar B, Anumba C. Radio-Frequency Identification (RFID) applications: A brief introduction. 2007;21:350-5.
- [10] Goodrum PM, McLaren MA, Durfee A. The application of active radio frequency identification technology for tool tracking on construction job sites. *Autom.Constr.* 2006;15:292-302.
- [11] Le Breton M, Liébault F, Baillet L, Charléty A, Larose É, Tedjini S. Dense and long-term monitoring of earth surface processes with passive RFID — a review. *Earth-Sci.Rev.* 2022;234:104225.
- [12] Jensen SF, Kristensen JH, Adamsen S, Christensen A, Waehrens BV. Digital product passports for a circular economy: Data needs for product life cycle decision-making. 2023;37:242-55.
- [13] Adisorn T, Tholen L, Götz T. Towards a digital product passport fit for contributing to a circular economy. 2021;14:2289.
- [14] Psarommatis F, May G. Achieving global sustainability through sustainable product life cycle. 2022:391-8.
- [15] Raihanian Mashhadi A, Behdad S. Optimal sorting policies in remanufacturing systems: Application of product life-cycle data in quality grading and end-of-use recovery. *J.Manuf.Syst.* 2017;43:15-24.
- [16] Psarommatis F, May G. Digital Product Passport: A Pathway to Circularity and Sustainability in Modern Manufacturing. 2024;16:396.



Capítulo 6: GESTIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS EN FIN DE USO: SITUACIÓN ACTUAL

Agustín Chiminelli¹, Miguel Lizaranzu¹, Cristina Crespo¹

¹ Instituto Tecnológico de Aragón (ITA)

Abstract

This chapter presents a review of the current situation in Spain, in relation to Europe and the world, regarding the treatment of composite materials and their constituents at the end of their life cycle. Such treatment may include landfill disposal, energy recovery (incineration), recycling or recovery of materials as raw materials for the same or other uses, or the reuse or repurposing at the component or subcomponent level. These pathways or processes, along with associated developments and research, are described in greater depth in subsequent sections, while this section provides a general, combined, and particularized review, as much as possible, of the Spanish case. The chapter covers three main areas: a general framework, a section on initiatives and services offered by private companies, and a section on the activities of groups, centers, and entities within the R&D sector. Issues related to legislation, including waste classification, are presented in chapter 24 which is dedicated to this topic.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords:

Materiales compuestos
Fin de vida
Reciclado
Situación actual
España
Composite materials
End of life
Recycling
Current situation
Spain

1 - MARCO GENERAL

Los materiales compuestos constituyen tecnologías clave de cara a conseguir mejoras desde el punto de vista de la sostenibilidad en diversos sectores, principalmente por las ventajas que ofrecen durante su vida o funcionamiento en servicio. En general, las mismas están asociadas a reducciones de consumos energéticos y emisiones, a la extensión de la vida útil, o la optimización funcional gracias a la posibilidad de obtener componentes con geometrías complejas, entre otros factores. Como tales, son fundamentales para que España, al igual que el resto de los países europeos, alcance el objetivo de cero emisiones netas definido para 2050.

Sin embargo, el reto de la gestión de los materiales compuestos como residuos, tanto el tratamiento de los desechos generados durante los procesos productivos como el de los propios productos al llegar a su fin de vida, no está aún resuelto. En el contexto actual, esto puede constituir una limitación importante para su uso/implementación, dadas las cada vez mayores exigencias en términos de reciclabilidad de productos en diversos sectores, tanto por parte de los organismos gubernamentales y las administraciones como de la sociedad. Esto explica la gran cantidad de iniciativas, proyectos e investigaciones actualmente en curso en este campo, así como también los servicios y tecnologías que algunas empresas están ofreciendo en relación con la gestión del fin de vida de estos materiales y oportunidades para su reuso o reciclado. Esta situación se reproduce, en mayor o menor medida, en todos los países de Europa.

Aunque en comparación con otros materiales la producción y el uso de materiales compuestos de matriz polimérica son significativamente bajos (consumos mundiales de distintos materiales en millones de toneladas en 2023: 42 000 MTn cemento y hormigón, 5 000 MTn madera y derivados, 2 000 MTn acero, 35 MTn aluminio, 500 MTn plásticos, y 13 MTn materiales compuestos) [1], el porcentaje que consigue llevarse finalmente a una vía de reciclado es también, en general, de los más reducidos, con valores estimados que oscilan en los mejores casos entre un 10 % y 20 % dependiendo del tipo de refuerzo (el primero para compuestos reforzados con fibra de vidrio, el segundo para los reforzados con fibra de carbono; la diferencia entre las tasas de reciclaje se debe al coste y las prestaciones, propiedades o oportunidades que pueden ofrecer cada tipo de fibra post-reciclado) [2] [3]. En España, estos porcentajes son probablemente incluso algo inferiores.

El uso de materiales compuestos en Europa representa aproximadamente un 22 % del uso total a nivel mundial [4]. Del mercado europeo, la mayor parte corresponde a Alemania, Italia, Reino Unido, Francia y España. En 2023, la fracción correspondiente a España y Portugal para compuestos de matriz termoestables, que es la mayoritaria, se

estimaba en un 14,2 % [5]. En 2020, se estimaba que la cantidad de empresas fabricantes de componentes con materiales compuestos en España era de en torno a 500, en la mayoría de los casos PYMEs [6]. En gran parte de estas empresas, la eliminación en vertedero es la vía actualmente más empleada. A lo sumo, en algunos casos en los que se requiere gestionar resinas, disolventes y otras sustancias como residuos químicos, esta operación se subcontrata. Sin embargo, existe una cantidad importante de iniciativas que buscan revertir esta situación, incorporando nuevas vías o soluciones, algunas de las cuales se recogen a continuación.

En cuanto a los procesos de reciclado, los más desarrollados y utilizados son en general los mecánicos, seguidos por los procesos térmicos (en particular del tipo pirólisis). Los procesos químicos se encuentran generalmente con un grado de madurez tecnológica (TRL) algo inferior a los anteriores, entre los cuales se puede destacar los de tipo solvólisis. Finalmente, los procesos biológicos, entre otros, están en niveles de madurez más bajos. Esto está relacionado también con la viabilidad técnica, económica y ambiental de los procesos y la calidad de los subproductos que se generan. Es por esto por lo que las investigaciones actuales sobre los procesos de menor TRL se centran en la mayoría de los casos en mejorar el rendimiento, reducir los costes, hacerlos más sostenibles e intentar obtener subproductos de la mayor calidad/valor posible.

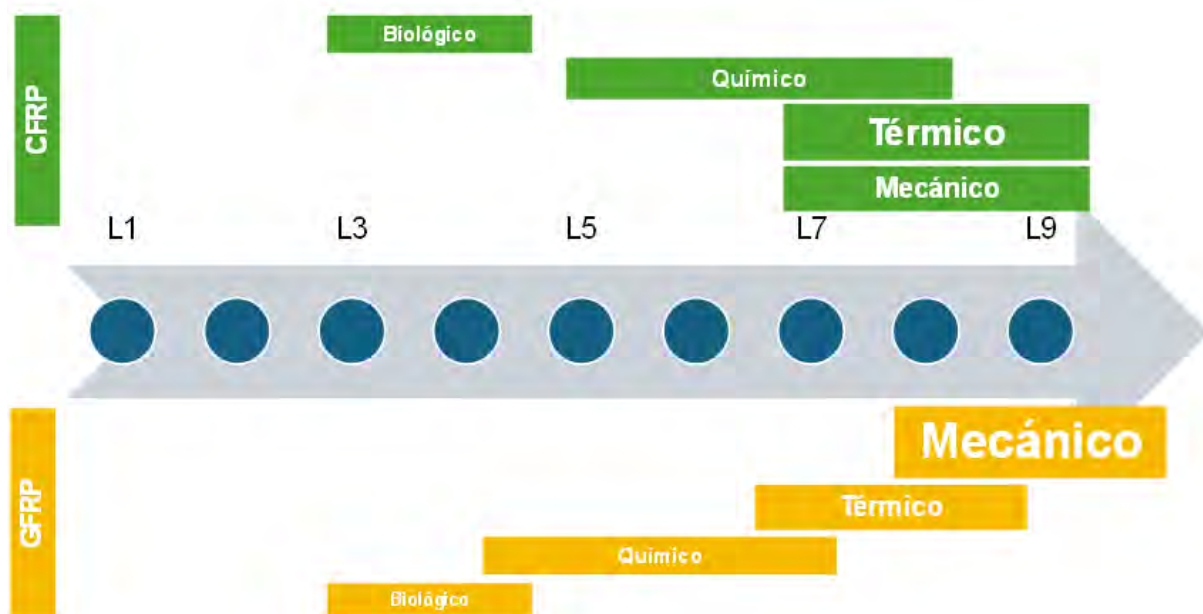


Figura 1: Nivel de madurez de la tecnología (L1-L9) y grado utilización (según tamaño). Rangos promediados de varias referencias [7] [8] [4]. GFRP - Compuestos reforzados con fibra de vidrio / CFRP - Compuestos reforzados con fibra de carbono.

2 - INICIATIVAS POR PARTE DE EMPRESAS GESTORAS DE RESIDUOS, PROVEEDORES DE SERVICIO AMBIENTALES, EMPRESAS DE DESMANTELAMIENTO/DESMONTAJE, RECICLADORAS Y FABRICANTES DE COMPONENTES

Tal y como se mencionó, en España, al igual que en otros países, algunas de las iniciativas actualmente en marcha o servicios que se están ofreciendo en el mercado vienen desde de empresas gestoras de residuos, recicladoras y proveedoras de servicios en estos ámbitos.

El sector eólico constituye uno de los ámbitos de mayor actividad en el desarrollo e implementación de vías de reciclado de materiales compuestos, motivado por la importante cantidad de palas que agotarán su vida en los próximos años. Se estima que en 2030 cerca de 5.500 palas de aerogenerador llegarán al final de su vida útil, lo que da una idea de la magnitud del problema. Esto transcurre en paralelo con el desarrollo de nuevos materiales y procesos que faciliten estas operaciones y el tratamiento de estos componentes en el futuro, como se verá en apartados subsiguientes. Es posible encontrar una descripción detallada de la situación general y de las prácticas de economía circular en este sector en el informe elaborado por la AEE (Asociación Empresarial Eólica) [9].

En este contexto, dentro de los ejemplos específicos de iniciativas dentro del ámbito de los aerogeneradores, se encuentra sociedad Grineo, constituida en 2023 entre Prezero y Endesa, cuyo objetivo es la construcción de una planta de reciclaje de palas eólicas en desuso [10]. Según se proyecta, las materias primas secundarias recuperadas podrán ser utilizadas, entre otras aplicaciones, en sectores como el de la automoción, la construcción o el cerámico, creando

de este modo una economía circular en el negocio eólico español. Otro caso es RenerCycle S.L., entidad constituida por 10 socios, Acciona-Energía entre ellos, que construirán la planta de reciclado Waste2Fiber [11]. El tratamiento propuesto, de tipo térmico, pretende preservar las propiedades de las fibras de refuerzo, reutilizar las fracciones orgánicas de las palas (la madera, por ejemplo) y transformar los materiales compuestos (fibras y resinas) en materias primas secundarias de alto valor añadido. Los materiales de vidrio reciclado y fibras de carbono serán utilizados, en diferentes formatos, mientras que los compuestos orgánicos tendrán aplicaciones en la industria química. La instalación tendrá una capacidad de procesamiento de 6.000 toneladas de material al año. Ambos ejemplos son iniciativas cuya puesta en marcha está prevista para 2024.

Complementando los casos anteriores, existen empresas del ámbito del montaje, instalación, supervisión y mantenimiento de aerogeneradores que actualmente ofrecen también servicios de desmontaje, reciclado y/o oportunidades de segunda vida de palas. Por ejemplo la empresa Tecnorenova, cuyo proceso se basa principalmente en separación y triturado [12], o la empresa Surus Inversa [13]. Otro caso es el de la empresa Altertec, la cual está actualmente estudiando procesos de valorización energética de estos materiales y de reciclado biológico^[14]. Esta tipología de reciclado, mediante la cual se busca soluciones más eficientes y sostenibles que las actuales, están aún en fase de evaluación y desarrollo.

Un ejemplo en el sector aeronáutico, en el que hay una amplia trayectoria en el uso de materiales compuestos, es la empresa zaragozana AIR (Aviation International Recycling), del grupo Lopez Soriano, que se dedica específicamente al desmantelamiento de aeronaves y en cuyos procesos consiguen el reciclado de más del 90 % de los componentes^[15]. Actualmente la empresa está llevando a cabo estudios y desarrollos específicos orientados al tratamiento en fin de vida de los materiales compuestos aeronáuticos, incluyendo principalmente vías de reciclado mecánico y químico, así como también oportunidades de reuso. Las aeronaves que están desmantelando actualmente son en la mayoría de los casos las que están agotando su vida en servicio, por lo que son relativamente antiguas y, en general, incorporan una cantidad de materiales compuestos sustancialmente menor que las aeronaves de última generación. En este sentido, se espera que la necesidad de reciclado de estos materiales aumente gradualmente, no solo por el aumento del número de aviones operativos en las últimas décadas, sino también por la mayor presencia de estos compuestos por aeronave.

Existe otro tipo de empresas que centran sus servicios en las tecnologías o los procesos de reciclado y no en el sector o la aplicación, quedando fuera de su ámbito los procesos de desmontaje o desensamblado. Cubren por lo tanto una parte específica de la cadena del proceso de reciclado (últimas 3 o 4 fases, Figura 2). Este es el caso de la empresa B-circular [16], que utiliza el proceso R3FIBER para obtener fibras limpias sin resinas, energía y combustibles. El mismo, de tipo térmico-químico, ha sido desarrollado por CENIM, TRT y UPV/EHU [17], siendo un excelente ejemplo de transferencia de la investigación al mercado. El avance tecnológico se basa en una evolución del proceso de pirólisis, combinándolo con la recuperación de energía a partir de los gases y líquidos que se generan durante el proceso.

Otro caso destacable que no está ligado a ningún sector específico o aplicación concreta es el de la empresa FAIRMAT [18], focalizada en el tratamiento de compuestos de fibra de carbono, que ofrece tanto servicios de reciclado como el subproducto específico que obtiene mediante su tecnología. Además, la compañía ofrece el soporte para la implementación de su solución. Su proceso, de tipo mecánico, se diferencia por el hecho de que en lugar de triturar el material como es habitual, trocea los residuos en tamaños relativamente grandes, lo cual favorece a mantener las propiedades mecánicas originales. La tecnología permite mantener un 70% de las cualidades básicas con un consumo energético muy reducido. Aunque se trata de una start-up francesa, la empresa tiene oficinas en España.

En estos últimos modelos de negocio, las fases de desmantelamiento, separación y clasificación estarían a cargo de otras empresas (como las mencionadas anteriormente), lo cual daría lugar a la necesidad de colaboración entre distintas entidades de cara a cubrir la cadena de procesos completa (Figura 2).



Figura 2: Cadena de procesos para el reciclado de materiales compuestos.



Respecto a las empresas fabricantes de productos con materiales compuestos, existen un interés bastante generalizado en intentar incorporar los subproductos que se obtienen de los procesos mencionados. Una muestra de esto son las empresas que participan activamente en el Grupo de Sostenibilidad de AEMAC, dentro de las cuales están Acciona, Talgo, Vestas, Ferrer-Dalmau, Ziur, Inpre, y Airbus, entre otros. También participan empresas proveedoras de materias primas o equipos, como Hexcel y MTorres.

En general, en el ámbito empresarial, la situación en España es similar a la que se presenta en el resto de Europa, escalada en concordancia con el volumen del mercado de los materiales compuestos y, con diferencias o excepciones que se corresponden con sectores de mayor actividad o relevancia, como es el caso del sector eólico español. Finalmente, cabe destacar que muchas de las iniciativas mencionados se han conseguido articular gracias a ayudas tanto a nivel nacional [19], europeo [20] [21] o incluso regional.

3 - ACTIVIDAD POR PARTE DE GRUPOS DE INVESTIGACIÓN EN UNIVERSIDADES, CENTROS TECNOLÓGICOS Y OTROS ORGANISMOS DE INVESTIGACIÓN

En cuanto a grupos o entidades trabajando en el ámbito de la I+D+i, los campos de actuación (trabajos o investigaciones en curso o llevados a cabo en los últimos años) abarcan prácticamente toda la pirámide de jerarquía de tratamiento de residuos. En muchos casos, las actividades se realizan a través de proyectos específicos en colaboración con empresas como las citadas anteriormente. Por ofrecer algunos ejemplos, se recogen a continuación distintas líneas en las que se está o se ha estado trabajando en distintos centros, organismos o universidades, sin pretender que lo que se presenta sea exhaustivo o completo.

Centros tecnológicos como AITIIP están llevando a cabo proyectos dónde el trabajo se orienta al estudio de metodologías de desmantelamiento integral, para hacer posible la clasificación, reciclaje y reutilización de grandes componentes de materiales compuesto. En el ámbito del reciclado de residuos generados en los procesos de producción, Tekniker ha desarrollado un sistema que recupera fragmentos de material preimpregnado sin curar. AIMEN es otra de las entidades que trabaja en sistemas de separación y clasificación.

Respecto al diseño de nuevos polímeros con capacidad de reciclado al final de la vida útil cabe destacar los desarrollos de CIDETEC [22], a través de su tecnología 3R. Existen también otros sistemas que están siendo investigados por otros centros, como AITIIP o TECNALIA; o en el ámbito académico, en la URJC [23]¹ por ejemplo. En la misma línea, el ITA lleva tiempo desarrollando soluciones para el desensamblado bajo demanda de uniones adhesivas para materiales compuestos, mediante la modificación de adhesivos y resinas [24].

El aprovechamiento de los materiales para su reutilización dando una segunda vida una vez extraído de su producto de origen está siendo estudiado por numerosos centros tecnológicos españoles, entre los que se puede destacar a LEARTIKER, AIMEN, ITA, AITEX, TECNALIA, CIDAUT, FIDAMC, IDEKO, AIMPLAST, EURECAT, CTAG y GAIKER, por mencionar algunos. En cuanto a grupos de universidades, se puede resaltar la actividad de AMADE-UG en proyectos en esta temática, la UPV/EHV y la UPM/ETSIA. También hay en marcha estudios para el reaprovechamiento y reciclado de los materiales auxiliares de fabricación, campos en los que han estado investigando por ejemplo EURECAT y FIDAMC (respectivamente).

Teniendo en cuenta que el reciclado mecánico se presenta como una de las opciones con un TRL más alto e implantado a nivel industrial, tal y como se ha nombrado anteriormente, podría decirse que actualmente las investigaciones en esta línea son algo más limitadas y que el mayor esfuerzo se está realizando en los métodos de reciclaje químico o térmico, en los que a priori el reto tecnológico es mayor y en los que se aspira a obtener productos de un valor añadido mayor al del reciclado mecánico. En este sentido AIMPLAS, TECNALIA, EURECAT, GAIKER o CIDETEC son ejemplos para el caso del reciclado químico; UPV/EHV, CSIC y nuevamente AIMPLAST en procesos pirolíticos. El IUMA/AC trabaja también en el reciclado químico, y cuenta con una patente para la recuperación de las fibras inorgánicas mediante procesos de solvólisis [25]. Pese a lo mencionado, cabe destacar que los procesos mecánicos suelen requerirse en algunos casos como paso previo a los reciclados químicos o térmicos. Existen también estudios de procesos de reciclado de sistemas de refuerzo más específicos, como el desarrollado por IMDEA para láminas de CNTs [26].

Como línea de investigación más básicas y alejadas de los niveles de industrialización, la investigación en el uso de la biotecnología aplicada al reciclado (reciclado biológico) está tomando cada vez más fuerza y grupos como ITA, AITIIP, o AIMPLAS cuentan con resultados preliminares en los proyectos en los que participan.

En general, se puede afirmar que el nivel de actividad en I+D para abordar la problemática del tratamiento en fin de vida de los materiales compuestos es elevado, y, por lo tanto, España se posiciona como uno de los países punteros en el desarrollo de soluciones en este ámbito.



4 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] JEC Observer, Overview of the global composite market 2023-2028.
- [2] A.A. Mohamed Sultan, P.T. Mativenga, Sustainable Location Identification Decision Protocol (SuLIDeP) for determining the location of recycling centres in a circular economy, *Journal of Cleaner Production* 223 (2019) 508-521.
- [3] S. K. Gopalraj and T. Kärki, A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis, *SN Applied Sciences* (2020) 2:433.
- [4] JEC Composites Magazine, Special Issue, Composites Sustainability 2023.
- [5] Dr. Elmar Witten, Volker Mathes, The European market for Fiber-Reinforced Plastics / Composites 2023, Market developments, Trends, challenges and prospects, (AVK).
- [6] Europe Composites, U.S. Commercial Service.
- [7] The sustainability of fibre-reinforced polymer composites. A good practice guide. Composites UK Ltd, 24th November 2022.
- [8] Sustainable decommissioning: wind turbine blade recycling. Report from phase 1 of the energy transition alliance blade recycling project, ORE Catapult.
- [9] Economía Circular en el Sector Eólico – Palas de Aerogeneradores, Dic. 2022, Informe elaborado por la AEE.
- [10] <https://prezero.es/prensa/noticias/prezero-espana-y-endesa-presentan-grineo-la-nueva-sociedad-creada-para-dar-vida-a-la-primera-planta-de-reciclaje-de-palas-eolicas-en-la-peninsula>
- [11] <https://www.energias-renovables.com/eolica/acciona-reciclara-palas-de-aerogenerador-con-una-20231115>
- [12] <https://tecnorenova.com/reciclaje-de-palas/>
- [13] <https://www.surusin.com/caso/parques-eolicos-de-zas-y-corme/>
- [14] <https://www.altertec.net/rebiowind-reciclado-de-materiales-compuestos/>
- [15] <https://aviationinternationalrecycling.com/en/>
- [16] <https://www.bccircular.com/es/>
- [17] <https://digital.csic.es/handle/10261/207666>
- [18] <https://www.fairmat.tech/>
- [19] <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2023/10/el-adjudica-185-7-millones-en-ayudas-para-repotenciacion-eolica-.html>
- [20] HORIZON-CL5-2022-D3-01-02 - Demonstration of innovative materials, supply cycles, recycling technologies to increase the overall circularity of wind energy technology and to reduce the primary use of critical raw materials.
- [21] HORIZON-CL4-2021-RESILIENCE-01-01 - Ensuring circularity of composite materials.
- [22] [3R leading technology | Cidetec](#)
- [23] I. Lorero et al., Thermally remendable, weldable, and recyclable epoxy network crosslinked with reversible Diels-alder bonds, *Polymer* 259 (2022) 125334.
- [24] G Ibarz, M Canales, M Lizaranzu, S Roche, C Valero, A Chiminelli, J Aucher, M Fache, Metal-composite joints with debonding on demand functionality for automotive applications, AB2023, Univ. Porto, 2023.
- [25] ES 2 604 311 B1, Procedimiento de recuperación de fibras inorgánicas a temperatura ambiente en materiales compuestos fibra-resina.
- [26] <https://materials.imdea.org/imdea-materials-demonstrates-breakthrough-recyclability-of-carbon-nanotube-sheets/>



Capítulo 7: TECNOLOGÍAS DE RECICLADO Y RECUPERACIÓN DE FIBRAS DE CARBONO Y VIDRIO POR PIRÓLISIS

Olga Rodriguez Largo¹, Félix A.López¹

¹ Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC)

Abstract

Of all the recycling technologies available for recycling fiber-reinforced composite materials, pyrolysis is one of the most frequently used. This technology allows the recovery of long fibers with good mechanical properties in addition to reusing the resin in the form of energy. This chapter describes this technology, including some variations of it, such as microwave-assisted pyrolysis. It can be concluded that pyrolysis is a suitable technology for the recovery of long fibers, maintaining between 70-95% of their initial mechanical properties. Furthermore, pyrolysis applied to reinforced composites is a technology currently used at an industrial level, both in Europe and in Spain.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - INTRODUCCIÓN

Los plásticos reforzados con fibras (en inglés: *fiber-reinforced plastics*, (FRP)), también llamados composites reforzados con fibras, son materiales compuestos fabricados con una matriz polimérica reforzados con fibras. Las fibras son habitualmente de vidrio o de carbono, aunque también pueden ser de aramida.

Los FRP poseen una de las relaciones resistencia-peso de todos los materiales conocidos, son resistentes y duraderos, disponibles para ser utilizados durante años. Al contrario que el acero, los FRP tienen memoria, volviendo a su forma original cuando se desvía. Incluso impactos de gran magnitud causan pocos daños y no producen un fallo del material. Los FRP también se pueden diseñar y fabricar a medida para proporcionar distintas funciones de refuerzo para cumplir así con los requisitos específicos de resistencia a la corrosión y la abrasión. Los FRP se han utilizado ampliamente en las industrias automotriz, marina, minera, de petróleo, gas, instalaciones de tratamiento de aguas residuales, plantas de energía y construcción, etc. Hasta ahora, las industrias han utilizado rápidamente estos materiales sin conocer bien sus métodos de eliminación.

La demanda de los materiales compuestos está aumentando durante los últimos años debido en gran medida a los nuevos objetivos de reducción de emisiones de CO₂, y a la necesidad de componentes estructurales, que aúnen un bajo peso y una gran resistencia. La demanda de materiales compuestos reforzados con fibra de carbono ha aumentado de 68 000 toneladas (t) kten 2010 a alrededor de 170 kt en 2020. Se estima que esta demanda siga creciendo en un futuro cercano, y se prevé que se llegue a una demanda de 190 kt en 2050 en el caso de los composites reforzados con fibra de carbono.

Una de las razones de este aumento se debe al crecimiento del uso de materiales compuestos en las palas de aerogenerador y en aplicaciones marinas, lo que se demuestra en un volumen de utilización en palas eólicas de casi 34 kt en comparación con el uso en aplicaciones aeronáuticas de casi 33 kt. El volumen de utilización de materiales compuestos de fibra de carbono en aplicaciones marinas aún es reducido (alrededor de 3 kt en 2018) en comparación con los sectores eólico y aeronáutico, pero se estima que crecerá en un futuro inminente.

Durante décadas, los vertederos y la incineración han sido los dos métodos de eliminación más utilizados por las industrias de materiales compuestos. Estos métodos han provocado un aumento de la concienciación medioambiental para identificar un método de eliminación sostenible y proporcionar una solución para evitar la acumulación de residuos [1].

La Unión Europea ha implementado implementó algunas directivas que agregaron tasas impositivas sobre residuos y se ha prohibido prohibió la eliminación en vertederos en algunos países europeos. Por ejemplo, la directiva 2008/98/CE [2] sugiere que una administración de residuos debería indicar un canal de reciclaje definido y establece



un reciclado de casi el 70% en peso del material de desecho para reducir tanto el vertido como el impacto medioambiental. Además, la directiva 2008/98/CE [2] y la directiva 2000/53/CE [3] exigen que casi el 85% del peso de los vehículos al final de su vida útil deba recuperarse y reciclarse.

A pesar de la extensa bibliografía respecto al reciclado de los materiales compuestos reforzados con fibras, siguen existiendo muchos obstáculos tanto técnicos, como logísticos y, especialmente, económicos. La complejidad de su estructura y la alteración de las propiedades mecánicas durante el proceso de reciclaje conducen principalmente a la recuperación de energía y materia combustible y materiales de menor calidad. Además, la cantidad de residuos es muy inferior a la de plásticos o metales, lo que da lugar a una falta de interés en reciclarlos. La dispersión geográfica de los residuos generados también hace que la recogida sea difícil y costosa [4].

Debido a la gran preocupación medioambiental, tanto de la sociedad como de las instituciones, la gestión de residuos se está convirtiendo en una prioridad para la durabilidad de este tipo de material. En el caso de los composites, los procesos no siempre son rentables, ya que, por el momento, resulta más barato depositarlos en vertederos.

En la situación actual, se considera que una recuperación completa de las fibras (enfoque de reciclado estructural directo) beneficia al sector de los materiales compuestos. Las fibras recicladas con este enfoque tienen un valor añadido en el mercado debido al bajo uso de recursos naturales, energía y mano de obra en el proceso, junto con una calidad de fibra similar a la fibra virgen (en el caso de las fibras de carbono). En este caso además, las fibras de carbono recicladas pueden alcanzar un valor de mercado de unos 10 €/kg [5]. Hasta la fecha se han estudiado y establecido numerosos métodos, especialmente mecánicos, térmicos y químicos, porque la selección del método depende del tipo de material que se vaya a reciclar y de la aplicación en la que se vaya a reutilizar. Además, es difícil identificar un método de reciclado estándar entre todos ellos [6].

2 - TECNOLOGÍAS

Se destacan tres categorías principales de reciclado para los materiales compuestos reforzados [7]:

- **Procesos mecánicos:** El material compuesto se tritura, obteniéndose fracciones ricas en fibra y fracciones ricas en matriz. Estas fracciones suelen ser de menor calidad en comparación con el material inicial.
- **Procesos térmicos:** El material compuesto se somete a un tratamiento a alta temperatura recuperándose residuos sólidos, principalmente fibras, así como energía.
- **Procesos químicos:** Durante la despolimerización química, las fracciones orgánicas y minerales se separan mediante el uso de un disolvente, para poder ser empleadas como productos intermedios en nuevas síntesis o en nuevos productos. Como esta ruta a veces puede generar desechos químicos con problemas ambientales, esta técnica no se ha estudiado ampliamente excepto a escala de laboratorio. Sin embargo, el uso de fluidos supercríticos, considerados procesos más limpios, podría ser una alternativa [8] para su aplicación.

En este capítulo nos centraremos en los procesos térmicos, que implican la recuperación de las fibras mediante la volatilización de la resina, dando lugar a subproductos como gases, líquidos o materia inorgánica. Se pueden distinguir cuatro procesos principales: planta de cemento, pirólisis, lecho fluidizado y pirólisis por microondas. De todos ellos, este capítulo va a presentar los tratamientos por pirólisis, cuyos productos se analizarán en detalle en el capítulo siguiente.

2.1 - PIROLÍISIS

Dentro de los tratamientos térmicos, la pirólisis es la tecnología más estudiada. Los residuos de materiales compuestos reforzados con fibras se someten a un tratamiento a alta temperatura (entre 450 °C y 700 °C) en ausencia de oxígeno para separar las fibras y degradar los compuestos orgánicos.

La matriz polimérica se descompone en moléculas de bajo peso molecular que se transforman en gases que producen aceites y/o *char* (residuos de descomposición de las resinas). Dicho *char* se deposita en la superficie de las fibras, disminuyendo su calidad. Los residuos de descomposición de la matriz (aceites y gases) sirven como combustibles.

La pirólisis permite la recuperación de fibras largas con módulo alto pero contaminadas por el *char* descrito en el párrafo anterior. Es necesario un tratamiento post-pirólisis, que consiste en una oxidación con aire, para quemar el *char* en la superficie de la fibra [9]. Este tratamiento conduce a la formación de una superficie rica en oxígeno, que promueve la adhesión química entre las fibras recicladas y la nueva resina [10], [11]. Otra alternativa al tratamiento de post-pirólisis mediante combustión que puede usarse en el caso de las fibras cortas de carbono, es la modificación de la superficie con polidopamina, que mejora la unión interfacial entre una matriz epoxi y las fibras de carbono cortas recicladas. [12].



En el caso de las fibras de vidrio, sus propiedades mecánicas pueden verse gravemente perjudicadas - hasta un 50% - bajo tratamientos a muy altas temperaturas. Como la temperatura mínima de este proceso es de 450 °C, esta técnica se utiliza habitualmente para fibras de carbono, que conservan entre el 95 y el 99% de sus propiedades mecánicas iniciales, dependiendo de las condiciones de tratamiento. Se debe llegar a un equilibrio entre las propiedades mecánicas resultantes y la cantidad de carbonizaciones restantes. Una temperatura entre 500 y 550 °C se considera el rango de temperatura máximo para preservar la resistencia de las fibras de carbono [13].

Esta técnica ha alcanzado un alto nivel de desarrollo tecnológico, llegando a un TRL de 8. En 2010, ELG Carbon Fiber (ahora Gen 2 Carbon) comenzó con una línea de reciclaje de fibras de carbono. Su asociación de ELG Carbon Fiber con Boeing en 2019 mostró la posibilidad de utilizar fibras de carbono recicladas en la industria aeroespacial en aplicaciones no estructurales. En estos momentos tienen dos productos en el mercado que utilizan fibras largas recicladas: uno es un *nonwoven mat*, y el otro es de fibras recicladas mezcladas (*comingled*) con fibras termoplásticas. El negocio de fibras cortas se vendió en 2021 a Procotex, que tiene un amplio abanico de productos con fibras cortas de carbono recicladas.

Una de las principales desventajas de esta tecnología es que requiere una atmósfera inerte y un proceso de oxidación complementario para mejorar las propiedades mecánicas de las fibras obtenidas. Además, el impacto medioambiental de este proceso, que suele implicar mantener temperaturas superiores a 500 °C y emitir gases peligrosos, plantea un problema de sostenibilidad [15].

2.2 - PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS

Una variante a la pirólisis tradicional es la pirólisis asistida por microondas. La tecnología de microondas consiste en el uso de una radiación electromagnética de longitud de onda comprendida entre 0,01 m y 1 m. Las microondas se pueden descomponer en dos componentes perpendiculares, un campo eléctrico y uno magnético. El material que presenta una propiedad absorbente convertirá la energía electromagnética en energía térmica. A diferencia del calentamiento convencional, donde el calor se transfiere desde la superficie hacia el interior, el calentamiento por microondas calentará el material directamente desde el interior, lo que permitirá una transferencia térmica más rápida y un ahorro de energía [16]. Por lo tanto, se puede utilizar una temperatura moderada, lo que supone una ventaja especialmente para el reciclado de fibras de vidrio que tienden a dañarse con tratamientos a alta temperatura, como hemos visto previamente.

Hay antecedentes del reciclado mediante esta tecnología de una pala de aerogenerador [17]. Las fibras de vidrio recuperadas representaron un 70% de la masa inicial del FRP con fibra de vidrio. Las fibras mostraron una superficie alterada debido a los residuos de carbonización, lo que provocó una pérdida de adhesión entre las fibras y la matriz. Para obtener propiedades mecánicas tolerables, estas fibras de vidrio recicladas se reutilizaron en una proporción del 25% en peso combinados con fibra de vidrio virgen para fabricar un nuevo material compuesto que podría ser empleado en aplicaciones con menores requerimientos mecánicos.

Otro estudio realizó irradiación con microondas sobre desechos de materiales compuestos reforzados con fibras de carbono en diferentes atmósferas: argón, nitrógeno y aire [18]. La tasa de eliminación de resina alcanzó el 100 % en aire después de 300 s y el 90 % en nitrógeno o argón. Sin embargo, en atmósfera de aire, las imágenes con microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) mostraron defectos en las fibras de carbono, concluyendo que el argón y el nitrógeno eran las mejores atmósferas para obtener las fibras de carbono sin defectos superficiales. La resistencia de las fibras extraídas mediante pirólisis por microondas fue similar a la de las fibras vírgenes o a las fibras extraídas mediante rutas convencionales.

Jiang *et al.* [19] realizaron pirólisis por microondas en un compuesto termoestable reforzado con fibra de carbono bajo flujo de nitrógeno para evitar la oxidación. Al introducir las fibras de carbono recicladas resultantes en dos matrices termoplásticas diferentes, el compuesto de polipropileno presentó mejores propiedades que el compuesto de nailon. Este último tuvo mejores propiedades al utilizar . Estas observaciones se atribuyeron a diferencias en la rugosidad y la unión de la superficie.

3 - UN EJEMPLO DEL DESAROLLO DE TECNOLOGÍA DE PIRÓLISIS EN ESPAÑA

En España, en la empresa de base tecnológica creada por el CSIC B-Circular, emplea un proceso de pirólisis seguido de proceso de gasificación para la eliminación del *char* (residuos de la resina que quedan depositados sobre las fibras). El esquema de este proceso se representa en la Figura 1.

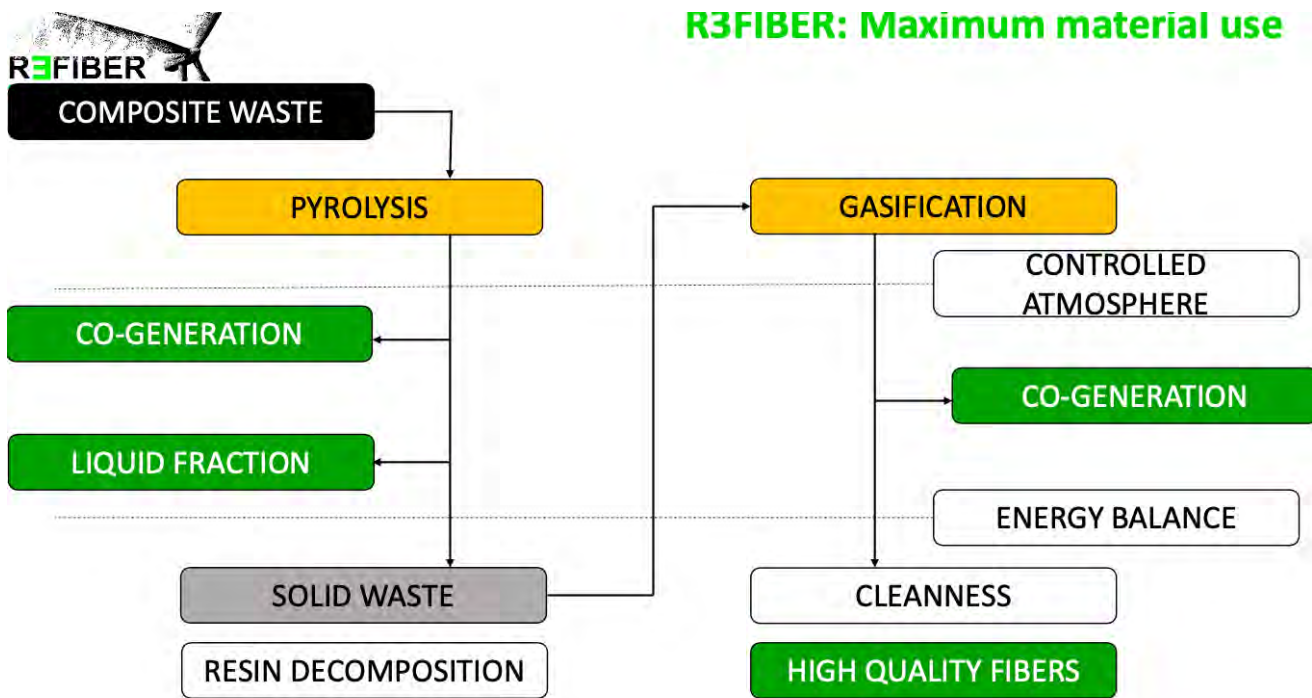


Figura 1: Esquema de la tecnología R3FIBER desarrollada por B-Circular.

Este proceso es versátil, ya que puede emplearse para composites reforzados tanto con fibra de vidrio como con fibra de carbono, aunque los mejores resultados de propiedades de las fibras resultantes se obtienen para los composites reforzados con fibra de carbono. En la Tabla 1 se recogen los resultados de las propiedades de las fibras recicladas obtenidas mediante la tecnología R3FIBER. Como se puede observar, no se produce una disminución del diámetro de las fibras, se mantiene un 85% de su módulo de Young, y entre el 88 y el 93% de su resistencia a la tensión.

Propiedades fibras recicladas		Propiedades fibras recicladas respecto fibras originales	
Diámetro medio	0,009 mm	Diámetro nominal	100 %
Densidad	0,02 g/cm ³	Resistencia a la tensión	88-93 %
Longitud máxima	800 mm	Módulo de Young	85 %
Resistencia a la tracción	328 MPa (velocidad 5mm/min)		

Tabla 1: Propiedades de las fibras recicladas.

Como, tras el proceso de recuperación, la superficie de las fibras recicladas no presenta prácticamente ningún residuo procedente de la descomposición de la resina, esto mejora su aplicación posterior, ya que cuando se aplique de nuevo resina para fabricar nuevos materiales compuestos, esta tendrá una mejor adherencia. Una micrografía electrónica muestra la superficie de las fibras recicladas (Figura 2).

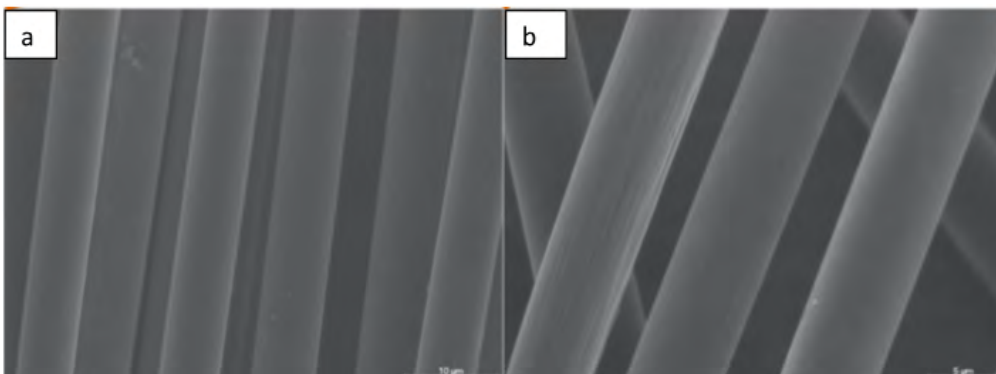


Figura 2: Imágenes de microscopía electrónica (SEM) de las fibras después de proceso de pirólisis y gasificación [20].



4 - CONCLUSIONES

La tecnología de reciclado de plásticos reforzados con fibras mediante pirólisis y gasificación es adecuada para la recuperación de fibras largas, especialmente de carbono. Estas fibras mantienen sus propiedades hasta en un 90%, lo que hace que las fibras puedan volver a utilizarse en aplicaciones de un alto valor añadido. Otra de las ventajas de dicha tecnología es su grado de madurez, estando implantada en la industria tanto a nivel internacional como nacional.

5 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Hadi, C. Ning, W. Ouyang, M. Xu, C. S. K. Lin, and G. McKay, "Toward environmentally-benign utilization of nonmetallic fraction of waste printed circuit boards as modifier and precursor," *Waste Manag.*, vol. 35, pp. 236–246, 2015.
- [2] E. Commission, "Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives (Waste framework Directive)," *Off. J. Eur. Union L*, vol. 312, pp. 23–34, 2008.
- [3] Council Directive, "2000/53/EC on End-of-Life Vehicles," *Off. J. Eur. Union*, vol. L269, pp. 34–42, 2000.
- [4] R. Bernatas, S. Dagreou, A. Despax-Ferreres, and A. Barasinski, "Recycling of fiber reinforced composites with a focus on thermoplastic composites," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 5, p. 100272, 2021.
- [5] V. P. McConnell, "Launching the carbon fibre recycling industry," *Reinf. Plast.*, vol. 54, no. 2, pp. 33–37, 2010.
- [6] K. Wong, C. Rudd, S. Pickering, and X. Liu, "Composites recycling solutions for the aviation industry," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 60, no. 9, pp. 1291–1300, 2017.
- [7] P. Krawczak, "Recyclage des composites," 2011.
- [8] Y. Yang, R. Boom, B. Irion, D.-J. van Heerden, P. Kuiper, and H. de Wit, "Recycling of composite materials," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 51, pp. 53–68, 2012.
- [9] S. R. Naqvi, H. M. Prabhakara, E. A. Bramer, W. Dierkes, R. Akkerman, and G. Brem, "A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 136, pp. 118–129, 2018.
- [10] G. Cai, M. Wada, I. Ohsawa, S. Kitaoka, and J. Takahashi, "Interfacial adhesion of recycled carbon fibers to polypropylene resin: Effect of superheated steam on the surface chemical state of carbon fiber," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 120, pp. 33–40, 2019.
- [11] L. Mazzocchetti, T. Benelli, E. D'Angelo, C. Leonardi, G. Zattini, and L. Giorgini, "Validation of carbon fibers recycling by pyro-gasification: The influence of oxidation conditions to obtain clean fibers and promote fiber/matrix adhesion in epoxy composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 112, pp. 504–514, 2018.
- [12] S. Yang, Y. Cheng, X. Xiao, and H. Pang, "Development and application of carbon fiber in batteries," *Chem. Eng. J.*, vol. 384, p. 123294, 2020.
- [13] G. Oliveux, L. O. Dandy, and G. A. Leeke, "Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 72, pp. 61–99, 2015.
- [15] J. A. Butenegro, M. Bahrami, J. Abenojar, and M. Á. Martínez, "Recent Progress in Carbon Fiber Reinforced Polymers Recycling: A Review of Recycling Methods and Reuse of Carbon Fibers," *Materials*, vol. 14, no. 21, 2021.
- [16] F. Motasemi and M. T. Afzal, "A review on the microwave-assisted pyrolysis technique," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 28, pp. 317–330, 2013.
- [17] D. Åkesson, Z. Foltynowicz, J. Christéen, and M. Skrifvars, "Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 31, no. 17, pp. 1136–1142, 2012.
- [18] K. Obunai, T. Fukuta, and K. Ozaki, "Carbon fiber extraction from waste CFRP by microwave irradiation," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 78, pp. 160–165, 2015.
- [19] L. Jiang *et al.*, "Recycling carbon fiber composites using microwave irradiation: Reinforcement study of the recycled fiber in new composites," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 132, no. 41, Nov. 2015.



[20] F. A. López *et al.*, "Recovery of carbon fibres by the thermolysis and gasification of waste prepreg," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2013.



Capítulo 8: REVALORIZACIÓN DE PRODUCTOS DE PIRÓLISIS

Alexander Lopez-Uriónabarrenechea¹, Adriana Serras-Malillos¹, Naia Gastelu¹, Borja Baltasar Perez-Martinez¹, Esther Acha¹, Blanca María Caballero¹, Isabel de Marco¹

¹ Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente. Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)

Abstract

This chapter describes the physical-chemical properties and market options of pyrolysis oils and pyrolysis gases coming from residual fiber-reinforced plastic materials. The description focuses on the pyrolysis products generated from the two predominant types of resin in these materials, i.e. epoxy and unsaturated polyester, from both production and end-of-life waste. Pyrolysis oils and gases have two potential industrial applications: the petroleum refining and petrochemical industries, and the alternative fuels market, namely, refuse derived fuels (RDF). However, it can be observed throughout the chapter that the physical-chemical properties of these two products are far from the standards currently required by the industry. Finally, the state of the art of the research on the optimization possibilities of these products is presented, highlighting a successful case where the oils are eliminated and hydrogen-rich gases are generated, increasing the economic profitability of the pyrolysis processes applied to this kind of waste.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords:

Pyrolysis
Valorisation
Pyrolysis oil
Fibre-reinforced plastics
Pyrolysis gases
Pirólisis
Valorización
Aceites de pirólisis
Plásticos reforzados con fibras
Gases de pirólisis

1 - INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha mencionado en el capítulo anterior, cuando se utiliza la pirólisis como proceso para recuperar las fibras de los residuos de plásticos reforzados con fibras (FRP) se producen dos productos adicionales: el aceite de pirólisis y el gas de pirólisis. Ambos productos poseen algunas características físico-químicas atractivas, por lo que potencialmente podrían utilizarse como materia prima secundaria en procesos industriales. En lo que se refiere a su composición molecular, los productos recuperados mayoritariamente son mezclas de sustancias orgánicas procedentes de la descomposición térmica de la resina plástica que posea el material que se haya pirolizado [1-2].

En el caso de que se pirolicen residuos de fin de vida útil (FVU), los aceites y gases también contendrán sustancias derivadas de aquellos materiales que formen parte del residuo FVU y que se descompongan térmicamente por acción de la temperatura de pirólisis, por ejemplo: pinturas, insertos de madera, adhesivos, otras resinas termoestables y/o termoplásticas, etc. En términos de composición elemental, las sustancias presentes en los aceites y gases de pirólisis incorporan aquellos elementos que se encuentran en la formulación de las resinas comerciales que se utilizan en los FRP, así como aquellos presentes en los materiales adicionales de los residuos FVU. Por tanto, además de los hidrocarburos alifáticos, naftenos e hidrocarburos aromáticos compuestos por carbono e hidrógeno, es común encontrar sustancias orgánicas que contienen oxígeno (ácidos, aldehídos, cetonas, éteres, ésteres), nitrógeno (amidas, aminas, nitrilos), azufre (sulfuros, sulfóxidos, sulfonas) y sustancias orgánicas halogenadas (flúor, cloro, bromo) y fosforadas [3-4]. También es habitual encontrar una fase acuosa acompañando a los aceites de pirólisis generados debido al carácter oxigenado de los polímeros que se utilizan principalmente en estas resinas (epoxi, poliéster, fenólicas) [5].

En la Figura 1 se puede observar el aspecto de la fase condensada de la pirólisis de algunos residuos de FRP, donde se puede apreciar la coexistencia del aceite de pirólisis (sustancia más oscura), la fase acuosa (sustancia más clara) e incluso fases semi-sólidas compuestas por sustancias de alto peso molecular.



Figura 1: Aspecto de líquidos de pirólisis de diferentes residuos de plásticos reforzados con fibras.

En lo que se refiere a la peligrosidad, en la actualidad ni el aceite ni el gas de pirólisis de composites están notificados como peligrosos en la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA, por las siglas en inglés de: European Chemicals Agency,) pero es muy probable que en un hipotético caso de utilización comercial de estas sustancias ambas sean clasificadas como peligrosas a efectos del Reglamento (CE) nº 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (reglamento CLP, por sus siglas en inglés). Existe el precedente de dos aceites de pirólisis de otros residuos que sí están notificados (aún sin clasificación armonizada): TACOIL™, que es el aceite de pirólisis de plásticos post-consumo (plásticos de envases) que comercializa la empresa británica Plastic Energy, y *Pyrum thermolysis oil*, que es el aceite de pirólisis procedente de gomas y ruedas que comercializa la empresa alemana Pyrum Innovations. En la notificación de ambos productos se puede observar que presentan peligros físicos (H225), peligros para la salud (H304, H317, H340, H350, H373) y peligros para el medio ambiente acuático (H411, H412), una clasificación muy similar a la de los combustibles líquidos de origen fósil como, por ejemplo, la gasolina. En principio, nada hace indicar que los aceites de pirólisis de composites no vayan a presentar ninguna de estas indicaciones de peligro. En relación a los gases de pirólisis, si bien no existe ninguna notificación en la ECHA al respecto, también se espera que sean clasificados como una mezcla peligrosa de sustancias gaseosas, ya que habitualmente contienen hidrógeno (explosivo), hidrocarburos (inflamables) y CO/H₂S (tóxicos) [3].

2 - ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

2.1 - CARACTERIZACIÓN DE ACEITES DE PIRÓLISIS Y OPCIONES DE MERCADO

Las opciones de mercado del aceite de pirólisis son principalmente dos: la industria del petróleo, pudiendo ser utilizado mezclado con las materias primas de diferentes etapas de refinado del petróleo y/o con las de síntesis de productos químicos de base petroquímica (polímeros, aditivos, BTX⁰, etc.), y el mercado de los combustibles alternativos, concretamente los combustibles derivados de residuos (CDR). En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que hoy en España los aceites de pirólisis son legalmente considerados como residuos, ya que se trata de productos derivados de un residuo, con lo que no pueden comercializarse como una sustancia mientras la Comisión Europea o el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico no establezcan unos criterios de “fin de condición de residuo (F_{cR})” para este tipo de aceites y estos sean publicados en un Reglamento u Orden Ministerial, respectivamente. Por lo tanto, los posibles usos que se exponen a continuación deben realizarse a día de hoy bajo el paraguas de la legislación de residuos y, más concretamente, la de residuos peligrosos.

A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se muestran las sustancias químicas principales contenidas en un aceite de pirólisis sin centrifugar procedente de un *prepreg* aeronáutico con resina epoxi, cuantificadas como porcentaje en área de los picos obtenidos por cromatografía gaseosa acoplada a espectrometría de masas (GC-MS, por sus siglas en inglés). Es

⁰ Benceno, tolueno, xileno.



necesario indicar que esta composición, por muy compleja que parezca, no muestra al completo la realidad composicional del aceite, ya que, aunque se trata de una técnica de análisis muy empleada para este tipo de muestras, las limitaciones de la GC-MS y las condiciones en las que se aplica imposibilitan la determinación completa de la composición. Por ejemplo: en función de la relación muestra / disolvente que se emplee (dilución), se detectarán más o menos especies; por ello en algunos trabajos publicados se han llegado a detectar centenares de sustancias [3]. Por tanto, cuando se consultan composiciones de aceites de pirólisis se debe tener en cuenta que es un producto con una incertidumbre nada despreciable en cuanto a su naturaleza química y que es necesario conocer las limitaciones y las condiciones de la técnica de análisis que se haya empleado en su caracterización [6]. Por otro lado, es necesario mencionar que el porcentaje en área de pico GC-MS no se puede relacionar directamente con tanto por ciento en peso para este tipo de sustancias, por lo que la composición expresada en estas unidades es en realidad cualitativa. Para conocer la concentración es necesario hacer una calibración cuantitativa sustancia por sustancia, algo que en la práctica no se realiza debido a la gran cantidad de compuestos químicos que componen el aceite, con excepción de los casos en los que los datos de porcentaje en área hagan sospechar que alguno de ellos se pueda encontrar en una concentración elevada.

Sustancia	% área	% área familias
Tolueno	2,1	AR 2,7
Etilbenceno	0,4	
1,3-Dimetilbenceno	0,2	
Fenol	10,9	PH 17,2
2-Metilfenol	2,7	
4-Metilfenol	2,2	
2-Etilfenol	0,8	
4-Etilfenol	0,3	
2,6-Dimetilfenol	0,3	
Difenil éter	3,8	OXY 6,8
Acetona	1,6	
2-Metilbenzofurano	0,6	
9H-Xanteno	0,5	
2,1-Pentilfurano	0,3	NIT 14,7
Anilina	11,6	
n-Metilnilina	1,5	
6-Metilquinolina	0,5	
n,n-Dimetilbenzamida	0,4	
1-fenil-1H-pirrol	0,4	
p-Aminotolueno	0,3	OXY-NIT 11,1
Caprolactama	10,1	
Quinolina	1,0	SUL 1,9
Difenil disulfuro	1,3	
Difenil sulfuro	0,3	
Metiltolbenceno	0,3	AQU 34,5
Agua	34,5	
Sustancias no identificadas	11,1	UN 11,1

Tabla 1: Composición química detallada y clasificada en familias de los aceites de pirólisis no centrifugados de prepreg aeronáutico de base epoxi (% área GC-MS).

AR: compuestos aromáticos; PH: compuestos fenólicos; OXY: otras sustancias orgánicas oxigenadas; NIT: sustancias orgánicas nitrogenadas; OXY-NIT: sustancias orgánicas oxigenadas y nitrogenadas; SUL: sustancias orgánicas sulfuradas; AQU: agua; UN: sustancias no identificadas.

A la vista de la Tabla 1 se puede deducir que este aceite de pirólisis apenas contiene hidrocarburos entre las sustancias mayoritarias (2,7 % área, todos aromáticos) y presenta una cantidad significativa de agua (34,5 % área). Tal y como se ha comentado anteriormente, la formación de agua es inevitable en la pirólisis de FRP por la condición oxigenada de las resinas empleadas. Esta puede aparecer formando una fase independiente sin necesidad de centrifugar o tras un proceso de centrifugación del aceite e, incluso - si la cantidad de agua es pequeña - disuelta en el aceite. Las familias de sustancias orgánicas mayoritarias detectadas en este aceite son las oxigenadas y las nitrogenadas (oxigenadas totales: 24 % área, nitrogenadas: 14,7 % área y oxinitrogenadas: 11,1 % área). Además, también existen sustancias orgánicas sulfuradas (1,9 % área) y la composición elemental que se mostrará posteriormente revelará la presencia de sustancias órgano-halogenadas, a pesar de no ser detectadas con la técnica de análisis GC-MS.

La opción de valorización de mayor valor añadido para el aceite de pirólisis sería intentar separar alguna sustancia de interés industrial de entre las contenidas en su composición. La Tabla 1 muestra que el aceite de pirólisis contiene fenol, anilina y caprolactama en una proporción superior al 10 % en área. Estas tres sustancias se utilizan ampliamente en la industria como compuestos químicos de base e incluso como materia prima para la reformulación de polímeros. Sin embargo, en este caso concreto, la proporción de estas sustancias no es suficientemente elevada como para realizar una calibración cuantitativa y tampoco lo es para plantear la separación y purificación de alguna de ellas, que

no sería económicamente competitiva porque la complejidad del propio aceite hace prácticamente inviable la aplicación de procesos de separación habituales.

La segunda opción en términos de valor añadido es el coprocesamiento del aceite de pirólisis en los procesos industriales del refino del petróleo o de la industria petroquímica. Actualmente ya existen experiencias y pruebas técnicas de coprocesamiento de aceites de pirólisis de plásticos de envasado a nivel industrial, principalmente en la unidad de craqueo catalítico fluido (*fluid catalytic cracking, FCC*), en procesos de hidrotratamiento y en la unidad de craqueo de olefinas (*steam cracking*). Este último proceso genera una gran variedad de productos químicos de base, entre ellos etileno y propileno, que posteriormente se pueden convertir en polietileno (PE) o policloruro de vinilo (PVC) y polipropileno (PP) o poliácridonitrilo (PAN), respectivamente. Esta vía, conceptualizada en la Figura 2, es la más estudiada en la actualidad porque permite contabilizar el PE y el PP fabricados según la ruta descrita como plásticos con contenido de material reciclado, lo que abre una nueva alternativa para el cumplimiento de los objetivos de contenido de material reciclado en plásticos de envasado establecidos en el Real Decreto 1055/2022, de envases y residuos de envases, y además asegura la circularidad de los plásticos por la vía del tratamiento termoquímico.

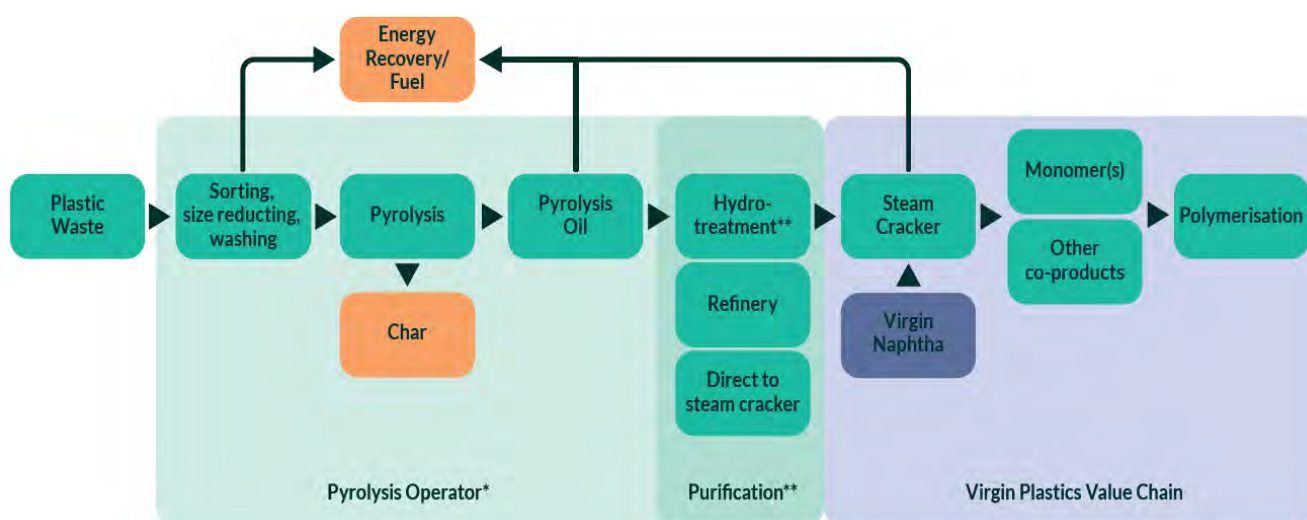


Figura 2: Diagrama conceptual de la utilización de aceite de pirólisis en la industria petroquímica. Extraído de [7].

Grandes compañías como CEPSA, REPSOL, Total Energies o BASF han mostrado interés en el coprocesamiento de aceite de pirólisis de plásticos de envases en los últimos años, lo cual ha estimulado de manera significativa la creación de empresas dedicadas a la producción de este tipo de aceite. Ejemplos de empresas con sede social en España son Neoliquid, Nantek, Greene Enterprise, Preco o Waste Plastic Iberia. En Europa, Plastic Energy en el Reino Unido, Pyrum Innovations AG en Alemania o QuantaFuel en Noruega, entre otros.

Sin embargo, las propiedades físico-químicas de los aceites de pirólisis de plásticos de envases distan significativamente de las propiedades de las materias primas empleadas normalmente en los procesos mencionados, por lo que es habitual que los aceites estén fuera de especificaciones en cuanto al contenido de oxígeno, nitrógeno, halógenos, metales, olefinas e hidrocarburos aromáticos [6,8]. Esto requiere que la relación de coprocesamiento (ratio materia prima convencional / aceite de pirólisis) sea muy alta y/o que los aceites sean pretratados antes de su incorporación al proceso (también existen ya empresas con esta línea de negocio, por ejemplo, Neste). Este último caso compromete en cierta medida la sostenibilidad ambiental, energética y económica de la vía petroquímica por ser necesario un proceso de tratamiento intermedio antes de su utilización [9].

Estas deficientes propiedades físico-químicas hacen que el aceite de pirólisis de composites se encuentre especialmente lejos de poder ser utilizado en la industria del petróleo y la petroquímica. La industria del petróleo se basa en materias primas fundamentalmente compuestas por hidrocarburos (H y C), y el contenido de hidrocarburos de los aceites de pirólisis de composites habitualmente no es muy elevado. Al contrario, estos aceites contienen nitrógeno y oxígeno hasta en un 6 y 10 % en peso respectivamente (en el aceite de pirólisis de plásticos de envases están en el rango de las ppm) y hasta 8000 ppm de cloro (un aceite de pirólisis de plásticos de envases seleccionados sin PVC puede contener unas 200-400 ppm de cloro). Además, como se ha mostrado anteriormente, también pueden contener o estar mezclados con agua.

Utilizando el contenido de cloro como ejemplo, la materia prima de la unidad de craqueo de olefinas debe contener < 3 ppm de cloro, mientras que la carga de *fluid catalytic cracking (FCC)* o de hidrotratamiento podrían admitir concentraciones algo superiores. Esto hace posible un coprocesamiento de aceite de pirólisis de residuos de envases



pero descarta casi por completo esta opción de mercado para aceites de pirólisis de composites, incluso sin tener en cuenta el resto de elementos y compuestos químicos mencionados previamente (N, O, agua) en los cuales estos aceites son especialmente inapropiados. El esfuerzo de descontaminación tendría que ser tan elevado que se trata de un escenario inviable desde el punto de vista económico. La composición del aceite de pirólisis de FRP es excesivamente heteroatómica incluso para los procesos de destilación de alquitranes a través de los cuales se fabrican las breas, en los que se admiten porcentajes de fenol y otros compuestos oxigenados del orden de los recogidos en la Tabla 1, incluso alguna sustancia nitrogenada, pero en ningún caso una presencia tan relevante de agua y sustancias halogenadas.

En lo que se refiere a la utilización del aceite de pirólisis como combustible, en la actualidad no existen regulaciones específicas relacionadas con el uso de ningún tipo de aceite de pirólisis de residuos como combustibles derivados de residuos (CDR). Sin embargo, muchas plantas cementeras españolas están legalmente autorizadas para utilizar "residuos combustibles líquidos que contienen sustancias peligrosas". Este tipo de residuos, con código 19 02 08* en la Lista Europea de Residuos (LER), son aceites minerales y otros líquidos orgánicos obtenidos en los procesos de tratamiento físico-químico de residuos industriales. Por lo tanto, si bien son diferentes a los aceites de pirólisis (LER 19 01 17*), presentan bastante similitud en algunas características.

La Autorización Ambiental Integrada (AAI) de cada una de las plantas cementeras de España recoge la lista de residuos cuya utilización tienen autorizada y también los valores límite de aceptación de estos residuos en cuanto a sus propiedades termo-químicas. En la Tabla 2 se recogen los valores límite autorizados en las cementeras del País Vasco para los residuos combustibles líquidos que contienen sustancias peligrosas, junto con los resultados de caracterización de aceites de pirólisis de diferentes tipos de residuos de FRP.

Propiedad	Combustible para cementera	Prepreg aeronáutico caducado EPOXI	Pala de aero generador EPOXI	Chasis de coche de competición EPOXI	Casco de barco pesquero POLIESTER	Tabla de surf POLIESTER + POLIURETANO
PCI (kcal/kg)	1500 - 10000	7225	7400	7500	7400	6900
S (% peso)	< 1	< 1	< 1	no detectado	no detectado	no detectado
Halógenos totales (ppm)	≤ 20000	303 Cl + 259 F	7843 Cl + 69 Br + 427 F	5527 Cl	1571 Cl	704 Cl
Flúor (ppm)	< 2000	259	427	no detectado	no detectado	no detectado
PCB-PCT (ppm)	< 50	-	-	-	-	-
Hg (ppm)	< 10	-	-	-	-	-
Cd + TI + Hg (ppm)	< 100	-	-	-	-	-
Suma metales pesados (% peso)	< 0,5	-	-	-	-	-
Punto de inflamación (°C)	> 38	-	-	-	-	-

Tabla 2: Límites de admisión de residuos líquidos orgánicos 19 02 08* en cementeras del País Vasco y caracterización de aceites de pirólisis de diferentes residuos de FRP.

Propiedad	Combustible de aceites usados	Prepreg aeronáutico caducado EPOXI	Pala de aerogenerador EPOXI	Chasis de coche de competición EPOXI	Casco de barco pesquero POLIESTER	Tabla de surf POLIESTER + POLIURETANO
PCI (kcal/kg) ¹	9500 - 10000	7225	7400	7500	7400	6900
S (% peso) ¹	≤ 1	< 1	< 1	no detectado	no detectado	no detectado
Cl total (ppm)	< 50	303 (+ 259 F)	7843 (+ 69 Br + 427 F)	5527	1571	704
PCB (ppm)	< 1	-	-	-	-	-
Hg (ppm)	< 5	-	-	-	-	-



TI / Ni / Pb / Cd / Cr / As / Cu / Co / Mn / Sb / Zn / Sn (ppm)	< 5	-	-	-	-	-
---	-----	---	---	---	---	---

¹Especificaciones de los fuelóleos contenidas en el Real Decreto 61/2006, por el que se fijan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo, se regula el uso de determinados biocombustibles y el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo.

Tabla 3: Valores límite de aceite usado para su uso como combustibles según Orden APM/205/2018 y caracterización de aceites de pirólisis de diferentes residuos de FRP

La Tabla 2 muestra que por lo general los aceites de pirólisis de FRP cumplen con los requisitos de poder calorífico, contenido en azufre y contenido en halógenos totales y flúor, por lo que a priori podría ser un destino posible. Sin embargo, se debería comprobar el contenido de bifenilos y terfenilos policlorados (*polychlorinated biphenyls (PCB)*, *polychlorinated terphenyls (PCT)*) y de metales pesados, parámetros que requieren de unas técnicas de caracterización complejas y que habitualmente no se llevan a cabo sin una necesidad específica, por lo que no se dispone de esa información ni en datos propios ni en la bibliografía. Un parámetro que posiblemente no cumplan los aceites de pirólisis de composites es el punto de inflamación, que puede ser incluso menor de 20 °C según la experiencia del equipo de investigación autor del capítulo. También quedaría por determinar si las plantas cementeras pueden admitir altos contenidos de nitrógeno, y en su caso, con qué límites de aceptación.

En la Tabla 3 se presentan los mismos datos de caracterización de los aceites, pero, en esta ocasión, junto a los valores límite de un producto denominado “aceite usado procesado”, que constituye el primer ejemplo en España de un CDR que finaliza su condición legal de residuo (FcR) y pasa a formar parte de los combustibles comerciales no residuales. El procedimiento según el cual se puede obtener esta condición FcR viene definido en la Orden APM/205/2018, por la que se establecen los criterios para determinar cuándo el aceite usado procesado procedente del tratamiento de aceites usados para su uso como combustible deja de ser residuo. Los valores límite que se recogen en el anexo I de esta orden, si bien aplican al ejemplo concreto de los aceites minerales usados, pueden ser indicativos de lo que se pueda exigir a los aceites de pirólisis en un futuro en el que se desclasifiquen como residuos para su utilización como combustible industrial. En este caso se puede observar que las limitaciones en cuanto al PCI (9500-10000 kcal/kg) y al contenido en cloro (50 ppm) son mucho más exigentes, y los aceites de pirólisis de FRP están muy lejos de poder cumplirlas. Otra referencia que se podría tener en cuenta para prever los valores límite que se podrían establecer para la desclasificación de los aceites de pirólisis de FRP es la propuesta de Antoniou y Zorpas [10] para que el aceite de pirólisis de neumáticos usados alcance la FcR y se utilice como combustible industrial, que sitúa el límite de concentración de cloro aún más bajo (5 ppm).

2.2 - CARACTERIZACIÓN DE GASES DE PIRÓLISIS Y OPCIONES DE MERCADO

Los gases de pirólisis presentan opciones de mercado similares a las de los aceites de pirólisis, es decir: su utilización como materia prima para la industria del petróleo y la petroquímica y su utilización como combustible. En este caso concreto, dado que se trata de una sustancia gaseosa, la opción más lógica es la de su utilización en la misma localización en la que se genera. Su transporte implicaría la instalación de tuberías (por su composición es improbable que se pueda inyectar en la red de gas natural) o su envasado en recipientes de gases a presión con el consiguiente riesgo de condensaciones, lo cual implicaría un pre-tratamiento de los gases y por tanto unos costes no asumibles para un producto de las características que se muestran a continuación. En la Tabla 4 se puede observar, para diferentes tipos de residuos de FRP, el poder calorífico superior (PCS) y la composición determinada por cromatografía de gases (GC) con detectores de conductividad térmica (TCD) y de ionización de llama (FID).

	PCS	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆	Otros hidrocarburos C2-C6	H ₂ S
Pre-preg aeronáutico caducado EPOXI	25	13	24	5	22	5	3	8	20
Pre-preg aeronáutico caducado POLIBENZOXACINA	25	⁻²	⁻²	35	64	⁻²	⁻²	1	⁻²
Pala de aerogenerador EPOXI	16	4	12	56	17	2	4	5	⁻²
Chasis de coche de competición EPOXI	20	10	11	34	27	3	3	12	⁻²
Casco de barco pesquero	8	2	7	82	2	1	3	3	⁻²



POLIESTER								
Tabla de surf	12	8	9	63	12	1	3	4
POLIESTER + POLIURETANO								- ²

¹ En base seca y libre de nitrógeno, oxígeno, sustancias nitrogenadas, sustancias halogenadas y especies de azufre diferentes del H₂S² Por debajo del límite de cuantificación

Tabla 4: Poder calorífico superior (MJ/m³N) y composición (% volumen¹) de gases de pirólisis de diferentes residuos de PRF.

En lo que se refiere al poder calorífico, la Tabla 4 muestra que, en función del residuo concreto de que se trate, el PCS de los gases puede oscilar entre 8 y 25 MJ/m³N. Existen variaciones en el poder calorífico incluso para residuos que contienen el mismo tipo de resina polimérica, como puede observarse en la tabla entre los tres tipos de residuos que contienen resina epoxi (16-25 MJ/m³N). De la tabla también se puede deducir que los residuos con resina de tipo poliéster generan unos gases con un poder calorífico especialmente bajo (8-12 MJ/m³N) debido a su alto contenido en CO₂. Por último, cabe destacar que los poderes caloríficos más altos se obtienen con los residuos de *prepreg* caducados (25 MJ/m³N), lo cual podría estar relacionado con el hecho de que un residuo *prepreg* de producción está constituido exclusivamente por la resina y las fibras, mientras que en los residuos FVU puede haber otros materiales que influyan negativamente en el poder calorífico de los gases de pirólisis.

Para poder contextualizar con otros combustibles gaseosos que se utilizan en la industria, el gas natural tiene un poder calorífico del orden de 45-50 MJ/m³N, mientras que el propano y el butano pueden alcanzar los 90 y 120 MJ/m³N respectivamente. Queda a la vista que la calidad de los gases de pirólisis de FRP como combustible es baja, pudiendo alcanzar en el mejor de los casos sólo la mitad del poder calorífico del gas natural por unidad de volumen. Por tanto, la mejor manera de maximizar el aprovechamiento de su contenido energético es utilizarlos *in situ* como fuente de energía que sustituya parcialmente al combustible que se use para calentar los reactores de pirólisis (gasóleo o gas natural). Dado el bajo poder calorífico de estos gases, el porcentaje del consumo energético total que pueden abastecer es pequeño, del orden del 5-15 %, pero este escenario es sensiblemente mejor que si los gases de pirólisis se quemaran en un motor de gas para producir electricidad, ya que la baja eficiencia de la conversión de energía térmica en energía eléctrica en los motores hace perder mucho potencial energético [11].

Tal y como se ha comentado anteriormente, la otra opción de mercado de estos gases es la utilización en la industria petroquímica y/o de síntesis química. Cabe recordar que para ello la instalación de pirólisis debería estar ubicada en la misma parcela industrial o muy cercana a aquella en la que se utilizarían estos gases. En líneas generales, en términos cualitativos de presencia de hidrógeno, metano y otros hidrocarburos, la composición de los gases de pirólisis de FRP podría ser asimilable a corrientes gaseosas que se generan (*off-gases*) en las unidades de refino de petróleo como la de FCC, con las que podrían mezclarse y por tanto ser incorporadas al proceso productivo [12-13]. Sin embargo, el contenido de CO₂ de los gases de pirólisis, que en muchos casos supera el 30 % en volumen y puede llegar a constituir el 80 % de los gases en algunas ocasiones (ver Tabla 4), condiciona completamente su utilización directa, dejando de ser interesante como gas de mezcla de las corrientes gaseosas de refinería, cuyo valor se basa en la riqueza en hidrógeno, olefinas, metano y otros hidrocarburos. Por otro lado, los porcentajes de hidrógeno y monóxido de carbono no son suficientemente elevados como para poder considerar estos gases como un gas de síntesis de suficiente calidad.

De entre todos los gases de pirólisis de PRF recogidos en la Tabla 4, los derivados de *prepregs* aeronáuticos de resinas epoxi son los más interesantes en términos de contenido en hidrocarburos, hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono. Sin embargo, también se puede observar en la tabla que estos gases contienen un 20 % en volumen de H₂S, una sustancia tóxica y que también genera problemas de operación relacionados con la corrosión, por lo que debe ser eliminada como paso previo a cualquier aplicación industrial. Este contaminante es de los pocos que se puede detectar y cuantificar adecuadamente con un sistema de análisis basado en GC-TCD/FID, que es el modo en el que la gran mayoría de grupos de investigación en este campo analizan los gases de pirólisis. A la vista de los datos publicados, parece que los gases de pirólisis de FRP carecen de contaminantes a excepción del H₂S, pero lo que ocurre en realidad es que la mayoría de las sustancias contaminantes presentes en los gases no se pueden determinar por los métodos convencionales de análisis que se utilizan para gases de esta naturaleza. En este sentido, existe un trabajo muy interesante publicado por Pauline Tranchard *et al.* [14], en el cual se analizan por espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) los gases de pirólisis del mismo *prepreg* aeronáutico que el mostrado en la Tabla 4, detectando contaminantes como sulfuro de carbonilo (COS), amoniaco (NH₃), dióxido de azufre (SO₂) y fenol (C₆H₆O). El grupo de investigación autor del presente capítulo también ha detectado trazas de especies como óxido de dinitrógeno (N₂O), cloruro de hidrógeno (HCl), fluoruro de hidrógeno (HF) o formaldehído (CH₂O) utilizando la misma técnica FTIR para el análisis de gases de pirólisis de FRP.



3 - PROCESOS DE VALORIZACIÓN DE ACEITES Y GASES DE PIRÓLISIS: SITUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA, HUELLA INDUSTRIAL Y DESARROLLOS FUTUROS EN ESPAÑA Y A NIVEL GLOBAL

A día de hoy existe muy poco desarrollo en el ámbito de los procesos de valorización de aceites y gases de pirólisis. La gran mayoría de la información publicada sobre pirólisis de FRP se centra en la recuperación de las fibras, analizando sus propiedades mecánicas y sus posibilidades de reutilización en nuevos materiales compuestos. En lo que se refiere a los aceites y gases de pirólisis, la información se limita a describir sus propiedades físico-químicas, añadiendo comentarios genéricos típicos del ámbito de la pirólisis de residuos plásticos en los que se indican las potenciales opciones de utilización que se han abordado en los apartados anteriores de este capítulo. Sin embargo, tal y como ha quedado claro en los apartados mencionados, la realidad es que la utilización industrial de estos dos productos requeriría de un intenso post-tratamiento que la industria en la actualidad no considera viable, ya que sus esfuerzos por el momento están centrados en conseguir incorporar a sus procesos los aceites de pirólisis de plásticos de envases, lo cual constituye ya un reto nada despreciable.

Descartada por el momento la vía del post-tratamiento en la industria, a nivel investigador cabe la posibilidad de estudiar la modificación del propio proceso de pirólisis para intentar generar unos aceites y gases de características mejoradas, asegurando siempre que las propiedades mecánicas de las fibras no se vean alteradas. La primera alternativa es modificar los parámetros de operación, como: la velocidad de calentamiento, la temperatura final, el tiempo de isoterma a la temperatura final, el tiempo de residencia y la mayor o menor carga oxidante de la atmósfera de trabajo. De un análisis del estado del arte en la bibliografía se puede deducir que, en los rangos en los que se debe trabajar para asegurar la calidad de las fibras, ninguna modificación de estos parámetros de operación tiene una influencia determinante en la mejora de las propiedades físico-químicas de aceites y gases de pirólisis [15]. La segunda alternativa es la utilización de catalizadores. En pirólisis se trabaja habitualmente con catalizadores sólidos que se pueden usar en dos disposiciones diferentes. La primera disposición consiste en mezclar el residuo y el catalizador, de manera que el catalizador actúa sobre el mecanismo de descomposición térmica del residuo, dando lugar a productos diferentes de los que se producen por acción exclusivamente térmica. La segunda disposición consiste en situar el catalizador en un lecho o reactor diferente de aquél en el que tiene lugar la pirólisis, de manera que éste actúa sobre las sustancias que se forman en la descomposición térmica del residuo, fomentando las reacciones secundarias entre ellas y dando lugar, también en este caso, a productos diferentes (y/o en distinta cantidad) de los que se producen en ausencia de catalizador.

La pirólisis catalítica de residuos es un proceso muy estudiado desde hace años, por lo que sorprende que en el caso concreto de los residuos de composites apenas se encuentren dos grupos de investigación en todo el mundo que hayan publicado trabajos (revisados por comités externos) sobre la influencia de los catalizadores en los productos de pirólisis: el grupo de Samy Yousef de la Universidad Tecnológica de Kaunas (Lituania) y el grupo de investigación que escribe este capítulo. Yousef y su equipo estudian el proceso de pirólisis con el catalizador mezclado con el residuo, y hasta la fecha han publicado trabajos de pirólisis catalítica con zeolitas de los tipos ZMS-5 e Y, actuando sobre residuos de composites con resina de poliéster, epoxi y polimetilmetacrilato (PMMA). Los resultados muestran que aun utilizando relaciones catalizador/residuo muy altas y difícilmente extrapolables a nivel industrial, los productos condensables obtenidos siguen siendo una mezcla muy compleja de hidrocarburos monoaromáticos y poliaromáticos, compuestos oxigenados y otras sustancias orgánicas heteroatómicas [16-18]. En términos generales, de su investigación se puede deducir que la utilización de los catalizadores permite aumentar la concentración de algunas de estas familias, pero no lo suficiente como para obtener un producto de interés industrial. Además, la utilización del catalizador mezclado con el residuo presenta implicaciones derivadas de la necesidad de separar con posterioridad las fibras y el catalizador.

Por su parte, el grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU), autor de este capítulo, lleva más de 10 años estudiando la posibilidad de obtener productos de pirólisis de FRP de aplicación industrial a través de un proceso de dos reactores en serie. En el primer reactor tiene lugar la pirólisis del residuo. Las sustancias que salen del primer reactor se alimentan al segundo reactor, donde se lleva a cabo un tratamiento en fase gaseosa de carácter térmico o termo-catalítico antes de permitir la condensación y la consecuente separación entre aceites y gases [19-20]. Utilizando este diseño de proceso, con patente española y europea [21], el grupo ha investigado la posibilidad de enfocar el tratamiento del segundo reactor a la mejora de las propiedades físico-químicas de los aceites por un lado y, por otro lado, a la eliminación de los aceites y la promoción de los gases, mejorando al mismo tiempo sus propiedades físico-químicas.

En la Tabla 5 se muestran algunos resultados obtenidos bajo el enfoque de la optimización de los aceites de pirólisis. En concreto, se presentan las mejores composiciones obtenidas, agrupadas en sus principales familias y determinadas como porcentaje en área GC-MS, de los aceites de la pirólisis catalítica de dos tipos de residuo de PRF tras la realización de una serie de ensayos en los que se probaron 4 tipos de zeolitas diferentes como catalizador, con diferentes relaciones catalizador / residuo y diferentes relaciones sílice / alúmina en el propio catalizador. Estos



ensayos se realizaron aplicando las condiciones de operación que favorecen en mayor medida la producción de aceites: velocidad de calentamiento muy rápida (*fast pyrolysis*) y tiempo de residencia bajo. Cabe mencionar que en todos los casos se obtuvo también una fase acuosa que se separó de los aceites.

	Chasis de coche de competición (resina epoxi)		Casco de barco deportivo (resina poliéster)	
	Sin catalizador	Zeolita H-USY	Sin catalizador	Zeolita H-USY
T (°)	600	600	600	600
C/F	-	2	-	2
SAR	-	30	-	30
AR	6,8	47,6	33,2	66,2
AL	0,2	0,0	0,3	0,0
PAH	2,8	37,7	8,5	27,6
PH	23,2	4,8	0,0	0,0
2PH	12,5	1,4	0,5	0,5
OXY	3,1	0,5	10,8	0,0
NIT	0,8	1,2	0,1	0,0
SUL	0,0	0,0	0,0	0,0
HAL	0,8	0,4	0,1	0,0
UN	49,8	6,4	46,5	5,7

Tabla 5: Composición química de los aceites de pirólisis tras el tratamiento termo-catalítico de las sustancias procedentes de la pirólisis de residuos de chasis de coche de competición (epoxi) y de casco de barco deportivo (poliéster) (% área GC-MS).

C/F: relación catalizador / residuo; SAR: relación sílice / alúmina. AR: hidrocarburos monoaromáticos; AL: hidrocarburos alifáticos; PAH: hidrocarburos poliaromáticos; PH: compuestos fenólicos de anillo simple; 2PH: compuestos fenólicos de doble anillo; OXY: otros compuestos oxigenados; NIT: sustancias orgánicas nitrogenadas; SUL: sustancias orgánicas sulfuradas; HAL: sustancias orgánicas halogenadas; UN: sustancias no identificadas.

Tal y como se puede apreciar, la utilización de catalizadores permite, en algunos casos y bajo ciertas condiciones, obtener unos aceites de pirólisis con una composición simplificada, al menos a nivel de familias químicas. Este es el caso, por ejemplo, de los aceites procedentes de la pirólisis del casco de barco deportivo, basado en resina poliéster y procesado con la zeolita H-USY con una relación catalizador / residuo de 2. Se puede observar que en este caso se consigue transformar un aceite compuesto principalmente por hidrocarburos (42 % área), sustancias orgánicas oxigenadas (11,3 % área) y un porcentaje muy elevado de sustancias desconocidas (46,5 % área) en un aceite compuesto casi exclusivamente por hidrocarburos y que presenta una proporción muy baja de compuestos no identificados (5,8 % área) y de sustancias orgánicas oxigenadas (0,5 % área). Por tanto, parece que bajo las condiciones de este proceso se produce una efectiva descontaminación del aceite, que se compondría casi exclusivamente de hidrocarburos (C, H), siempre y cuando la fracción de compuestos no identificados no acumule los heteroátomos. Aunque este es un resultado en cierto modo esperanzador, cabe destacar que se ha obtenido con una relación catalizador / residuo de 2, es decir, que se utiliza el doble de cantidad de catalizador que de residuo. Esta relación no se podría mantener a escala industrial por cuestiones económicas, por lo que pone en duda las posibilidades de obtener aceites mejorados por esta vía.

En el caso del residuo de chasis de coche, basado en resina epoxi, no se han conseguido obtener unos resultados tan satisfactorios bajo ninguna de las condiciones estudiadas, probablemente debido a la mayor complejidad de la formulación de esta resina. La utilización de zeolita H-USY consigue disminuir mucho la presencia de sustancias no identificadas (de 49,8 a 6,4 % área) y las sustancias oxigenadas (de 38,8 a 6,7 % área), pero sigue siendo un aceite oxigenado, nitrogenado y halogenado. Tal y como se ha justificado a lo largo del presente capítulo, un aceite de estas características posee escaso valor industrial, por lo que a la vista de estos resultados y los publicados por Yousef y su equipo, se puede afirmar que la optimización de los aceites a través de la pirólisis catalítica es un reto muy complicado, requiere de mayor tiempo de investigación y en la actualidad no es una alternativa viable a nivel industrial.

Cabe recordar que, en ausencia de una aplicación industrial, los aceites de pirólisis de composites se clasifican como residuos peligrosos, normalmente de alto coste de gestión por su contenido en halógenos. Dada la cantidad en la que se producen (10-50 % peso del residuo inicial), el coste de gestión de los aceites no es un factor despreciable en el balance económico de un proceso de estas características, de manera que, en algunos casos, una falta de previsión en

este aspecto podría conllevar el fracaso económico de la inversión. La otra alternativa consiste en quemarlos para obtener energía en la propia planta de reciclado, pero, dada su composición, la inversión en equipos de depuración de los gases de combustión sería muy elevada.

En este contexto, parece lógico que se explore la posibilidad de minimizar la generación de aceites de pirólisis en favor de la generación de gases y observar las posibilidades de la fracción gaseosa que se obtiene bajo estas condiciones. Este es el enfoque al que el grupo de investigación autor de este capítulo ha dedicado sus mayores esfuerzos durante estos últimos años. En esta ocasión, se debe trabajar con las condiciones de operación más favorables para la minimización de aceites y la maximización de gases, que se corresponden con velocidades de calentamiento lentas y tiempos de residencia elevados, y, además, la temperatura del segundo reactor debe ser también elevada para fomentar el craqueo secundario de las sustancias que se forman en la descomposición del residuo en el primer reactor, lo cual permitirá eliminar aceites y generar más gases.

En la Figura 3 se puede observar el aspecto de la fase condensada obtenida tras aplicar un tratamiento térmico de 900 °C en el segundo reactor (sin catalizador). A la vista queda que la eliminación de los aceites es total, obteniéndose exclusivamente una fase acuosa que contiene trazas de compuestos orgánicos en concentraciones de ppm y, además, la cantidad de producto condensado es muy baja. Merece la pena la comparación de estos condensados acuosos con los condensados bi- y trifásicos mostrados en la Figura 1.

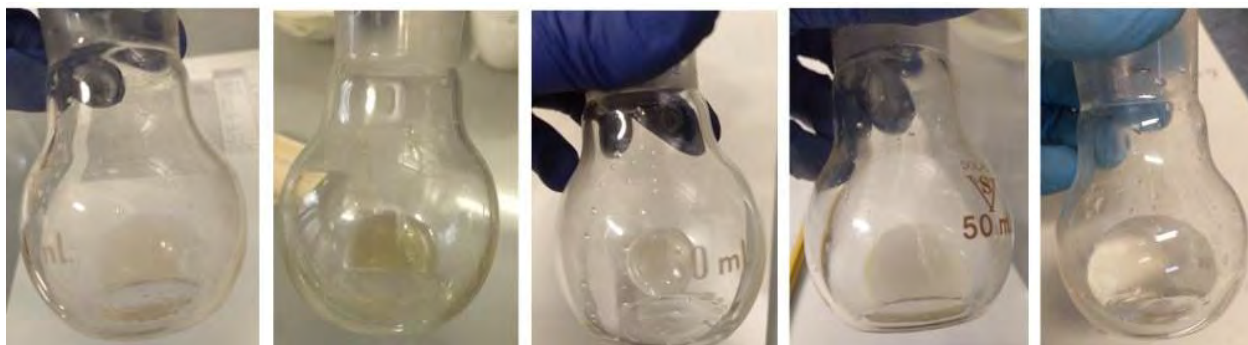


Figura 3: Aspecto de líquidos de pirólisis de diferentes residuos de plásticos reforzados con fibras tras el tratamiento térmico de los gases y vapores a 900 °C.

A falta de caracterizaciones más exhaustivas, existe la posibilidad de que estos líquidos se pudiesen verter a colector y se depurasen en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) urbanas, pero, aunque ese no fuera el caso, siempre podrían depurarse en las EDAR para aguas industriales que habitualmente existen en las propias instalaciones industriales. Incluso en la situación más desfavorable, es decir, que este líquido tuviese que gestionarse como residuo peligroso al mismo precio que un aceite de pirólisis (improbable), el coste de gestión sería menos de la mitad del que supone el escenario con producción de aceites, lo que ya no compromete la viabilidad económica del proceso de pirólisis.

Bajo las condiciones de este tratamiento, la cantidad de gases de pirólisis aumenta de manera equivalente a la disminución de la fase líquida, por lo que el gas de pirólisis pasa a ser el producto principal de entre los dos. Además, las reacciones secundarias que tienen lugar en el segundo reactor modifican positivamente la composición del gas, provocando un aumento considerable de la proporción de hidrógeno y una disminución equivalente de la proporción de CO₂. En la Figura 4 se puede apreciar el mencionado cambio en la composición, que se produce de manera similar independientemente del tipo de residuo tratado y supone unas concentraciones de hidrógeno en los gases del orden del 40 % en volumen.

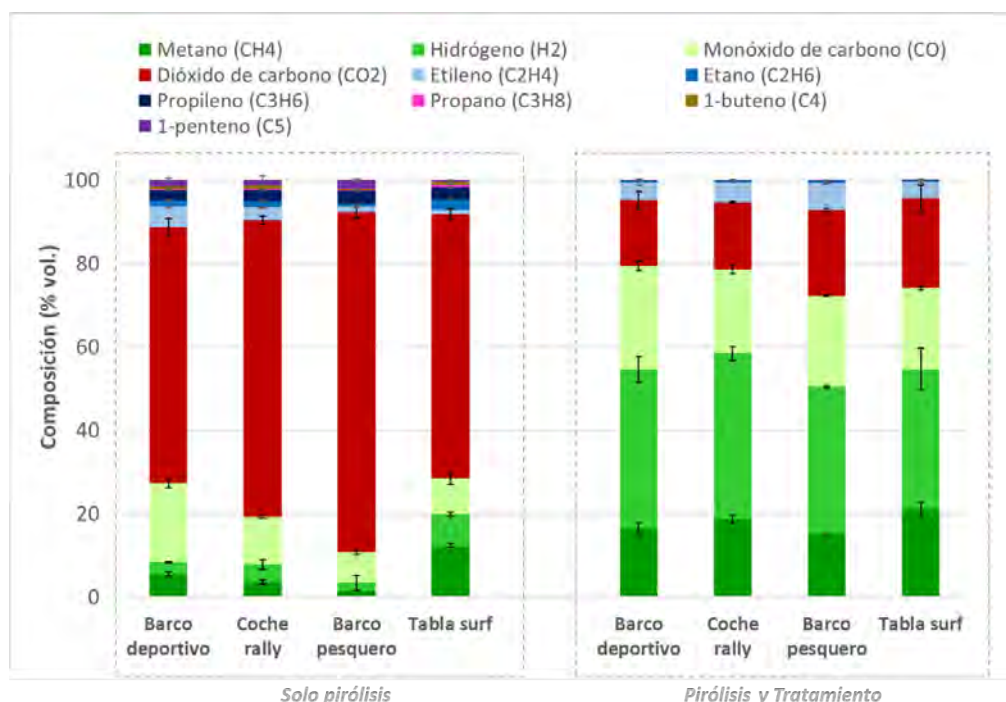


Figura 4: Composición de los gases de pirólisis de diferentes residuos de plásticos reforzados con fibras sin tratamiento térmico (izquierda) y con tratamiento térmico a 900 °C (derecha).

Esta proporción de hidrógeno en los gases puede aumentarse aún más utilizando catalizadores y realizando un proceso de limpieza de los gases con carbón activo. El grupo de investigación que escribe este capítulo ha publicado recientemente unos resultados en los que se demuestra que la combinación de la utilización de catalizadores de níquel en un tratamiento a 700 °C unido a la posterior limpieza del gas de pirólisis con carbón activo (adsorbe el CO₂ y el H₂S) genera unos gases compuestos en más del 90 % en volumen por hidrógeno [22]. Estos resultados se han obtenido en el tratamiento de residuos de *prepreg* aeronáutico de base epoxi y son excepcionales. Aún falta por realizar un análisis exhaustivo de contaminantes en la fase gaseosa, si bien se espera que muchos de ellos sean adsorbibles en el carbón activo y aquellos que no lo sean se presenten en formas químicas de fácil eliminación, ya que el paso por el reactor secundario de tratamiento tiende a simplificar las sustancias químicas presentes en la fase gaseosa producida. En cualquier caso, una vez que se supera el 50 % en volumen de hidrógeno en los gases, la separación del hidrógeno como compuesto puro es económicamente viable a través del proceso *pressure swing adsorption* (PSA). Esto supone que un proceso de pirólisis que incluya este tratamiento generaría hidrógeno puro como producto junto con las fibras recuperadas, otorgando mayor competitividad al proceso. Los ingresos derivados de la venta del hidrógeno, unido a que los gases sobrantes de la separación PSA poseen mayor poder calorífico que los que se obtienen sin tratamiento, compensan el mayor gasto energético que supone el segundo reactor de tratamiento de los gases y vapores. Los cálculos preliminares del grupo de investigación indican que un proceso de pirólisis avanzado en el que se eliminan los aceites y se produce un gas rico en hidrógeno posee mayor rentabilidad económica que el proceso de pirólisis convencional.

4 - RECOMENDACIONES DE FUTURO Y ESTRATEGIA DE DESARROLLO

En la actualidad, los aceites de pirólisis de residuos plásticos reforzados con fibras (composites), lejos de ser un producto de interés, constituyen un problema de tal magnitud que su gestión puede ser el motivo del fracaso de funcionamiento de una planta de reciclado de este tipo de residuos. Se trata de un residuo peligroso con escasas o nulas opciones de mercado y cuyo coste de gestión puede llegar a ser mayor que el coste derivado del consumo energético de la instalación. Por tanto, la principal recomendación para las instalaciones de pirólisis de residuos plásticos reforzados con fibras que pretendan implementarse en el futuro es la previsión adecuada del destino de los aceites de pirólisis. Es decir, contar de antemano con un contrato cerrado para su destino final conociendo su coste de gestión. En este sentido, un escenario en el que el aceite de pirólisis se envía a otro proceso industrial a coste cero se podría considerar exitoso. En cuanto a la estrategia de desarrollo en este ámbito, esta debe pasar por aumentar la financiación a proyectos de investigación en los que se avance en el conocimiento acerca de la caracterización y optimización de los productos de pirólisis, así como la colaboración público-privada para testear a escalas superiores tecnologías de optimización maduras en laboratorio.



5 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Fiedreric *et al.*, Waste Management 173 (2024) 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.002>
- [2] S. Yousef y col., J. Anal. Appl. Pyrol. 173 (2023) 106100. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106100>
- [3] L. Ge *et al.*, J. Anal. Appl. Pyrol. 171 (2023) 105964. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105964>
- [4] W. Chen *et al.*, J. Anal. Appl. Pyrol. 169 (2023) 105859. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105859>
- [5] L. Ge *et al.*, J. Anal. Appl. Pyrol. 170 (2023) 105919. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105919>
- [6] M. Kusen erg *et al.*, Waste Manage 138 (2022) 83-115. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.009>
- [7] A. Gendell y V. Lahme, Feedstock Quality Guidelines for Pyrolysis of Plastic Waste, Report for the Alliance to End Plastic Waste. Eunomia Research & Consulting. August 2022. Disponible en: <https://endplasticwaste.org/en/our-stories/feedstock-for-pyrolysis>
- [8] A. P. Silva *et al.*, Energies 16 (2023) 3568. <https://doi.org/10.3390/en16083568>
- [9] A. Rollinson, Leaky loop “recycling”. A technical correction on the quality of pyrolysis oil made from plastic waste. Zero Waste Europe. Technical Report. October 2023. Disponible en: https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2023/10/e-Summary-Leaky-Loop-Recycling_-A-Technical-Correction-on-the-Quality-of-Pyrolysis-Oil-made-from-Plastic-Waste.pdf
- [10] N.A. Antoniou y A.A. Zorpas, Waste Management 95 (2019) 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.035>
- [11] A. Serras-Malillos *et al.*, J. Ind. Eng. Chem. 129 (2024) 665-681. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.09.020>
- [12] P. Bernardo. Ethylene Off-Gas. In: Drioli, E., Giorno, L. (eds) Encyclopedia of Membranes. (2016) Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44324-8_1625
- [13] Z. Gholami *et al.*, Energies 14 (2021) 8190. <https://doi.org/10.3390/en14238190>
- [14] P. Tranchard *et al.*, J. Anal. Appl. Pyrol. 126 (2017) 14-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.07.002>
- [15] E. Pakdel y col., Resourc. Conserv. Recycl. 166 (2021) 105340. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105340>
- [16] S. Yousef y col., Thermochim. Acta 715 (2022) 179293. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179293>
- [17] S. Yousef *et al.*, Fuel 315 (2022) 123235. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123235>
- [18] S. Yousef *et al.*, J. Anal. Appl. Pyrol. 177 (2024) 106330. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106330>
- [19] N. Gastelu *et al.*, Catalysts 8 (2018) 523. <https://doi.org/10.3390/catal8110523>
- [20] A. Serras Malillos *et al.*, Sustain. Mat. Technol. 38 (2023) e00773. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00773>
- [21] A. Lopez-Uriónabarrenechea *et al.*, Method for Treating Vapours Generated During the Process for Recovering Carbon Fibres From Composites By Pyrolysis (2016). WO2016/135359A1.
- Disponi le en: <https://data.epo.org/publication-server/document?iDocId=6449699&iFormat=0>
- [22] E. Acha *et al.*, Polymers 16 (2024) 580. <https://doi.org/10.3390/polym16050580>



Capítulo 9: SOLVÓLISIS Y RECICLADO BIOLÓGICO DE COMPOSITES. OBTENCIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Pablo Ferrero Aguar¹, Nora Lardiés Miazza¹

¹ AIMPLAS (Plastics Technology Centre) <https://www.aimplas.net/>

Abstract

This chapter analyses the chemical recycling technique by solvolysis and by biological recycling, explaining that it involves breaking the polymer chain by using reactive solvents, temperature, catalysts, and pressure in the first case, and enzymes and microorganisms in the second. The situation of both technologies is shown, i.e. the operating parameters found in the literature for each type of polymer. In the case of solvolysis, the companies that are currently commercializing this technology are listed; there are still no companies for the case of biological recycling as its technology readiness level (TRL) is lower than for solvolysis. The chapter ends with recommendations for future developments for both types of solvolysis.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - SOLVÓLISIS: ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

El proceso de solvólisis para materiales compuestos consiste en una rotura de la cadena polimérica de la matriz utilizando disolventes, reactivos, y, en algunos casos, catalizadores como ácidos, bases o sales de metales.

El proceso de solvólisis está cobrando un interés creciente en los últimos años porque puede abrir la puerta a la recuperación de una amplia variedad de resinas y fibras valiosas a partir de residuos poliméricos complejos de múltiples materiales y capas.

El primer paso para reciclar los composites por solvólisis es la trituración mecánica de estos residuos con el fin de aumentar la superficie de difusión eficaz del disolvente. Posteriormente, el disolvente químico degrada la matriz polimérica (parte orgánica) de los composites, lo que permite recuperar monómeros (u oligómeros) del polímero y separar las fibras, evitando al mismo tiempo la formación de residuos de carbonilla como sucede con el proceso de pirólisis (ver capítulo 8). La solvólisis requiere temperaturas más bajas que la pirólisis, lo que evita la degradación de las fibras recuperadas. Sin embargo, una desventaja clave del proceso es el uso de productos químicos y catalizadores o reactivos que complican las posteriores etapas de recuperación del disolvente y de purificación de los monómeros. Las condiciones del proceso de solvólisis son muy variadas: el que sean más fuertes o suaves va a depender de la temperatura, la presión, los disolventes reactivos y los catalizadores utilizados, lo que a su vez depende del tipo de matriz polimérica que se quiere degradar. Los aditivos o catalizadores se añaden para moderar las condiciones de funcionamiento, es decir, para reducir la temperatura y la presión de degradación.

El agua es el disolvente más investigado, ya sea puro o con un co-disolvente (como alcoholes, fenoles o aminas), y se ha utilizado a menudo con catalizadores alcalinos y con catalizadores ácidos en menor medida. Otros disolventes que se han utilizado son los alcoholes, la acetona y los glicoles con o sin catalizadores.

La glicólisis es el método más investigado para el reciclado químico de composites, siendo éste un caso especial de solvólisis que utiliza glicoles para romper los enlaces poliméricos. Los glicoles pueden utilizarse a altas temperaturas sin necesidad de aumentar la presión y permiten la recuperación de oligómeros que se utilizarán para la síntesis de nuevos polímeros.

La solvólisis puede clasificarse en dos tipos: 1) solvólisis a baja temperatura (en condiciones subcríticas) y 2) solvólisis en condiciones supercríticas

- Solvólisis en condiciones subcríticas ($T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$): La solvólisis a baja temperatura y a presión atmosférica



normalmente requiere el uso de catalizadores y aditivos. Esta solvólisis suele requerir largos tiempos de residencia y tiene la ventaja de ofrecer un mejor control de los mecanismos de reacción gracias a la menor aparición de reacciones secundarias. Por lo tanto, el proceso conduce a mayores tasas de recuperación de monómeros, pero algunos disolventes pueden ser agresivos y tóxicos. Por lo tanto, es deseable un mejor medio de reacción para reducir el tiempo de proceso y el impacto medioambiental.

- Solvólisis en condiciones supercríticas ($T > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$): Los fluidos supercríticos (SCF, por sus siglas en inglés) tienen bajas viscosidades, altos coeficientes de transporte de masa y altas difusividades en comparación con los fluidos subcríticos, por lo que garantizan un buen medio de reacción para superar el largo tiempo de residencia de los mecanismos de reacción lentos y las limitaciones de la transferencia de masa. La solvólisis en condiciones supercríticas permite recuperar fibras con mejores propiedades superficiales y mecánicas.

Revisando los artículos disponibles en bibliografía se observa que en la vertiente subcrítica se suelen utilizar catalizadores metálicos como el MgCl_2 , FeCl_2 , ZnCl_2 [1] o el $\text{Ti}(\text{n-BuO})_4$ [2] para la solvólisis de composites reforzados con fibra de carbono o AlCl_3 [3] para los que contienen fibra de vidrio. En estos casos, se combina el efecto activante del catalizador metálico junto con un disolvente con una buena capacidad de penetración en la resina, factores clave para conseguir romper la red tridimensional polimérica.

Las temperaturas empleadas son las mayores posibles, marcadas por la temperatura de ebullición del disolvente, oscilando entre 100 y $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. En paralelo, existe igualmente la opción de emplear condiciones altamente oxidantes basadas en ácido peracético [4], KMnO_4 [5] o agua oxigenada [6]. En todos estos casos, pese al entorno oxidante empleado, los autores reportan tanto una eliminación de la resina como una conservación de las propiedades mecánicas superiores al 90%.

Por otro lado, en la vertiente supercrítica, las condiciones de temperatura y presión son muy elevadas, oscilando entre los $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los 100 a 300 bares, siendo necesaria la utilización de reactores de alta presión.

Una variante más es la solvólisis asistida por microondas (MW, por sus siglas en inglés), que está actualmente desarrollándose a escala de laboratorio. Este método se considera ecológico, energéticamente eficiente y más sostenible, ya que se aumenta la velocidad de reacción y, en consecuencia, se reduce el tiempo de reacción [7]. Algunos autores han reportado solvólisis asistida por MW de composites de fibra de vidrio con una tasa de descomposición de aproximadamente el 90% manteniendo las propiedades mecánicas de entre el 93-99% en comparación con la fibra de vidrio virgen [8].

A continuación, se muestran los resultados encontrados en bibliografía para cada tipo de matriz de composites específica: epoxi, poliéster, poliamida (PA), poliuretano (PUR) y otros.

1.1 - SOLVÓLISIS DE RESINAS EPOXI

Los epoxis curados con amina son el sustrato más investigado en la degradación mediante solvólisis de composites, lo que no es sorprendente dada su utilización en la mayoría de los composites reforzados con fibra de carbono. En la siguiente tabla se muestra un resumen de las condiciones más interesantes para degradar distintos tipos de resinas epoxi. Se observan mayores rendimientos de degradación en condiciones supercríticas, que no utilizan catalizadores, facilitando la posterior purificación de los monómeros.

Resina epoxi	Temperatura [°C]	Solventes y catalizadores	Tiempo [h]	% Degradación	Ref.
Condiciones subcríticas					
Resina JR-236 EP	100	Acetona/H ₂ O ₂ (1/2)	7	98,2	Li <i>et al.</i> , [9]
Prepreg FC con matriz epoxi alto rdto. Estr. aeroespaciales	190	PEG200/H ₂ O ₂ , NaOH	17	¿?	Mohd Zaini & Badri [10]
Epoxi amina	190	Etanol/ZnCl ₂ (20%)	5	89,8	Liu <i>et al.</i> [11]
Desconocido	65	HAc/H ₂ O ₂ (80/20)	4/38	98,8	Das <i>et al.</i>
Diglicidiléter de bisfenol A (DGEBA)	1) 120	Dos pasos: 1)HAc	1) 1	94,4	Kim <i>et al.</i> ¹²
	2) 100	2) KMnO ₄ (1M)	2) 2		
Condiciones supercríticas					
Bisfenol A curado con IPN	350	1-propanol, KOH	5	98	Piñero—Hernanz <i>et al.</i> [13]
	350	1-propanol	1		
Bisfenol A curado con 4,40-diaminodifenilmetano	320 y 100	KOH/Phenol/H ₂ O (1/10/100,g/g/mL) v/v	1	95,2	Liu <i>et al.</i> [14]



TGMDA con endurecedor de diamina	320 y 140	Acetona/H ₂ O 80/20 v/v	2	~95	Keith <i>et al.</i> , [15]
Desconocida	1) 270	Dos pasos: 1) Etilen glicol	1) 16	90	Mattsson <i>et al.</i> ¹⁶
	2) 330 °C	2)Agua, 1-propanol (20%) y KOH (10%)	2) 3		
Líquidos iónicos					
Desconocida	150	[BMIm][Acet]:EG20:80	2.5	¿?	Pérez <i>et al.</i> [17]

Tabla 1: Resumen de las condiciones de solvólisis para degradar resinas epoxi

1.2 - SOLVÓLISIS DE RESINAS DE POLIÉSTER

Los conocimientos sobre los productos de reacción y los mecanismos que subyacen a la despolimerización solvolítica de los plásticos termoestables a base de poliéster son limitados. La mayoría de los estudios se centran en la degradación de la matriz orgánica y la recuperación de las fibras y no tanto en la resina.

Entre los diversos procesos de solvólisis, la hidrólisis es el método más utilizado, ya que se utiliza agua pura o mezclada con un cosolvente como alcohol, amina o fenol. El agua ofrece ventajas como su bajo coste, su respeto por el medio ambiente y su fácil manipulación. Es bien sabido que la hidrólisis de los ésteres tiene lugar en presencia de ácidos o bases minerales fuertes, produciendo cantidades considerables de ácido y sal residuales.

En la siguiente tabla se recogen los resultados de algunos estudios interesantes [18] sobre solvólisis de resinas termoestables de poliéster (UPR).

Tipo de solvólisis	Temperatura [°C] y tiempo (h)	Solventes y catalizadores	Observaciones	Ref.
Condiciones sub-críticas				
Hidrólisis	350 °C	Agua y catalizador alcalino (NaOH)	Disminución prop. mecánicas fibras	Abeyasinghe [19], Apicella <i>et al.</i> [20], Oliveux <i>et al.</i> [21]
	300 °C	Agua y alcoholes	Degradación con alcoholes y fenoles de cadena larga, no con dioles	Suyama <i>et al.</i> [22]
Glicólisis	170-225 °C y 3h	Propilenglicol	El material degradado se usó para fabricar nueva resina	Yoon <i>et al.</i> [23]
Solvólisis asistida por microondas	340 °C y 2min	Líquidos iónicos	Recuperación de monómeros	Shajkumar <i>et al.</i> , 2019 [24] y Kamimura <i>et al.</i> [25]
Acidólisis	180 °C y 12h	AlCl ₃ /CH ₃ COOH	Recuperación de valiosos oligómeros y monómeros	Wang <i>et al.</i> [26]
Hidrólisis	80 °C y 30 min	Agua y etanol	Rendimiento del 80%, reutilizan los reactivos	Wang <i>et al.</i> [27]
Condiciones supercríticas				
Hidrólisis	325 °C (300 bar), 30 min.	Acetona/agua (1/1), KOH catalizador	Analizan los productos obtenidos en la fase acuosa y en el aceite	Bjelić [28]
	250-325 °C			Arturi <i>et al.</i> [29]

Tabla 2: Resumen de las condiciones de solvólisis para degradar resinas de poliéster

1.3 - SOLVÓLISIS DE OTRAS MATRICES (TERMOPLÁSTICOS Y DE ALTAS PRESTACIONES)

Algunos de los polímeros termoplásticos que se utilizan con diferentes refuerzos, la mayoría con fibra de carbono pero también con fibra de vidrio, son los siguientes [30]: polietileno (PE), polipropileno (PP), poli(etilen tereftalato) (PET), poli(butilen tereftalato) (PBT), poliamida-6 (PA6), ácido poliláctico (PLA), poliuretano (PUR), metacrilato (MA), sulfuro de polifenileno (PPS), PA6, PA66, poliamida-11 (PA11), polieteretercetona (PEEK), polieterimida (PEI), polietersulfona (PES), entre otros.

PP y PE no se pueden degradar mediante solvólisis al ser polímeros que se obtienen mediante reacciones de poliadición. Sin embargo, la solvólisis del PET, PA6 y PUR está ampliamente estudiada en la literatura; de hecho, el PET es el primer polímero cuyo reciclado mediante solvólisis está industrializado, no así los composites de PET.

En el caso de las **PA**, la solvólisis como método de reciclado químico se encuentra aún en fase de investigación y desarrollo, por lo cual, la conversión por ejemplo del Nylon-6 no suele ser completa hacia ε-caprolactama en la mayoría de los casos, siendo éste el monómero de partida dentro del entorno industrial. Los estudios sobre

despolimerización involucran, por lo general, reacciones a altas presiones, hidrólisis y aminólisis. Las temperaturas de reacción rondan los 200-370 °C, y los disolventes/catalizadores estudiados en reacciones de solvólisis principalmente para la mayoría para PA6 han sido: Ac₂O anhídrido acético, 4-dimetilaminopiridina [31], HCl (hidrólisis ácida) [32], NaOH (hidrólisis básica) [33], H₃PO₄, H₂O, NaOH, PrOH (isopropanol) [34], NaOH/KOH [35]. Autores como Hirschberg y Rodrigue [36] también han estudiado la solvólisis de PA66, PA1010, PA11 y PA12.

Para el caso del PUR, la glicólisis es el proceso más estudiado ya que se consiguen buenos rendimientos en condiciones de reacción suaves. En la literatura científica se encuentran una gran variedad de glicólisis exitosas de formulaciones de PUR de espuma rígida y, sobre todo, de espuma flexible [37], sin embargo, la glicólisis de los elastómeros de PUR ha sido mucho menos estudiada. Borda et al. [38] describen la glicólisis de elastómeros de PUR basados en polioli poliéster y MDI (diisocianato de difenilmetano). Como disolvente emplearon etilenglicol (EG), 1,2-propilenglicol (PG), trietilenglicol (TEG) y poli(etilenglicol) (PEG) así como dietanolamina (DEA) como catalizador. Encontraron que el mejor disolvente era EG en proporciones de DEA:EG que van desde 1:1 hasta 1:9.

En otro artículo Borda *et al.* [39] describen la síntesis de adhesivos de uretano a partir de estos polioles obtenidos mediante glicólisis de espuma flexible y elastómeros.

El segundo artículo en el que se describe la glicólisis de un elastómero data del año 2011 (Wang *et al.* [40]). En este caso se trata de un termoplástico elastómero (TPU) basado en MDI y poliéter polioli. Como disolventes utilizan EG y dietilenglicol (DEA) y como catalizadores etanolamina (EA) y acetato de litio (AcLi). En todos los casos las temperaturas de degradación se encuentran entre 160-200 °C y, similar al caso anterior, el polioli de partida se encuentra en la fase superior de la mezcla de dos fases resultante de la glicólisis.

En el caso de los termoplásticos de altas prestaciones como **polieteretercetona (PEEK)**, **polieterimida (PEI)**, **polietersulfona (PES)**, se han encontrado muy pocos artículos que avalen su degradación por solvólisis [41], sin embargo, al contener enlaces carbono-heteroátomo se piensa que se pueden hidrolizar aunque puede ser que requieran mayores temperaturas y tiempos debido a impedimento estérico.

2 - SOLVÓLISIS: SITUACION DE LA TECNOLOGÍA, HUELLA INDUSTRIAL Y FUTUROS DESARROLLOS A NIVEL GLOBAL

En España se conocen muy pocos casos de plantas industriales de solvólisis de materiales plásticos y ninguna de composites. En concreto, REPSOL, en colaboración con RAMPF Eco-Solutions como proveedor licenciante para la tecnología, tiene una planta de acidólisis de espumas de poliuretano (residuos procedentes de colchones) en Puertollano (Ciudad Real) en la que se obtienen nuevas espumas de PUR a partir de los polioles reciclados obtenidos. Esta planta está operativa desde el año 2023.

A nivel mundial, en el año 2015 se detectaron las siguientes empresas que utilizan solvólisis como métodos de reciclado [41]:

- Adherent Technologies (USA) [42]: proceso de tres etapas combinando solvólisis y pirólisis.
- Innoveox (Francia) [43]: proceso de oxidación hidrotérmica.
- Extractive-industry [44]: solvólisis de piezas de composite con fibra de carbono a escala planta piloto con recuperación del disolvente y del catalizador.

En los últimos 10 años se ha producido un retroceso en cuanto a la industrialización de la solvólisis en comparación con la pirólisis. Lo más destacado es la *start-up* Catack-H [45], en Corea del Sur, que recicla composites de fibra de carbono mediante un método de solvólisis basado en agua a presión atmosférica y ha reportado un coste de tan sólo el 10% del de una planta de incineración [46].

Otro ejemplo es la creación en Estados Unidos de dos empresas *spin off* procedentes de la Wichita State University (Kansas): Closed Composites LLC. y Shocker Composites LLC realizan un proceso de solvólisis asistida mediante ultrasonidos a baja temperatura para recuperar fibra de carbono reciclada (rFC) de residuos de composites. Posteriormente, esta rFC se utiliza para fabricar pellets TP (hasta un 20% en peso de rFC) [47].

En cuanto a proyectos de investigación europeos relacionados con el reciclado químico de composites por solvólisis a continuación se muestran los más interesantes:

- MC4: *Multi-level Circular Process Chain for Carbon and Glass Fibre Composites*.
- EURECOMP: *Recycling thermoset composites of the SST*.
- ELIOT: *End of Life for biomaterials*.



- RECREATE: *Recycling technologies for circular reuse and remanufacturing of fiber-reinforced composite materials.*
- URBANREC: *New approaches for the valorization of URBAN bulky waste into high added value recycled products.*
- EOLO-HUBS: *Wind turbine blades End of Life through Open HUBs for circular materials in sustainable business models.*
- ICEBERG: *Innovative Circular Economy Based solutions demonstrating the Efficient recovery of valuable material Resources from the Generation of representative End-of-Life building materials.*

En cuanto a estudios de análisis de ciclo de vida (ACV) y económicos (ATE), Š. Ferjan *et al.* [48] han indicado los beneficios medioambientales de la solvólisis sobre la pirólisis para biocomposites (un 17% menos de potencial de calentamiento global: GWP, por sus siglas en inglés), debido principalmente a la alta tasa de recuperación de resina así como a una demanda de calor significativamente menor (casi la mitad) en comparación con la pirólisis. De forma similar a los resultados del ACV, los resultados del ATE mostraron una ligera ventaja de la solvólisis (4,91 euros/kg) sobre la pirólisis (5 euros/kg).

3 - SOLVÓLISIS: RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS EN ESPAÑA

El desarrollo de un método eficaz para el reciclado químico de composites es uno de los problemas más cruciales a los que se enfrenta el mundo en la actualidad. El proceso de solvólisis es muy interesante ya que es el único proceso de reciclado que es capaz de recuperar íntegramente todo el composite, tanto la fibra como la matriz (en su correspondiente monómero) e incluso el núcleo. A continuación, se detallan algunas recomendaciones a tener en cuenta para futuros desarrollos:

- Para realizar eficazmente el reciclado químico por solvólisis de un polímero se necesita un método de despolimerización selectivo para ese polímero. El material monomérico recuperado requiere de otros procedimientos de purificación que suelen ser difíciles y laboriosos. De hecho, el postratamiento de las fracciones orgánicas recuperadas ha recibido muy poca atención en los estudios investigados en términos de recuperación de productos valiosos.
- Se aconseja investigar la posibilidad de un efecto sinérgico en la degradación de mezclas de diferentes polímeros como, por ejemplo, epoxi con poliéster y/o termoplásticos, ya que no se han encontrado estudios de reciclado mediante solvólisis de mezclas de diferentes tipos de matrices como puede suceder en algunas piezas de composites (palas eólicas).
- Se debería desarrollar una cadena de suministro para: a) la entrada de residuos, b) salida de fibra y c) salida de monómeros de la matriz. Además, la salida de fibra debería disponer de un proceso a medida de aplicación del ensimaje (*sizing*) perdido durante la solvólisis que incluya el posterior hilado y tejido según su aplicación final.

4 - RECICLADO BIOLÓGICO: ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

La biodegradación de materiales plásticos se refiere al proceso mediante el cual estos materiales son descompuestos por organismos vivos como bacterias u hongos en compuestos más simples como agua, dióxido de carbono y biomasa. En este sentido, uno de los primeros pasos para llevar a cabo la biodegradación de los materiales consiste en la producción de enzimas hidrolíticas por parte de las bacterias u hongos, de modo que los materiales poliméricos son descompuestos en componentes más simples como monómeros u oligómeros para posteriormente ser asimilados por los microorganismos y utilizarlos como fuente de carbono y energía.

De modo que el reciclado enzimático consiste en el uso exclusivo de enzimas empleadas como biocatalizadores para despolimerizar los materiales en monómeros u oligómeros que posteriormente son purificados y separados para finalmente utilizarlos en la fabricación de nuevos productos. Este enfoque de la gestión de los residuos plásticos ofrece una alternativa sostenible a procesos de reciclaje que son intensivos en energía y recursos.

La biodegradación de estos materiales se basa en la rápida adaptación que tienen los microorganismos a cambios en el medio. También es importante resaltar que la mayoría de microorganismos que se han descrito como degradadores de polímeros actúan sobre polímeros con un esqueleto heteroatómico, ya que esto ofrece mejores condiciones para realizar el ataque enzimático. Uno de los polímeros más estudiados para su biodegradación es el PET, encontrándose diferentes microorganismos termofílicos que poseen enzimas con estabilidad térmica capaces de hidrolizar el PET hasta sus monómeros (ácido tereftálico y etilenglicol). El enfoque utilizado en la degradación biológica y enzimática de PET ha sido empleado para identificar microorganismos y enzimas implicadas en la degradación de otros polímeros como el poliuretano. A este respecto, es importante resaltar que la biodegradabilidad y la aplicabilidad del reciclaje enzimático es más eficiente en los poliuretanos tipo poliéster, mientras que en los poliuretanos tipo poliéter se ha reportado una baja actividad enzimática y degradativa. Algunos autores han identificado diferentes tipos de microorganismos degradadores de PU. Al mismo tiempo, se han identificado diferentes enzimas para llevar a cabo el reciclado enzimático de PU como lipasas [49], cutinasas [50], y uretanasas [51]



que atacan los enlaces éster y uretano. Además, recientemente se ha reportado la degradación enzimática de diferentes tipos de poliuretanos, incluyendo una espuma de poliuretano de tipo poliéter, gracias a la acción de un sistema mediado por lacasas [52]. Sin embargo, aunque se observaron oligómeros producto de la degradación enzimática también es reseñable que ésta se limitó a unos porcentajes muy bajos tras 18 días de incubación, por lo que su desarrollo a nivel industrial hoy en día se encuentra lejos de poder implementarse.

En el caso de las resinas epoxi y polímeros basados en resinas epoxi reforzados con diferentes fibras se han llevado a cabo diferentes enfoques. Por ejemplo, Eliaz *et al.* (2018) [53] investigaron el crecimiento de microorganismos presentes en el suelo de una industria del sector plástico en medio mínimo conteniendo dos resinas epoxi diferentes, en concreto Araldite® LY5052 y EPON™ 815C. Estos autores señalaron que *Rhodococcus rhodochrous* y *Ochrobactrum anthropi* fueron capaces de crecer en el medio mínimo basado en LY5052, pero las enzimas implicadas en la degradación de esta resina no han sido todavía elucidadas. Zhang *et al.* (2023) [54] investigó la degradación de resinas epoxi mediante *Pseudomonas aureginosa*. Los autores encontraron que *P. aureginosa* promovió el deterioro de la resina epoxi rompiendo los grupos C-O-C y C-O, que son importantes en el entrecruzado de la resina. Otros investigadores han comprobado la eficiencia de la biodegradación usando diferentes consorcios microbianos empleando resinas curadas de epoxi, tal como realizó Negi *et al.* (2009) [55] que encontró que el consorcio formado por *Bacterium Te68R*, *Microbacterium sp* y *Pseudomonas putida* tuvo el mayor crecimiento en medio mínimo conteniendo la resina epoxi triturada a una concentración de 5 g/L, obteniendo una degradación final de un 34% tras 15 días. De forma similar, Gu *et al.* (1997) [56] utilizó un consorcio fúngico que consistía en *Aspergillus versicolor*, *Cladosporium cladosporioides*, y *Chaetomium sp* para la degradación de un composite de la resina epoxi Hercules 3501 reforzado con fibras de grafito. Tras el periodo de incubación se observó la colonización y penetración del material por los hongos utilizando microscopia electrónica de barrido. Por el contrario, los autores no reportaron un porcentaje de biodegradación.

Por otro lado, el primer estudio donde se aplicaron enzimas aisladas directamente para llevar a cabo la degradación enzimática de resinas epoxi fue publicado recientemente por Dolz *et al.* (2022) [57]. Los autores desarrollaron un ensayo colorimétrico para hacer un cribado de peroxigenasas inespecíficas diseñadas para la degradación de resinas epoxi, concretamente usaron la resina Hexflow RTM-6, usada ampliamente en el sector aeronáutico. En concreto, utilizaron enzimas mutantes de diferentes microorganismos y determinaron su potencial actividad de desalquilación empleando N,N-bis(2-hydroxypropyl)-p-toluidine (NNBT) y establecieron una plataforma de evolución dirigida para obtener variantes degradadoras de composites.

5 - RECICLADO BIOLÓGICO: RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS EN ESPAÑA

El reciclado biológico de plástico se ha centrado, principalmente, en materiales termoplásticos, mientras que la investigación en plásticos recalcitrantes como las resinas termoestables es limitada. La estructura entrecruzada de las resinas supone una limitación importante para el proceso de degradación enzimático, ya que los materiales son insolubles en los sistemas de reacción acuosos, reduciendo de esta forma la accesibilidad de los biocatalizadores (enzimas). Además, su naturaleza hidrofóbica y su alto peso molecular limitan la adhesión de los microorganismos y, por tanto, obstaculizan la acción de la enzima. Para abordar estos desafíos se deben explorar diferentes soluciones y enfoques como explotar la biodiversidad natural, prestando especial atención a microorganismos que no han sido todavía cultivados, o emplear las técnicas de biología molecular disponibles para desarrollar o mejorar la actividad específica de las enzimas para que puedan actuar sobre materiales termoestables. En conclusión, el reciclado de las resinas termoestables empleando métodos biológicos es una importante área de investigación que puede ofrecer una alternativa sostenible a los métodos convencionales, y para alcanzar estos objetivos se deben coordinar equipos multidisciplinares para explorar y optimizar las soluciones posibles.

6 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Liu *et al.* Polymer Degradation and Stability 139, (2017), 20-27.
- [2] G. Tersac *et al.* Polymer Degradation and Stability 91, (2006), 690-702.
- [3] X. Hou *et al.* Green Chem., 2015,17, 4527-4532.
- [4] S. Varughese, ACS Sustainable Chem. Eng. 2018, 6, 2, 1564-1571.
- [5] M. Goh, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 96, 2021, 76-91.
- [6] Y.-Z. Wang *et al.* Green Chem., 2012,14, 3260-3263.
- [7] Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., & Zafar, S. (2021). A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. Composites Part B: Engineering, 215(October 2020),



108768.

- [8] Zabihi O, Ahmadi M, Liu C, Mahmoodi R, Li Q, Ferdowsi MRG, et al. A sustainable approach to the low-cost recycling of waste glass fibres composites towards circular economy. *Sustain Times* 2020;12.
- [9] Li, J., Xu, P. L., Zhu, Y. K., Ding, J. P., Xue, L. X., & Wang, Y. Z. . "A promising strategy for chemical recycling of carbon fiber/thermoset composites: Self-accelerating decomposition in a mild oxidative system". *Green Chemistry*, 14(12), pp. 3260–3263. <https://doi.org/10.1039/c2gc36294e>
- [10] Mohd Zaini, M. B., & Badri, K. H. (2014). Glycolysis of carbon fiber-epoxy unidirectional mat catalysed by sodium hydroxide. *AIP Conference Proceedings*, 1614pp. 446–451. DOI: 10.1063/1.4895238
- [11] Liu, T., Zhang, M., Guo, X., Liu, C., Liu, T., Xin, J., & Zhang, J. (2017). Mild chemical recycling of aerospace fiber/epoxy composite wastes and utilization of the decomposed resin. *Polymer Degradation and Stability*, 139, 20–27. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.017
- [12] Kim, D. H., Yu, A., & Goh, M. (2021). Oxidative chemical depolymerization of thermoset epoxy resin for green recycling. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 96, 76–81. DOI:10.1016/j.jiec.2021.01.047
- [13] Piñero-Hernanz, R., García-Serna, J., Dodds, C., Hyde, J., Poliakoff, M., Cocero, M. J., Kingman, S., Pickering, S., & Lester, E. (2008). Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions. *Journal of Supercritical Fluids*, 46(1), 83–92. Doi: 10.1016/j.supflu.2008.02.008
- [14] Liu, Y., Liu, J., Jiang, Z., & Tang, T. (2012). Chemical recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites in subcritical water: Synergistic effect of phenol and KOH on the decomposition efficiency. *Polymer Degradation and Stability*, 97(3), 214–220. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.12.028
- [15] Keith, M. J., Román-Ramírez, L. A., Leeke, G., & Ingram, A. (2019). Recycling a carbon fibre reinforced polymer with a supercritical acetone/water solvent mixture: Comprehensive analysis of reaction kinetics. *Polymer Degradation and Stability*, 161, 225–234. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.01.015
- [16] Mattsson, C., André, A., Juntikka, M., Trnkle, T., & Sott, R. (2020). Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 942(1). DOI: 10.1088/1757-899X/942/1/012013
- [17] Pérez, R. L., Ayala, C. E., Opiri, M. M., Ezzir, A., Li, G., & Warner, I. M. (2021). Recycling Thermoset Epoxy Resin Using Alkyl-Methyl-Imidazolium Ionic Liquids as Green Solvents. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(11), 5588–5595. DOI: /10.1021/acsapm.1c00896
- [18] Shajkumar, A., Samal, S. K., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2019). The degradation and recycling of unsaturated polyester resin-based composites. In *Unsaturated Polyester Resins: Fundamentals, Design, Fabrication, and Applications*
- [19] H.P. Abeyasinghe, W. Edwards, G. Pritchard, G.J. Swampillai, Degradation of crosslinked resins in water and electrolyte solutions, *Polymer (Guildf.)* 23 (1982) 1785?1790.
- [20] A. Apicella, C. Migliaresi, L. Nicolais, L. Iaccarino, S. Roccotelli, The water ageing of unsaturated polyester-based composites: influence of resin chemical structure, *Composites* 14 (1983) 387?392.
- [21] G. Oliveux, J.L. Bailleul, E. L. G. La Salle, Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 43 (2012) 1809?1818.
- [22] K. Suyama, M. Kubota, M. Shirai, H. Yoshida, Effect of alcohols on the degradation of crosslinked unsaturated polyester in sub-critical water, *Polym. Degrad. Stab.* 91 (2006) 983?986.
- [23] K.H. Yoon, A.T. DiBenedetto, S.J. Huang, Recycling of unsaturated polyester resin using propylene glycol, *Polymer* 38 (1997) 2281?2285.
- [24] Shajkumar, A., Samal, S. K., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2019). The degradation and recycling of unsaturated polyester resin-based composites. In *Unsaturated Polyester Resins: Fundamentals, Design, Fabrication, and Applications*. Elsevier
- [25] A. Kamimura, S. Yamamoto, K. Yamada, Depolymerization of unsaturated polyesters and waste fiber- reinforced plastics by using ionic liquids: the use of microwaves to accelerate the reaction rate, *ChemSusChem* 4 (2011) 644-649.



- [26] Y. Wang, et al., Chemical recycling of unsaturated polyester resin and its composites via selective cleavage of the ester bond, *Green Chem.* 17 (2015) 4527-4532.
- [27] Wang, X. L., An, W. L., Tian, F., Yang, Y., Zhao, X., Xu, P. P., Xu, S., & Wang, Y. Z. (2020). High-efficiency hydrolysis of thermosetting polyester resins into porous functional materials using low-boiling aqueous solvents. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(42), 16010–16019
- [28] S. Bjelic, *Journal of Cleaner Production*, 170, 2018, 131-136.
- [29] K. R. Arturi, H. U. Sokoli, E. G. Sogaard, F. Vogel, S. Bjelić, "Recovery of value-added chemicals by solvolysis of unsaturated polyester resin", *Journal of Cleaner Production*, vol. 170, Ene. 2018, pp. 131-136.
- [30] Pegoretti, A. (2021). Towards sustainable structural composites: A review on the recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(2), 105–115.
- [31] C. Alberti, R. Figueira, M. Hofmann, S. Koschke, and S. Enthaler, "Chemical Recycling of End-of-Life Polyamide 6 via Ring Closing Depolymerization" *ChemistrySelect*, vol. 4, pp. 12638–12642, Nov. 2019, doi: 10.1002/slct.201903970.
- [32] U. Češarek, D. Pahovnik, and E. Žagar, "Chemical Recycling of Aliphatic Polyamides by Microwave-Assisted Hydrolysis for Efficient Monomer Recovery" *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 43, pp. 16274–16282, Nov. 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.0c05706.
- [33] A. M. Nemade, S. Mishra, and V. S. Zope, "Chemical Recycling of Polyamide Waste at Various Temperatures and Pressures Using High Pressure Autoclave Technique" *J. Polym. Environ.*, vol. 19, no. 1, pp. 110–114, 2011, doi: 10.1007/s10924-010-0249-1.
- [34] A. Minor, R. Goldhahn, L. Rihko—Struckmann, K. Sundmacher, "Chemical Reciclynd process of Nylon 6 to Carpolactam: Review and Techno-Economic Assessment", *Chemical Engineering Journal*, vol. 474, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.145333
- [35] X. Chen, G. Wu, S. Chen, Y. Wang, "Facile, high-efficiency, and low-cost depolymerization of PA6 to caprolactam enables closed-loop chemical recycling", *Polymer*, vol. 283, jul. 2023
- [36] V. Hirschberg, D. Rodrigue, "Recycling of polyamides: Process and conditions", *Journal of Polymer Science*, vol. 61, pp- 1937—1958, Abr. 2023, doi: 10.1002/pol.20230154
- [37] Simón, D., Borreguero, A. M., de Lucas, A., & Rodríguez, J. F. (2018). Recycling of polyurethanes from laboratory to industry, a journey towards the sustainability. *Waste Management*, 76, 147–171.
- [38] Borda, J., Pásztor, G., & Zsuga, M. (2000). Glycolysis of polyurethane foams and elastomers. *Polymer Degradation and Stability*, 68(3), 419–422.
- [39] Borda, J., Rácz, A., & Zsuga, M. (2002). Recycled polyurethane elastomers: A universal adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 16(9), 1225–1234.
- [40] Wang, X., Chen, H., Chen, C., & Li, H. (2011). Chemical degradation of thermoplastic polyurethane for recycling polyether polyol. *Fibers and Polymers*, 12(7), 857–863.
- [41] Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61–99.
- [42] [online marzo 2024]. https://www.adherent-tech.com/recycling_technologies/
- [43] [online marzo 2024]. <https://innoveox.eu/>
- [44] [online febrero 2024]. <https://www.extractive-industry.com/>.
- [45] [online febrero 2024]. <https://catack-h.com/>.
- [46] Branfoot, C., Folkvord, H., Keith, M., & Leeke, G. A. (2023). Recovery of chemical recyclates from fibre reinforced composites: A review of progress. *Polymer Degradation and Stability*, 215(May), 110447.
- [47] Asmatulu R., Patlolla V. System and method for recycling of pre-impregnated composite fibers. 9776107B1, 2016.
- [48] Š. Ferjan, M. Jovicic, N. Lardiés-Miazza, T. Ligthart, C. Harvey, S. Fita, R. Mehta and P. Samani. Sustainability



Assessment of the End-of-Life Technologies for Biocomposite Waste in the Aviation Industry. *Polymers* 2023, 15, 2689. <https://doi.org/10.3390/polym15122689>.

[49] Gautam, R., Bassi, A. S., & Yanful, E. K. (2007). *Candida rugosa* lipase-catalyzed polyurethane degradation in aqueous medium. *Biotechnology letters*, 29, 1081-1086.

[50] Schmidt, J., Wei, R., Oeser, T., Dedavid e Silva, L. A., Breite, D., Schulze, A., & Zimmermann, W. (2017). Degradation of polyester polyurethane by bacterial polyester hydrolases. *Polymers*, 9(2), 65.

[51] Branson, Y., Sötl, S., Buchmann, C., Wei, R., Schaffert, L., Badenhorst, C. P., ... & Bornscheuer, U. T. (2023). Urethanases for the enzymatic hydrolysis of low molecular weight carbamates and the recycling of polyurethanes. *Angewandte Chemie International Edition*, 62(9), e202216220.

[52] Magnin, A., Entzmann, L., Pollet, E., & Avérous, L. (2021). Breakthrough in polyurethane bio-recycling: An efficient laccase-mediated system for the degradation of different types of polyurethanes. *Waste Management*, 132, 23-30.

[53] Eliaz, N., Ron, E. Z., Gozin, M., Younger, S., Biran, D., & Tal, N. (2018). Microbial degradation of epoxy. *Materials*, 11(11), 2123.

[54] Zhang, S., Zheng, H., Chang, W., Lou, Y., & Qian, H. (2023). Microbiological Deterioration of Epoxy Coating on Carbon Steel by *Pseudomonas aeruginosa*. *Coatings*, 13(3), 606.

[55] Negi, H., Kapri, A., Zaidi, M. G. H., Satlewal, A., & Goel, R. (2009). Comparative in-vitro biodegradation studies of epoxy and its silicone blend by selected microbial consortia. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(5), 553-558.

[56] Gu, J. D., Lu, C., Thorp, K., Crasto, A., & Mitchell, R. (1997). Fiber-reinforced polymeric composites are susceptible to microbial degradation. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 18, 364-369.

[57] Dolz, M., Mateljak, I., Méndez-Sánchez, D., Sánchez-Moreno, I., Gomez de Santos, P., Viña-Gonzalez, J., & Alcalde, M. (2022). Colorimetric high-throughput screening assay to engineer fungal peroxygenases for the degradation of thermoset composite epoxy resins. *Frontiers in Catalysis*, 2, 883263.

Capítulo 10: RECICLADO MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS

Silvia Gonzalez Prolongo¹, Alberto Jiménez Suárez¹

¹ Dpto. Matemática Aplicada, Ciencia e Ingeniería de Materiales y Tecnología Electrónica. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid. Spain.

Abstract

The mechanical recycling of long-fiber composite materials is presented as an alternative of greater technological simplicity as well as low energy consumption, emission of pollutants and use of solvents, which places it in an advantageous position from the point of view of environmental sustainability. However, the products obtained are short-fibered, which reduces their mechanical reinforcement capacity, and have been used mainly as fillers for cementitious, asphalt and thermoplastic matrices.

The technologies used to reduce the size of the initial pieces substantially influence the characteristics of the final product obtained, especially if they are to be used for functional purposes in terms of electrical or thermal properties. In addition, the fibers obtained have a proportion of resin from the initial composite material, so the subsequent treatment processes of these fibers, both physical and chemical, can affect the amount of final resin present in the product, its agglomeration or its surface characteristics.

The current challenges for these products is to find processes that allow a better quality and greater uniformity of the final properties of the short fiber, so that the products obtained present a greater added value, which allows them to compete with other current discontinuous reinforcements.

 OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - FUNDAMENTOS DEL RECICLADO MECÁNICO

El reciclado mecánico de materiales compuestos implica procesos de trituración y molienda para su reducción de tamaño a fragmentos microscópicos. Normalmente, conlleva varias etapas. La primera fase, de menor consumo energético, consiste en reducir el material a trozos pequeños homogéneos (50-100 mm, *chopped*), utilizando fresas o molinos de corte a baja velocidad [1]. Después, se somete a distintos procesos de molienda para alcanzar tamaños micrométricos (50-100 μm , *milled or powder*), normalmente mediante el uso de molinos de martillo a mayor velocidad de rotación [2]. Finalmente, el material reciclado se puede separar en distintas fracciones, mediante ciclones y tamices, en función del tamaño, que presentan diferente contenido de resina y fibra. Estas fracciones son denominadas polvo, de menor tamaño y ricas en resina; y productos fibrosos, de mayor longitud y ricos en fibra.

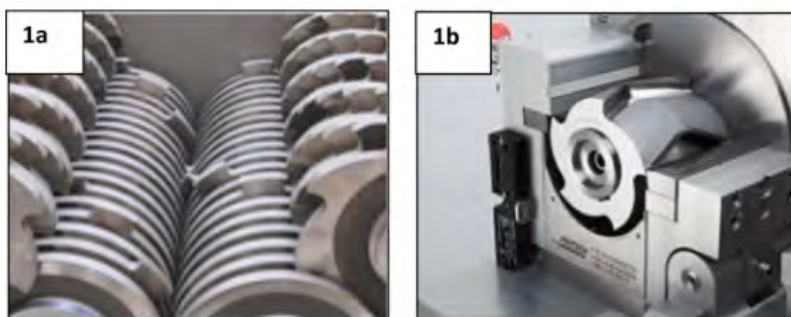


Figura 1. Tecnología de trituración (1a) y molienda (1b)

Las principales ventajas del reciclado mecánico son su sencillez tecnológica; bajo consumo energético; sostenibilidad, ya que no implica la emisión de gases, ni el uso de disolventes o reactivos químicos; y su gran versatilidad, ya que se puede optimizar para cualquier material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra de vidrio o carbono. Su principal limitación es, sin lugar a duda, el producto reciclado, cuyo valor añadido es muy inferior al material de partida. De hecho, el polvo de fibra corta reciclada obtenido se suele utilizar como relleno de cementos, asfalto y

termoplásticos.

Todos los estudios publicados acerca del consumo energético y análisis de costes y beneficios indican que el reciclado mecánico es, sin duda, el procedimiento de reciclado más eficiente, además de evitar la emisión de gases de efecto invernadero y el uso de reactivos químicos.

2 - CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS FIBRAS CORTAS RECICLADAS MECÁNICAMENTE (mR-F)

Dependiendo de la tecnología y condiciones de operación utilizadas en el reciclado mecánico se obtienen diferentes productos. Existen estudios [3] para fabricar piezas recicladas de baja responsabilidad mecánica mediante el procesamiento de piezas trituradas, sin molienda, mediante compresión en molde abierto, cerrado y asistido con vacío

Condiciones más agresivas y tiempos de molienda más largos inducen principalmente un acortamiento de las fibras recicladas, pero con mayor homogeneidad, ya que la curva de distribución de longitudes de fibra se estrecha. Además, el contenido de resina remanente también se reduce, aunque no se elimina completamente en ningún caso.

Las condiciones de reciclado inducen el acortamiento de las fibras, pero no influyen significativamente en la defectología de las mismas, ni en su cristalinidad. Al contrario de lo esperado, excepto en el extremo de rotura, las fibras de carbono recicladas no presentan graves defectos estructurales.

Por otro lado, el material de desecho de partida también afecta a las condiciones de reciclado. En caso de preimpregnados caducados, la molienda es compleja porque las fuerzas de fricción inducen el curado de la resina, favoreciendo su adhesión a las cuchillas, pudiendo dañar seriamente el molino. Por ello, se recomienda previamente lavar con disolvente adecuado para retirar la resina.

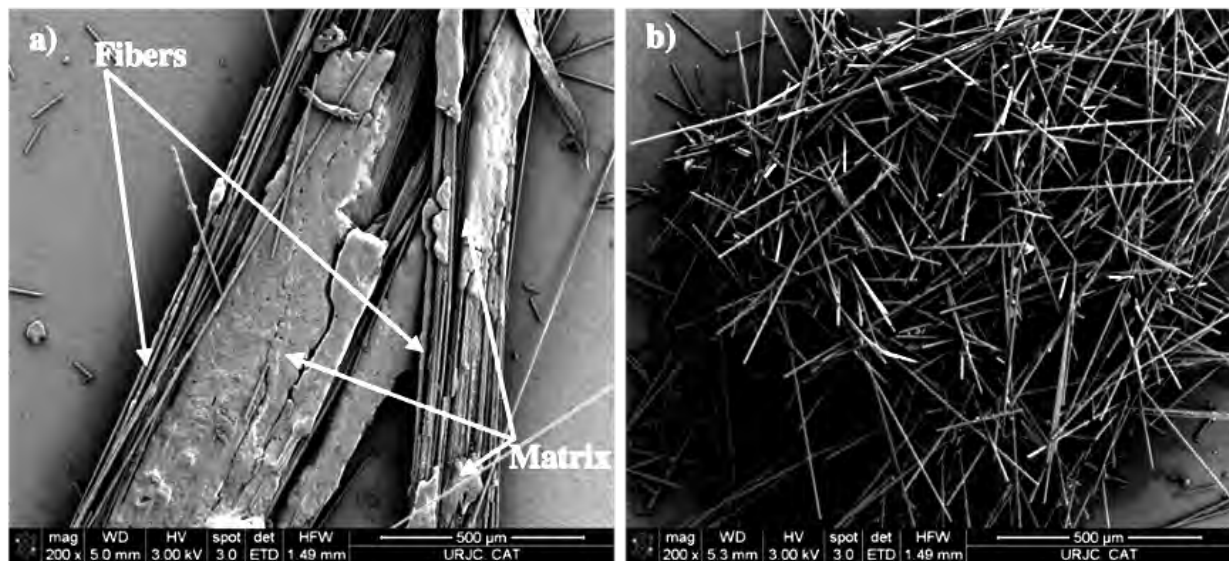


Figura 2. Modificación de las fibras recicladas de carbono con el aumento del número de etapas de molienda: una pasada (a) y 10 pasadas (b)

Las fibras cortas recicladas contienen restos de matriz termoestable que posteriormente dificultará su adherencia a una nueva matriz. Por ello, después del proceso de reciclado mecánico se propone un tratamiento superficial, como modificación química, plasma oxidativo, recubrimientos, etc. con objeto de mejorar la interfase de estas fibras con la matriz en el nuevo material compuesto reciclado.

Además, las fibras cortas recicladas pueden estar aglomeradas. Su separación se puede llevar a cabo mediante técnicas de dispersión en medios líquidos como, por ejemplo, los monómeros precursores de la nueva resina, o métodos físicos, como polarización dieléctrica o descargas a bajo voltaje.

3 - OBTENCIÓN DE DIFERENTES PRODUCTOS DE FIBRA RECICLADA

Considerando el menor valor añadido de las fibras cortas recicladas mecánicamente en comparación con los tejidos de

fibra larga de partida, existen diversas propuestas interesantes para aumentar su valor, entre las que cabe destacar:

- Alineamiento de las fibras de carbono recicladas sobre tejidos de fibra de carbono virgen por polarización dieléctrica (Fig. 3a, 3b) [4]
- Fabricación de papeles (*mat*) no tejidos de fibra reciclada corta mediante filtrado a vacío con/sin presión asistida o tradicionales máquinas de fabricación de papel (*sheet former*), usando aglutinantes (Fig 3c) [5,6]
- Fabricación de papeles (*mat*) no tejidos de fibra corta reciclada y otras fibras largas poliméricas (Fig 3c) [7]

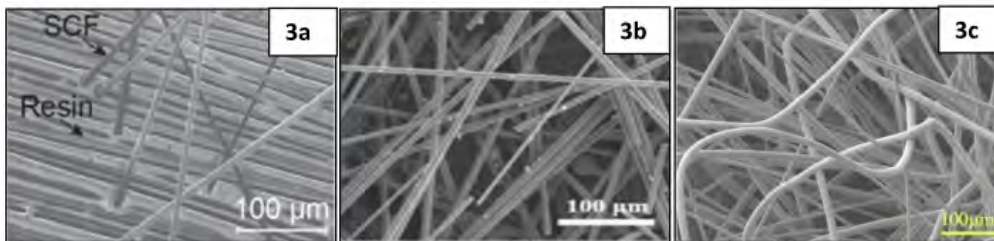


Figura 3: Tejido de fibra largo con mR-F perpendiculares (3a), mats de mR-F (3b) y mat de mR-F con otras fibras largas (3c)

4 - RESINAS REFORZADAS Y MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS RECICLADAS

La incorporación de fibras de carbono cortas, obtenidas por reciclado mecánico, a las resinas termoestables como cargas, sin orientación, puede inducir interesantes mejoras en su comportamiento mecánico y térmico.

Cholake y col. [8] publicaron que la tenacidad, medida como G_{IC} , de una resina epoxídica puede ser mejorada en hasta un 50 and 64 %, al dispersar un 5 y 10% mR-F en peso, respectivamente, mediante sonicación. Su resistencia a la flexión y a la compresión, también son mejoras, en un 105 y 20 %, respectivamente, al añadir un 20 % mR-CF [9]. También se ha comprobado que la adición de mR-CF puede inducir un importante incremento en la conductividad térmica de la matriz termoestable, cuando se alcanza el umbral de percolación, que depende de la longitud del refuerzo y el contenido de matriz residual procedente del material compuesto reciclado, variando desde 5 al 20 % en peso. En ocasiones, es necesario realizar algún tratamiento térmico, químico o eléctrico para la eliminación de la resina residual, entonces es posible alcanzar valores de conductividad muy elevados, por encima de 15 S/m. También se ha observado que las mR-CF pueden ser utilizados como eficientes refuerzos para apantallamiento electromagnético.

Finalmente, las resinas reforzadas con mR-CF pueden ser utilizadas para la fabricación de un material compuesto multiescalar. En un material multiescalar con 5 % mR-CF y tejido unidireccional de fibra de carbono, fabricado por RTM, la tenacidad a fractura, medida como G_{IC} , aumenta en más de un 150% en comparación con el material compuesto con resina sin reforzar.

Los *mat* de mR-CF reforzados [10] se pueden emplear como capas intermedias en laminados de FC fabricados por VARIM mejorando su tenacidad en más de un 50%. Si además estos *mats* se fabrican combinando las mR-CF con fibras largas poliméricas, los incrementos de tenacidad, medidos como G_{IC} y G_{IIc} , pueden superar el 220 y 105% en comparación con el material compuesto sin mR-CF.

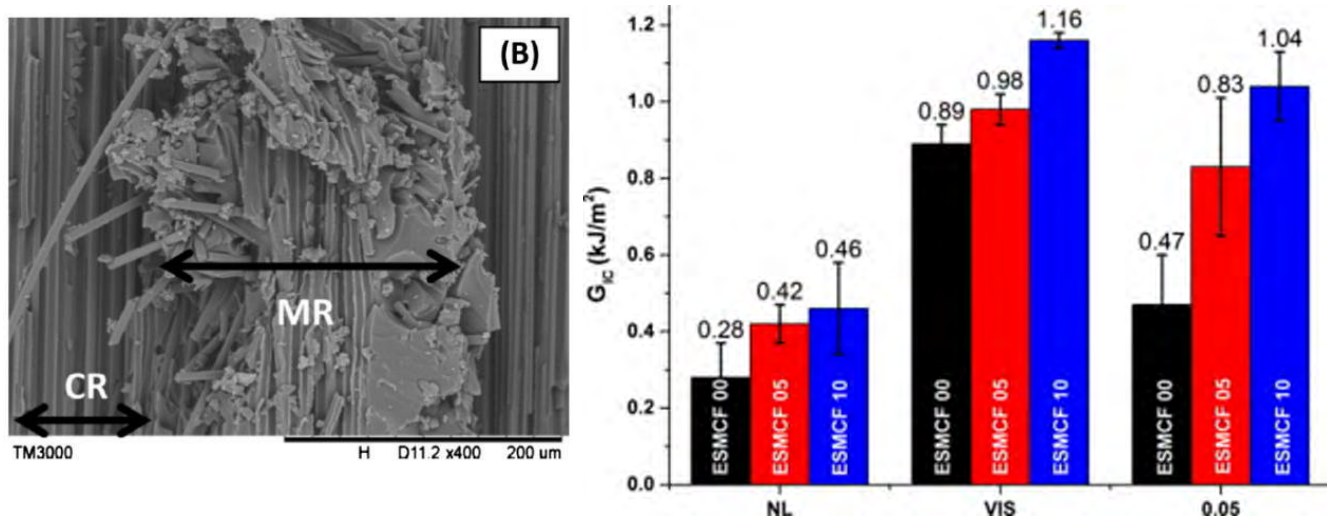


Figura 4: Incremento de la tenacidad de fractura (A) y microestructura (B) de un material compuesto multiescalar de CF unidireccional con matriz reforzada con mR-CF

5 - SITUACIÓN ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA EN ESPAÑA Y A NIVEL GLOBAL

El trabajo de investigación realizado en el campo del reciclado mecánico de materiales compuestos tiene aun una tendencia creciente a lo largo del siglo XXI y con una tendencia creciente aun más acusada desde el año 2017 hasta la actualidad (Fig. 5.a). En cuanto a los países que mayor número de aportaciones hacen en este campo, destacan 5 países europeos entre los 10 que mayor número de aportaciones han tenido en dicho intervalo (Fig. 5.b)

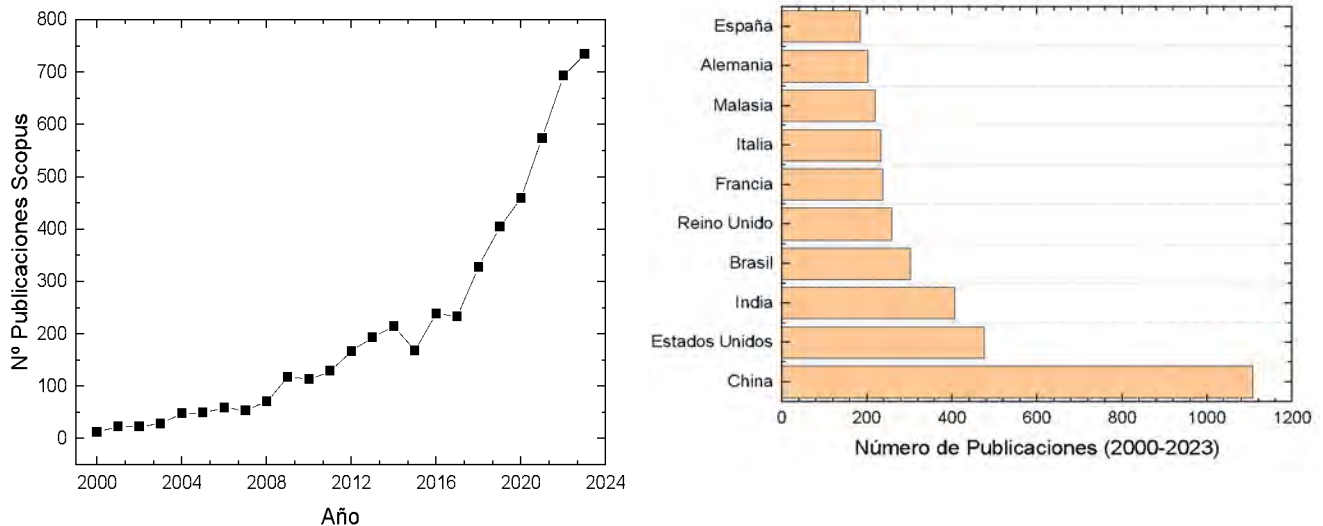


Figura 5: Publicaciones científicas indexadas en Scopus entre los años 2000-2023 en el ámbito del reciclado mecánico de materiales compuestos.

Esta tecnología también ha suscitado un interés a nivel europeo con varios proyectos financiados fundamentalmente en los últimos 10 años, aunque extendiéndose en el tiempo a la primera década del siglo XXI. Estos proyectos cuentan con diferentes participantes del tejido industrial, centros tecnológicos y de investigación como IK4, Tecnalia, Aimplas, Fundación AITIIP, Gamesa, Aeronnova, Gamesa, Batz, Maier (Corporación Mondragón), Mariskone S.A. o Bekaert Composites S.A. entre otros. Estos proyectos combinan habitualmente estudios de reciclado mecánico junto con otras tecnologías de reciclado tanto en fibra de carbono como en fibra de vidrio. Adicionalmente, en algunos casos utilizan simultáneamente esta técnica junto con nuevas formulaciones poliméricas que permiten el reprocesado mecánico tanto de la fibra como de la resina, que tendría capaz de volverse a consolidar cuando estén formadas por redes covalentes dinámicas.

Los principales sectores que son objetivo de estos proyectos europeos son la industria aeroespacial, automoción,



construcción y de construcción de palas de aerogeneradores, que producen una elevada cantidad de residuos de material compuesto, tanto de fibra de vidrio como de carbono, aunque se pueden encontrar menciones a otros campos de aplicación en los diferentes proyectos europeos concedidos. Por otro lado, los

Adicionalmente, el reciclado mecánico se emplea también en el reciclaje de textiles de otras materias primas que son luego añadidas para la producción de materiales compuestos. En esta línea, diferentes proyectos europeos han llegado a poner en marcha plantas piloto para el reciclaje de diferentes textiles de poliamida o polietilentereftato. En este caso, el principal problema al que se enfrentan estos proyectos es fundamentalmente la clasificación de los productos de deshecho para poder obtener los materiales compuestos posteriormente.

6 - PRINCIPALES RETOS FUTUROS DE LA TECNOLOGÍA DE RECICLADO MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS

La tecnología actual de reciclado mecánico de materiales compuestos se enfrenta a varios retos para los próximos años, entre los que se pueden destacar:

- Optimización de los procesos de trituración y molienda, así como de las operaciones posteriores para lograr productos más uniformes con propiedades más homogéneas. La heterogeneidad de estos productos lleva a su uso como relleno en aplicaciones en las que el refuerzo no confiere propiedades relevantes a las matrices en las que se añaden.
- Tratamientos posteriores de las fibras obtenidas para mejorar la intercara matriz/refuerzo o la optimización de la cantidad de resina presente en las fibras, lo cual puede en algunos casos mejorar la compatibilidad con respecto a la fibra corta virgen. Para ello, la cantidad y la distribución de la resina remanente sobre las fibras debe ser optimizada [11].
- Búsqueda de alternativas de mayor valor añadido para los productos obtenidos con la fibra corta reciclada. Actualmente, la gran mayoría de las soluciones diseñadas y publicadas utilizan simplemente el producto como relleno, con un menor valor añadido. En esta línea, se han llevado a cabo trabajos para obtener filamentos de impresión 3D reforzados con mejores propiedades mecánicas mediante la incorporación de fibra corta de vidrio reciclada. Estos filamentos se pueden considerar un producto de interés para industrias de fabricación avanzada como es la de la fabricación aditiva. Por otro lado, hay estudios que se centran en utilizar las propiedades funcionales de la fibra de carbono corta, permitiendo obtener materiales poliméricos con propiedades de conductividad eléctrica lo cual, a su vez, debería permitir utilizarlos en nuevas funcionalidades como calentamiento termoeléctrico para propiedades antihielo o deshielo, así como la activación térmica de cualquier otro fenómeno en el material (memoria de forma, autorreparación, etc.) [12].

7 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] G.A. Vicente, T.A. Bruijn, S. Wijskamp, M.I.A. Rasheed, M.V. Drongelen, R. Akkerman. *Composites B* 176 (2019)
- [2] J. Howarth, S.S.R. Mareddy, P.T. Mativenga. *J Cleaner Production* 81, 2014, 46-50
- [3] G. Nilakantán, S. Nutt. *Reinforced plastics* 59 (2015) 44-51
- [4] S. Zhang, X. Shen, Y. Tian, Y. Fu, M. Li, S. Li, W. Zhu, Y. Ke, K. Yan. *Separation and Purification Technology* 305, 2023, 122518
- [5] X. Huan, K. Shi, J. Yan, S. Lin, Y. Li, X. Jia, X. Yang. *Compos B* 193 (2020) 107987
- [6] C.Y. Attahu, C.K. Thein, K.H. Wong, J. Yang *Compos Struct* 197 (2022) 115981
- [7] D. Quan, U. Farooq, G. Zhao, C. Dransfeld, R. Alderliesten. *Materials & Design* 218 (2022) 110671
- [8] S.T. Cholake, G. Moran, B. Joe, Y. Bai, R.K. S. Raman, X.L. Zhao, S. Rizkalla, S. Bandyopadhyay. *Construction and Building Materials* 111 (2016) 399-407
- [9] C. Thomas, P.H.R. Borges, T.H. Panzera, A. Cimentada. *Composites B* 59 (2014) 260-268
- [10] D. Quan, U. Farooq, G. Zhao, C. Dransfeld, R. Alderliesten. *Materials & Design* 218 (2022) 110671
- [11] A. Rahimizadeh, J. Kalman, R. Henri, K. Fayazbakhsh, L. Lessard. *Materials* 12 (2019) 3929.
- [12] D. Martínez-Díaz, E. Espeute, A. Jiménez-Suárez, S.G. Prolongo. *Electrical and Joule Heating Capabilities of Multifunctional Coatings based on Recycled Carbon Fiber from Prepreg Scrap. ACS Omega* 8(49) (2023), 46548-46559.



Capítulo 11: TECNOLOGÍAS DESTINADAS A LA REUTILIZACIÓN DE FIBRAS CORTAS DE VIDRIO Y CARBONO RECICLADAS

Julio Vidal Navarro¹, Lidia Garcia Quilez¹, Berta Gonzalvo Bas¹, Ivan Domenech²

¹ Aitiip Centro Tecnológico

² AITEX

Abstract

This chapter describes the different strategies that can be carried out with polymeric matrix composite materials once they have passed through the recycling centres currently available on an industrial scale.

The work describes how, depending on the nature of the matrices, as well as the fibers, the reuse of this type of fiber should be directed towards one type of process or another and how, through diverse technologies, it is possible to develop products with a greater or lower fiber orientation. In the same way, the chapter collects information on how some composite manufacturing processes can affect the fiber length and therefore modify the final properties of the product.

Thus, the different technologies currently available and under development in Spain with focus on giving a new life to carbon and glass fibers, while retaining most of their added value and properties, are described. Namely, reuse in thermoset composites, reuse as reinforcement in thermoplastic composites, fiber re-processing (woven or non-woven fiber structures), recycling of fibres that are still embedded, recycling specific to the nature of the fiber.

Throughout the text, some of the projects led by Spanish entities with the greatest relevance in the development of the different technologies are collected. At the end of the text, these same projects and others are highlighted, remarking the work carried out by Spanish centres, universities and companies in the field of re-using and recycling of carbon and glass fibers.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Submitted: 15/10/2024

Keywords:

Reuse
Recycling
Reprocessing
Extrusion compounding
Retention of added value
Fiber length
Weaving
Final product characteristics
Reutilización
Reciclado
Reprocesado
Extrusion
Retención de valor añadido
Longitud de fibra
Tejeduría
Características del producto final

1 - INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos debido a sus altas prestaciones y a la capacidad de adaptarlos a las diferentes funcionalidades requeridas mediante la combinación de refuerzo y matriz, están creciendo de manera exponencial en sectores tan variados como la aeronáutica, el ferroviario, la construcción, la energía o el deportivo, y con ellos los residuos que generan. Por ejemplo, se calcula que el sector de las energías renovables generará unas 500.000 toneladas de residuos de material compuesto de fibra de vidrio y carbono para 2030 [0], generando un problema medioambiental y abriendo nuevas oportunidades de negocio y trabajo en el reciclaje de los mismos y la recuperación de sus componentes (refuerzo y matriz).

En la actualidad, está creciendo significativamente la investigación en tecnologías para el reciclaje de materiales compuestos [1]. No obstante, las tecnologías de reciclaje de los materiales compuestos a nivel industrial están limitadas, por el momento, a los procesos mecánicos y térmicos.

En el caso de los procesos mecánicos, se están llevando a cabo grandes avances que permiten controlar el tamaño de partícula y su valorización, así como en la integración de los mismos materiales compuestos recuperados como refuerzo de otra matriz, demostrando la capacidad y el potencial de los materiales compuestos de ser utilizados en diferentes sectores. En este campo, centros tecnológicos españoles como Gaiker, han estado trabajando desde hace años con proyectos como Re-3 [2], donde destaca el uso de trituradoras móviles continuadas por molidos con molinos de martillo y la aplicación de diferentes tamices y ciclones, consiguiendo así empaquetamientos de material de aproximadamente 330Kg/m³ con tamaños de partícula muy homogéneos [3]. Uno de los sectores con mayor impacto y en el que se están realizando diversos estudios en este sentido, es el sector de la construcción, que incorpora el



material compuesto como un refuerzo en estructuras de hormigón, donde cabe destacar el trabajo que se está realizando desde la Universidad de Girona, que está investigando su uso como un refuerzo de este tipo de estructuras.

Para poder reforzar las piezas de hormigón con materiales compuestos de grandes dimensiones, es necesario facilitar el movimiento y desmantelado de piezas de gran tamaño, así como adaptarlas a nuevas funcionalidades y a las dimensiones necesarias para sus posteriores tratamientos. En España y más concretamente en el centro tecnológico Aitiip se han realizado desarrollos de tecnologías de corte y programación de robot [4], dentro del marco de varios proyectos europeos [5,6], dirigidos a la integración de los primeros puntos de la cadena de valor del reciclado y reutilización de los materiales compuestos.

En el caso de los procesos de reciclado mecánico, el principio básico de los mismos es el molido y tamizado de las partículas obtenidas. En los procesos de reciclado térmico, el principio de reciclaje se basa en atacar directamente y mediante la aplicación de temperatura a las bases poliméricas permitiendo de esta manera la separación de la matriz y de la fibra. De esta manera el proceso de reciclado térmico permite la degradación de los materiales orgánicos y la recuperación de aquellos materiales inorgánicos capaces de soportar temperaturas superiores a los 500-600 °C sin degradarse ni modificar su estructura química. En este campo, es posible encontrar en España una de las empresas con mayor liderazgo en la preparación y corte de los materiales compuestos [7], así como en su posterior degradación térmica [8], como es Acciona.

Aunque este proceso de reciclado térmico ataca principalmente a los materiales orgánicos mediante la degradación de las fases poliméricas, el proceso térmico y los pretratamientos necesarios hacen que la fibra recuperada sea fibra discontinua, también llamada fibra corta.

En este aspecto, es importante destacar que en el mundo de los refuerzos de fibras utilizados en materiales compuestos podemos diferenciar varias naturalezas: carbono, vidrio, poliméricas y naturales [9, 10, 11]. De estos cuatro tipos de refuerzos continuos, solamente dos se pueden reciclar por métodos térmicos: carbono y vidrio. Esta diferencia entre la recuperación de un tipo de fibra y otro se debe a las temperaturas alcanzadas durante el proceso de reciclado y la capacidad del mismo de degradar polímeros de origen natural [12] o sintético [13].

Es por este motivo, que los únicos tipos de fibra reciclada proveniente de materiales compuestos en la actualidad son las fibras de carbono [14, 15] y de vidrio [16]. Tras el proceso de reciclado térmico en el que se ha procedido a separar el refuerzo de la matriz, se eliminan además de la matriz polimérica los diferentes tratamientos incorporados a la superficie de la fibra (comúnmente conocidos *sizing*) y que ayudan a trabajarla y protegerla de daños potenciales ocasionados por procesos posteriores (como, por ejemplo, procesos de tejeduría o fabricación de *preimpregnados*). Es importante tener en cuenta la eliminación de estos tratamientos superficiales, que generalmente se seleccionan con criterios de compatibilidad química con las matrices poliméricas, pues contribuyen mejorar las propiedades de adherencia entre matriz y refuerzo y, por tanto, las propiedades finales del material compuesto.

El procesamiento de revalorización de las fibras cortas recuperadas consta de diferentes etapas y estrategias, dependiendo de los productos finales y/o intermedios que se deseen conseguir [17], teniendo en cuenta que las características de las fibras recicladas, separadas de la matriz polimérica, presentan diferencias significativas respecto a las fibras vírgenes. Esta modificación de las propiedades se debe en gran medida a los efectos previamente mencionados como son la pérdida u oxidación de los diferentes aditivos presentes en la superficie de la fibra y que permiten mejorar la adhesión entre matriz y refuerzo, así como la reducción del tamaño de la fibra.

Es por ello que después del proceso de separación de las fibras de refuerzo y antes de proceder a su incorporación en otro material compuesto, es necesario que los refuerzos obtenidos, las fibras, pasen primero por un proceso de lavado que permita terminar de eliminar las partículas presentes en su superficie y después por un proceso de mejora de adhesión superficial, como puede ser la aplicación de plasma o la incorporación de materiales ligantes en la interfase [18, 19]. Gracias a la combinación de estos dos procesos es posible volver a obtener fibras recicladas con el mismo potencial de uso que las fibras vírgenes. Además, en este segundo paso de preparación de las fibras recuperadas, es importante tener en cuenta la aplicación final y la estructura que se quiere reforzar con las mismas, siendo posible diseñar y aplicar tratamientos específicos y otorgando de esta manera una mejor adhesión de las mismas a la matriz polimérica en la que se van a incorporar y, por tanto, recuperando su potencial de refuerzo mediante una correcta adherencia entre refuerzo y matriz.

Las estrategias generales de reutilización de fibra se pueden agrupar en 5 bloques dependiendo de su aplicación final, su estado de separación y la matriz en la que se encuentran embebidas:

2 - REUTILIZACIÓN EN COMPUESTOS TERMOESTABLES

Las fibras de carbono o de vidrio recuperadas y posteriormente preparadas para su reutilización en un compuesto termoestable, tienen el potencial de ser directamente aplicadas para diferentes aplicaciones no estructurales. Estos

nuevos materiales compuestos se caracterizan por no tener ni una direccionalidad predefinida, ni un empaquetamiento eficiente. Estas propiedades son conferidas por tecnologías de procesamiento como es el BMC (Por sus siglas en inglés, *Bulk Moulding Compound*) [20]. Se obtienen unas propiedades isotrópicas y un bajo porcentaje de fibra, en comparación con los materiales compuestos termoestables estructurados. Debido a la falta de direccionalidad de las fibras, las propiedades mecánicas obtenidas son relativamente bajas, lo que los hace adecuados para aplicaciones no estructurales o aplicaciones decorativas, en las que el material no está sometido a altas cargas.

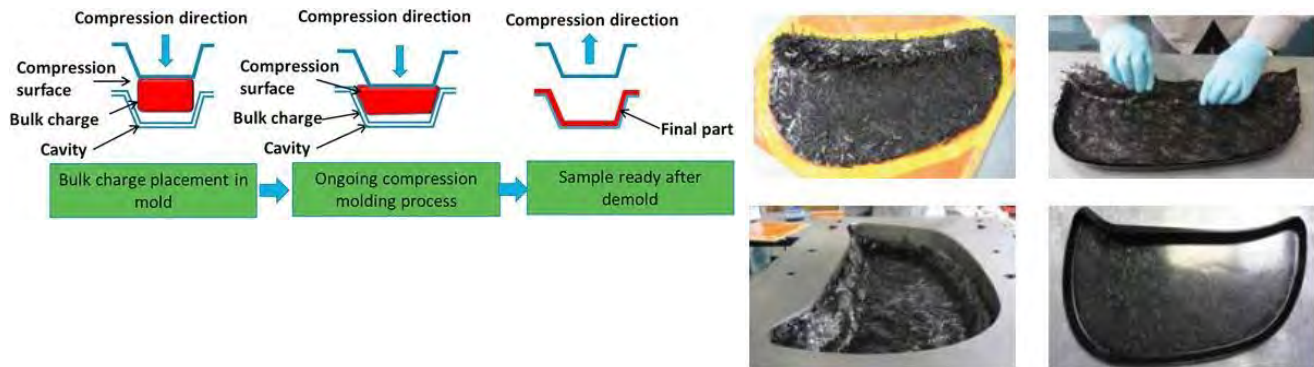


Figura 1: Esquema de un proceso BMC (izq) [21], Método y producto final producido por BMC (der) [22]

Aunque el proceso de BMC, pueda ser uno de los más utilizados a nivel industrial para la reutilización de fibras sueltas y recuperadas, también es posible utilizar procesos como la infusión para embeber las fibras distribuidas de manera aleatoria sobre una superficie compleja.

3 - REUTILIZACIÓN COMO REFUERZO EN MATERIALES COMPUESTOS TERMOPLÁSTICOS

En el caso de los materiales termoplásticos, las fibras se incorporan mediante un proceso de extrusión y mezclado en el que la matriz termoplástica es fundida y mezclada mecánicamente con los diferentes aditivos y refuerzos. Para ello, es necesario que las fibras estén adecuadamente preparadas para ser incorporadas en la matriz termoplástica y, por lo tanto, que tengan el tratamiento adecuado para asegurar una buena interfase entre matriz y refuerzo. Además, su formato físico debe ser adecuado para garantizar que sean correctamente dosificadas en la extrusora de una manera continua y homogénea durante todo el proceso de producción.



Figura 2: Componentes de husillo utilizados en el proceso de extrusión (Aitiip centro tecnológico)

De esta manera, las fibras son introducidas a través de unos husillos dentro de la extrusora, donde durante el proceso de mezclado con el polímero, sufren torsiones y esfuerzos mecánicos que las pueden romper, reduciendo su tamaño original y por tanto impactando en las propiedades mecánicas que éstas otorgan al material compuesto definitivo/obtenido [23]. La Figura 3 ilustra varias configuraciones de husillos desarrollados durante el proyecto Eco-Clip.

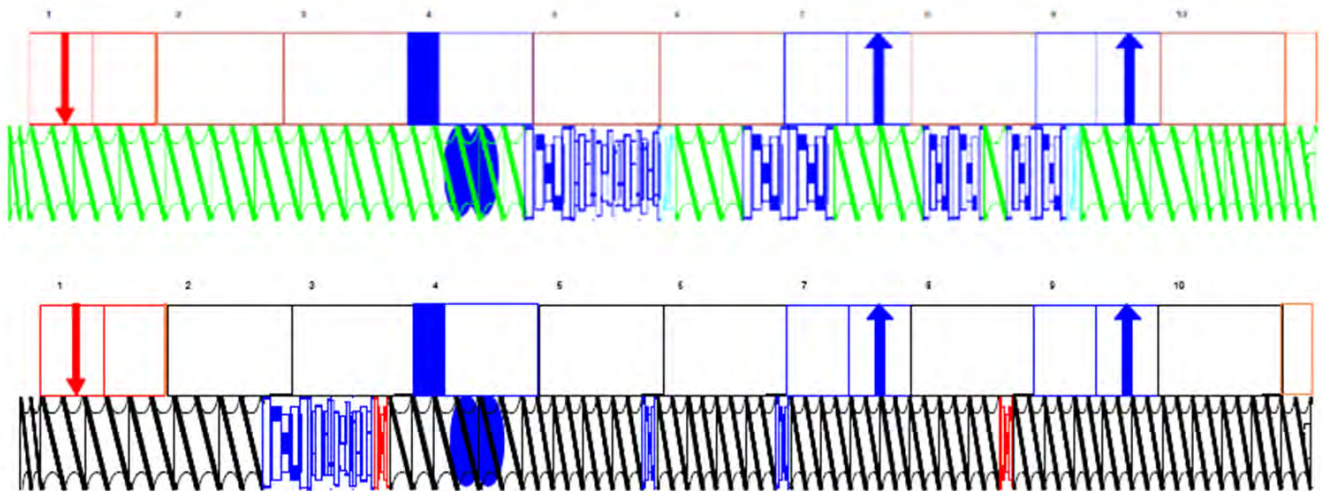


Figura 3: Esquema de diferentes configuraciones de husillos en una extrusora doble husillo (Aitiip centro tecnológico), durante el proyecto Barbara [24]

Es por este impacto directo que el proceso de extrusión tiene sobre las propiedades finales del material compuesto que es importante modificar, no solo las características de la extrusión, para que ésta se lleve a cabo en las condiciones más favorables para preservar la longitud de fibra, sino que además es necesario favorecer esta preservación de las características de la fibra mediante la modificación y especialización de los husillos utilizados en el proceso de extrusión y mezclado entre refuerzo y matriz.



Figura 4: Extrusora Cooperion de doble husillo corotatorios, con sistema de enfriamiento por baño de agua, dosificadores de granza, polvo, fibras y líquidos (Aitiip centro tecnológico)

Debido a la naturaleza lineal del proceso de extrusión y a la corta fase de compactación que se da en la punta de la extrusora, el material obtenido tras la incorporación de la fibra en la matriz termoplástica, la fibra se encuentra homogéneamente distribuida en el núcleo y con una direccionalidad predefinida, en el sentido del flujo de la extrusión. Obteniendo de esta manera un filamento liso en el que la fibra ha sido orientada en la dirección del filamento, debido a la fluencia del polímero fundido.

Todos los efectos comentados en el proceso de extrusión del material termoplástico reforzado con fibra; efecto piel, orientación de la fibra y reducción de la longitud de la fibra debido a la cizalla, se replican en las diferentes tecnologías

de procesamiento de material termoplástico, donde el concepto de fundido y empuje mediante husillo es un denominador común a todas las tecnologías, llegando a ser un efecto muy significativo en el caso de la inyección.



Figura 5: Micrografía de la fibra de carbono extruida, direccionalidad de la fibra durante el proceso de extrusión, obtenida por AIMEN en el proyecto ECOCLIP [25]

4 - REPROCESADO DE LA FIBRA: ESTRUCTURAS DE FIBRA TEJIDAS O NO TEJIDAS

Las fibras obtenidas por los procesos de reciclaje con longitudes superiores a 25-30mm no solo pueden ser utilizadas directamente como fuente de material para materiales compuestos, como se ha comentado en los puntos anteriores, sino que el valor añadido de estas fibras cortas se puede aumentar de manera significativa mediante procesos textiles que permitan alinear, paralelizar y dar lugar a estructuras lineales con una mayor complejidad y direccionamiento de fibras. De esta manera se consigue que la distribución de fibras tenga una dirección preferente y otorgue unas mejores propiedades a los materiales finales desarrollados o facilitar su procesabilidad. Dependiendo de la naturaleza de la unión entre las fibras y la estructura obtenida, se agrupan en dos tipos: refuerzos tejidos y no tejidos.

En el caso de los no-tejidos, principalmente su obtención se realiza mediante dos tecnologías: carda y el wet/dry-laid. Mediante la obtención de no-tejidos con carda se consigue una alta orientación de las fibras, como demuestra M. Khurshid et al. [26], aunque el porcentaje de fibras que disminuyen su longitud es significativo.

Para la fabricación de compuestos con refuerzos no tejidos, cabe destacar que en la actualidad ya es posible encontrar diferentes soluciones a nivel industrial, como las ofrecidas por BCIRCULAR y que, por lo tanto, se trata de una tecnología madura de la que diversos sectores ya se están beneficiando para conseguir materiales más sostenibles. Estos materiales destacan por su isotropía a nivel macroscópico y un grado de porosidad medio. Las estructuras no tejidas generadas a partir de las fibras recicladas son estructuras de fibras dispuestas de manera aleatoria y prensadas, dando lugar a una estructura isótropa y compleja con unas propiedades semejantes a las conseguidas mediante el proceso de BMC, pero facilitando tanto el proceso de fabricación como la logística y desplazamiento de las fibras. Además, gracias al proceso de prensado de las mismas se pueden encontrar estructuras con un mayor empaquetamiento y por lo tanto una mayor proporción de refuerzo en el material compuesto.



Figura 6: Imagen de una placa de material de fibra de carbono no tejido obtenido por la empresa BCIRCULAR para el sector de la automoción

En el caso de la formación de hilos con fibras de carbono reciclado, se ha estudiado la influencia de la longitud de la fibra de carbono, el retorcido de los hilos y el porcentaje de carbono en las propiedades del hilo final. De estos estudios se extrae que, a mayor longitud de fibra, mejores propiedades mecánicas del hilo resultante [27], mientras que existe una disminución de las propiedades a tracción con el aumento del retorcido [28].

El principal reto tecnológico de estas tecnologías versa en la modificación y adaptación de las tecnologías tradicionales textiles, de forma que permitan procesar fibras intrínsecamente frágiles a procesos mecánicos, con alta conductividad eléctrica (rCF), alta generación de electricidad estática y una baja resistencia a flexión que produce la disminución de forma notable de la longitud de las fibras y, en consecuencia, de las propiedades mecánicas de los composites fabricados a partir de estas.

Para los compuestos que incorporan refuerzos tejidos en base a hilados de fibra cortada se están realizando diversas investigaciones y desarrollos que abren la puerta a estructuras cada vez más complejas. Los proyectos rGENERA I [29] y II [30], r-Lightbiocom [31] y el proyecto EOCENE [32] son ejemplos del trabajo que se está realizando en España en este campo y que han dado lugar a una solicitud de patente [33] por parte del centro tecnológico AITEX. La calidad de las fibras que se están utilizando y la longitud de las mismas también están aumentando y optimizándose, dando lugar así a hilos y tejidos cuyas propiedades mejoran actuales soluciones comerciales como los no-tejidos en cuanto a propiedades mecánicas. En el caso de las fibras provenientes de materiales compuestos reciclados (vidrio y carbono), la fragilidad de las fibras, especialmente en el caso del carbono, está siendo uno de los mayores obstáculos encontrados para conformar hilados regulares y con propiedades mejoradas, que se encuentra actualmente en desarrollo. Diferentes centros, empresas y universidades se encuentran actualmente trabajando en esta temática, con resultados altamente prometedores. Uno de los casos con mayor potencial en el sector de los materiales compuestos y los textiles en España es la red Cervera OSIRIS [34]. Estos procesos se basan en la orientación de las fibras recicladas en una misma dirección para después poder tratarlas y generar diferentes mechas continuas que puedan habilitar el proceso de fabricación del tejido y, en consecuencia, al material compuesto. Los primeros resultados de caracterización mecánica han demostrado que algunas propiedades como la resistencia a tracción, no mejoran significativamente debido a la longitud de las fibras (discontinuidad), pero propiedades como la resistencia a la flexión e impacto mejoran respecto a los no-tejidos. Estas tecnologías abren nuevos campos de aplicación de las fibras recicladas para aplicaciones no estructurales de alto valor añadido, ya que la procesabilidad, manipulación y conformabilidad de estos textiles intermedios, permiten la obtención de geometrías complejas no viables con los no-tejidos u otras soluciones. En la actualidad, las investigaciones principales en este campo de hilatura-tejeduría se centran en el estudio de la combinación de filamentos vírgenes mediante hibridación y *commingling* que permitan mejorar las propiedades mecánicas.



Figura 7: Imagen del proceso de revalorización de fibra mediante tecnologías textiles desarrollados por AITEX (De izq. a dcha. cinta de carda, mecha, hilado, tejido y composite termoplástico)

5 - RECICLADO DE FIBRAS QUE TODAVÍA ESTÉN EMBEBIDAS

En el caso de las fibras embebidas es necesario tener en cuenta la naturaleza polimérica que las aglutina para poder definir las estrategias de reciclado más apropiadas.

Cuando las fibras están en un sistema termoplástico su reciclaje viene determinado por la capacidad de estos polímeros para ser reciclados mediante la aplicación de calor. Las cadenas poliméricas que conforman los materiales termoplásticos, gracias a la energía aportada en forma de calor tienen una alta movilidad y pueden pasar a estado líquido sin llegar a degradarse, a diferencia de los termoestables. Esta capacidad de los materiales termoplásticos les otorga una gran ventaja en el campo del reciclaje respecto al resto de estructuras poliméricas. Es por este motivo que el reciclado de materiales compuestos termoplásticos debe ser tratado como un bloque completamente diferente a los anteriores. En este caso no es necesario realizar una separación propiamente dicha para poder revalorizar el material compuesto, dado que este se puede revalorizar mediante un proceso de calentamiento y moldeo de la pieza.

Es importante destacar que, pese a la posibilidad de reciclar piezas mediante la aplicación de calor, el proceso industrial de reciclado de materiales termoplásticos se basa en la unión de un proceso mecánico que permite obtener gránulos, y un proceso posterior de extrusión y/o transformación, como puede ser el proceso de moldeo por inyección. Así, los materiales reciclados tienen potencialmente la misma procesabilidad y características físicas que el material termoplástico virgen del que proceden.

En este sentido, es importante tener en cuenta varios factores. Por un lado, en caso de querer reducir la concentración de fibra, como no se lleva a cabo la separación entre la matriz y el refuerzo, este material solo puede ser empleado con el mismo tipo de polímero que la matriz que lo embebe (por ejemplo, poliamida con poliamida o polipropileno con polipropileno) o siendo mezclado con matrices poliméricas miscibles entre sí, es decir, con alta compatibilidad [35], evitando así la generación de defectos en la interfase entre ambos polímeros. En caso de que sea necesario modificar las características del sistema termoplástico, existen tecnologías que permiten cambiar la estructura polimérica de la matriz mediante la aplicación de una reacción química en el proceso de extrusión, estas tecnologías REX (Por sus siglas en inglés *Reactive Extrusion*) [36], se basan en la realización de una reacción química en continuo promovida por la acción de movimiento, cizalla y temperatura otorgada por la extrusión.

El otro punto a tener en cuenta para el reciclado de materiales compuestos termoplásticos es el efecto que los procesos mecánicos de extrusión y transformación de plásticos tienen sobre la fibra. Como se ha comentado en el punto 2, los procesos con alta cizalla como son la extrusión o la inyección tienen un efecto directo en la longitud de la fibra y, por lo tanto, en las propiedades finales del material. Este efecto en la longitud de la fibra limita la revalorización de los materiales compuestos termoplásticos y, en consecuencia, las aplicaciones en las que se pueden volver a utilizar.

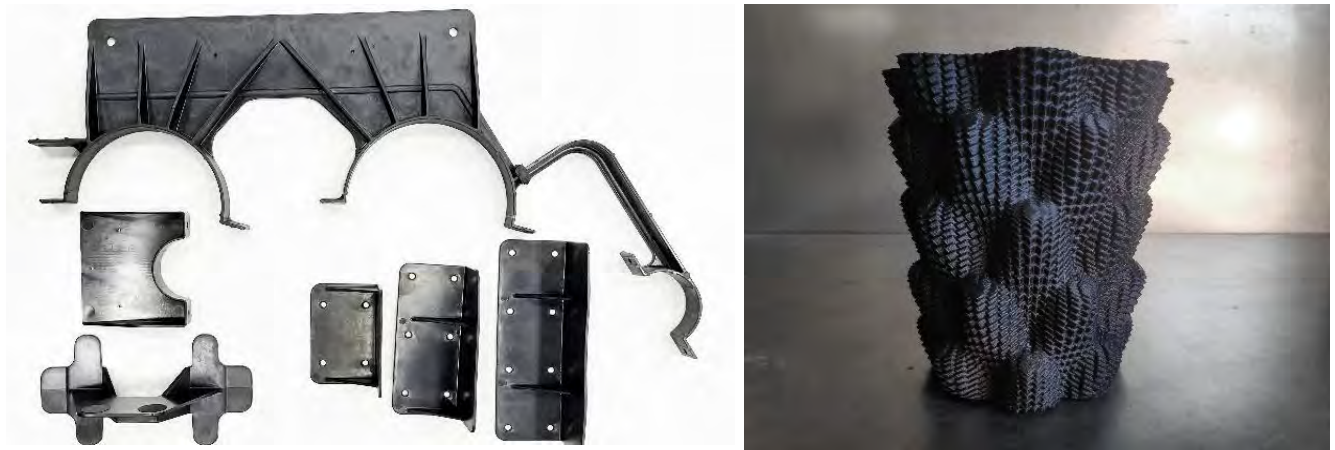


Figura 8: Productos realizados en el marco del proyecto ECOCLIP [XXVI], mediante moldeo por inyección de Aitiip (izq); pieza impresa en 3D con material de la empresa BCIRCULAR

En este sentido, en el proyecto ECO-CLIP [xxvi], se trabajó sobre el desarrollo de nuevos productos para la industria aeronáutica, utilizando como punto de partida los materiales desechados de la propia industria aeronáutica. A partir de rollos de fibra continua, el proyecto fue capaz de fabricar piezas demostradoras del marco del Clean Sky 2, mientras se monitorizaba el efecto que cada uno de los procesos de transformación de plásticos tenía en la longitud de la fibra, como se puede ver en las Figura 9 & 10.

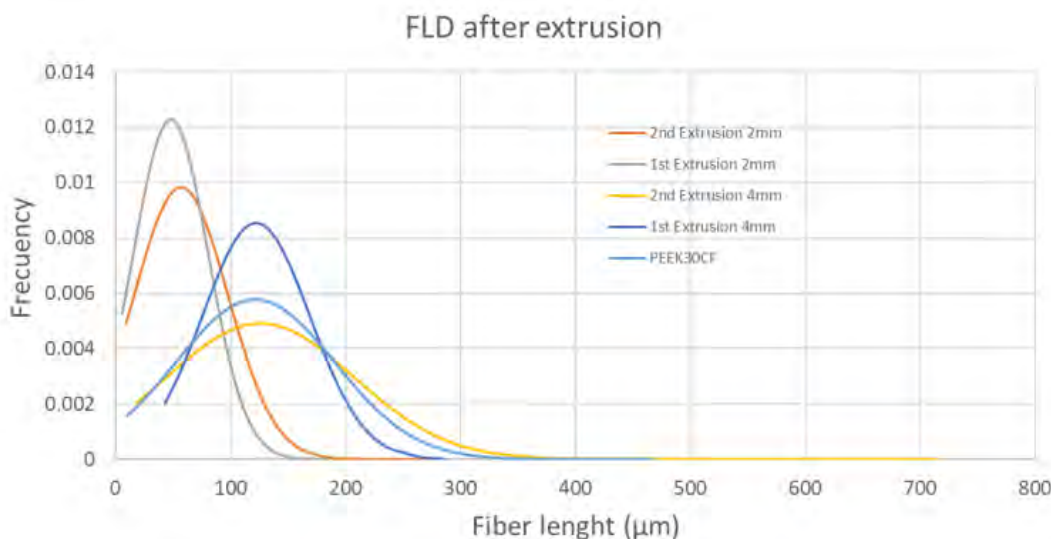


Figura 9: Longitud de la fibra reciclada con diferentes tamaños de cabezales (2mm y 4 mm de diámetro), después del proceso

de extrusión y comparación con el material comercial (PEEK30CF), en el marco del proyecto ECO-CLIP [XXVI], en las instalaciones de AIMEN

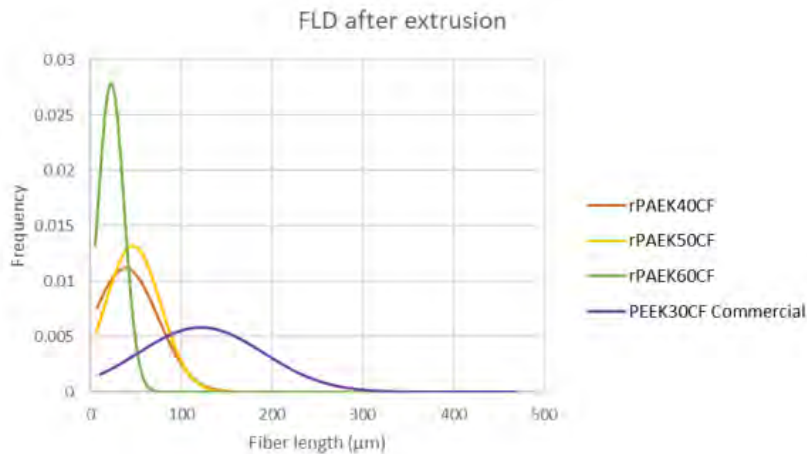


Figura 10: Longitud de la fibra reciclada después de ser mezclada (mediante extrusión) con material comercial sin fibra: efecto de la cizalla en la longitud de la fibra. Trabajo realizado en el marco del proyecto ECO-CLIP [XXVI], en las instalaciones de AIMEN

En el caso de los sistemas termoestables, una vez que el material compuesto se encuentra formado, no es posible realizar un proceso de reciclado de la fibra sin un proceso de separación de matriz y refuerzo o ser utilizado como un refuerzo en otros sistemas complejos, como se ha explicado en el caso 1. No obstante, las características del procesado de los materiales compuestos nos permiten dar lugar a diferentes estrategias de reciclado de residuos no curados como son los retales de fibra no impregnada con resina o aquellos retales de materiales preimpregnados que todavía no han sido expuestos a un proceso de curado. En ambos casos es posible reutilizar dichos materiales como fuente de materia prima primaria para piezas más pequeñas o mediante su combinación para poder dar lugar a sistemas complejos.

Aunque en el caso de los materiales termoestables no es posible recuperar las fibras de los polímeros curados, es importante hacer una puntualización. Actualmente se están desarrollando nuevas formulaciones basadas en redes covalentes dinámicas que permiten el reprocesado de materiales termoestables curados, como se puede ver en el capítulo 17. Aunque hay diferentes centros trabajando en diferentes soluciones dinámicas como Aitiip o NAITEC, es el centro tecnológico CIDETEC quien mediante proyectos como AIRPOXY [37], ECOXY [38] y CUBIC [39] está liderando este tipo de innovaciones.

6 - RECICLAJES ESPECÍFICOS A LA NATURALEZA DE LA FIBRA

Un material compuesto es aquel que mediante la unión de diferentes componentes, una matriz y un refuerzo, consigue unas propiedades superiores a la de los dos materiales por separado. Aunque los materiales compuestos se asocian principalmente, por la importancia y relevancia en el mercado, a los refuerzos de fibras de vidrio y de carbono, es necesario incluir en la ecuación otros refuerzos como pueden ser las fibras termoplásticas [40] o las fibras naturales [41].

En el caso de las fibras termoplásticas, una vez conseguida su separación, pueden ser recicladas de manera estándar gracias a las características propias/intrínsecas de estos polímeros, dando lugar de esta manera a una nueva generación de fibras recicladas. En este caso particular, el reto que se presenta es doble: la correcta separación fibra-matriz y el molido mecánico de las fibras para poder introducirlas en sistemas de extrusión industriales. Ambas aproximaciones de reciclaje se enfrentan a desafíos comunes, como son la compatibilidad de los diferentes tipos de fibras que pueden estar presentes y la compatibilidad entre la fibra y la matriz. Desde diferentes proyectos liderados por Aitiip se están promoviendo soluciones de autoreforzo, en el que la combinación de diferentes grados de cristalinidad da lugar a un filamento autoreforzado, mejorando las propiedades y simplificando el reciclaje del tejido [xxxv, 42].

Para las fibras naturales, siendo el lino y el cáñamo [43, 44] las más prometedoras a nivel europeo, las limitaciones para su reciclado actual se deben a sus propiedades térmicas y la degradación que sufren las mismas durante el proceso de reciclado térmico. Es por este motivo que proyectos como VIBES [45] están trabajando en el desarrollo de diferentes estrategias sostenibles que permitan su recuperación y así poder tratarlas y revalorizarlas con las mismas



estrategias con las que se está trabajando para las fibras de carbono y de vidrio.

7 - CONCLUSIONES

En este capítulo se ha definido el potencial de reciclado de las diferentes estructuras compuestas que introducen como refuerzo fibra corta, sus retos y problemáticas así como las ventajas y el valor añadido otorgado por dichas estructuras complejas de la fibra corta.

De este modo es posible esbozar/vislumbrar las diferentes estrategias y puntos de trabajo que se deben seguir investigando en el campo de los materiales compuestos para dar lugar a una economía sostenible, en la que los propios materiales de refuerzo puedan retener el valor añadido y prolongar su vida.

A modo de resumen: el punto más crítico es la preservación de la longitud de la fibra, directamente relacionado con las propiedades mecánicas otorgadas por la misma al material compuesto, así como la simplificación del proceso de retrabajo mediante tecnologías de reciclado que permitan reutilizar las estructuras tejidas para las mismas aplicaciones y utilizando los mismos formatos de origen, sin necesidad de volver a someter a las fibras continuas por un proceso de tejeduría.

En aquellos casos en los que la fibra no puede ser separada de la matriz o la calidad de la misma no permite reprocesarla para dar lugar a estructuras continuas, la mejor opción es revalorizarla con la mayor longitud posible, pues fibras discontinuas con longitudes superiores a 9 mm, que pueden no ser válidas para sectores como la aeronáutica en piezas estructurales, son de gran valor para otros productos fabricados mediante moldeo por inyección o impresión 3D, en dicho u otros sectores como puede ser la automoción.

De esta manera se favorece que el residuo de un sector pueda ser reutilizado en otra cadena de valor para el mismo sector u otros, favoreciendo la simbiosis industrial.

A lo largo del capítulo se han ido mencionando algunos de los proyectos que se están llevando a cabo a nivel nacional y regional, así como proyectos europeos en los que los centros y empresas españolas están liderando la investigación. A continuación, se listan los más relevantes en cuanto al desarrollo de procesos de reciclado y reutilización de fibras de carbono y vidrio.

<u>EOCENE</u>	<u>VIBES</u>	<u>TIANA</u>	<u>Carbon Second Life</u>
<u>OSIRIS</u>	<u>EOLO HUBS</u>	<u>PEGASO</u>	<u>CUBIC</u>
<u>TIANA</u>	<u>BIO-UPTAKE</u>	<u>ECO-CLIP</u>	<u>INN-PAEK</u>
<u>rGENERA I</u>	<u>rGENERA II</u>	<u>HELACS</u>	<u>RE-3</u>
<u>AIRPOXY</u>	<u>ECOXY</u>	<u>r-LightBioCom</u>	

8 - BIBLIOGRAFÍA

[0] Materiales compuestos de fibra de carbono y de vidrio, un nuevo flujo de residuos cuyo reciclaje hay que abordar (residuosprofesional.com) (Acceso el 11/05/2024)

[1] Qureshi, J. A Review of Recycling Methods for Fibre Reinforced Polymer Composites. Sustainability 2022, 14, 16855. <https://doi.org/10.3390/su14241685>

[2] Recycling of fibre reinforced plastic waste: processing and applications | RE-3 | Project | Fact sheet | FP5 | CORDIS | European Commission (europa.eu) (Acceso el 11/05/2024); GA ID: G5RD-CT-2001-00464

[3] CERCHA 105 OCTUBRE-10. pp. 76-80. Reciclado de materiales compuestos de matriz polimérica.pdf (riarte.es)

[4] EP22211297.1 con título "SISTEMA DE PROGRAMACION DE ROBOT"

[5] Helacs (aitiip.com) (Acceso 11/05/2024); GA ID: 101007871

[6] EoLO-HUBS – Wind turbine blades End of Life through Open HUBs for circular materials in sustainable business models (Acceso 11/05/2024); GA ID: 101096425

[7] Equipo portátil de corte de piezas de material compuesto: (Nº solicitud: PCT/ES2022/070841)

[8] Instalación de degradación térmica de materiales compuestos y procedimiento asociado para el reciclado (Nº solicitud: PCT/ES2022/070842)



- [9] Qureshi, J. A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures. *Fibers* 2022, 10, 27. <https://doi.org/10.3390/fib10030027>
- [10] Shikha Parashar, V.K. Chawla;; A systematic review on sustainable green fibre reinforced composite and their analytical models; *Materials Today: Proceedings*; Volume 46, Part 15; 2021; 6541-6546, doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.739.
- [11] Subhash Waghmare, Sagar Shelare, Kapil Aglawe, Pravin Khope;; A mini review on fibre reinforced polymer composites;; *Materials Today: Proceedings*, Volume 54, Part 3;;2022; 682-689, doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.379.
- [12] Asim, M., Paridah, M.T., Chandrasekar, M. et al. Thermal stability of natural fibers and their polymer composites. *Iran Polym J* 29, 625–648 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13726-020-00824-6>
- [13] Vohlídal, Jiří. "Polymer degradation: a short review" *Chemistry Teacher International*, vol. 3, no. 2, 2021, pp. 213-220. <https://doi.org/10.1515/cti-2020-0015>
- [14] Y. Wei, S.A. Hadigheh;; Development of an innovative hybrid thermo-chemical recycling method for CFRP waste recovery;; *Composites Part B: Engineering*;; Volume 260;; 2023;; 110786;; doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110786.
- [15] Y. Wei, S.A. Hadigheh;; Development of an innovative hybrid thermo-chemical recycling method for; CFRP waste recovery;; *Composites Part B: Engineering*;; Volume 260;; 2023;; 110786;; doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110786.
- [16] Karuppannan Gopalraj, S., Kärki, T. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. *SN Appl. Sci.* 2, 433 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4>
- [17] Heru Sukanto et al 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1034 012087; DOI 10.1088/1757-899X/1034/1/012087
- [18] K. Pender, L. Yang;; Regenerating performance of glass fibre recycled from wind turbine blade;; *Composites Part B: Engineering*;; Volume 198;; 2020;; 108230;; doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108230.
- [19] Di He, Vi Kie Soo, Filip Stojcevski, Wojciech Lipiński, Luke C. Henderson, Paul Compston, Matthew Doolan;; The effect of sizing and surface oxidation on the surface properties and tensile behaviour of recycled carbon fibre: An end-of-life perspective;; *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*;; Volume 138;; 2020;; 106072;; doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106072.
- [20] Elmar Moritzer, Maximilian Scholle; The main factors influencing glass fiber length reduction in the processing of bulk molding compounds (BMC). *AIP Conf. Proc.* 8 May 2024; 3158 (1): 040003. <https://doi.org/10.1063/5.0208080>
- [21] Yuyang Song, Umesh Gandhi, Takeshi Sekito, Uday K. Vaidya, Srikar Vallury, Anthony Yang, Tim Osswald;; CAE method for compression molding of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite using bulk materials;; *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*;; Volume 114;;2018;;388-397;; doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.09.002.
- [22] Toray Advanced Composites. (2024, February 14). Advanced Composite Bulk Molding. AZoM. Retrieved on May 12, 2024 from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7976>. (Acceso 12/05/2024)
- [23] Ville, J., Inceoglu, F., Ghamri, N., Pradel, J. L., Durin, A., Valette, R. and Vergnes, B.. "Influence of Extrusion Conditions on Fiber Breakage along the Screw Profile during Twin Screw Compounding of Glass Fiber-reinforced PA" *International Polymer Processing*, vol. 28, no. 1, 2013, pp. 49-57. <https://doi.org/10.3139/217.2659>
- [24] Barbara Project (Acceso 12/05/2024); GA ID: 745578
- [25] ECO-CLIP (ecoclip-project.eu) (29/04/2024); GA ID: 886810
- [26] M. F. Khurshid, C. Cherif y A. Abdqadir, «'Processing of waste carbon and poly-amide fibers for high performance thermoplastic composites: Influence of carding parameters on fiber orientation, fiber length and sliver cohesion force,» *Journal of the Textile Institute*, vol. Online, pp. 1-12, 11 2019. doi: 10.1080/00405000.2019.1690918
- [27] M. Hasan, S. Nitsche, A. Abdkader y C. Cherif, «Properties of CF/PA6 friction spun hybrid yarns for textile reinforced thermoplastic composites,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 254, p. 042013, 10 2017. doi: 10.1088/1757-899X/254/4/042013
- [28] M. Hengstermann, K. Kopelmann, A. Nocke, A. Abdkader y C. Cherif, «Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibres for high-performance composites: Part IV: Measurement of recycled carbon



- fibre length,» Journal of Engineered Fibers and Fabrics, vol. 15, 5 2020. doi: 10.1177/1558925020910729
- [29] rGENERA_informe_final_web-1.pdf (aitex.es) (12/05/2024);
- [30] RGENERA II - FIBRA DE CARBONO REUTILIZADA PARA TEXTILES (aitex.es) (12/05/2024)
- [31] <https://www.r-lightbiocom.eu/> (14/05/2024); GA ID: 101091691
- [32] Eocene | Proyecto Eocene (proyecto-eocene.com) (12/05/2024); Proyecto subvencionado por CDTI
- [33] P202330884
- [34] Red Osiris Network Reciclado de Plásticos (29/04/2024)
- [35] Andrea Dorigato,; Recycling of polymer blends,; Advanced Industrial and Engineering Polymer Research,; Volume 4, Issue 2,; 2021,; 53-69,; doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.02.005.
- [36] Tian-Tian Li, Lian-Fang Feng, Xue-Ping Gu, Cai-Liang Zhang, Pan Wang, and Guo-Hua Hu Industrial & Engineering Chemistry Research 2021 60 (7), 2791-2806 DOI: 10.1021/acs.iecr.0c05078
- [37] AIRPOXY - Smart Epoxy-based Composites for Aeronautics (Acceso 13/05/2024); GA ID: 769274
- [38] Ecoxy Project - Biobased, reciclable, reshapable & repairable fiber (Acceso 13/05/2024); GA ID: 744311
- [39] Cubic (cubicproject.eu) (Acceso 12/05/2024); GA ID: 101111996
- [40] Hicks, E. M., Craig, R. A., Wittbecker, E. L., Lavin, J. G., Ednie, N. A., Howe, D. E., ... Couper, M. (1971). THE PRODUCTION OF SYNTHETIC-POLYMER FIBRES. Textile Progress, 3(1), 1-108. <https://doi.org/10.1080/00405167108688988>
- [41] Valiveti Adithya Ajitesh, Jai Inder Preet Singh, Sehijpal Singh, Vikas Dhawan, Vikas Sharma; A review on natural fibres: Its applications, chemical and mechanical properties. AIP Conf. Proc. 30 January 2024; 2962 (1): 020025. <https://doi.org/10.1063/5.0192259>
- [42] Welcome - Bio Uptake Project (bio-uptake-project.eu) (Acceso 12/05/2024); GA ID: 101057049
- [43] Del Bianco G, Giammaria V, Boria S, et al. Flax and hemp composites: Mechanical characterization and numerical modeling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2023;0(0). doi:10.1177/09544062231182036
- [44] B. Murali, P. Yogesh, N.K. Karthickeyan, D. Chandramohan,; Multi-potency of bast fibers (flax, hemp and jute) as composite materials and their mechanical properties: A review,; Materials Today: Proceedings,; Volume 62, Part 4,; 2022,; 1839-1843,; doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.001.
- [45] vibesproject (29/04/2024); GA ID: 101023190



Capítulo 12: REDUCCIÓN DE RESIDUOS EN PRODUCCIÓN Y REUTILIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS PREIMPREGNADOS

Laura Medina Coronado¹, Irene Díaz Raboso¹

¹ AIRBUS

Abstract

The efforts to reduce, reuse and recycle scrap derived from manufacturing processes with composite materials are significantly increasing in all those sectors making use of such materials in their production systems. The rising commitment with the environmental cause and the everyday stricter regulation in terms of waste management has led to launching new initiatives to minimize the environmental impact of composite materials and derived components manufacturing. Therefore, the aim of this chapter is to provide several examples of optimization initiatives in the use of composite materials and, consequently, the reduction and reuse of waste in production environments in the aeronautical sector, having Airbus as a reference where, according to the available pre-pandemic data, 61% of the scrap corresponds to uncured material whereas 39% refers to cured waste.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos para reducir, reutilizar y reciclar residuos procedentes de los procesos de fabricación con materiales compuestos son cada vez mayores en todos los sectores que incorporan estos materiales en sus sistemas productivos. El creciente compromiso con el medio ambiente y la cada vez más estricta normativa en materia de gestión de residuos ha impulsado la puesta en marcha de iniciativas encaminadas a reducir el impacto ambiental de la producción de materiales compuestos y de componentes a partir de estos. Además, con el paso de los años se ha puesto de manifiesto la necesidad de abordar estos asuntos desde el prisma de equipos multifuncionales, en los que los múltiples actores involucrados en el correcto funcionamiento de tales entornos de fabricación - los agentes de la cadena de suministro, los encargados de edificios e instalaciones, los responsables de ingeniería, los equipos de mantenimiento y las propias entidades de producción - encuentren un espacio común de reunión y de trabajo en estas líneas de actuación, facilitando el camino hacia su implementación.

El objetivo de este capítulo es presentar algunos ejemplos de iniciativas de optimización del uso de materiales compuestos y, por consiguiente, de reducción y reutilización de residuos de dichos materiales en los entornos de producción del sector aeronáutico, tomando como referencia algunas de las iniciativas ejecutadas en Airbus en los últimos años.

Los materiales preimpregnados de fibra de carbono constituyen la principal materia prima de los procesos productivos del sector aeronáutico en España, especialmente en su formato de cinta unidireccional. Por tanto, las principales actuaciones para la reducción y la reutilización de residuos han estado encaminadas primeramente a este tipo de materiales. No obstante, los tejidos de fibra de carbono y los materiales preimpregnados a base de fibra de vidrio también están presentes en los procesos actuales y, por tanto, de los residuos de producción, requiriendo de acciones de mejora.

Las cifras de generación de residuos en un momento de producción al alza, como fue la época de pre-pandemia en 2019, indican que el 61% de los residuos de material de fibra de carbono se encontraban en estado no curado frente a un 39% de material curado.

Si nos centramos primeramente en los residuos de material no curado, se observó que el 66% de los mismos correspondía a restos de corte de laminados en producción, un 32% eran finales de bobinas y el 2% restante abarcaba tanto materiales caducados como otros residuos de generación puntual. Por tanto, estas cifras indicaron la necesidad de enfocar los esfuerzos en esas circunstancias, desarrollando proyectos destinados a mejorar esas cifras. A continuación, se presentan algunas de las principales líneas de trabajo que se han llevado a cabo tomando como premisa las cifras anteriores:

- **Optimización de la cantidad de material empleada en los procesos de fabricación:** Uno de los conceptos de más comunes en los entornos de fabricación en el sector aeronáutico es el llamado ratio Buy to Fly, que relaciona

la cantidad de material que es necesario aprovisionar para la producción de dicho componente con la cantidad de material presente en el componente final. Este ratio es un indicador del grado de optimización en el uso de los materiales en los procesos de fabricación, de forma que el objetivo es tender al menor valor posible. La evolución de las tecnologías de fabricación, especialmente de encintado, han permitido que la tasa de generación de material residual en este tipo de operaciones se haya reducido progresivamente desde cerca de un 30% en las primeras tecnologías de encintado automático con cinta (Automated Tape Laying) hasta un 10% de los procesos encintado de mechas más avanzados (Automatic Fiber Placement, AFP).

- Reuso de finales de bobina:** Como se ha indicado anteriormente, en torno al 32% de los residuos de material no curado identificados en 2019 correspondían a finales de bobina, como resultado de la dificultad en los procesos productivos de aprovechar el 100% del material disponible en tales bobinas en las operaciones de encintado. No obstante, existen otros componentes de las piezas de fabricación para cuya obtención originalmente se empleaba material virgen y que son susceptibles de obtenerse siguiendo procesos de extrusión o pultrusión a partir de finales de bobina, como es el caso de los rellenos que es necesario aplicar en las uniones entre las pieles de los componentes y la zona en la que pierden la continuidad los distintos subcomponentes que constituyen los rigidizadores, en la zona del radio. En esas zonas, aparece un intersticio de sección triangular que debe rellenarse asegurando el mejor ajuste posible entre componentes con el objeto de mantener la resistencia y la rigidez de los mismos sin alteración así como la calidad interna del componente, evitando la aparición de porosidades y distorsión en las fibras durante el proceso de curado.



Figura 1: Rellenos de radios de largueros

Este relleno se asume que se trata de una pieza sin responsabilidad estructural, que no transmite cargas, y que a menudo se presenta en formato de varillas de sección triangular y longitud cercana a 1m. Además, desde la perspectiva de la fabricación, es necesario asegurar que el proceso de obtención del relleno es eficiente y robusto de forma que se puedan cumplir los requerimientos de calidad satisfaciendo las necesidades productivas en todo momento. Por consiguiente, los rellenos deben ser estables en cuanto a dimensiones y geometría desde su fabricación, pasando por las operaciones de manipulación intermedias hasta llegar a su instalación en su posición final y, para ello, se pueden emplear distintos procesos:

- Proceso de conformado en prensa:** Se parte de un laminado plano de telas orientadas a 0° cortado de forma precisa en tiras finas de sección rectangular las cuales se insertan en un útil de conformado donde se le confiere la sección triangular necesaria. No obstante, se parte de material nuevo para la obtención de los rellenos.

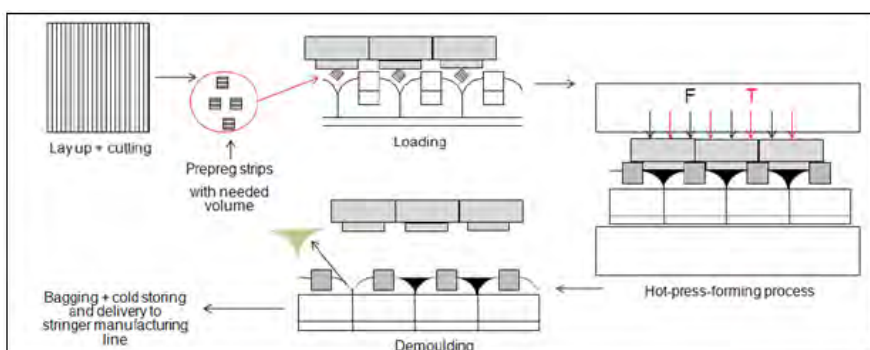


Figura 2: Proceso de fabricación de rellenos



Figura 3: Molde para relleno

- **Pultrusión de material formato ATL:** Se parte de bobinas de material de ancho 150 mm o 300 mm, las cuales se cargan en el desbobinador para separar el material del papel soporte antes de pasar a la unidad de corte, donde el material se corta en tiras más finas que luego se unen para pasar conjuntamente por unas boquillas que le confieren la sección triangular al tiempo que se aplica calor mediante una lámpara de radiación IR para consolidar el material a su paso. Finalmente, el material se somete a presión en un conjunto de rodillos donde se acaba de conferir la geometría al relleno, que luego se corta en varillas de la longitud deseada.

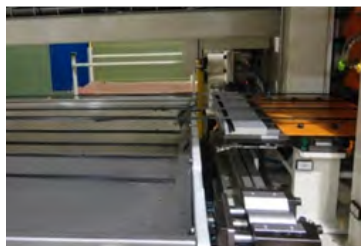
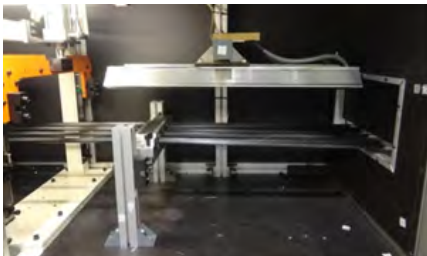


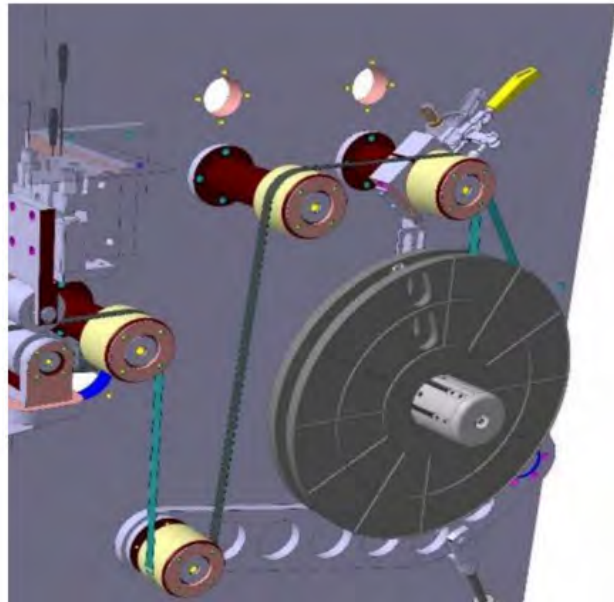
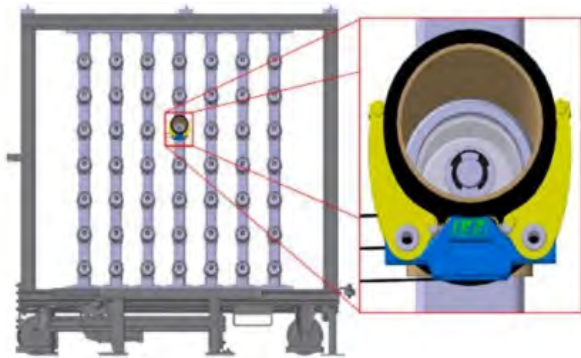
Figure 4: Equipo de obtención de rellenos a partir de material formato ATL

- **Pultrusión de material formato AFP:** Se parte de finales de bobinas de material de ancho 6,35 mm y soportado sobre film de polietileno, resultantes de los procesos de encintado automático de mechas (Automated Fiber Placement, AFP).



Figure 5: Finales de bobina de AFP

Debido a la variabilidad de la longitud del material disponible en cada bobina, el material se unifica en cassettes a través de la unidad de rebobinado. Posteriormente, los diferentes cassettes necesarios para obtener el relleno deseado, se emplean en paralelo y se hace pasar por la unidad de pultrusión, en la cual el material se consolida, se conforma y se corta en varillas de aproximadamente 1 m.



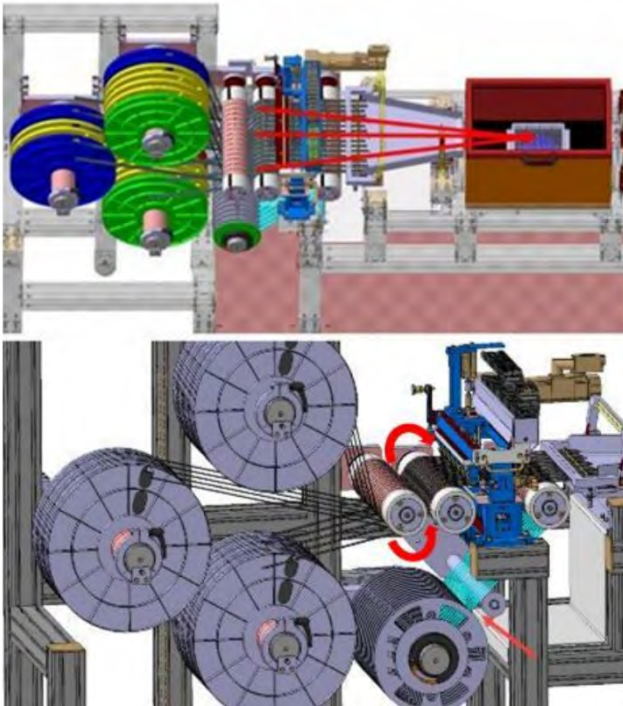


Figure 6: Carros con finales de bobinas, unidad de rebobinado y unidad de pultrusión

- **Programas de encintado y corte optimizados:** La optimización de los programas de encintado y corte de laminados supone otra estrategia que contribuye a la reducción del consumo de material en los entornos de producción y, por consiguiente, a minimizar la generación de material residual. Para ello, es fundamental la aplicación de principios de ecodiseño encaminados a maximizar las prestaciones de los componentes fabricados con materiales compuestos así como a optimizar las geometrías de los mismos considerando las capacidades y los medios de fabricación desde la fase de diseño para así favorecer el aprovechamiento de material. Ejemplos de esto son los programas de encintado y corte en los que los contornos de los laminados son cada vez más próximos a los contornos del componente final, minimizando la cantidad de material extra necesaria para la fabricación.
- **Alternativas a la laminación de material compuesto:** La laminación de material compuesto es el procedimiento habitual para la obtención de apilados de capas de material compuesto con unas orientaciones determinadas hasta alcanzar el espesor deseado en cada zona. No obstante, este proceso puede no ser la opción más óptima, especialmente para componentes con orificios, como las juntas de las bocas de hombre o bocas de mano de las piezas. En este caso, la junta no es más que un anillo de material compuesto cuya forma tradicional de obtenerlo consistía en la laminación en plano y el corte posterior del anillo, incurriendo en una cantidad considerable de material residual. Como alternativa, se plantea el bobinado de estas juntas, de forma que el material compuesto se va depositando sobre el contorno de un útil oval a partir del cual se obtiene la geometría de la junta sin necesidad de extraer posteriormente la zona central para generar el anillo.

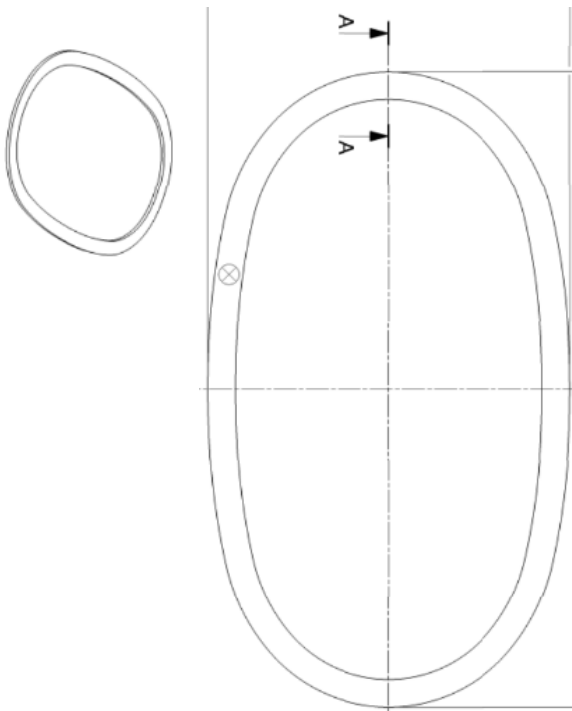


Figure 7: *Junta de trampillas de mantenimiento*

- Reuso de material residual no curado:** Además de todas las tecnologías que se han presentado anteriormente, sigue existiendo una parte importante de material residual de los procesos de producción cuyo aprovechamiento sigue pendiente de solución, especialmente si hablamos de material no curado multicapa como, por ejemplo, los residuos de los procesos de corte de laminados. En este sentido, recientemente se ha estado trabajando en nuevas tecnologías encaminadas al reuso de este tipo de materiales basadas en el moldeo por compresión. Así, tras la correcta segregación y acondicionamiento de los laminados residuales en los puntos de generación, es decir, las plantas de fabricación, estos deben someterse a un proceso de separación de capas de material y posterior corte en láminas de tan solo unos centímetros de longitud. Tras esto, el material se podría emplear para la obtención de una preforma a procesar posteriormente en una prensa para obtener el componente final deseado.

Por otro lado, si hablamos de residuos de material curado, de los que se indicaba anteriormente que, a 2019, representaban el 39% de los residuos generados, siendo estos principalmente residuos generados en las operaciones de recantado de las piezas curadas así como inutilidades de los propios componentes debidas a desviaciones ocurridas en el proceso de fabricación afectando negativamente a la calidad final de la pieza. En este sentido, algunas de las principales líneas de acción son las siguientes:

- Iniciativas de netshape o fabricación a contorno final:** Este tipo de líneas de trabajo van encaminadas a fabricar los componentes o parte de ellos eliminando la necesidad de recantar tras el curado, contribuyendo así a reducir tales residuos.
- Optimización de los procesos de control de calidad:** Conforme los procesos de fabricación van adquiriendo madurez y las tecnologías se van consolidando y progresando, los procesos de control de calidad también van evolucionando, pudiendo pasar de requerimientos de amplias campañas de elaboración de probetas a la obtención de la información necesaria a través de solo unos pocos especímenes acompañados de una recopilación detallada de datos de los diferentes procesos. Esto implica que la cantidad de ensayos, tanto destructivos como no destructivos, se va reduciendo con el tiempo en estas circunstancias como resultado de esa evolución tecnológica y, por tanto, la cantidad de material consumido en probetas que, tras el debido tiempo, pasan a convertirse en residuos, también va disminuyendo.
- Reciclaje de material curado:** Para todos aquellos residuos de material curado que no son susceptibles de desaparecer en origen, la única opción que se presenta es la aplicación de tecnologías de reciclaje, físico o químico, de tales componentes o residuos, y que están encaminados a obtener los componentes del material, refuerzo (fibra) y matriz (resina), por separado, a costa de cierta caída en sus propiedades con el fin de poder ser empleados en procesos o industrias con requerimientos menos exigentes.



Así, tras esta revisión de las distintas iniciativas ya implementadas en procesos productivos o aún en fase de desarrollo, se pone de manifiesto la necesidad de seguir trabajando en soluciones sostenibles para los residuos de fabricación generados en todos aquellos sectores empleando materiales compuestos.



Capítulo 13: GESTIÓN DEL RESIDUO Y TECNOLOGÍAS DE REUSO DE MATERIALES COMPUESTOS NO POLIMERIZADOS

Nuria Fanegas Martín¹, Álvaro Calero Casanova¹

¹ Fundación para la Investigación, Desarrollo y Aplicación de Materiales Compuestos (FIDAMC)

Abstract

This chapter addresses two relevant challenges to enforce in a manufacturing plant where carbon fiber prepreg is used as raw material for the manufacture of aeronautical parts. The first challenge is the segregation of fresh production waste, where the resin is fresh and has a big potential for being used as material for other applications. This chapter described a proposal for the collection of this highly valuable material in a pilot plant where aircraft stabilizers are manufactured. This second challenge addresses solutions for the reprocessing of waste material discarded during the manufacturing of carbon parts. Hereafter is described the preparation of new materials or by-products, which can be reincorporated into the production system of other composite material parts.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords:

Waste management
Reuse
recycling
carbon fiber reinforced polymer (CFRP)
Sustainability
Gestión del residuo
Reuso
Reciclado
Materiales compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP)
Sostenibilidad

1 - INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono o (*Carbon-fiber reinforced polymer*, CFRP) empleados en la industria aeronáutica muestran propiedades únicas en la que se combinan alta rigidez específica y una excelente relación resistencia-peso. No obstante, un 30 - 40 % de los laminados de fibra de carbono se desperdician durante la fabricación de las piezas. Reutilizar este material de alto valor añadido para la fabricación de nuevos componentes, incluso con aplicación aeronáutica, es una actividad de gran interés en la que se están invirtiendo tiempo y esfuerzos para dar valor a algo que hoy en día se descarta generando residuos [1,2].

La demanda mundial de CFRP ha aumentado un 12% desde 2010 [3]. Este aumento de su empleo en la industria conlleva un aumento en la generación de residuos. Además, se espera que la demanda mundial de este material supere la oferta mundial [4,5]. Durante la fabricación de piezas con material compuesto se generan principalmente dos tipos de residuos. Los residuos de material no polimerizado, también llamado material fresco, donde la resina tiene capacidad para reaccionar y dar lugar a un producto curado con buenas propiedades, y los residuos curados. Las principales fuentes de residuos frescos que se generan durante la fabricación de las piezas de CFRP son entre otros, el material sobrante cuando se cortan los laminados a su forma final, los finales de bobina, materiales caducados y, en menor medida, los generados durante las pruebas para la puesta a punto del proceso o fallos en producción. El resto de material que se desperdicia es material curado, ya sea por falta de calidad en la pieza o piezas al final de vida de servicio.

Dentro de la gestión ambiental, las regulaciones de fin de vida (*End of Life*, EoL) impulsan la búsqueda de alternativas al vertido de este tipo de materiales. El empleo de materiales compuestos podría sufrir restricciones en un futuro a menos que se establezca una ruta de reciclaje eficiente. El reciclaje del material CFRP contribuirá a la sostenibilidad y al desarrollo sostenible de los procesos industriales. Sin embargo, la naturaleza heterogénea intrínseca de este material conduce a un material reciclado con propiedades inferiores o pobres. La búsqueda de nuevas rutas para reciclar o reutilizar este material supone un beneficio para los consumidores industriales.

La fabricación de componentes aeronáuticos genera una cantidad sustancial de residuos de CFRP. La relación entre el

material que se compra y el material que finalmente vuela (*Buy to Fly*, BtF) es aproximadamente de 4:1, dependiendo de la operación y de la pieza que se vaya a fabricar. Este 40% del material se pierde en procesos como cortes, contornos, errores... de ellos, alrededor del 60-70% de ellos son preimpregnados sin curar, lo que supone un coste importante para su eliminación al considerarse residuos especiales, con penalizaciones económicas.

La política de tratamiento de residuos en la Unión Europea tiene como objetivo limitar los impactos de los residuos en el medio ambiente y crear eficiencia de recursos mediante la promoción del uso de residuos como nuevo recurso.

Este capítulo recoge un breve resumen de diversas metodologías para reutilizar el desecho fresco de CFRP de producción en una planta de fabricación de componentes aeronáuticos, con el objetivo de asegurar la recuperación del material y de su valor añadido con el mínimo impacto a la actividad principal de la planta. Encontrar una solución para reutilizar el residuo de CFRP inherente a los procesos de fabricación aeronáutica es un ámbito relevante en el que vale la pena invertir esfuerzos.

Hay que señalar que debido a la naturaleza de este tipo de material su reutilización es compleja. Las propiedades resultantes tras el proceso de reciclado o reutilización conllevan una reducción de las propiedades finales del material de entre un 40-60% en el mejor de los casos.

Este capítulo se centra en la recuperación y reutilización del material preimpregnado de matriz termoestable descartado durante la producción de piezas aeronáuticas.

Para la fabricación de estos componentes se emplean máquinas de encintado automático de cinta (*Automatic Tape Layup*, ATL) o encintado automático de mecha (*Automatic Fiber placement*, AFP) [6]. El proceso consiste en un conjunto de rodillos que laminan automáticamente un rollo de material preimpregnado de fibra de carbono - en la mayoría de los casos, matriz polimérica termoestable (epoxi) reforzada con fibra larga de carbono - en la orientación necesaria. Una vez que se completa todo el laminado, una cuchilla ultrasónica corta el panel a la forma o patronaje deseado, antes de los siguientes pasos de fabricación. Los recortes de laminado que quedan como desecho tras esta operación, es lo que en el ámbito de fabricación aeronáutica se conoce como **material residual multicapa no curado**, que se caracteriza por no tener una gran cantidad de transiciones de espesor, además de presentar una orientación predominante (normalmente 40-50% de fibras están orientadas a 0°). Los principales inconvenientes de estos recortes son su alta pegajosidad (la resina fresca que impregna la fibra de carbono proporciona adherencia al material para mejorar la unión entre capas durante el encintado) y su vida útil de almacenamiento limitada, al ser material preimpregnado fresco, y naturaleza multicapa y multidireccional de los laminados, con espesores variables desde 1 mm hasta 30 mm.

La Figura 1 muestra imágenes del proceso de encintado de un laminado de CFRP mediante ATL y fotos de varios tipos de residuos generados, estos consisten principalmente en laminados multicapa con diferentes orientaciones surgidas al cortar el contorno de pieza final, aunque también se pueden encontrar retales multicapa a 0°, o monocapa provenientes de cortes de patrones manuales.

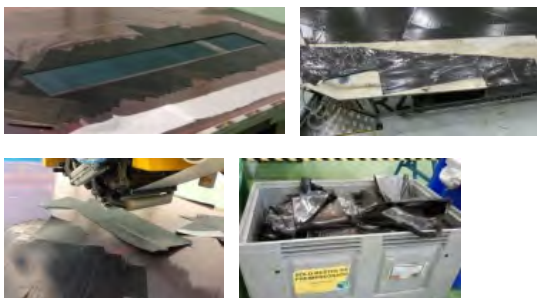


Figura 1: Imágenes de desechos de CFRP generados durante el laminado de piezas aeronáuticas.

Otro residuo no curado, o fresco, son los **finales de bobina** y las bobinas caducadas, que se dan en un porcentaje mucho menor, del orden de 3%, pero cuyo residuo tiene un gran potencial como comentaremos más adelante (Figura 2).



Figura 2: Finales de bobinas de material preimpregnado y rollos caducados tanto de AFP como de ATL.

2 - RECUPERACIÓN DEL MATERIAL DESCARTADO DURANTE PRODUCCIÓN PARA SU APROVECHAMIENTO

El primer desafío por abordar es encontrar un método de procesado del material de desecho de producción para convertirlo en un subproducto y de ese modo darle una segunda vida. La principal dificultad es cómo recoger este material de manera se recupere con las mejores características posibles y transportarlo dentro de la planta impactando lo mínimo posible sobre la actividad de la esta. Esto requiere implementar un cambio en la recolección de material de desecho dentro de la planta. En lugar de descartar en un contenedor el material arrugado y apilado junto con materiales auxiliares mezclados, se debe recurrir a una solución alternativa para recuperar el material con el máximo de su potencial.

En esta primera parte de este capítulo, se plantea una propuesta de gestión del residuo dentro de una planta piloto, centrando la actividad en la recuperación del residuo de los larguerillos de estabilizadores [7].

La solución consiste en preparar el material de desecho en un formato fácil de transportar e identificar. Enrollar el residuo preimpregnado en bobinas, especialmente aquel residuo estrecho y largo como el generado durante la fabricación de larguerillos. Cada bobina de residuo se identificada con una etiqueta digital que contiene información relevante acerca del material, como el nombre del material, la secuencia del laminado, el rango de espesores de ese laminado (esta información será la del laminado completo antes del corte de contorno), la fecha de salida del frigorífico (la más restrictiva de todas las piezas de las que se ha recuperado) o la vida útil del material.

Dependiendo de la geometría, longitud y número de piezas de material descartado la preparación de estas bobinas supondría la necesidad de disponer de técnicos de taller adicionales disponibles al final del proceso de laminación de los larguerillos.

La estación de recogida debe colocarse junto a la estación de laminación o de la estación de corte de paneles. El paso de recolección puede ser manual o podría automatizarse dependiendo de las ratios de fabricación y las capacidades de la planta.

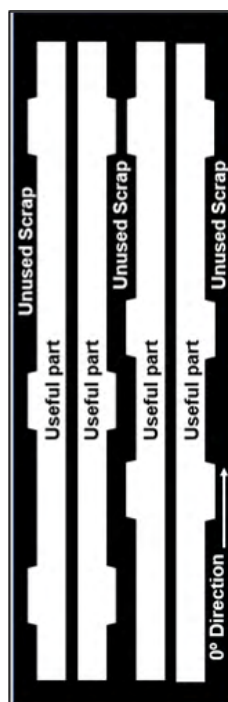


Figura 3: Las imágenes muestran el desecho que se genera al cortar los larguerillos de un estabilizador

En la Figura 3 se muestran los contornos de un posible laminado de larguerillos, las formas blancas - imagen izquierda - muestran la parte útil del larguerillo, mientras que los contornos negros muestran el deshecho de material sin curar. La foto de la derecha es un ejemplo de residuo de los larguerillos. Este material se puede reciclar y convertir en un subproducto con bastante viabilidad. Cómo recogerlo y la logística dentro de la planta son algunas de las cuestiones a abordar.

Es necesario evaluar detalladamente diferentes factores como la presencia de fibra de vidrio o película separadora en la superficie de los laminados residuales o las dimensiones del residuo (ver Figura 4).



Figura 4: Residuos típicos contaminados con material auxiliar

Los restos de preimpregnado de producción son principalmente laminados multicapa multidireccionales con diferentes áreas de espesor. En el caso que nos ocupa, el material está libre de materiales auxiliares, una solución eficiente para su correcta recuperación y almacenaje es la preparación de bobinas debido a que los residuos de los larguerillos, como se ha comentado, son especialmente estrechos (varios mm) y largos (varios m). Las bobinas se embolsarían para evitar que se peguen o se contaminen y se podrían almacenar dentro de la sala acondicionada - sala limpia - donde se genera el residuo. Una solución sería depositar cada bobina generada en una estantería situada cerca del punto de generación. Al final del turno, o cuando la estantería estuviera llena, proteger e identificar las bobinas y almacenar en un frigorífico a -18°C para asegurar que no sobrepase la vida útil del preimpregnado. El frigorífico deberá disponer de una zona especial reservada para almacenar este material, al menos durante el período acordado con la empresa responsable de los siguientes pasos [7].

La implementación de métodos para la recuperación de los desechos de fabricación puede requerir una inversión de capital inicial. Sin embargo, los ahorros de costes y los beneficios ambientales a largo plazo generalmente superan estos costes. Además, el material recuperado debe cumplir estándares de calidad específicos para poder reutilizarse en aplicaciones de alto rendimiento. Garantizar el manejo y almacenamiento adecuados de este material es esencial para mantener su calidad.

3 - TECNOLOGÍA DE REUSO PARA MATERIALES NO POLIMERIZADOS

Otro de los principales desafíos a los que nos enfrentamos a la hora de dar valor a este residuo fresco es definir cómo reprocesar este tipo de material, ya que presenta varios inconvenientes que dificultan su tratamiento. Es necesario procesar el material hasta conseguir un nuevo formato homogéneo que sea adecuado para la fabricación, de esta forma se deben homogeneizar las variaciones de espesor y forma del material, intentando aprovechar las orientaciones de las fibras.

A continuación, se muestra una solución desarrollada dentro de un proyecto con financiación europea [8]. La propuesta aquí descrita consiste en cortar el material de desecho en tiras del mismo ancho y posteriormente calandrar las tiras entre unos rodillos calefactados hasta reducir y homogeneizar su espesor a un valor constante en todas las tiras.

El punto de partida para evaluar el sistema de calandrado como método para reducir el espesor inicial y lograr la homogeneización del material final fue la adquisición de un pequeño equipo representativo de la tecnología. La máquina seleccionada se compone de dos rodillos y una palanca manual que genera el movimiento. También se puede ajustar la distancia entre los rodillos. Como la máquina es una adquisición para hacer un estudio de prueba de concepto, el ancho de los rodillos es limitado, lo que no permite alimentar grandes trozos de material. Con esta máquina se estudió la viabilidad del proceso y se evaluó el rendimiento del método para establecer los parámetros de máquina necesarios para una posible puesta a punto en producción.

El proceso se enfocó en el reciclaje del material de multicapa de desecho de paneles fabricados por ATL durante la fabricación de componentes aeronáuticos. Este material obviamente tendrá propiedades inferiores a las originales,

pero el objetivo es aumentarlas al máximo, con la intención de utilizarlo para aplicaciones de bajo/medio rendimiento.

La Figura 5 muestra cómo, partiendo de tiras de los restos de laminados, se puede procesar el material mediante un proceso de calandrado para dar lugar a un material homogéneo. Este nuevo material se emplea para la fabricación de paneles que se ensayan para evaluar las propiedades, y con ello, el potencial de este material.

El resultado obtenido durante este proceso demostró la viabilidad de esta solución para la reutilización del material de desecho. Por ello, se invirtió en la compra de una máquina automatizada con rodillos de mayor dimensión y además calefactados, de modo que se pudiese desarrollar un proceso más robusto y con mayor potencial.

Con la máquina automática las dimensiones de las tiras de material reciclado pueden llegar a anchos de mayor tamaño, obteniendo un mayor rendimiento durante el procesado. Se optimizan los parámetros tanto de máquina como del material de partida para minimizar la pérdida de resina durante el calandrado, combinando velocidad y temperatura del rodillo. Finalmente, las tiras se calandran en etapas secuenciales reduciendo la distancia entre cilindros paso a paso ayudando a lograr una buena homogeneidad del material.

Hay varios parámetros clave para encontrar las condiciones de calandrado más adecuadas. Durante las primeras pruebas, la resina se pegaba a los rodillos y la fibra se distorsionaba a la salida de los mismos. La combinación de temperatura, velocidad de los rodillos y distancia entre ellos fue la clave para establecer los parámetros de proceso adecuados.



Figura 5: Fotos de las diferentes etapas que sufre el material en el procesado para su reutilización

Las imágenes de la Figura 6 muestran fotos de las tiras calandradas con el nuevo equipo desarrollado para tener un proceso más robusto. Una vez calandradas las tiras, se pueden emplear como material "normal", para la fabricación de nuevas piezas mediante moldeo por compresión en un proceso de prensado con placas calientes. Se han fabricado una serie de paneles para la caracterización de propiedades mecánicas del material, y así realizar una comparativa con las propiedades del material original.

Complementariamente a esta solución se pueden encontrar otro tipo de soluciones para dar salida a este material. Todas confluyen en un objetivo común, dar homogeneidad al material, y con ello poder darle una aplicación final.



Figura 6: Fotos de las tiras de material reciclado procesadas mediante calandrado

Otra solución para la reutilización del material descartado durante producción consiste en trocear el material mediante cortes, de manera que se genere un material troceado homogéneo con trozos de material de dimensiones homogéneas. El material se puede trocear mediante un proceso más o menos industrializado. Se han invertido esfuerzos para estudiar las propiedades mecánicas y fisicoquímicas resultantes en paneles fabricados con material troceado de este modo mediante proceso de moldeo por compresión o "Bulk Molding Compound" (BMC). La siguiente Figura muestra fotos del material multicapa fresco troceado a dos dimensiones distintas, 10x10 y 20x20 mm. También se muestran imágenes de los paneles a partir de los cuales se caracterizan las propiedades de los materiales en función del tamaño de corte.

Las propiedades mecánicas obtenidas dependen del tamaño de corte de los trozos de material, siendo la resistencia a tracción especialmente sensible a cambios en la dimensión de estos. No obstante, las propiedades mecánicas obtenidas en este tipo de material son reducidas en contraste con el material virgen de partida. Una estrategia para mejorar estas propiedades y, con ello abarcar un mayor abanico de aplicaciones, consiste en añadir capas de material virgen con fibra continua en la fabricación de las piezas. Con ello se logra aumentar las propiedades mecánicas hasta el doble de su valor.

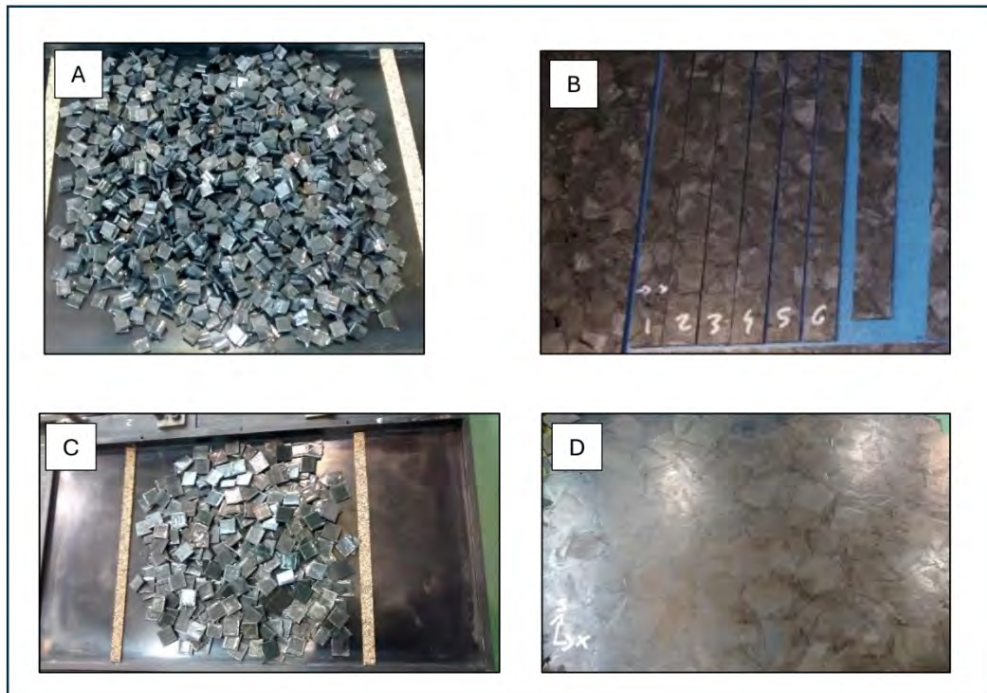


Figura 7: A) Fotos de material reciclado troceado a 10x10 mm y B) panel resultante; C) Fotos material reciclado troceado a 20x20 mm y D) panel resultante

El fabricante de material Hexcel produce una gama de productos análogos a este, pero a partir de material virgen. Estos productos están disponibles en el mercado, HexMC® y HexTool® [9, 10]. Estos materiales se emplean o bien para aplicaciones con formas tridimensionales complejas o que requieran co-curado con elementos como injertos de metal. En el caso del HexTool, este material es idóneo para la fabricación de moldes o útiles de fabricación debido a su buena estabilidad dimensional y su capacidad de retener vacío antes y después del mecanizado. Además, son fáciles de mecanizar para obtener la superficie deseada.

Las propiedades de estos materiales en términos de resistencia a la tracción rondan los 175-300MPa y módulos de 38-43 GPa, cercanos a aquellos de aleaciones de aluminio que están en 310MPa y 69GPa. Tomando estos valores como referencia para la comparativa de propiedades, el material reciclado mediante esta metodología puede llegar a tener valores similares a estos de referencia e incluso superiores en términos de resistencia a impacto. Esto indica que este tipo de material se podría emplear en aplicaciones reemplazando a piezas de aluminio o de HexTool o HexMC.

La Figura 8 muestra una serie de demostradores fabricados a partir de este material reciclado a partir de material multicapa de desecho. Entre otros la tapa de un agujero para hombre (*manhole*), una plantilla de taladrado o una pieza con curvatura.

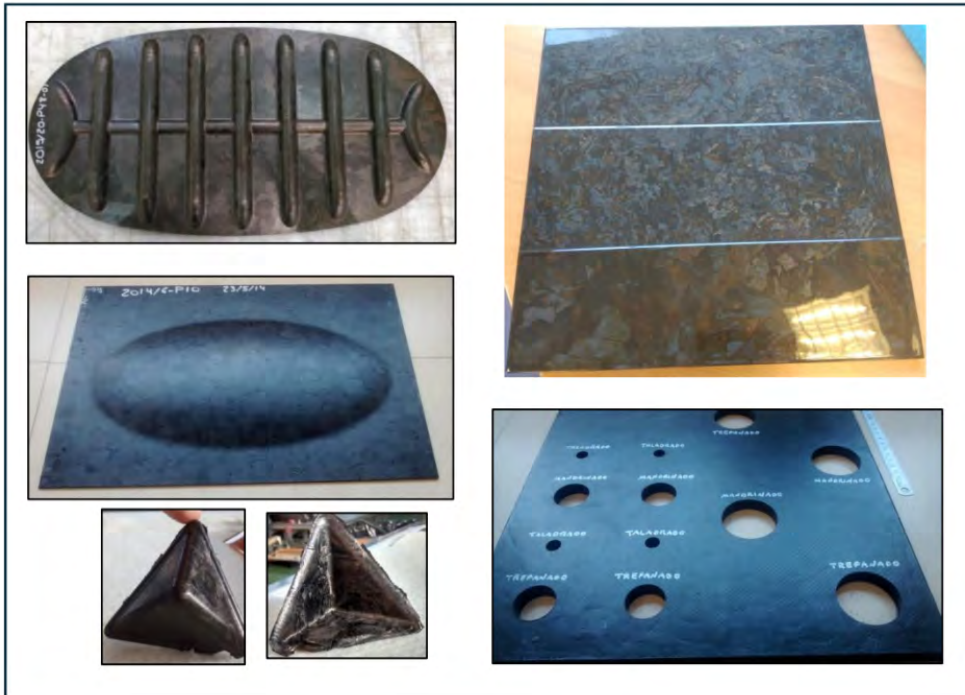


Figura 8: Fotos de dos piezas fabricadas con material reciclado troceado para hacer BMC

Otra fuente de residuos son los finales de bobina o las bobinas caducadas, que siendo no aptos para la fabricación de piezas para las que se han diseñado, siguen teniendo excelentes propiedades para emplearse en aplicaciones menos exigentes. Si nos centramos en el material de final de bobina la solución para su reutilización es la más atractiva, se puede cortar fácilmente el material monocapa con una mayor longitud de fibra, mejorando sustancialmente las propiedades mecánicas finales incluso por encima de las propiedades del HexTool o HexMC.



Figura 9: Material reciclado a partir de finales de boninas

Una alternativa de reciclado para estos materiales consiste en procesar el material preimpregnado en una trituradora o en una extrusora para homogeneizar el material y poder emplearlo como material para fabricación de piezas por moldeo por compresión (BMC). Algunos investigadores valoran la adición de resina adicional a este material en función del tiempo que ha estado el material fuera de nevera [11,12]. Cuanto menos envejecida esté la resina mejor comportamiento tendrá el material, mientras que en materiales con altos tiempos de exposición se necesitará la adición de resina para mejorar su procesabilidad.



Figura 10: Fotos de dos piezas fabricadas con material reciclado troceado para hacer BMC

Otros investigadores se han decantado por el uso de máquinas con criogenia para fragilizar el material antes de su procesado, este también mediante trituración. Al someter a la resina fresca a bajas temperaturas, el comportamiento del material es más amigable, y se consigue mejorar su tratamiento a costa de encarecer el procesado del material, lo que puede repercutir en el precio del material final. Esta solución está destinada a el procesado de grandes cantidades de material tanto de bajos como de altos espesores. El principal inconveniente es la heterogeneidad del tamaño de los trozos de material resultante y el alto riesgo de absorción de humedad por parte del material procesado [13].

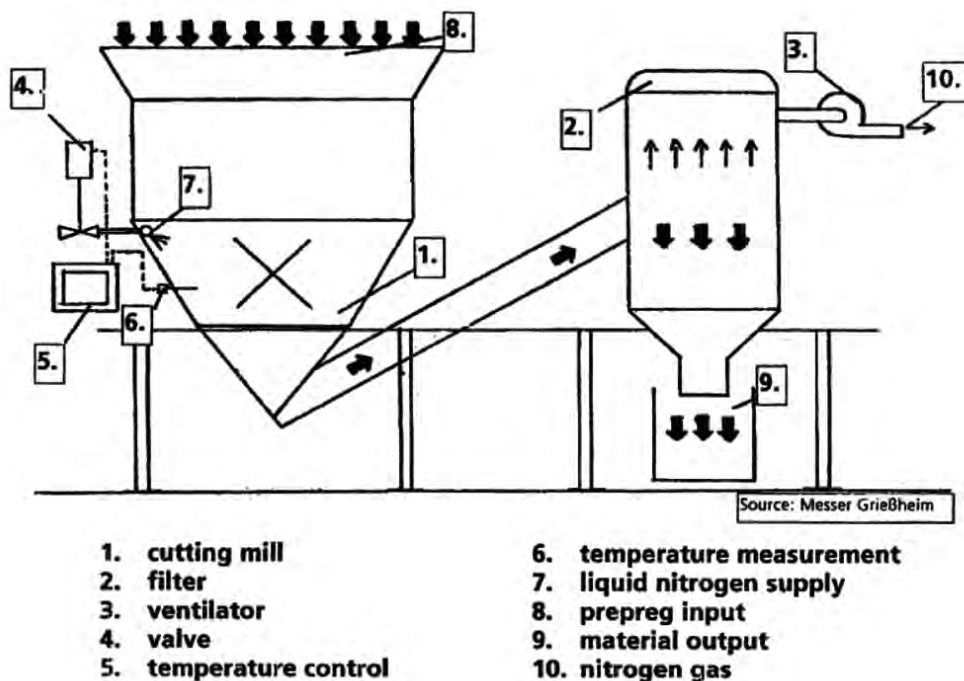


Figura 11: Molino de corte refrigerado para triturar residuos de corte de preimpregnados a bajas temperaturas [13]

El corte del material mediante chorro de agua a muy alta presión sería otra alternativa para la reutilización del material preimpregnado. Esta tecnología es muy limpia, con una alta calidad en el corte y un resultado muy homogéneo de tamaños. No obstante, en esta solución nos enfrentamos a posibles problemas de delaminación del material, el riesgo de absorción de agua y el bajo grado de madurez de la tecnología.

Por último, cualquier solución empleada en el reciclado de material curado es aplicable al material fresco. Una opción es el reciclado térmico, por ejemplo, mediante incineración o mediante pirólisis del material para la recuperación de energía o bien de fibra y combustible, lo que es perfectamente válido. O realizando el reciclado químico para la eliminación de la matriz para la recuperación de la fibra. No obstante, esta fibra se deberá tratar previamente para mejorar su adhesión a las posibles matrices, o emplear con relleno en otro material compuesto [14].

4 - CONCLUSIÓN

La recuperación y reutilización eficiente de los desechos de fibra de carbono a partir de recortes de producción es



esencial para impulsar la sostenibilidad en la fabricación de piezas con fibra de carbono. A medida que las industrias aumentan la demanda de este material de altas prestaciones, la gestión responsable de los desechos de fibra de carbono se vuelve cada vez más crítica. Al adoptar métodos de recogida apropiados y desarrollar tecnologías de reciclaje, la industria contribuye a desarrollar un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, al tiempo que se benefician económicamente de la conservación de recursos y la reducción de costes.

En este capítulo se describe una propuesta de segregación adecuada para reutilizar el residuo de CFRP fresco generados durante la fabricación de componentes aeronáuticos. Además, se incluyen diversas soluciones para el tratamiento de residuos de CFRP frescos con objeto de recuperar un nuevo material que tenga una nueva aplicación dentro de la industria. En particular se describe un proceso basado en el calandrado que busca el reciclaje del material de desecho de producción de componentes aeronáuticos. Este material tendrá propiedades inferiores al original, pero el objetivo es aumentarlas al máximo, con la intención de utilizarlo para aplicaciones de bajo/medio rendimiento.

También se recogen otras posibles soluciones alternativas al calandrado, como es el reciclado mecánico, ya sea mediante el corte, la trituración o incluso soluciones más innovadoras como el empleo de criogenia durante la trituración del material fresco. Por último, mencionar que las soluciones presentes en el reciclaje de piezas curadas son extensivas al material fresco, ya que se basan en la eliminación de la matriz con independencia del estado de esta, fresca o curada.

6 - BIBLIOGRAFÍA

[1] A. Lefeuvre, S. Garnier, L. Jacquemin, B. Pillain, G. Sonnemann, Anticipating in- use stocks of carbon fiber reinforced polymers and related waste flows generated by the commercial aeronautical sector until 2050, *Resour. Conserv. Recycl.* 125 (2017) 264–272, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.023>. [2] Yongxiang Yanga, Rob Booma, Brijan Irionb, Derk-Jan van Heerdenb, Pieter Kuiperc, Hans de Wita, Elaboration and Characterization of a Hybrid Composite Material with Two Particles of the Same Size: Coco Shells and Palm Shells, *Chemical Engineering and Processing* 51 (2012) 53– 68

[3] Composites Market Report 2017: Market Developments, Trends, Outlook and Challenges | PDF | Composite Material | Fibre Reinforced Plastic. Scribd, n.d. [[https https](https://www.scribd.com/document/551679099/composites-market-report-2017)] ://www.scribd.com/document/551679099/composites-market-report-2017 (accessed 22 July 2023)

[4] J. Zhang, V.S. Chevali, H. Wang, C.-H. Wang, Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling, *Compos. Part B Eng.* 193 (2020), 108053, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108053>.

[5] The outlook for carbon fiber supply and demand, *CompositesWorld* n.d. [[https https](https://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-carbon-fiber-supply-and-demand)] ://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-carbon-fiber-supply-and-demand (accessed 23 July 2023). [6] G. P. A. Crosky, "Sciencedirect," [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/automated-tape-laying#:~:text=Automated%20tape%20laying-,Auto>

ated%20tape%20laying%20(ATL)%20is%20one%20of%20the%20most%20well,of%20the%20part%20being%20manufactured) [7] FASTER-H2_W_D6.2.4.3-2_FIDAMC_Issue1_ Segregation of scrap – pilot case. Clean Aviation GA 101101978 – FASTER – H2 [8] Deliverable D3.2 Recycling process for uncured materials, MC4 Multi-level Circular Process Chain for Carbon and Glass Fibre Composites (MC4 101057394). [9] <https://www.hexcel.com/Products/HexMC-Materials-for-Industries> [10] <https://www.hexcel.com/Products/Tooling/HexTool-Tooling-Material>

[11] Recycling of carbon fibers, Tassilo Witte, CTC GmbH Stade. Composites Days 2016.

[12] Deliverable D3.2 Recycling process for uncured materials, MC4 Multi-level Circular Process Chain for Carbon and Glass Fibre Composites (MC4 101057394).

[13] K. Pannkoke, M. Oether, J. Busse, *Cryogenics* 1998 Vol 38, number 1 pag 155. PII: S0011-2275 (97)00127-6.

[14] Yongxiang Yang, Rob Boom, Brijan Irion, Derk-Jan van Heerden, Pieter Kuiper, Hans de Wit *Chemical Engineering and Processing* 51 (2012) 53– 68

Capítulo 14: REUTILIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS POLIMERIZADOS

José-María Fernández de la Puente Calvo¹, Jui Jhala¹, Romain Planche¹

¹ Fairmat

Abstract

Spain, holding a prominent position in Europe's composites industry and notably in aviation composites, faces significant waste management challenges within its 500-strong composite company sector. As it shifts towards the Circular Economy to enhance competitiveness and resource efficiency, Spain adheres to the EU's waste hierarchy, emphasizing the critical need for waste minimization and the reuse of materials. This transition is particularly vital given the environmental impact of disposing of polymer-matrix composites, especially cured composites, with Europe generating roughly 400,000 tonnes of thermoset composite waste annually, a substantial portion of which is from Spain.

This study delves into the reuse and repurposing of polymer composites, promoting their integration within the Circular Economy to preserve material integrity and value. It showcases innovative repurposing projects in Spain and across Europe, such as transforming wind turbine blades into materials for construction, which demonstrates the feasibility of extending these materials' lifecycles. These efforts align with sustainability goals aimed at waste reduction and resource conservation. However, challenges persist, including matching waste volume and condition with market demands and scaling these practices effectively. The concept of structural re-use, turning cured composite waste into high-value, reusable products, highlights the potential of merging reuse and recycling strategies. Innovative approaches to reuse not only mitigate sustainability challenges but also foster economically viable solutions, marking a significant stride towards sustainable and efficient resource utilization in the composites sector.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords:

Reuse
Repurpose
Minimum processing
Efficient waste reduction
Reuso
Reutilización of open data
Procesado mínimo
Reducción residuos eficiente

1 - INTRODUCCIÓN

En el contexto del mercado europeo, la industria española de composites destaca como un actor clave, ocupando una notable 5ª posición global y situándose en 3ª posición en el sector de materiales compuestos para aviación, tras Alemania y Francia. Esta industria alberga aproximadamente 500 empresas, que producen materiales compuestos principalmente para el transporte y la construcción [1]. Sin embargo, a pesar de su consolidada presencia, España se enfrenta a importantes retos en la gestión de los residuos de materiales compuestos, una cuestión crítica que persiste a la par que sus logros industriales.

La jerarquía de gestión de residuos descrita en la Directiva 2008/98/CE de la Unión Europea, representada en la *figura 1*, da prioridad a las estrategias de gestión de residuos más eficaces, empezando por la minimización o prevención de residuos. Le siguen la reutilización o reaprovechamiento, el reciclado, la recuperación y, por último, la eliminación (como el vertido), que es la opción menos recomendada [2].



Figura 1: Jerarquía en la gestión de residuos [2]

En respuesta a este reto, España inició un nuevo paradigma de fabricación que aboga por una transición hacia una economía circular, apoyando así la competitividad, la productividad y la eficiencia de los recursos de España. La estrategia España Circular 2030 hace hincapié en el uso eficiente de los recursos, con el objetivo de reducir los residuos y aumentar la reutilización de materiales [3].

Este capítulo explora el concepto de reutilización y las innovaciones asociadas para los composites poliméricos curados.

2 - RESIDUOS DE MATERIALES COMPUESTOS POLIMERIZADOS (O CURADOS)

En el panorama comercial, los compuestos de matriz polimérica utilizan principalmente **fibras sintéticas** como el carbono, la fibra de vidrio y la aramida, y se conocen colectivamente como polímeros reforzados con fibras (*Fiber Reinforced Polymer, FRP*). Al mismo tiempo, crece el interés por las fibras naturales y seminaturales como alternativas sostenibles. En los *FRP*, la **matriz polimérica** puede ser termoplástica o termoestable, caracterizándose esta última por su polimerización irreversible, curado, debido a su alta reticulación durante la reacción. El **curado** transforma la matriz polimérica en un estado sólido y endurecido, proporcionando al material sus propiedades mecánicas definitivas y estabilidad final. Los compuestos termoestables se utilizan con más frecuencia **que los termoplásticos** [4] y, cuando se desechan, suponen un peligro para el medio ambiente, ya que pueden contaminar el suelo, el aire y las aguas subterráneas. EUCIA informa de que **los residuos de compuestos termoestables alcanzan aproximadamente las 400.000 toneladas anuales**, de las que entre el 40% y el 70% se depositan en vertederos o se incineran sin recuperación de energía [5]. En particular, Portugal y España contribuyen conjuntamente con 158.000 toneladas de residuos de polímeros reforzados con vidrio al año [6]. Los **residuos de composites curados** pueden incluir la **producción** (de las actividades de corte y recorteado en las que se fabrican los productos de composite [7]) y los **residuos al final de la vida útil** (*End of Life, EOL*) postconsumo (componentes de aeronaves, piezas de automóviles, palas de aerogeneradores, etc.). La gestión de los residuos al final de su vida útil es especialmente problemática debido a que se desconoce la edad del material, su historial y los posibles daños o contaminación.

3 - RECICLAJE FRENTE A REUTILIZACIÓN DE COMPOSITES POLIMERIZADOS (O CURADOS)

Para **resumir** brevemente lo analizado en capítulos anteriores, el aumento del uso de compuestos poliméricos y de los residuos asociados ha llevado a identificar **tres rutas clave de reciclaje**: mecánica, térmica y química, siendo las dos últimas las destinadas principalmente a la recuperación de fibras. El **reciclado mecánico** (analizado en detalle en el capítulo 12) consiste en descomponer los residuos de materiales compuestos en materiales reciclados de pequeño tamaño mediante procesos mecánicos (trituración, molienda, etc.). El **reciclado térmico** emplea una gama de altas

temperaturas para descomponer la resina y su posterior separación de las fibras (en los capítulos 7 y 8) se presenta información detallada sobre las tecnologías en cuestión y la revalorización de los productos reciclados resultantes). La adopción del método de **reciclado químico**, o solvólisis, se sitúa en el 24% [8], y se caracteriza por la despolimerización o eliminación de la matriz, lo que libera las fibras para su procesamiento adicional (como se explica en el capítulo 9). España ostenta la distinción de ser el **primer estado miembro** de la Unión Europea en **incorporar el reciclado químico** a su marco legislativo [9].

Aunque estas rutas de reciclaje desempeñan un papel crucial en la prevención de la pérdida de material, no es el enfoque más favorecido en el marco de la economía circular. Esto se debe a que el reciclado a menudo conduce a la pérdida de las propiedades mecánicas de alta calidad conseguidas inicialmente mediante una meticulosa selección de materiales, procesos de fabricación combinados e intrincados esfuerzos de diseño. En esencia, **el valor añadido a través de estas sofisticadas etapas de desarrollo no se retiene completamente en el proceso de reciclaje**. Además, la estrategia española de economía circular (España Circular 2030) promueve un modelo en el que el valor de los productos, materiales y recursos se mantiene dentro de la economía durante el mayor tiempo posible, con un mínimo de residuos y **reutilizando en la medida de lo posible los residuos que no se pueden evitar** [10].

La reutilización ofrece una alternativa pragmática a los métodos de reciclaje convencionales, centrándose en preservar la integridad estructural inherente de los compuestos poliméricos. Implica la aplicación directa de composites polimerizados (o curados) obsoletos, en nuevos contextos, preservando tanto su integridad material como su valor intrínseco. Este enfoque sostenible amplía el ciclo de vida del material con un reprocesamiento mínimo y reduce la demanda de extracción y consumo de recursos adicionales.

4 - REUTILIZACIÓN Y REAPROVECHAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS POLIMERIZADOS (O CURADOS)

La reutilización, por definición, es el uso de un material que no ha sufrido ninguna transformación térmica, mecánica o química para los mismos fines o para otros (también llamado reaprovechamiento) distintos de aquellos para los que fue diseñado originalmente [11]. En algunas investigaciones, el término “reutilización” también implica la práctica de reutilizar materiales con un reprocesamiento mínimo.

En España, la mayoría de los aerogeneradores son propiedad y están gestionados por Iberdrola, Acciona Energía, EDP Renováveis y Enel Green Power [12], y la vida útil típica de un parque eólico en el país es de más de 20 años [13]. Se prevé que en Europa, para 2025, se desmantelen unas 36.000 palas, lo que corresponde a 240.000 toneladas de residuos de compuestos poliméricos [14]. **La reutilización de las palas de los aerogeneradores**, que constituyen aproximadamente la mitad de la masa total de la turbina y cuyo diseño se basa en el uso de fibras de carbono o de vidrio, matriz de polímeros termoestables, núcleo, revestimientos y metales, **se ha estudiado ampliamente**.

Numerosos estudios presentan conceptos en aplicaciones únicas, como viviendas, puentes y postes de líneas de transmisión eléctrica, que ilustran la viabilidad de la reutilización. Sin embargo, también reconocen la necesidad de un mayor desarrollo en este campo. El proyecto *Re-Wind* ofrece un gran potencial para la reutilización de las palas de aerogeneradores en desuso en el **sector de la construcción** (viviendas, edificios, infraestructuras, paisajes y arte público). Su investigación también se centró en casos de estudio para reutilizar las palas de aerogeneradores como elementos estructurales de carga en nuevas estructuras, como barreras acústicas, puentes, diques y refugios (véanse las *figuras 2a y 2b*) [15]. Un estudio conceptual de los Institutos de Investigación *RISE* de Suecia (*Research Institutes of Sweden*) explora la reutilización de palas de aerogeneradores como elementos en nuevos diseños de puentes ciclistas y peatonales. En general, los conceptos tenían la anchura recomendada para las vías compartidas para peatones y ciclistas, como se muestra en la *figura 2c*. Además, *Superuse Studios*, una empresa con sede en los Países Bajos, ha desarrollado con éxito varias estructuras mediante la reutilización creativa de palas de turbina [16].

Los materiales compuestos *EOL* también pueden utilizarse de forma creativa en instalaciones artísticas o en el diseño de mobiliario. Canvus, una empresa estadounidense, está convirtiendo palas de aerogenerador en productos de mobiliario de exterior creativos y funcionales, centrados en la comunidad [17]. Ventos Metódicos, una iniciativa innovadora de la región ibérica, explora la reutilización y reaprovechamiento de las palas de los aerogeneradores en mobiliario urbano y soluciones de iluminación (véase la *figura 2d*), lo que pone de relieve la creciente tendencia en Europa [18]. Sin embargo, la estrategia de reutilizar las palas para aplicaciones de reciclaje no está exenta de desafíos [19].

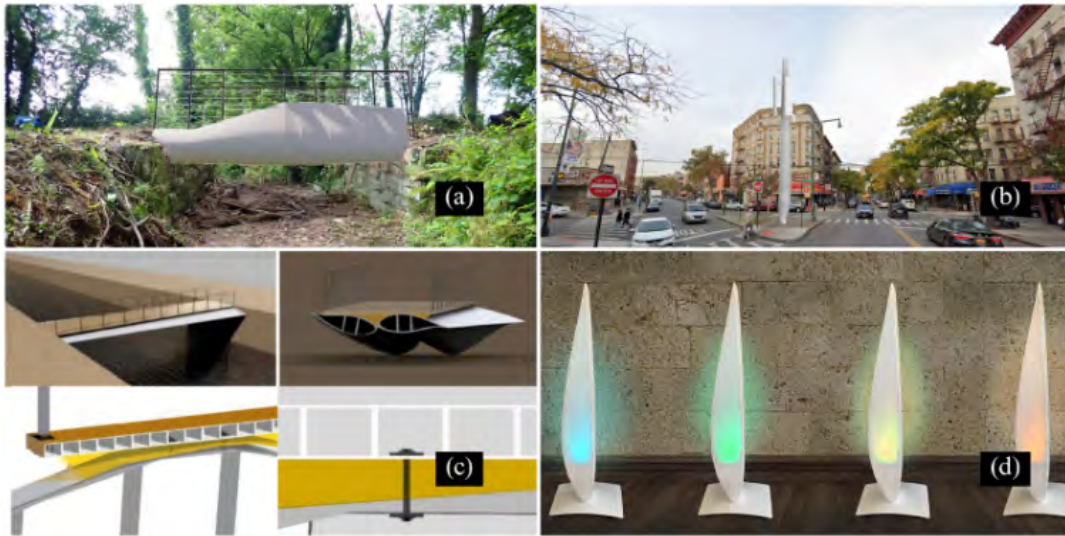


Figura 2: (a) Puentes de palas de aerogenerador – Re-wind Network; (b) Mástiles a partir de palas – Re-wind Network; (c) Detalles del diseño para un concepto de puente, RISE Research Institutes of Sweden (d) Lámparas multicolor de interior, Ventos Metódicos.

Un estudio sobre el reciclaje de embarcaciones de FRP sugiere que los cascos de los barcos oceánicos pueden reutilizarse “tal cual”, mientras que sus equipos y sistemas pueden actualizarse. La investigación destaca otras aplicaciones de reutilización, como museos flotantes, arrecifes artificiales, almacenes flotantes y cubos de basura (a partir de embarcaciones de remo [20]). Además, un artículo académico dedicado al reciclaje en la industria de la construcción afirma que los materiales compuestos, como cúpulas, chimeneas y torres de reloj, tienen un potencial significativo de reutilización o reaprovechamiento [21]. Un estudio realizado por la *National Composites Network (NCN)* indica que los materiales compuestos reutilizados ya han sustituido a los materiales tradicionales en la construcción de cabañas y casetas, así como a los palés en la industria del embalaje [22].

La reutilización de **residuos postindustriales de composites** mediante la incorporación de residuos de composites de fibra de vidrio en enfoscados se ha estudiado en el *Journal of Cleaner Production*. Los residuos procedentes del proceso de corte de piezas en la industria de materiales poliméricos se incorporaron a morteros como relleno, en sustitución del árido natural. Como resultado, la trabajabilidad y la resistencia a la flexión y a la compresión de los morteros mejoraron significativamente con la aplicación de los residuos de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio (*Glass Fibre Reinforced Polymer, GFRP*) [23].

En 2015, la Cátedra de Ingeniería de Polímeros (Universidad de Ciencias Aplicadas de Windesheim) desarrolló el principio de la reutilización estructural de productos *EOL* de composites termoestables. Se basa en mantener intacta la estructura del composite *EOL* y, por tanto, sus propiedades, pero mecanizándola en partes más pequeñas (tiras o escamas), que luego se utilizan como elementos de refuerzo para fabricar nuevos productos (como perfiles, vigas o placas). Este aspecto de la reutilización estructural es especialmente valioso en diversas aplicaciones, como se analiza en el estudio, incluida la fabricación de muros de contención, estructuras de guía para canales, esteras para grúas y cubiertas de puentes. La reutilización estructural no sólo amplía el valor de los materiales compuestos originales, sino que también se ajusta a las prácticas sostenibles al reducir los residuos y conservar los recursos [24].

Partiendo de este concepto, una ampliación innovadora y escalable de la reutilización estructural consiste en procesar mecánicamente los residuos de composites para convertirlos en compuestos estándar (o reciclados) cuyo uso no se limita a las aplicaciones de construcción e infraestructuras, sino que se extiende a diversas industrias. A diferencia de los procesos de recuperación (químicos y térmicos), cuyo objetivo principal es recuperar las fibras originales del material, o del reciclado mecánico tradicional que produce reciclados en polvo o reciclados fibrosos ricos en resinas o fibras de escaso valor, la reutilización con un procesamiento mecánico mínimo conserva y extiende sus beneficios a los productos de segunda generación.

5 - RETOS Y OPORTUNIDADES DE LA REUTILIZACIÓN Y REAPROVECHAMIENTO

La reutilización y reaprovechamiento de los composites curados, aunque prioritaria en la jerarquía de gestión de residuos frente al reciclaje, presenta varios retos al intentar equilibrar factores como el volumen de los residuos, su estado, la correspondiente demanda del mercado para los productos reutilizados y reaprovechados, la escalabilidad, etc. La reutilización de los desechos de preimpregnados no curados que se generan continuamente durante el



proceso de fabricación se considera más viable que la reutilización de los residuos de composites *EOL* curados, ya que el volumen de residuos curados es significativamente mayor y se caracteriza por una **vida útil** prolongada [25].

Además, el suministro constante y fiable de residuos *EOL* es incierto y plantea un **reto logístico**. En este capítulo se han descrito minuciosamente proyectos de reutilización tanto en estado conceptual como en activo, así como sus aplicaciones. Sin embargo, faltan investigaciones que validen la **demandas del mercado** de estas aplicaciones reutilizadas y reaprovechadas. También es necesario fundamentar la **escalabilidad** de las aplicaciones de reutilización, en particular en diversos sectores, para satisfacer esa demanda. Las prácticas actuales de reutilización parecen demasiado limitadas y no aprovechan plenamente el potencial de los materiales en ese contexto. La clave de esta expansión es la necesidad de encontrar métodos eficientes, sostenibles desde el punto de vista medioambiental y económicamente viables para desmontar y reprocesar los composites mínimamente y sin comprometer su valor inherente.

Una estrategia óptima para reutilizar materiales compuestos curados implica **combinar los principios de reutilización y reciclaje** y aprovechar sus ventajas combinadas. Una ilustración clave de esta estrategia se encuentra en el **concepto de reutilización estructural**, que reutiliza productos de composites *EOL* en refuerzos más pequeños, presentando una solución prometedora a numerosos retos asociados con la reutilización. Sin embargo, este enfoque requiere una aceptación más amplia y un mayor desarrollo para su viabilidad intersectorial. Con este fin, Fairmat, una empresa *DeepTech* europea, ha desarrollado un *spin-off* de la reutilización estructural, un método para transformar los residuos de composites de fibra de carbono curados en un producto de alto valor y bajo impacto conocido como *CFRP Chips*. Utilizando la reutilización como base de su solución tecnológica de reciclaje, Fairmat es capaz de transformar los *CFRP Chips* en laminados y productos que conservan un 70% de rendimiento mecánico en comparación con sus homólogos vírgenes. Estos productos tienen aplicaciones en diversos sectores, como el deporte y el ocio, la movilidad y la electrónica de consumo [26].

6 - BIBLIOGRAFÍA

[1] U.S. Commercial Service (CS), U.S. Department of Commerce. European Composites Resource Guide. (2022) 24

<https://www.trade.gov/european-composites-resource-guide>

[2] J. Qureshi. A Review of Recycling Methods for Fibre Reinforced Polymer Composites 14 (2022) 16855.

<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/24/16855>

[3] Interdisciplinary Researches in Economics and Administration Sciences: Concepts, Researches, and Applications (2022) 109-110

<https://books.google.co.in/books?id=tJunEAAAQBAJ&pg=PA109&lpg=PA109&dq=Currently+Spain,+recycles+37.1%25+of+waste+TgGHd51CGU4ChDoAXoECAIQAw#v=onepage&q=Currently%20Spain%2C%20recycles%2037.1%25%20of%20waste%20generated%2C&f=false>

[4] Y. Yang, R. Boom, B. Irion, Derk-Jan van Heerden, P. Kuiper, and Hans de Wit. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification 51 (2012) 53-68

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270111002029>

[5] EuCIA. EuCIA launches European Composites Waste & Recycling Survey - EuCIA. (2023)

<https://eucia.eu/eucia-launches-european-composites-waste-recycling-survey/>

[6] Catarina Brazão Farinha, Jorge de Brito, and R. Veiga, Journal of Cleaner Production 210 (2019) 1579-1594

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618334838>

[7] J. Rybicka, A. Tiwari, P. Alvarez, and J. Howarth. Journal of Cleaner Production 91 (2015) 251-261

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614013225>

[8] J. Rybicka, A. Tiwari, and G. A. Leeke. Journal of Cleaner Production 112 (2016) 1001-1012

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615012056>

[9] AIMPLAS. Chemical Recycling in Spain: Fostering a Circular Future (2022)



<https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/09/Informe-RQ-2021-ING-A4.pdf>

[10] España Circular 2030

https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/espana_circular_2030_executive_summary_en.pdf

[11] R. Bernatas, S. Dagreou, A. Despax-Ferreres, and A. Barasinski, *Cleaner Engineering and Technology* 5 (2021) 100272–100272

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821002329>

[12] L. Ziegler, E. Gonzalez, T. Rubert, U. Smolka, and J. J. Melero, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 82 (2018) 1261–1271

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313503>

[13] P. Leahy, *End-of-life Options for Composite Material Wind Turbine Blades: Recover, Repurpose or Reuse?* (2020) 37287

https://www.researchgate.net/publication/344456270_End-of-life_Options_for_Composite_Material_Wind_Turbine_Blades_Recover_Repurpose_or_Reuse

[14] A. André, M. Juntikka, C. Mattsson, and R. Haghani. 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (2022) 1183-1195

https://www.researchgate.net/publication/356585769_The_Re-use_of_End-of-Life_Fiber_Reinforced_Polymer_Composites_in_Construction

[15] The Re-Wind Network

<https://www.re-wind.info/>

[16] Superuse Studios

<https://www.superuse-studios.com/>

[17] Canvus

<https://www.gocanvus.com/>

[18] Ventos Metódicos

<https://www.ventosmetodicos.eu/>

[19] K. Korniejenko, B. Kozub, Agnieszka Bąk, Ponnambalam Balamurugan, Marimuthu Uthayakumar, and G. Furtos. *Journal of Composites Science* 5 (2021) 243–243

<https://www.mdpi.com/2504-477X/5/9/243>

[20] J. Somarajan, S. Kodungallur, and C.G. Nandakumar,. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)* 9, (2018) 244–252

https://www.researchgate.net/profile/Jayaram-Somarajan/publication/326128820_RECYCLING_OF_FRP_BOATS/links/5b3a42e84585150d23ef8e8a/RECYCLING-OF-FRP-BOATS.pdf

[21] A. Conroy, S. Halliwell, and T. Reynolds. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37 (2006) 1216–1222

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X05002125>

[22] National Composites Network Best Practice Guide End of Life Options for Composite Waste.

<https://compositesuk.co.uk/wp-content/uploads/2021/12/End-of-Life-Options.pdf>

[23] C. Farinha, J. Brito, and R. Veiga. *Journal of Cleaner Production* 210 (2019) 1579–1594

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618334838>



[24] A. Busschen. Industrial Re-Use of Composites (2022) 99452

<https://www.intechopen.com/chapters/77980>

[25] G. Nilakantan and S. Nutt. Reinforced Plastics 59 (2015) 44–51

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003436171400071X>

[26] B. Saada, A. Contant and U. Dubois. WIPO - WO2023118383 (A1) - 2023-06-29

https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=WO&NR=2023118383A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20230629&DB=&locale=fr_EP



Capítulo 15: REUTILIZACIÓN DE FIBRAS Y RESINAS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES. PROPUESTAS DE USO

Roberto Estal Vera¹

¹ Ziur Composites

Abstract

One of the main problems of composite recyclability, is to find applications with a positive business case and technically viable. In order to determine possibilities, it is necessary, first, to analyze mechanical properties of materials as well as today available manufacturing processes with this type of products.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords:

Composite
Polymers
Manufacturing processes
Composite applications
Recycling
Materiales compuestos
Polímeros
Procesos de fabricación
Aplicación composites
Reciclado

1 - CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS OBTENIDOS A PARTIR DE FIBRAS RECICLADAS Y MÉTODOS DE FABRICACIÓN APLICABLE

Los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono, han ido incrementando su presencia en el mercado e introduciéndose en nuevos sectores gracias a su excelente relación entre peso, rigidez y resistencia. Sobre todo, cuando el peso es el factor decisivo en la selección unido a la posibilidad de optimizar el diseño de las estructuras aprovechando la correlación entre la orientación de las fibras y sus propiedades.

Sin embargo, algunos de los beneficios se ven reducidos en el caso de la utilización de fibras recicladas debido a los siguientes motivos:

- Pérdida de propiedades de la fibra debido al proceso de recuperación.
- Pérdida del enzimaje que ayuda a su compatibilidad mejorando la adhesión con las matrices poliméricas.
- Formato de salida de la fibra reciclada, en cuanto a longitud, gramaje y orientación.

En este caso y aunque existen algunos avances en la recuperación de la fibra en el formato original [1] con los procesos actuales el formato final suele ser un “non-woven” o no tejidos con fibras cortadas y sin alineación.

Obviando las limitaciones citadas, factores económicos, medioambientales y legislativos han sido impulsores de la investigación en nuevas técnicas de reciclado de las fibras incorporando productos con un cierto comportamiento estructural.

En la Tabla 1 se puede ver el estado del arte en el reciclado de las fibras, el cual ya está aportando fibras con propiedades mecánicas cercanas a las originales

	<i>Resistencia (MPa)</i>	<i>Modulo elástico E (MPa)</i>	<i>IFSS con epoxy (MPa)</i>	<i>IFSS con PP (MPa)</i>
<i>FC Virgen</i>	6966	356	82.5	11.2



FC Rec 1	5876	369	64.2	12
FC Rec 2	6795	331	62.4	11.4

Tabla 1: Comparación de propiedades mecánicas a tensión e IFSS entre fibra de carbono T800 reciclada y su equivalente virgen [2]

Ahora bien, las propiedades mecánicas del material compuesto con fibras recicladas, sí que muestran valores inferiores a los de referencia. Debido tanto a las características de salida de las fibras recicladas nombradas previamente, longitud y pérdida de enzimaje, y otro a que los métodos de fabricación (derivados de lo utilizados con fibras vírgenes) no están adaptados aún a estos materiales reciclados. Estos métodos deben ser, por tanto, adaptados a las características de las fibras recicladas.

A continuación, pasaremos revista a algunos de los métodos más utilizados y que a priori parecen más fáciles de adaptar con estas fibras recuperadas.

- **Moldeo por inyección.** Este proceso, por el cual una resina generalmente termoplástica y reforzada con fibras de carbono, cargas y aditivos son convertidas en “pellets”, parece que puede ser fácilmente adaptado a estas fibras recicladas. Sin embargo, por el momento no es factible su uso en aplicaciones estructurales por un lado por las características intrínsecas del proceso y por el otro porque el material obtenido es por sí mismo alrededor de un 25% menos rígido y tiene un 12% menos de resistencia que su equivalente con fibras vírgenes [3].
- **Moldeo por compresión de non-wovens.** En este caso, y partir de las fibras recicladas se puede obtener un “non-woven” o “no tejido” siendo este uno de los subproductos más habituales con fibras de carbono recicladas y existiendo varios fabricantes, como el británico GEN2Carbon, que ya comercializan este producto. Aquí su comportamiento mecánico, si parece permitir su aplicación en estructuras, con la salvedad de la dificultad de obtener contenidos en fibra altos por su baja permeabilidad y la exigencia de altas presiones en el proceso de moldeo. Por otro lado, no hay que olvidar que en el mercado ya existen materiales con prestaciones similares y más baratos. La mejora en el alineamiento de las fibras en la fabricación del no tejido, hasta un 80% del teórico según el desarrollo tecnológico actual [4], se traduce en un incremento de sus propiedades mecánicas con contenidos en fibra de hasta un 40% [4], en volumen. lo hace muy competitivo con el aluminio y “composites” de fibra de vidrio, por su conocida rigidez y resistencia específica.
- **Moldeo por infusión o RTM:** Los “non-woven” o no-tejidos obtenidos a partir de fibras recicladas pueden ser igualmente utilizados para fabricar piezas mediante infusión de resina o RTM. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la limitación ya comentada de la falta de permeabilidad para poder obtener altos volúmenes de fibra (como ocurre en el proceso de moldeo por compresión) aquí es más difícil de solventar, ni con procesos de moldeo por RTM de alta presión. Lo cual dificulta aumentar el volumen de fibra lo suficiente como para obtener propiedades mecánicas equivalentes. La tabla 2 muestra resultados conseguidos con materiales reciclados, empleando distintos procesos de fabricación.

Proceso	Matriz	Vf	Et (MPa)	Xt (MPa)
Moldeo por inyección	PP	19	16	126
PC	16	14	124	
Moldeo por compresión non-woven	EP	30	25	
UP	16	5.5	90	
Moldeo por compresión non-woven alineado	EP	44	80	422

Tabla 2: Propiedades mecánicas de materiales compuestos obtenidos a partir de fibras recicladas por distintos procesos de fabricación [8]

2 - APLICACIONES ESTRUCTURALES POTENCIALES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS A PARTIR DE FIBRAS RECICLADAS

En base a lo comentado anteriormente, realizaremos un análisis de distintas alternativas de introducción de estos materiales reciclados en diversos campos industriales.

2.2 - INDUSTRIA AERONÁUTICA

Se podría esperar que la industria aeronáutica, como uno de los principales productores de materiales compuestos en la actualidad y donde su uso está más extendido, fuera uno de los principales mercados para la aplicación de las fibras de carbono recicladas (principalmente en interiores). Sin embargo, existen numerosas limitaciones para este fin:



- **Peso:** La optimización del peso en las estructuras aeronáuticas que a lo largo del tiempo es lo que ha conllevado la sustitución paulatina de muchas de las estructuras originalmente metálicas por “composites”, hace que el uso de materiales reciclados con su peor comportamiento mecánico se vea muy limitado como alternativa competitiva a los materiales habituales. Por este motivo, se hace necesario continuar con el desarrollo tecnológico en los procedimientos de reciclado, impregnación y adaptación de los métodos habituales de obtención de piezas.
- **Certificación:** El otro punto relevante que necesita atención es la Certificación, y como su metodología se ha consolidado para adaptarse tanto a la materia prima como a los procesos de fabricación actuales. Se hace por tanto necesario incorporar en las fases de obtención de la materia prima reciclada (tanto en la fase de recuperación como en la de creación de los subproductos intermedios), controles estandarizados similares a los ya establecidos en la industria actual de los “composites”, así como adaptar los controles y certificaciones sobre el proceso de fabricación de la pieza final a las características de los nuevos materiales utilizados.

Prototipos y demostradores de piezas, especialmente significativas de estructuras interiores como asientos [6], abren una nueva fase de maduración en todo el ciclo de producción desde la obtención de las fibras recicladas hasta la certificación final de la pieza.

2.3 - INDUSTRIA AUTOMOCIÓN

La automoción es un sector en el que la introducción de los materiales compuestos en la actualidad es más bien de nicho, si exceptuamos aplicaciones específicas, como por ejemplo los paneles de SMC en vehículos pesados. Sin embargo, si que existe una voluntad en el sector por su introducción, impulsado por la legislación y la necesidad de buscar materiales más sostenibles además de otros cambios como la electrificación que abren un hueco a estos materiales reciclados que vendrían a ayudar con su menor coste a poder introducirse en la industria.

Por último, el tamaño y características geométricas de las distintas partes que componen un automóvil, o vehículo pesado, hacen que muchas de ellas sean viables para su fabricación mediante moldeo por compresión, por ejemplo:

- **Techos.** Ya hay varios modelos que han llevan techo en fibra de carbono porque sus características y posición en el coche lo hacen adecuado para ser fabricado en materiales compuestos. A estas mejoras funcionales se une una apreciable bajada de costes en comparación con la fibra virgen.
- **Capó.** También es susceptible ser fabricado con fibras recicladas siendo más ligero que su equivalente en acero y más barato que los existentes en algunos “supercoches” en tejidos vírgenes de fibra de carbono. Esto permitiría ampliar su uso a otro tipo de coches. Además, su forma y tamaño permiten el moldeo por compresión lo que lo hace viable para volúmenes medios/altos como los de la automoción.
- **Paneles interiores.** La mayor rigidez y resistencia de los “composites” reciclados en relación con los materiales plásticos habituales en los paneles interiores, su sustitución por el carbono lleva asociado unas ventajas de un montaje sin soportes internos simplificando su fabricación con unos costes muy competitivos.
- **Tapas y cajas de baterías.** Al ser un mercado nuevo aún no están definidos los materiales estándar para la fabricación de los mismos, que actualmente varían entre materiales metálicos y compuestos de fibra corta como el SMC. Esto facilita el uso de un material alternativo, aunque siempre teniendo en cuenta el peor comportamiento ante el fuego y al fenómeno conocido como “thermal runaway”. Sin embargo, esto puede ser solventado con matrices intrínsecamente ignífugas de la familia de las benzoxazinas o mediante cargas ignífugas.
- **Puertas maletero.** Ya existen puertas de maletero en material SMC de fibra vidrio, con lo que los materiales a partir de fibras de carbono reciclados podrían ser una alternativa más ecológica, ligera y resistente, aunque conlleva un mayor coste.
- **Soportes y otras piezas piezas.** Existen multitud de soportes y otras piezas como tirantes, soporte rueda de repuesto, pedales y otras, que por sus características de tamaño y necesidades estructurales inferiores son susceptibles de ser cambiados de materiales tradicionales a materiales compuestos obtenidos con fibras recicladas.

2.4 - INDUSTRIA EÓLICA

Actualmente es uno de los mayores usuarios de los materiales compuestos por lo que es interesante buscar aplicaciones en las que las fibras recicladas puedan sustituir a los materiales compuestos de fibras vírgenes. Aquí podemos diferenciar entre palas y otros elementos como las nacelle.

Palas eólicas. La imposibilidad actual de generar laminados de fibra larga hace difícil sustituir toda la fibra utilizada en la fabricación de las palas. Sin embargo, dentro de los distintos laminados que componen la pala es posible encontrar áreas en las que algunas de las capas puedan sustituirse por “non-wovens” o no tejido de fibra de carbono reciclado utilizando los mismos procesos de fabricación que en la actualidad.



Nacelle. Como se puede ver en la referencia 7, ya existen desarrollos sobre la fabricación de nacelles completas a partir de fibra reciclada utilizando procedimientos tradicionales de infusión y que presentan ventajas respecto a los materiales tradicionales [7].

2.5 - INDUSTRIA FERROVIARIA

Existen múltiples piezas en el sector ferroviario que actualmente son fabricadas mediante “mats” tejidos de fibra de vidrio y matriz termoestable, poliéster principalmente, en el que el uso de non-wovens o no tejidos de fibras de carbono recicladas ofrecería ventajas de reducción de peso y sostenibilidad.

Están pendientes de solucionar tanto los problemas derivados de la resistencia al fuego requeridos por la EN45545i, incorporando matrices o cargas ignífugas, como su coste asociado. Por lo que por el momento la balanza se inclina por los materiales y procesos habituales en el sector.

Como en otros sectores ya comentados, las propiedades mecánicas de los materiales reciclados hacen muy atractivo y por tanto abren alternativas para otras piezas como estructuras de asiento o mobiliario.

2.6 - INDUSTRIA DEPORTIVA

La industria deportiva podría ofrecer un gran número de aplicaciones para las fibras recicladas, siendo además un mercado en el que la sostenibilidad del producto afecta de manera positiva en el cliente final. Dentro de este sector podemos apuntar como posibilidades

- **Raquetas de padel.** La mayoría de ellas ya fabricadas en compuesto pero que pueden ser susceptibles de ser fabricadas en materiales híbridos incluyendo fibras recicladas.
- **Esquís y tablas de snowboard.** Aunque la orientación de la mayoría de capas de sus laminados no hace posible su sustitución completa, laminados híbridos son posibles sustituyendo algunos de los elementos, como los núcleos, por fibras recicladas.

3 - CONCLUSIONES

Se puede concluir que, aunque existen ciertas limitaciones para la sustitución de los materiales habituales por los de fibras recicladas de forma general, existe un amplio campo de aplicaciones en las que estas pueden ser utilizadas. Esto redundaría además en la mejora de la sostenibilidad de los “composites” y su paulatina introducción en productos y aplicaciones en las que su uso actual es residual. Y con ello, y a medida que se aumente la demanda es seguro que se continuara con los desarrollos de recuperación de fibra, generación de productos intermedios y procesos y así permitir su introducción en productos de los sectores arriba señalados.

4 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Ballout¹, N. Sallem-Idrissi¹, M. Sclavons¹, C. Doneux², C. Bailly¹, T. Pardoen² & P. Van Velthem¹. “*High performance recycled CFRP composites based on reused carbonfabrics through sustainable mild solvolysis route*”. Scientific Reports volume 12, Article number: 5928 (2022)
- [2] Guozhan Jiang, Stephen J pickering. “*Structure-property relationship of recycled carbon fibres revealed by pyrolysis recycling process*”. Journals of material Science Volume 51, pages 1949–1958, (2016)
- [3] Connor, M.L. “*Characterization of recycled carbon fibers and their formation of composites using injection molding*”. Master thesis. North Carolina State University (2008)
- [4] Howarth J, Jeschke M. “*Advanced non-woven materials from recycled carbon fibre*”. Carbon Fibre recycling and reuse 2009 conference, Hamburg, Germany.
- [5] Turner, T.A., Pickering, S.J., Warrior, N.A. “*Development of high value composite materials using recycled carbon fibre*”. SAMPE 09 Conference, Baltimore, USA
- [6] <https://www.compositesworld.com/news/cecence-ncc-and-gen-2-carbon-develop-sustainable-airplane-seatback->
- [7] “*Developments in applications of recycled carbon fibres*”. Sustainable composites: The future. University of Bristol 1st July 2020.
- [8] Pimenta S, Pinho ST. “*Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review an market outlook*”. Waste management 31, 378-392 (2010)



Capítulo 16: BIO-MONÓMEROS Y BIO-RESINAS TERMOESTABLES

Silvia González Prolongo¹, Alberto Jiménez Suárez¹

¹ Universidad Rey Juan Carlos

Abstract

Thermosetting resins, especially epoxy resins, have historically been based on petroleum-derived monomers, posing problems of toxicity, high costs, and dependence on non-renewable resources. This chapter presents the use of natural plant sources to develop more sustainable resin precursors.

The synthesis of bio-epoxy monomers from vegetable oils, polysaccharides, lignin, polyphenols, and natural resins is currently the subject of interest in several research projects and scientific papers, in some cases reaching the level of product commercialization. Vegetable oils, such as linseed and soybean, and the transformation of saccharides into epoxy monomers are examples of explored options. Naturally occurring epoxy monomers derived from polyphenols from various plant sources can also be found, although their epoxidation requires the use of toxic compounds such as epichlorohydrin.

Several natural sources, such as natural rubber, resin acids, and lignin are examined as alternatives to synthesize epoxy resins of natural origin. Leutelin, recently identified in fruits and medicinal herbs, is highlighted as a promising compound to produce bioepoxy monomers.

Although initially the research focused mostly on the development of monomers of natural origin, research also extends to hardeners of natural origin, highlighting the synthesis of amines from vanillin and curing agents based on phenalkamines. The development of hardeners with reversible bonds, such as lignin imines, is also being explored, and the catalytic effect of hemp fibers in the curing of epoxy resins is highlighted.

The combination with traditional monomers or the development of recyclable resins and vitrimers with reversible bonds are current fields of interest for the development of these resins, especially in the context of their competitors of petrochemical origin.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords:

Bio-sourced monomers
Bio-sourced hardeners
Vegetable oils
Rubber
Hemp
Lignin
Leutelin
Vanillin Epichlorohydrin
Monomers naturales
Endurecedores naturales
Aceites vegetales
Caucho
Cáñamo
Lignina
Leutelina
Vainillina Epichlorhidrina

1 - FUNDAMENTOS QUÍMICOS DE LA SÍNTESIS DE MONÓMEROS NATURALES

Actualmente, las resinas termoestables - especialmente las epoxídicas - resultan del curado de monómeros derivados del petróleo (DGEBA, novolacas, endurecedores amino, etc.). Su toxicidad, alto coste de producción y dependencia de fuentes no-renovables ha promovido el desarrollo de estos precursores a partir de fuentes naturales vegetales. En particular, la síntesis de monómeros bio-epoxídicos parte de aceites vegetales, polisacáridos, lignina, polifenoles y resinas naturales [1] con grupos funcionales activos (ácidos, dobles enlaces, furanos y alcoholes) que, mediante reacciones químicas, permiten desarrollar los grupos oxirano.

En concreto, los aceites vegetales son triglicéridos con diferentes enlaces insaturados. Entre los más usados para ser epoxidados se encuentran el aceite de linaza, canola, soja o ricino. Con ellos se obtienen monómeros de larga longitud de cadena con una funcionalidad desde dos hasta seis grupos oxirano por molécula.

Otra alternativa es la fabricación de monómeros epoxi a través de sacáridos. Esta transformación conlleva tres etapas: hidrólisis del almidón para obtener glucosa, hidrogenación de la glucosa para generar sorbitol y, finalmente, reacción del sorbitol con epichlorhidrina (ECH) para obtener el monómero epoxidado. Desgraciadamente, el ECH - también utilizado en la síntesis del DGEBA - es tóxico y cancerígeno, y está catalogado como peligroso con toxicidad aguda. Se puede realizar un proceso de síntesis similar a partir de sustancias de furano extraídas del azúcar, dando lugar a monómeros epoxídicos con estructuras furano que tienen una estructura química más próxima a los actuales monómeros epoxi comerciales.

También se ha abordado la síntesis de bio-monómeros epoxi a partir de polifenoles procedentes de diferentes

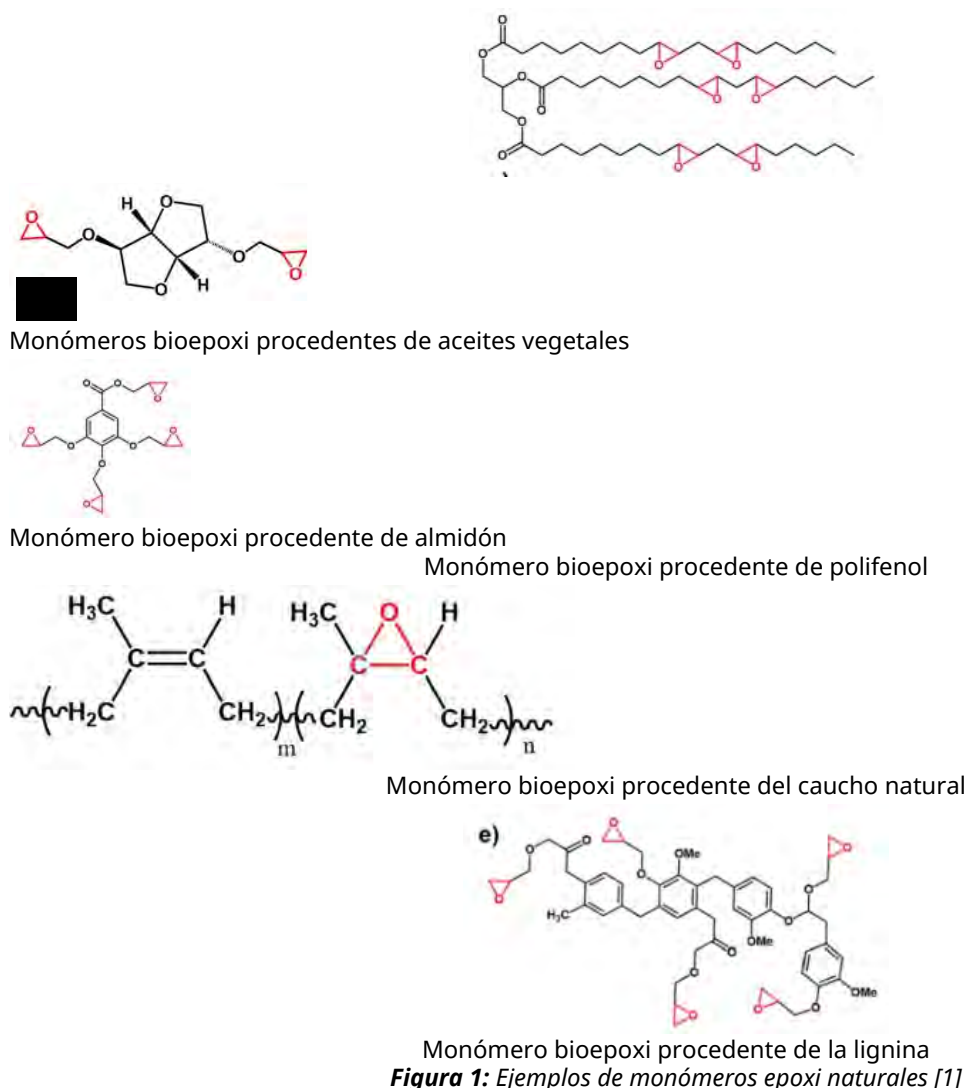
maderas y cortezas de distintos árboles, como: mimosa negra, roble, madera quebracho, manglar, castaño y varias especies de pino, así como de pieles de algunos frutos secos. La principal ventaja de estas fuentes vegetales (taninos, cardamol o resveratrol) es su elevada estabilidad térmica y buenas propiedades mecánicas. De nuevo, el problema radica en que su epoxidación requiere el uso de ECH.

El caucho natural es otra fuente para sintetizar bioepoxi mediante la epoxidación de algunos de los dobles enlaces del poli-isopreno. Por otro lado, a partir de ácidos resínicos de algunos árboles se pueden desarrollar biomonomeros denominados oligómeros de colofonia epoxidados.

Finalmente, la lignina es el polímero natural más abundante después de la celulosa, y contiene una estructura principal aromática y restos hidroxilo fenólicos similares a los monómeros epoxi comerciales derivados del petróleo. Por esta razón ha sido posible desarrollar varios monómeros bioepoxi a partir de la lignina [2].

La leutelina [10], que se puede encontrar en frutas, verduras y hierbas medicinales como el perejil, el tomillo, la menta y el apio también ha sido identificada recientemente como el principal compuesto de origen natural para la producción de monómeros bioepoxi. Es una sustancia aromática con varios grupos fenólicos que se pueden epoxidar fácilmente.

En la Figura 1 se recogen algunos ejemplos de monómeros epoxi obtenidos con distintas fuentes naturales.



Una vez presentada la síntesis de monómeros epoxi naturales es necesario desarrollar la obtención de endurecedores de origen natural. En este ámbito, las alternativas son variadas. Recientemente se ha publicado la síntesis de monómeros amina a partir de la vainillina, un derivado de la lignina que se emplea también frecuentemente como fuente de monómero bioepoxi [3]. A nivel industrial, se han desarrollado agentes de curado de origen natural basados



en fenalcáminas y fenalcámidas [4] para el desarrollo de recubrimientos y adhesivos de curado rápido libres de fenoles. Se empiezan a encontrar estudios [5] del uso de endurecedores procedentes de las cáscaras de los anarcados que se pueden usar para la fabricación de materiales compuestos para aplicaciones marítimas por su alta resistencia hidrotérmica. Estos compuestos pueden ser utilizados para procesos de infusión gracias a su baja viscosidad. La síntesis de poliaminas solubles en agua [6] a partir de alcoholes de azúcares permite el desarrollo de bio-endurecedores solubles en agua. Recientemente se están desarrollando endurecedores de origen natural con enlaces reversibles, para así favorecer el posterior reciclado de las resinas termoestables. Por ejemplo, se han desarrollado agentes de curado procedentes de ligninas, como la vainillina y el siringaldehído, que contienen iminas [7].

También se ha demostrado el efecto catalizador de las fibras de cáñamo en el curado de las resinas epoxi debido al descenso de la energía de activación, por eso se las denomina catalizador verde [8]. En este punto es necesario destacar que junto con los avances en los monómeros de origen natural también se está favoreciendo el uso de fibras naturales, como fibras de cáñamo, palmera, lino, bambú, etc.

Cada vez se encuentran más estudios de síntesis de monómero epoxi y su agente de curado a partir de la misma fuente. Por ejemplo, de la lignina procedente del aceite de soja se fabrica el monómero bioepoxi y el endurecedor anhidrido [9].

2 - PROPIEDADES DE LAS BIO-RESINAS RESPECTO A LAS TRADICIONES

Al igual que en las resinas tradicionales derivadas del petróleo, la elección del monómero y el agente de curado determinan el comportamiento de la resina termoestable.

En muchas ocasiones, el uso de monómeros bioepoxi procedentes de aceites naturales reduce las propiedades termomecánicas, al estar formados éstos por cadenas alifáticas largas que generan redes con baja densidad de entrecruzamiento. Por eso se están implementando industrialmente como recubrimientos o adhesivos. Por ejemplo, el aceite de soja epoxidado curado con diferentes endurecedores, poliaminas, anhídridos y ácidos carboxílicos exhibe una baja T_g y unas propiedades mecánicas inferiores a las resinas tradicionales. Para superar estas desventajas se han utilizado diferentes estrategias que mejoren su resistencia mecánica y térmica, como combinar el monómero bioepoxi con monómeros tradicionales como DGEBA o novalaca, introducir un termoplástico cristalino o el uso de agentes de curado que favorezcan una rigidez de la estructura. También se ha procedido a la síntesis de redes interpenetradas (IPN) [11] entre resinas convencionales y resinas bioepoxi, o incluso la utilización de distintas resinas de origen natural. Sin embargo, los monómeros bioepoxi procedentes de polifenoles, como la vainillina, el siringaldehído, eugenol, cardamol, resveratrol, etc. suelen presentar mejores prestaciones mecánicas y térmicas. También se han fabricado a partir del aceite de soja resinas de origen natural fotopolimerizables para poder ser procesadas por impresión 3D [12]. Finalmente, se están desarrollando siliconas procedentes de aceites naturales como la lignina para ser incorporadas a las resinas termoestables como modificadores de tenacidad [13].

Una de las principales ventajas encontradas en la mayoría de las resinas epoxi de origen natural es su alta resistencia intrínseca a la llama. Durante las pruebas de combustión se genera una capa de carbón compacta y continua que actúa como retardante de llama.

A continuación, se recogen algunas de las resinas bioepoxi desarrolladas con mayores prestaciones: el resveratrol, procedente de la piel de las uvas rojas, granos de cacao, cacahuetes y arándanos se puede epoxidar, y se utiliza como monómero bioepoxi para obtener resinas con ultra alta T_g . Si se cura el resveratrol con agentes amino tradicionales como el DDM, las resinas alcanzan una T_g superior a 300°C, mientras que, al curarlo con anhídridos como el metilhidroftálico, la T_g es más baja (218°C) pero tiene mayor módulo elástico [14]. Si se cura con floroglucinol, que también es de origen natural, se obtiene una excelente combinación de propiedades: alta T_g (246°C), muy alto módulo de almacenamiento que se mantiene hasta casi los 200°C (4,14 GPa), y excelente resistencia a flexión: 185 MPa. Por otro lado, las resinas bioepoxi fabricadas con magnolol, compuesto lignano obtenido de la corteza de la magnolia, pueden llegar a tener propiedades superiores a la resina de base DGEBA: una T_g de 168°C, un módulo de 5,2 GPa y una resistencia a tracción de más de 70 MPa [16]. La modificación de una resina tradicional, DGEBA E51 curada con DDS, con un 30% de resina bioepoxi procedente del magnolol mejora su tenacidad en un 54%, aumentando su T_g hasta 50°C y mejorando su resistencia intrínseca a la llama [17].

Entre otras interesantes propiedades que les aportan mayor valor añadido, algunas resinas bioepoxi han mostrado una alta capacidad para la captura de CO_2 , alta selectividad de CO_2/N_2 y buena regenerabilidad. Por ello, no solo presentan efectos retardantes de llama, sino que podrían tener una aplicación para ayudar a la conservación y descontaminación del medio ambiente durante su uso y - más aún - como desecho [15].

Recientemente también se han comenzado a desarrollar resinas reciclables y/o vitrímeros con resinas bioepoxi usando endurecedores con enlaces covalentes reversibles. Por ejemplo, las resinas epoxi bioepoxi basadas en la

vainillina y curadas con endurecedores imina son reprocesables y solubles en distintos disolventes a temperaturas suaves (50°C) [18]. Se están desarrollando resinas bioepoxi reciclables con multitud de fuentes naturales distintas incorporándoles diferentes enlaces reversibles (imina, disulfuro, éster bórico, etc.) [19].

3 - SITUACIÓN INDUSTRIAL Y DE LA INVESTIGACIÓN DE LAS RESINAS DE ORIGEN NATURAL

La investigación en polímeros de origen natural es muy reciente y muestra una evolución creciente a lo largo del siglo XXI. El interés suscitado en este tipo de materiales ha sido mucho mayor en la última década, coincidiendo con el despliegue de un mayor número de políticas medioambientales y con el incremento de la concienciación de las corporaciones de su responsabilidad medioambiental (Fig. 2.a). De los 10 países que han tenido mayor número de aportaciones en los últimos 10 años destacan 5 países europeos entre los que se encuentra España, lo que pone de relieve su papel en este ámbito (Fig. 2.b).

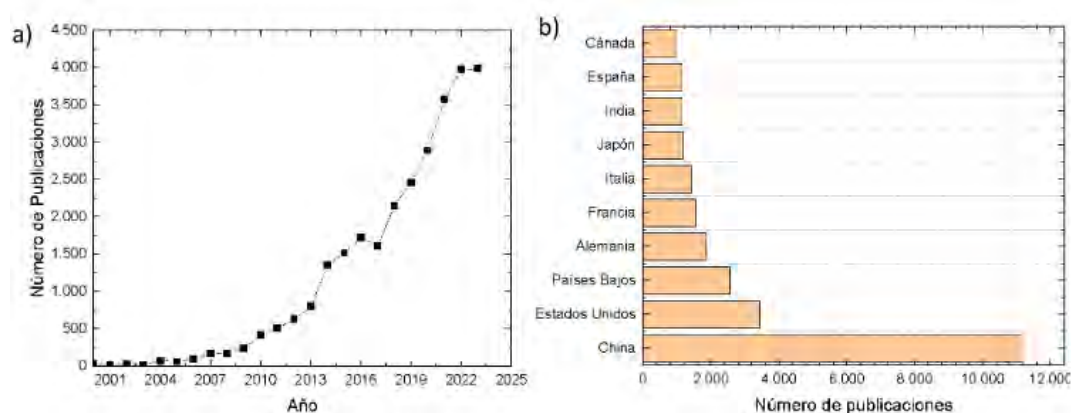


Figura 2. Publicaciones científicas indexadas en Web of Science entre los años 2000-2023 en el ámbito del desarrollo de polímeros de origen natural.

El desarrollo de este tipo de resinas se ha transferido del ámbito científico al tecnológico, contando con productos en el mercado que ya contienen la mención de resina termoestable - por ejemplo, epoxi - de origen natural. Los productos con mayor disponibilidad son los utilizados para acabados protectores (recubrimientos), siendo menos comunes a nivel comercial las resinas de origen natural para infiltración de tejidos de fibra continua con capacidad estructural. Además, en cualquier caso, estas resinas no siempre son completamente naturales en su composición; en muchas ocasiones la etiqueta de origen natural se asigna a resinas que contienen una proporción que no supera el 30 % en masa.

Las normas americana ASTM D6866-22 y europeas EN 16640 / CEN 16137 se utilizan para determinar la proporción de carbono de origen bio (*biobased carbon*) respecto al total del carbono orgánico que compone la materia utilizada. Existen varias empresas que comercializan actualmente resinas biobasadas, como: EcoPoxy (Canada), Entropy Resins (Estados Unidos), Spolchemie (República Checa), Resoltech (Francia), Gurit (Reino Unido), Cardolite Corporation (Estados Unidos), Sicomin (Francia) o Huntsman (Estados Unidos). La mayoría de los productos comercializados que se pueden encontrar responden a resinas utilizadas en recubrimientos (resinas de acabado) y *casting bulks* de propiedades bajas o intermedias.

En el tejido industrial español no es fácil encontrar fabricantes nacionales de este tipo de materias primas y apenas se encuentran productos comercializados, si bien hay diferentes centros tecnológicos (AIMPLAS, AITEX, CIDAUT, AITIIP, CIDETEC), universidades (URJC, URV) y empresas (BCIRCULAR, ACCIONA, IDEC) que participan en proyectos para el desarrollo de este tipo de resinas. Los proyectos europeos en los que se ha participado comenzaron fundamentalmente con la búsqueda de fuentes naturales para el desarrollo de polímeros, tanto termoplásticos como termoestables, existiendo un mayor número de fuentes alternativas en el caso de los primeros. Posteriormente se pasó a la investigación y desarrollo de refuerzos reciclados o de origen natural que incorporar a estas matrices, y al empleo de endurecedores dinámicos para fomentar no sólo un origen natural sino la posibilidad de reciclarlos, siguiendo con el desarrollo de fibras de carbono derivadas de la lignina como refuerzo estructural e, incluso, la incorporación de nanorrefuerzos de origen natural. Estas nuevas tendencias pretenden dar el siguiente paso a las matrices de origen natural inicialmente investigadas introduciéndolas en el ámbito de los materiales compuestos y de los nanomateriales.

El número de patentes relacionadas con polímeros de origen natural es muy elevado, con una alta predominancia de



patentes de China, aunque se encuentran también múltiples patentes en Europa. Un gran número de estas patentes están relacionadas con resinas de poliéster, acrílicas, epoxi y algunas otras formulaciones utilizadas en aplicaciones industriales (mercados) con elevada tasa de desarrollo y patentabilidad, como las tintas de impresión. También se encuentran múltiples patentes relacionadas con el desarrollo de precursores de los monómeros, como alcoholes de origen natural o, incluso, el desarrollo de refuerzos de origen natural.

4 - PRINCIPALES RETOS FUTUROS DEL DESARROLLO DE NUEVAS RESINAS TERMOESTABLES DE ORIGEN NATURAL

Si bien se han desarrollado y se están investigando múltiples alternativas para la obtención de resinas termoestables de origen natural como las resinas epoxi, muchos de estos procesos requieren aún de la etapa de escalado para una producción a mayor escala. Así, el primer reto al que se enfrenta este campo es el del desarrollo de una industria química o sostenible (*green chemistry*) que pueda competir técnica y económicamente con la industria petroquímica, cuyos procesos de producción de polímeros a escala industrial están bien establecidos y escalados. Además, algunos de esos procesos emplean reactivos que son considerados tóxicos, lo que complica la manipulación durante la producción, como es el caso de la epiclorhidrina, que es la sustancia más habitual para la epoxidación. Aunque esta molécula se puede obtener de forma natural esto no reduce su toxicidad y sus requerimientos de seguridad, por lo que la búsqueda de vías alternativas es un reto al que se enfrentan actualmente los productores de resinas epoxi de origen natural.

Si bien hay múltiples estudios basados en el desarrollo de monómeros y endurecedores de origen natural, para una completa transición hacia una economía circular es necesario desarrollar estrategias de reciclado de las matrices así como de recuperación de refuerzos que, en múltiples ocasiones, no son de origen natural. La investigación actual está desarrollando nuevos materiales de refuerzo de origen natural de escala micrométrica y nanométrica, así como formulaciones químicas basadas en monómeros de origen natural combinadas con endurecedores dinámicos que facilitan incrementar la vida en servicio y el reciclado posterior de estos nuevos materiales.

Aunque algunos de los monómeros obtenidos ya poseen las propiedades mecánicas y térmicas requeridas por algunas de las aplicaciones industriales más exigentes, aún sigue siendo un reto el poder obtener resinas al 100 % de origen natural que permitan un control preciso del procesado, de las propiedades de partida de los reactivos para asegurar un control eficaz de la obtención y, finalmente, un diseño controlado de las propiedades finales.

5 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, A. Ghadi. *International Journal of Biological Macromolecules* 256 (2024) 128041
- [2] B. Zhao, G. Chen, Y. Liu, K. Hu, R. Wu. *Journal of Materials Science Letter* 20 (2001) 859-862
- [3] M. A. Rsahid, M. N. H. A. Kafi. *Helyon* 9 (2023) e16062
- [4] Cardolite Company. <https://www.cardolite.com/>
- [5] M. A. G. Benega, R. Raja, J. I. R. Blake. *Procedia Engineering* 200 (2017) 186-192
- [6] M. Shibata, N. Ishigami, A. Shibita. *Reactive and Functional Polymers* 118 (2017) 35-41
- [7] M. A. Rashid, S. Zhu, L. Zhang, K. Jin, W. Liu. *European Polymer Journal* 187 (2023) 111878
- [8] M. Khalifa, G. Wuzella, H. Lammer. *Materials Today Communications* 37 (2023) 107052
- [9] X. Zhen, X. Cui, A. A. N. M. Al-Haimi, X. B. Wang, H. Liang, Z. Xu, Z. M. Wang. *International Journal of Biological Macromolecules* 254 (2024) 127760
- [10] X. Wang, H. Nabipour, Y. C. Kan, L. Song, Y. Hu. *Progress in Organic Coatings* 172 (2022) 107095 [11] H. Sreehari, V. Gopika, J. S. Jayan, A.S. Sethulekshmi, A. Saritha. *Polymer* 252 (2022) 124950
- [12] S. Chen, Q. Zhang, Z. Yang, Y. Bian, G. Chen, D. Li, W. Zheng, Y. Wei, Y. Bi, K. Ding, W. Zhou. *Industrial Crops and Products* 202 (2023) 117037
- [13] G. Li, C. Li, P. Li, R. Sun, L. Cao, P. Zhu. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 128 (2024) 103564
- [14] Y. Tian, M. Ke, X. Wang, G. Wu, J. Zhang, J. Cheng. *European Polymer Journal* 147 (2021) 110282
- [15] Q. Cao, H. Zhao, J. Li, Y. Guo, W. Zeng, J. Zhang, Z. Wei, X. Jian, Z. Weng. *Polymer Degradation and Stability* 215 (2023) 110424



- [16] M. Bu, X. Q. Zhang, T. Zhou, C. H. Lei. *European Polymer Journal* 180 (2022) 111595
- [17] H. Gu, Q. Cao, J. Li, J. Zhao, S. Zhang, X. Jian, Z. Weng. *Polymer* 280 (2023) 126038
- [18] M. A. Rashid, M. N. Hasan, M. A. Kafi. *Helyon* 9 (2023) e16062
- [19] Y. H. Zhang, F. Ma, L. Shi, B. Lyu, J. Ma. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 39 (2023) 100726



Capítulo 17: VITRIMEROS

Nerea Markaide¹, Alaitz Ruiz¹

1 - CIDETEC.

Abstract

The development of recyclable plastics is a key focus of research in the current world due to its environmental issues and concerns about non-renewability. Recently, vitrimeric materials have garnered significant attention as an exciting class of renewable plastics due to their potential to exhibit strength, durability, and chemical resistance approaching that of traditional thermosetting plastics, while also demonstrating recyclability at the end of their lifespan. This is attributed to their chemical structure, as vitrimers possess dynamic covalent crosslinking, providing them with stability while being reprocessable. This review summarizes the latest advancements and prospects in the development of vitrimeric materials. Special emphasis is placed on vitrimer design strategies that pave the way for the development of next-generation circular materials. The emerging applications of vitrimers are also discussed in terms of their properties, including self-repair, malleability, processability, and multiple shape memory.

OPEN ACCESS

Published: 25/02/2025

1 - INTRODUCCIÓN

La evolución en el diseño de materiales ha llevado al surgimiento de los vitrímeros, una clase única de polímeros con propiedades sorprendentes de autorreparación y reconfiguración. Estos materiales dinámicos representan una innovación significativa en la ingeniería de polímeros, ofreciendo versatilidad y funcionalidad inigualables.

Los plásticos pueden considerarse uno de los materiales clave y más empleados en los últimos 100 años[1]. Su versatilidad y adaptabilidad es incomparable a la de otro tipo de materiales, siendo maleables mediante métodos de procesamiento masivo como moldeo, extrusión y prensado en caliente[2]. Los plásticos también son materiales duraderos, a menudo resistentes a la humedad, oxidación y biodegradación. Hay dos clases principales de plásticos: termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos, pueden fundirse fácilmente y reprocesarse a temperatura elevada y pueden disolverse. Por otro lado, los termoestables no pueden reciclarse fácilmente después de su procesamiento inicial. Sin embargo, tienen una resistencia mecánica, estabilidad térmica y química significativamente mayores en comparación con los termoplásticos. Esta diferencia se puede entender al considerar sus estructuras químicas. Los termoplásticos comprenden cadenas poliméricas lineales que se asocian principalmente por fuerzas intermoleculares. A temperaturas más altas, estas fuerzas se superan y el plástico pasa de ser sólido a un líquido viscoelástico. En contraste, los termoestables comprenden redes tridimensionales (3D) con entrecruzamientos covalentes, que se forman durante el proceso de curado, de manera que todo el polímero puede considerarse una unidad molecular única[3]. Estos entrecruzamientos covalentes no se rompen fácilmente incluso a altas temperaturas, y el polímero generalmente se descompone antes de fundirse. Mientras que la mayoría de los plásticos no pueden degradarse fácilmente en sus monómeros correspondientes de manera rentable, los termoplásticos pueden reciclarse hasta cierto grado mediante procesamiento mecánico y disolución[4,5]. Lo mismo no se puede decir para los termoestables, que generalmente son adecuados solo para reutilizarse como materiales de relleno o como combustible[6]."

"Existe, por tanto, una motivación para desarrollar nuevos tipos de plásticos con resistencia y durabilidad similares a las de los termoestables, pero con capacidad de reprocesables, reparables y reciclables. Esto sería un habilitador clave en el desarrollo de una economía circular, donde los productos al final de su ciclo de vida podrían convertirse en la materia prima para otros materiales o reutilizarse de otras formas.

Un paso significativo hacia tales materiales es el desarrollo de Redes Covalentes Adaptativas (CANs, por sus siglas en inglés)[7–11]. Las CANs son materiales poliméricos con entrecruzamientos covalentes que se vuelven dinámicamente reversibles cuando se aplica un estímulo específico como calor, catalizador, luz o pH. En ausencia del estímulo correspondiente, su estructura entrecruzada puede dotarles de propiedades similares a los termoestables, como mayor resistencia y durabilidad. A diferencia de los termoestables tradicionales, que son esencialmente no reciclables,

las CANs son, en principio, reciclables debido a la naturaleza dinámica de sus entrecruzamientos. Además, las CANs también pueden exhibir propiedades como maleabilidad, memoria de forma y autorreparación. En las últimas dos décadas, el campo de las CANs ha experimentado un gran avance, con una amplia gama de entrecruzamientos, polímeros y aplicaciones reportadas[12–16]. En 2011, el grupo de Leibler reportó una nueva clase de CANs, a la que denominó vitrímeros, ya que su relación viscosidad-temperatura se asemeja a la de la sílice vitrea, siguiendo una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura[17]. "Las CANs pueden clasificarse aún más en dos grupos según su mecanismo de intercambio. El primer grupo de CANs utiliza un mecanismo de intercambio de enlaces cruzados disociativos. En este intercambio, los enlaces químicos primero se rompen y luego se vuelven a formar en otro lugar. Los enlaces dinámicos disociativos son aquellos que bajo un estímulo se rompen provocando una disminución de la densidad de reticulación en la red. (Fig. 1a). El segundo grupo de CANs utiliza intercambios de enlaces asociativos entre cadenas de polímeros, en los cuales el enlace cruzado original solo se rompe cuando se ha formado un nuevo enlace covalente en otra posición. En los enlaces dinámicos asociativos, no hay una disminución de densidad de reticulación ya que en el momento que se rompe un enlace se forma otro. Los entrecruzamientos presentes en los vitrímeros son asociativos rompiéndose solo cuando se forman nuevos enlaces. [18–22]. Esto tiene dos efectos principales. En primer lugar, se puede observar una fase gomosa extendida cuando se calientan, en comparación con las CANs disociativas que cambian de un estado sólido a uno líquido de manera más abrupta[23] [23]. Sin embargo, la clasificación simplemente por el tipo de enlaces químicos puede ser engañosa, ya que ciertos enlaces químicos pueden operar mediante uno u otro mecanismo dependiendo de la condición específica. Por ejemplo, el enlace de carbamato experimenta transcarbometilación asociativa en presencia de grupos hidroxilo en exceso[24] [26], mientras que el mecanismo de reversión de uretano disociativo es predominante en ausencia de esos grupos[25] [27]. Además, el mecanismo de estos materiales también puede no ser fácilmente dilucidado simplemente observando sus propiedades físicas; en algunos casos, los materiales que operan a través del mecanismo disociativo pueden tener propiedades reológicas indistinguibles de los vitrímeros [23–28]. Esto ocurre cuando la constante de velocidad de formación de enlaces es significativamente mayor que la de ruptura de enlaces, de manera que la proporción de enlaces disociados es pequeña. Como resultado, la dependencia viscosidad-temperatura de estos materiales todavía sigue la ley de Arrhenius, y estos materiales todavía pueden considerarse materiales tipo vitrímero (Fig. 1.1)[26]. Además, en materiales reales, las redes poliméricas están entrecruzadas no solo a través de enlaces covalentes, sino también mediante interacciones intramoleculares, como interacciones de Van der Waals, interacciones de enlace de hidrógeno y coordinación metal-ligando. Estas interacciones físicas respaldan las propiedades mecánicas de los materiales junto con los enlaces químicos en la red. En esta revisión, nuestro enfoque estará tanto en los vitrímeros como en los materiales con propiedades vitrímeras.

Desde los primeros vitrímeros descritos por Leibler, el número de polímeros vitrímeros en la literatura ha aumentado enormemente. Se ha demostrado que numerosos enlaces químicos reversibles, como aquellos basados en reacciones de adición-eliminación, reacciones de adición-eliminación conjugada, transalquilación e incluso intercambios de heteroátomos como boronatos y siloxanos, son efectivos como entrecruzamientos en materiales vitrímeros. Dentro de cada tipo de enlace químico, también se han explorado diferentes sistemas catalíticos y estructuras poliméricas. Más recientemente, se han desarrollado estrategias como el uso de catalizadores unidos covalentemente[29], catálisis por grupos vecinos [30–33] e incluso reacciones sin catalizadores[34,35] para hacer estos materiales más reprocesables. Los materiales vitrímeros también se han explorado en numerosas aplicaciones. Para hacer frente a los desafíos ambientales, se ha demostrado la capacidad de reprocesamiento y reciclabilidad de los vitrímeros. Además, varios grupos también han informado sobre aplicaciones como materiales auto-reparables, adhesivos reutilizables, materiales con memoria de forma e incluso en impresión en 3D. Los vitrímeros también se han combinado con nanomateriales para formar compuestos con propiedades sinérgicas.

En esta revisión, nuestro objetivo es resumir de manera integral los desarrollos recientes en materiales vitrímeros, prestando especial atención a los principios de diseño detrás de ellos, así como a sus aplicaciones emergentes en diversos campos (Fig. 1.2).

2 - CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE VITRÍMEROS Y CANS

En los últimos años, ha habido gran interés en un área de la química donde el enlace covalente tiene la capacidad de formarse, romperse e incluso reformarse reversiblemente[36]. Ejemplos de funcionalidades covalentes potencialmente dinámicas incluyen acetales, anhídridos borazaronómicos, ésteres de borato, disulfuros, hidrazonas, iminas, oximas y olefinas (metatesis) entre otras. La formación de la mayoría de estos grupos funcionales requiere un catalizador para iniciar y/o acelerar el equilibrio. El tipo de catalizador depende de la naturaleza del enlace covalente que se requiere hacer dinámico. Incluso los enlaces covalentes estables, como los éteres y amidas, pueden hacerse reversibles. Sin embargo, los catalizadores y condiciones necesarios para establecer los equilibrios suelen ser demasiado agresivos para tolerar la presencia de otras funcionalidades en la molécula. En esta revisión, analizaremos los enlaces covalentes dinámicos que tienen el potencial de hacerse reversibles bajo condiciones relativamente suaves.

Las redes covalentes adaptables (CANs, por sus siglas en inglés) son aquellas redes que contienen un número suficiente y una topología de enlaces covalentes reversibles que permiten que la estructura de red reticulada responda químicamente a un estímulo aplicado. Esta respuesta, que generalmente es un cambio en el estrés y/o forma (deformación) del material, se logra sin necesidad de degradación irreversible de la estructura de la red, siendo capaz de mantener la densidad de enlaces inicial mientras permite que el material se reorganice. Las CANs son materiales 'inteligentes' capaces de responder a un estímulo externo con un cambio en la estructura física de la red.

El diseño de materiales poliméricos que combinan las ventajas de los polímeros termoestables con las propiedades de flujo de los materiales termoplásticos se ha convertido en un campo de gran interés. En este sentido, los enfoques recientes buscan convertir los polímeros termoestables en materiales dinámicos utilizando enlaces covalentes dinámicos en la red para habilitar características funcionales como autorreparación, reciclabilidad, reparación, reprocesado, memoria de forma y adaptabilidad[11,37-39]. La introducción de enlaces covalentes dinámicos en cada punto de entrecruzamiento conduce a la obtención de una red covalente adaptable (CAN), un nuevo concepto introducido en la química de polímeros por Bowman y otros[11,27,40-44].

Las CANs pueden clasificarse aún más en dos grupos según su mecanismo de intercambio. En las CANs, el dinamismo de la red se logra aplicando un estímulo externo como calor, pH, luz, etc., a través de una vía disociativa o asociativa (ver Figura 1).

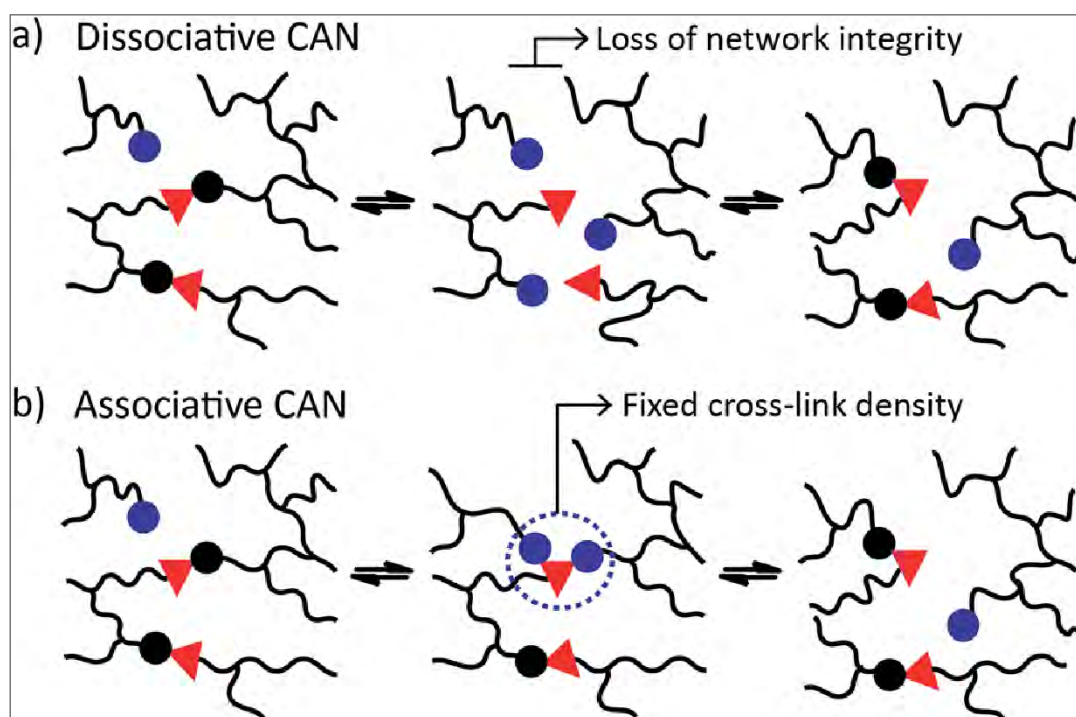


Figura 1: Las CANs se dividen en dos grupos: (a) disociativas y (b) asociativas, según las reacciones de intercambio que proceden, respectivamente, con o sin una pérdida temporal neta de densidad de entrecruzamiento. Los vitrímeros pertenecen al grupo de las CANs asociativas.

2.1 - CANs DISOCIATIVAS

El primer grupo de CANs hace uso de un mecanismo de intercambio de entrecruzamiento disociativo. En este intercambio, los enlaces químicos primero se rompen y luego se forman nuevamente en otro lugar. Los enlaces disociativos se basan en un desplazamiento desencadenado del equilibrio de asociación hacia el estado disociado endotérmico, transformando la red polimérica en un material similar a un termoplástico. Este mecanismo conduce a una caída repentina de la viscosidad que permite un reprocesamiento rápido, pero también una deformación no controlada a altas temperaturas y una peor resistencia a los solventes.

El enlace disociativo más estudiado es la reacción de Diels-Alder reversible entre furanos y maleimidas en redes poliméricas orgánicas. Los enlaces disociativos se rompen para volver a formarse más tarde en otro punto. Al calentar



estos materiales, se produce una disminución de los puntos de reticulación debido a la disociación de los enlaces dinámicos porque el equilibrio químico se desplaza hacia el lado endotérmico. Por lo tanto, estos materiales pueden lograr una relajación muy rápida del estrés debido a una disminución en la conectividad. Esta pérdida a corto plazo de entrecruzamientos resulta en una caída repentina de la viscosidad, similar al comportamiento observado en polímeros termoplásticos. Al enfriar el material, los entrecruzamientos se forman nuevamente, en la misma medida que en el material inicial, recuperando las deseables propiedades termoestables como rigidez e insolubilidad. Sin embargo, debido a las temperaturas bastante suaves requeridas para la disociación de enlaces, estas CANs disociativas no pueden utilizarse en aplicaciones donde se requieran propiedades térmicas y mecánicas elevadas.

2.2 - CANs ASOCIATIVAS

El segundo grupo de CANs contiene enlaces dinámicos asociativos entre cadenas poliméricas, en los que el entrecruzamiento original solo se rompe cuando se ha formado un nuevo enlace covalente en otra posición. Los enlaces asociativos mantienen una densidad de entrecruzamiento constante porque se necesita formar un nuevo enlace covalente ya sea simultáneamente o antes de romper un enlace covalente existente[45]. Leibler y sus colaboradores[46] fueron los primeros en introducir este tipo de enlaces covalentes asociativos en resinas epoxi para obtener una red epoxi reparable basada en un mecanismo de transesterificación catalizada por zinc, que demostró experimentar reordenamientos topológicos graduales al calentarse. Los intercambios dinámicos observados se asemejan al comportamiento de la sílice vítrea y esta nueva generación de materiales CAN se la denominó como **Vitrimeros**[47].

Los vitrímeros se comportan como materiales entrecruzados a temperaturas por debajo de la T_g , y como líquidos viscoelásticos a altas temperaturas. La presencia de enlaces dinámicos facilita el reprocesado de la red y el reciclaje a pesar de tratarse de materiales reticulados.

El proceso de reordenamiento de los vitrímeros puede ser controlado por dos temperaturas de transición distintas: la temperatura de transición vítrea (T_g) y la temperatura de congelación topológica (T_v). T_v representa la temperatura por debajo de la cual el intercambio químico se vuelve despreciable. Se define teóricamente como la temperatura en la que la viscosidad alcanza los 10^{12} Pa·s[43].

A altas temperaturas, la viscosidad de los vitrímeros está controlada por reacciones de intercambio químico, lo que produce una disminución térmica de la viscosidad que sigue la ley de Arrhenius, como se observa en materiales como el vidrio (Figura 2). Esta propiedad distingue a las CANs asociativas (vitrimeros) de las CANs disociativas y de los materiales termoplásticos porque estos materiales evolucionan de un estado sólido a un líquido de manera mucho más abrupta, siguiendo la ley de Williams-Landel-Ferry (WLF).

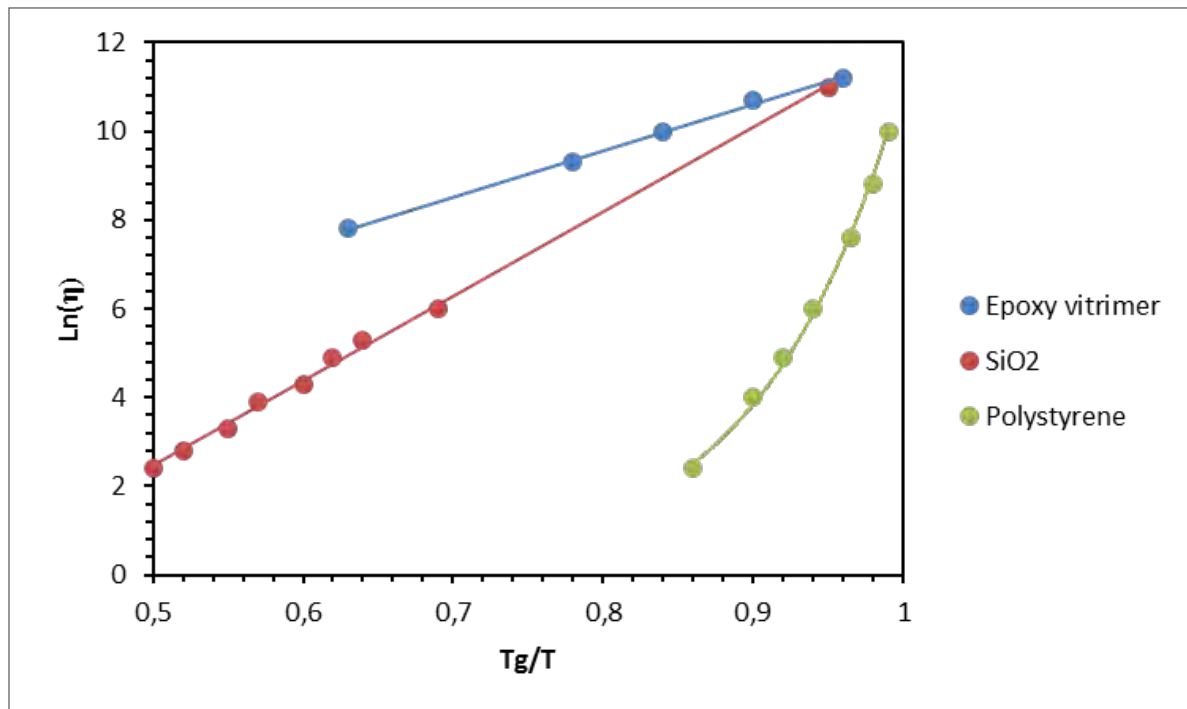


Figura 2: Gráfico de fragilidad de Angel [26]

En los vitrímeros se pueden distinguir dos casos en función de la T_g y la T_v :

1) Vitrímeros con una $T_g < T_v$: En este primer caso al calentar el material desde una temperatura inferior a T_g hasta una temperatura entre T_g y T_v , el sólido vítreo primero experimentará una transición a un estado gomoso comportándose como un elastómero, ya que la reacción de intercambio es tan lenta que la estructura de la red está prácticamente fija. Solo al continuar calentando el material, la reacción de intercambio se acelera y se vuelve relevante a temperaturas superiores a T_v , transformando el elastómero en un líquido viscoelástico cuyo flujo está principalmente controlado por la cinética de intercambio de los puntos de reticulación, produciéndose una bajada de la viscosidad con la temperatura que sigue la ley de Arrhenius.

2) Vitrímeros con una $T_v < T_g$: En este segundo caso, la reacción de intercambio intrínsecamente rápida está embebida en una matriz rígida con una T_g que es más alta que la T_v (Fig. 3b). En este caso, la T_v se puede calcular mediante la extrapolación de experimentos de relajación de esfuerzos o fluencia, esta transición es hipotética, ya que la red no queda congelada finalmente debido a la cinética de reacción, sino por la falta de movimiento de segmentos de cadena asociados con la T_g . A temperaturas por debajo de T_g , no ocurre ningún movimiento de segmentos de cadena y por lo tanto, no pueden ocurrir reacciones de intercambio y la red queda fija (cf. límite de difusión). Al calentar el material por encima de la temperatura de transición vítrea, el movimiento de diferentes segmentos de la cadena se inicia gradualmente mientras que las reacciones de intercambio ya son rápidas. En esta situación inicial, la cinética de reordenación/intercambio de la red está controlada por la difusión y los reordenamientos de la topología de la red están dominados por los movimientos de los diferentes segmentos de la cadena. En este caso el comportamiento de la viscosidad frente a la temperatura presenta un comportamiento que sigue la ley de WLF. Al seguir calentando el material, la cinética de intercambio cambian en cierto punto de un régimen controlado por difusión a un régimen controlado por la reacción de intercambio, que sigue la ley de Arrhenius.

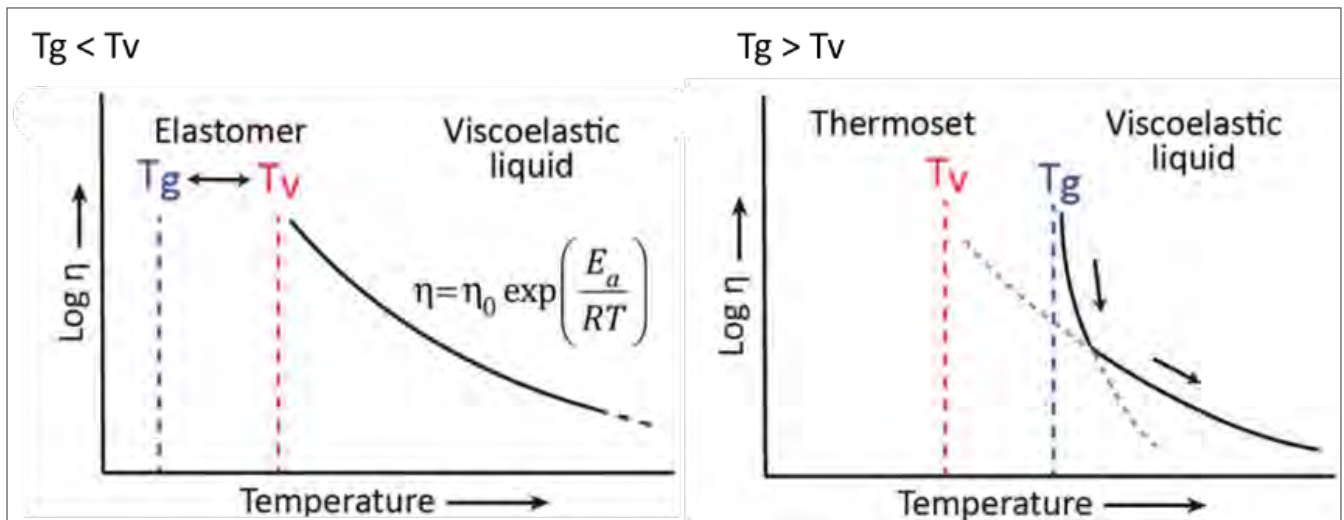


Figura 3: Comportamiento viscoelástico de vitrimeros a) con $T_g < T_v$ y b) $T_g > T_v$

3 - CLASIFICACIÓN DE LOS VITRÍMEROS

Los vitrimeros se pueden obtener a través de diferentes rutas de síntesis en función del enlace dinámico empleado. En muchos casos es necesario el empleo de catalizadores con el fin de activar el dinamismo del enlace covalente dinámico. A continuación, se recogen las diferentes químicas empleadas (catalizadas y no catalizadas) para la obtención de vitrimeros.

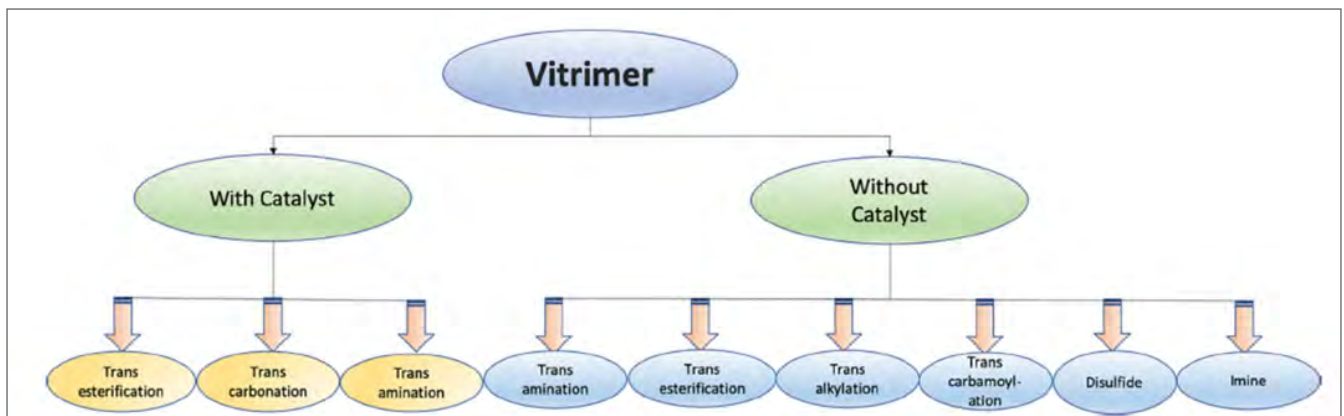


Figura 4: Diferentes químicas de vitrimeros [48]

3.1 - TRANSESTERIFICACIÓN

La reacción dinámica de transesterificación ocurre entre un éster y un alcohol para formar un nuevo éster y alcohol hasta que se alcanza el equilibrio, y esto generalmente requiere temperaturas elevadas y catalizadores como ácidos de Lewis o bases de Brønsted fuertes[49,50].

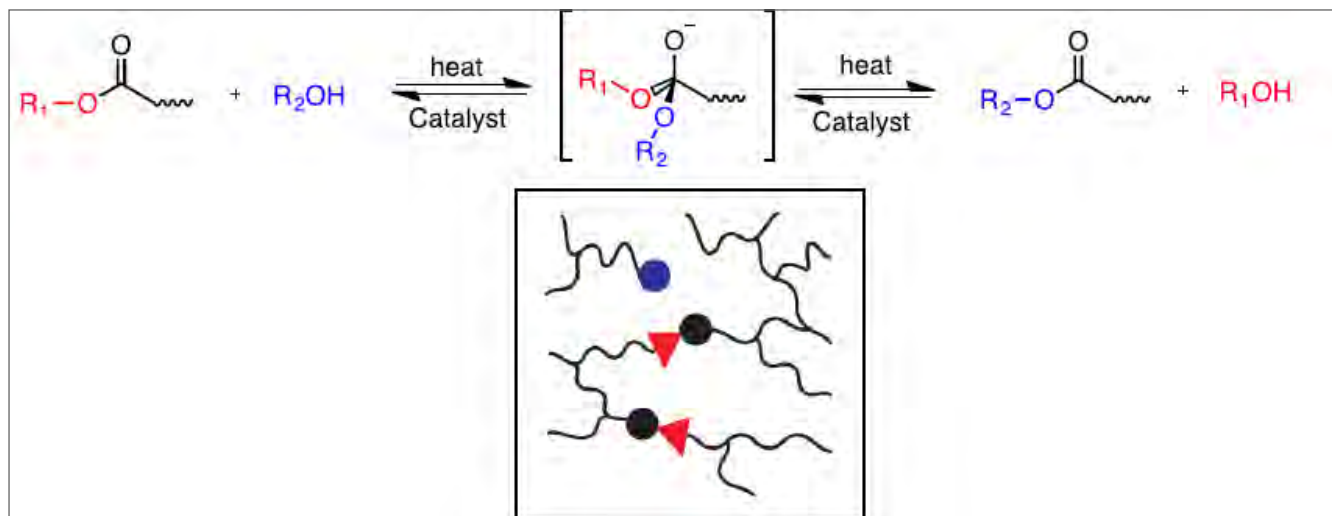


Figura 5: Reacción de transesterificación

En 2011, Leibler y colaboradores demostraron el concepto de vitrímeros utilizando reacciones de transesterificación basadas en ácido carboxílico, promovidas por un catalizador de zinc. De esta manera se abrió las puertas a la química de vitrímeros[46]. La velocidad de la reacción de transesterificación catalizada a temperatura ambiente es insignificante. Por lo tanto, las redes típicas de epoxi/ácido se comportan como resinas de epoxi convencionales por debajo de T_g . Sin embargo, al calentarse, las rápidas reacciones de intercambio permiten la reorganización de la estructura de la red, lo que permite deformar, procesar y reciclar el material[51]. La cinética de la reacción de intercambio puede controlarse fácilmente con el tipo y la concentración del catalizador. Al cambiar la cantidad y naturaleza del catalizador, la energía de activación y la T_v pueden ajustarse con una perturbación mínima de las propiedades del material.

- **Ventajas:** Alta capacidad de reprocesado, alta estabilidad térmica, insoluble, disponibilidad de monómeros comerciales, fácil síntesis.
- **Desventajas:** Baja solubilidad de los catalizadores, migración del catalizador, hidrólisis de los grupos éster, baja solubilidad de los ácidos carboxílicos en la resina epoxi. La estabilidad a largo plazo se puede ver empeorado debido a la pérdida del catalizador y hidrólisis de los grupos éster.

3.1.2 Transaminación de acilos vinílicos

Se trata de un tipo de vitrímeros que contienen un enlace dinámico intercambiable sin catalizador[41]. Los acilos vinílicos se forman mediante la reacción de condensación entre acetacetatos (uretano vinílico) o acetamidas (urea vinílica) y monómeros de amina.

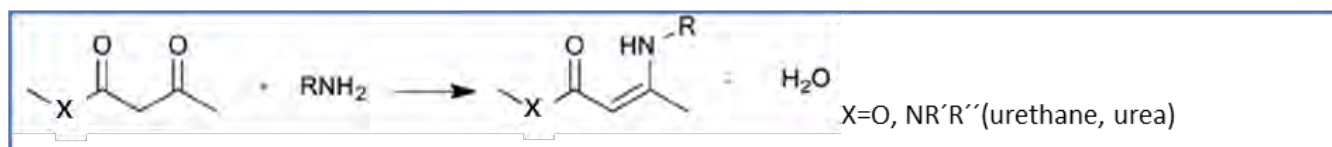


Figura 6: Síntesis de acilos vinílicos

La introducción de un enlace vinílico insertado entre el nitrógeno donador de electrones y un grupo aceptor de electrones confiere reactividad de tipo Michael con alta resistencia a la hidrólisis. La reacción de intercambio puede proceder sin catalizador a 100 °C o superior a través de la vía de adición de Michael. El ataque nucleofílico es realizado por un grupo de amina libre. Los tiempos de relajación disminuyen sustancialmente a medida que el grupo "X" se vuelve menos electronegativo (amida → uretano → urea).

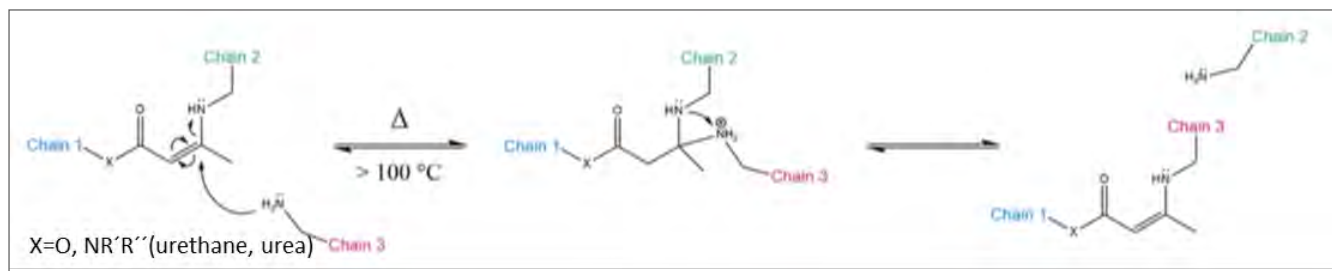


Figura 7: Reacción de transaminación de acilos vinílicos

Empleando un exceso de amina en la síntesis de estos materiales, se pueden obtener vitrímeros con suficientes aminas libres en la red polimérica dando lugar a materiales con alta velocidad de intercambio de enlaces. Además, los materiales resultantes mostraron buenas propiedades mecánicas, similares a las de los vitrímeros de epoxi/ácido pero con tiempos de relajación mucho más cortos (3 minutos a 150 °C). Esto puede atribuirse a la alta densidad de uretanos vinílicos en la red, y a la baja energía de activación de este tipo de materiales de 60 kJ·mol⁻¹.

- **Ventajas:** Materiales estables frente a la hidrólisis. No se necesitan catalizadores. Buenas propiedades mecánicas.
- **Desventajas:** Liberación de agua en la síntesis, química más compleja y se requiere de amplios conocimientos en química en la preparación de los materiales.

3.3 - TRANSCARBAMOILACIÓN

La reacción de transcarbamoilación de grupos de carbamato en poliuretanos puede seguir diferentes vías, dependiendo de las unidades químicas involucradas: *asociativa* mediante el empleo de un catalizador, *asociativa* a mediante la adición nucleófila de grupos OH y *disociativa*. La ruta disociativa es muy indeseable, ya que a menudo se asocia con reacciones secundarias indeseadas a altas temperaturas[24].

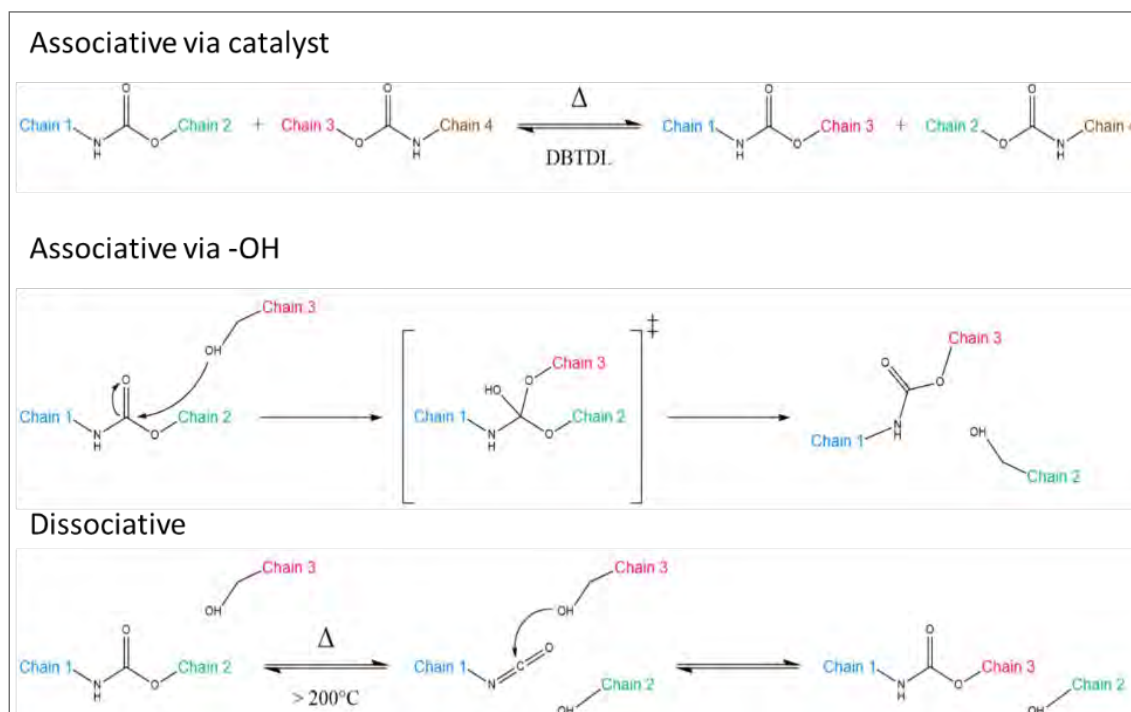


Figura 8: Diferentes rutas de intercambio que se pueden dar en materiales de tipo PU

La transcarbamoilación es una reacción de intercambio bastante lenta y presenta varios desafíos debido a una alta energía de activación. Por eso se requieren altas temperaturas para activar el dinamismo produciéndose reacciones secundarias que conducen a la degradación de los materiales. Por lo tanto, la aplicabilidad de la transcarbamoilación para poliuretanos reprocesables sigue siendo un desafío para su aplicación en materiales comerciales.

- **Ventajas:** Disponibilidad de los monómeros. Síntesis fácil y bien conocida por la industria.

- **Desventajas:** Reacciones de intercambio lentas. Degradación. Materiales de con cinéticas de intercambio lentas.

3.4 - TRANSALQUILACIÓN

Los vitrímeros basados en el mecanismo de transalquilación fueron empleados en el diseño de vitrímeros conductores de iones que pueden conducir la electricidad por encima de la Tg. Este tipo de vitrímeros fueron descritos por primera vez por Drockenmuller y colaboradores en 2015[52].

Estas redes poliiónicas se sintetizaron mediante un proceso de un solo paso a través de una poliadición de monómeros de α -azida- ω -alquino que implicaba una cicloadición Huisgen 1,3-dipolar (HAAC) de azida-alquino "sin clic" térmica y una reticulación simultánea con un agente de cuaternización de haluro de alilo.

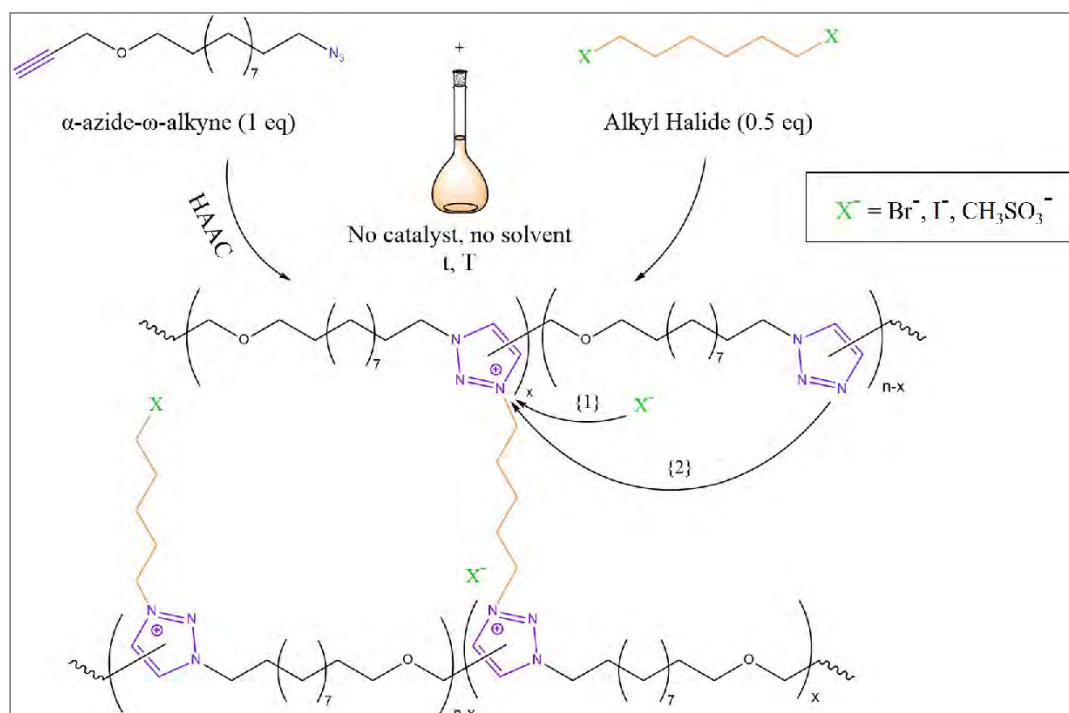


Figura 9: Reacción de transalquilación

En este tipo de vitrímeros las reacciones de intercambio pueden ocurrir por dos vías diferentes:

- (1) Ataque nucleofílico del contraión sobre la especie alquil-triazolio produciéndose una bajada en la densidad de reticulación temporal.
- (2) Adición nucleofílica concertada de tipo SN2 mediada por una unidad de triazol libre.

Los tiempos de relajación de los polímeros obtenidos oscilaron entre 30 min a 130 °C y unos pocos segundos a 200 °C. Las propiedades de fluidez de estos sistemas pueden controlarse mediante la elección del contraión ($\text{Br}^- \gg \text{I}^- > \text{MsO}^-$).

- **Ventajas:** Los polímeros iónicos presentan propiedades interesantes de conductividad, modulable en función de la funcionalización. Materiales interesantes para aplicaciones como polielectrolitos en membranas para captura de CO_2 , pilas de combustible, supercapacitores y baterías entre otros.
- **Desventajas:** Problemas de escalado y coste. Se ha observado pérdida de propiedades tras el reprocesado muy probablemente debido a reacciones secundarias indeseadas y ruptura de cadena.

3.5 -INTERCAMBIO Si-O en Siloxanos y Silil ÉTERES

El equilibrio dinámico de los siloxanos y su uso en la relajación química de tensiones del elastómero de polidimetilsiloxano (PDMS) ya se sugirieron en la década de 1950[53–55].

El intercambio nucleófilo Si-O en siloxanos requiere de un iniciador aniónico o un catalizador básico. Las propiedades dinámicas de estas redes pueden ajustarse en función de la concentración del iniciador aniónico y de la densidad del reticulante[56–58].

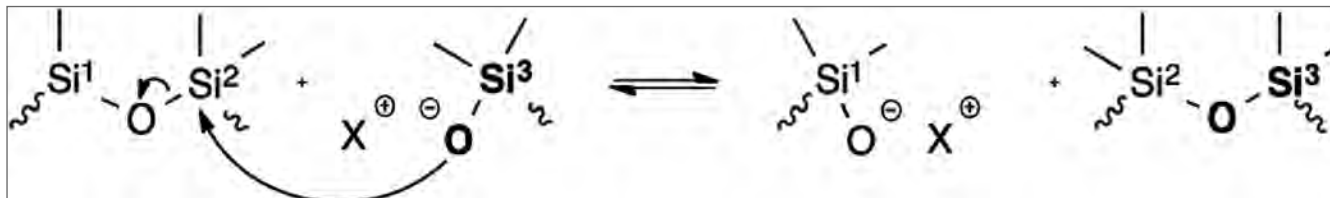


Figura 10: Reacción de intercambio nucleófilo Si-O en siloxanos

El intercambio de enlaces Si-O también puede utilizarse en materiales a base de éter de sililo[59].

- **Ventajas:** Fácil modulación de las propiedades dinámicas en función de la concentración del iniciador aniónico y la densidad del reticulante.
- **Desventajas:** La degradación térmica parece ser un problema importante en los sistemas conocidos.

3.6 - METÁTESIS DE OLEFINAS

La mayoría de los enlaces covalentes dinámicos utilizados para diseñar vitrímeros implican heteroátomos en reacciones dinámicas de intercambio. La formación reversible de enlaces carbono-carbono resulta especialmente atractiva para este tipo de aplicaciones, ya que la gran estabilidad de los enlaces C-C puede ofrecer la posibilidad de diseñar polímeros dinámicos más resistentes.

Guan y colaboradores demostraron las posibilidades de la reacción de metátesis de olefinas en redes de polibutadieno reticulado que contienen catalizador Grubbs de segunda generación[60–62] :

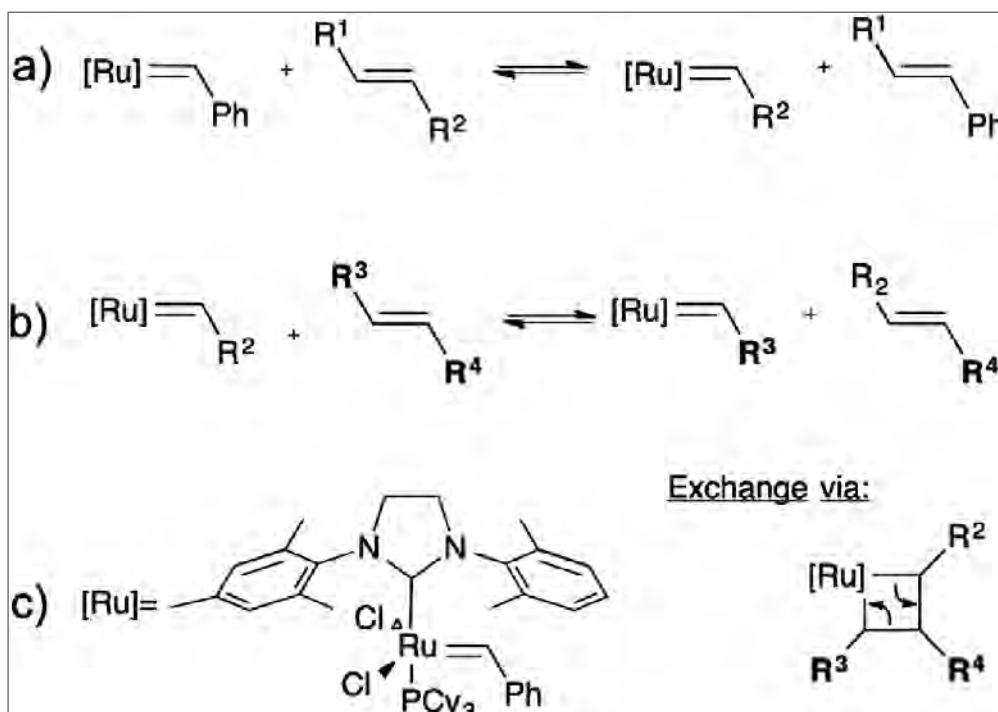


Figura 11: Reacción de intercambio por metátesis de olefinas, (a) inserción del catalizador de segunda generación de Grubbs en una cadena alquímica (b) intercambio de dos enlaces alquénicos (c) izquierda: estructura del catalizador de segunda generación de Grubbs; derecha: mecanismo de intercambio asociativo de una reacción de metátesis

El catalizador Grubbs de 2ª generación no es compatible con estas condiciones de reticulación, por lo que fue necesario introducir el catalizador mediante un experimento de hinchamiento.

- **Ventajas:** Buen enfoque para desarrollar elastómeros autoreparantes. Alta eficacia y eficiencia de reparación

mediante la formación dinámica de enlaces covalentes a temperaturas por debajo de la temperatura ambiente.

- **Desventajas:** No es fácil de aplicar en vitrímeros rígidos.

3.7 - REACCIONES DE INTERCAMBIO DE ÉSTERES BORÓNICOS

La esterificación de un ácido borónico con 1,2-diol o 1,3-diol conduce a la formación reversible de éster borónico en condiciones ambientales.

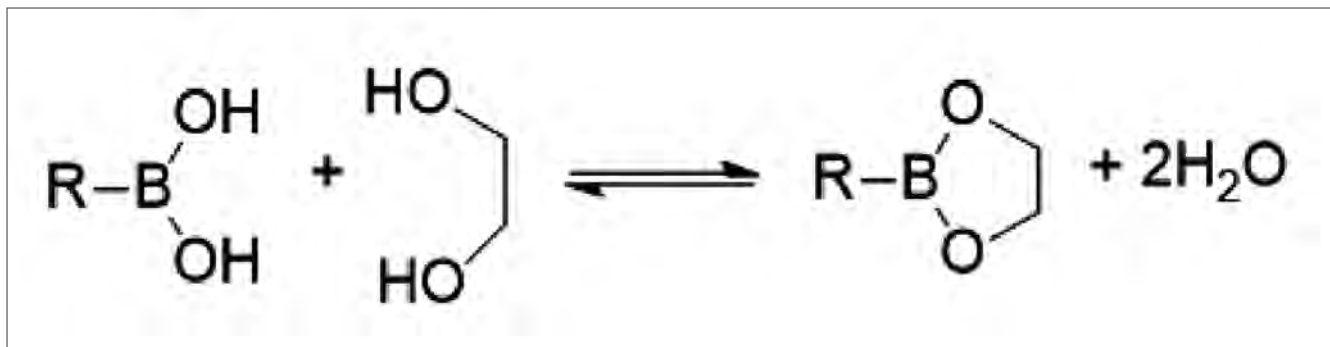


Figura 12: Reacciones de intercambio de ésteres borónicos

En medios acuosos, el equilibrio se favorece hacia los ésteres de boronato, cuando el pH está por encima del pKa de los ácidos borónicos, mientras que el equilibrio se desplaza hacia la formación de ácidos borónicos y dioles por debajo de este pKa[63].

Se puede acceder a la reversibilidad de los enlaces B-O en los ésteres borónicos y boroxinas a través de vías tanto disociativas como asociativas, lo que permite el ajuste fino de las propiedades del material.

Debido al rápido intercambio dinámico sin catalizador en condiciones ambientales y medios acuosos, esta reacción se ha utilizado en hidrogeles sensibles a estímulos con propiedades dinámicas.

Se necesitan nuevas estrategias para alcanzar el delicado equilibrio entre la capacidad de reprocesado y la resistencia a la fluencia.

- **Ventajas:** Los enlaces B-O reversibles han demostrado ser muy versátiles y prometedores como enlaces cruzados dinámicos para el diseño de polímeros autorreparantes y reprocesables.
- **Desventajas:** La rápida cinética de intercambio de enlaces dinámicos que permite la reprocesabilidad a temperatura ambiente conduce a materiales con baja resistencia al creep en condiciones moderadas. No aplicable a materiales estructurales.

3.8 - INTERCAMBIO DE DISULFUROS

El intercambio de disulfuro es una de las químicas de intercambio más estudiadas para el diseño de materiales dinámicos.

Las químicas basadas en azufre más comúnmente exploradas en este sentido son: (i) intercambio tiol/disulfuro, promovido por la presencia de tiolatos[64], e (ii) intercambio de disulfuros [43].

Intercambio tiol/disulfuro

El intercambio tiol/disulfuro es una de las químicas reversibles más populares.

El mecanismo de intercambio tiol-disulfuro implica el desplazamiento nucleofílico de un anión tiolato del disulfuro, mediante el ataque de otro anión tiolato[65-68].

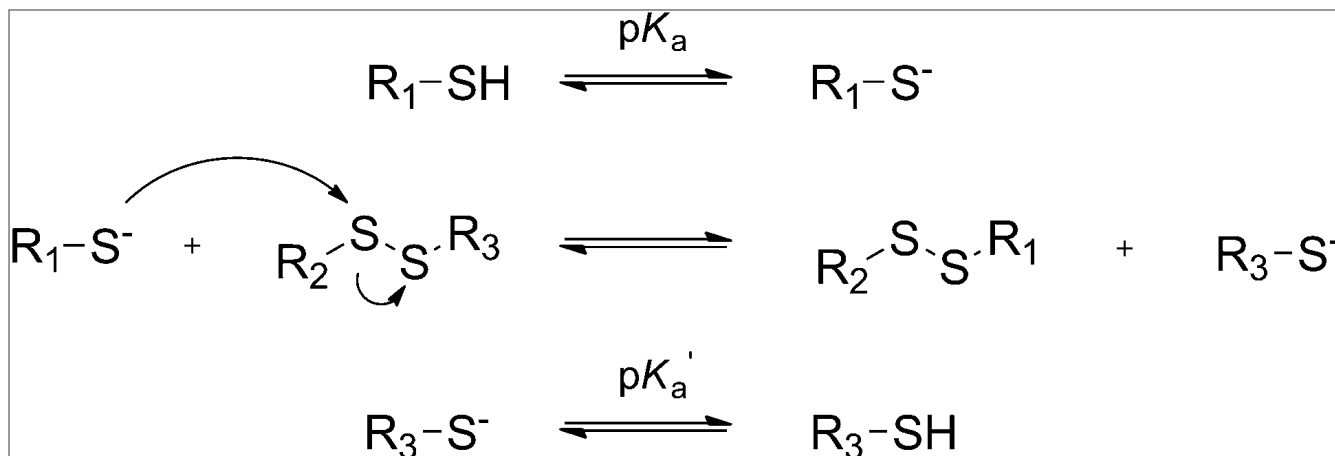


Figura 13: Reacción de intercambio tior / disulfuro

La reacción requiere un tior desprotonado, la reacción puede controlarse catalíticamente elevando el pH por encima de las condiciones neutras, normalmente utilizando acelerantes de base amina. Esta química se ha empleado en polímeros para muchas aplicaciones diferentes[65–68].

- **Ventajas:** Química bien conocida. Escalable y aplicable en gran cantidad de polímeros.
- **Desventajas:** La fácil oxidación en aire de tiolatos en medio neutro y básico hace que disminuya el mecanismo de los materiales.

INTERCAMBIO DE DISULFUROS

El intercambio de disulfuros es una de las químicas más empleadas para síntesis de vitrimeros. Según la bibliografía, el intercambio de disulfuros se produce en presencia de catalizadores, a temperaturas moderadas o bajo radiación UV a temperatura ambiente. En las redes basadas en disulfuros, se han descrito procesos tanto disociativos como asociativos[69].

El mecanismo de intercambio de disulfuro puede ocurrir por vía aniónica o radicalaria. En la vía aniónica, el ataque del anión tiolato al enlace disulfuro forma un nuevo enlace disulfuro y aniones tiolato a través de la escisión heterolítica del enlace S-S, donde el anión tiolato se genera en condiciones básicas o por adición de catalizadores (A)[70,71]. La vía radicalaria incluye la escisión homolítica del enlace S-S y la transferencia del radical y la reacción cruzada en respuesta a la luz (B)[72] o mediante la adición de un iniciador radical (C)[73]. La metátesis de disulfuro aromático en se ha estudiado ampliamente y se ha demostrado que funciona también a temperatura ambiente (D)[34,35,74–76].

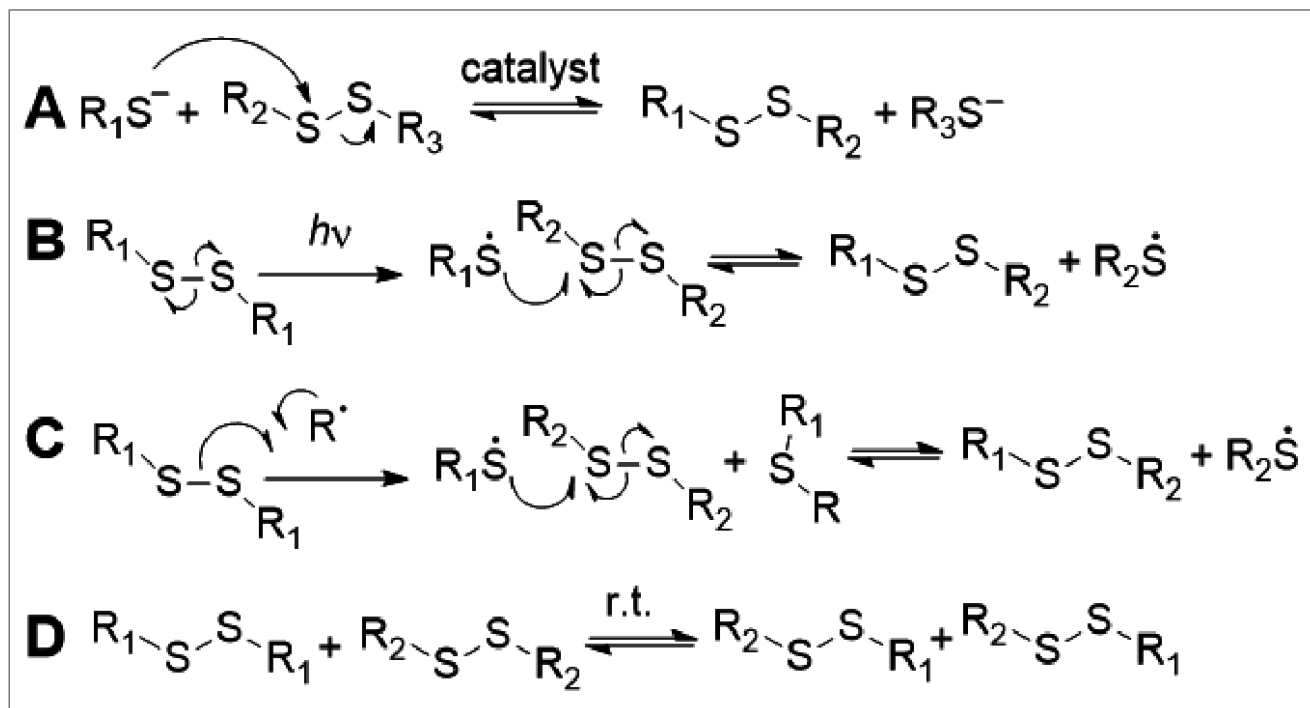


Figura 14: Reacción de intercambio de disulfuros

Los disulfuros aromáticos han demostrado gran dinamismo y son uno de los enlaces más empleados para la obtención de vitrimeros. Se ha demostrado por varios grupos que el intercambio de disulfuros aromáticos ocurre por vía radicalaria y no por metátesis. Las moléculas de disulfuro aromático, que pueden incorporarse fácilmente a los sistemas poliméricos. Los disulfuros aromáticos se emplea con éxito por CIDETEC y otros para la preparación de nuevos sistemas poliméricos dinámicos, como elastómeros de poli(urea-uretano) sin catalizador[44], autorreparables y procesables térmicamente, o composites epoxi reprocesables, reparables y reciclable[34,35,77-79].

A día de hoy, los disulfuros aromáticos son los enlaces dinámicos más prometedores para obtener materiales vitriméricos comerciales de alto rendimiento

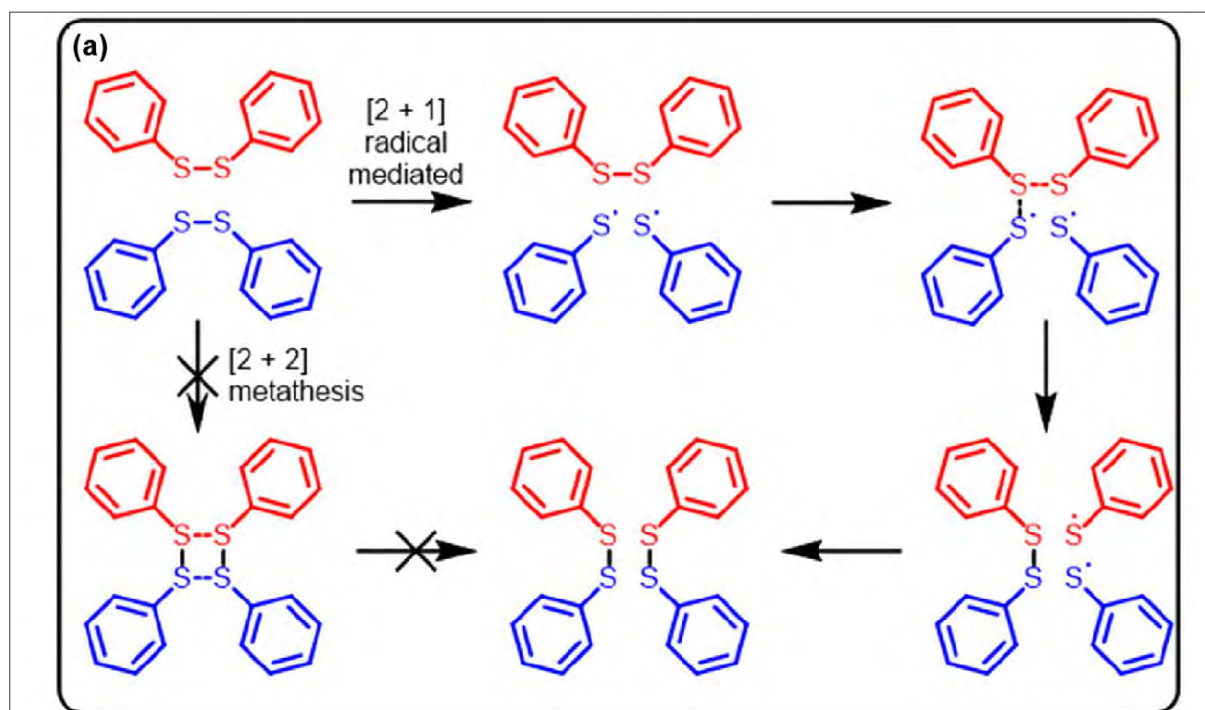


Figura 15: Reacción de intercambio de disulfuros aromáticos



- **Ventajas:** Fácil industrialización. Se puede obtener un control preciso de la cinética de intercambio. Tiempos de relajación bajos a altas temperaturas. Posibilidad de obtener vitrímeros con un amplio rango de Tgs (-40 °C – 190 °C). Alta resistencia a disolventes siendo fácilmente soluble en agentes químicos específicos. Fácil reprocesado y reparación.
- **Desventajas:** Estabilidad térmica hasta 210 °C.

La fácil disponibilidad del disulfuro de 4-aminofenilo (4-AFD) convierte a los vitrímeros epoxídicos que contienen disulfuro aromático en uno de los materiales más versátiles y en los principales candidatos para su implantación en aplicaciones industriales. Ofrecen muchas ventajas en comparación con otros vitrímeros existentes: escalabilidad, simplicidad, fácil procesamiento y excelentes propiedades mecánicas, y su uso en aplicaciones industriales es sencillo.

4 - PRODUCTOS COMERCIALES

Actualmente se conocen dos familias de resinas vitriméricas disponibles en el mercado. **Mallinda** (EE.UU.) comercializa la familia de vitrímeros VITRIMAX™. Estos vitrímeros se basan en una resina termoestable de poliimida que se puede formular a partir de una combinación de reticulantes de diamina, dialdehído y triamina mediante la condensación de imina en ausencia de cualquier catalizador. Esta familia de resinas permite la soldadura covalente, el moldeo, el remoldeo y el reciclado, y actualmente se comercializan dos resinas, con valores de Tg de 100°C y 130°C respectivamente[80]. **ATSP Innovations** (EEUU) comercializa una familia de polímeros de alta temperatura y alto rendimiento denominados copoliésteres termoendurecibles aromáticos, bajo las marcas comerciales Estherm™, Self-Bond™ y NOWE™, diseñados para su uso en aplicaciones tribológicas, adhesivas, estructurales y electrónicas. Permiten su reciclado como los termoplásticos, así como la des-unión y re-unión adhesiva. Estos vitrímeros están basados en reacciones de transesterificación y son estables hasta al menos 350 °C[81].

Además, existe otras familias de resinas disponibles comercialmente que no están clasificadas como vitrímeros sino que se basan en diversas químicas dinámicas. **Aditya Birla Chemicals** (India), comercializa la tecnología Recyclamine, originalmente perteneciente a Connora Technologies, que es una familia de agentes de curado basados en aminas que contienen puntos de escisión diseñados de forma específica, los cuales, bajo condiciones predeterminadas convierten las resinas epoxi termoestables con las que se combina en termoplásticos. Ello permite sumergir el composite en un solvente de bajo pH a temperatura elevada, convirtiendo la resina en un epoxi termoplástico mientras se libera el tejido, de manera que tanto la resina como la fibra pueden reutilizarse[82]. Sus valores típicos de Tg oscilan entre 90°C y 130°C. Actualmente ofrecen dos categorías de productos basados en la tecnología Recyclamine: la serie Briozen Recyclable (sistemas formulados con epoxi basados en la tecnología Recyclamine) y los bloques de construcción Recyclamine. **Swancor** (Taiwán) comercializa dos nuevos productos, EzCiclo y CleaVER. Concretamente EzCiclo es una resina epoxi que puede ser reciclada mediante solvólisis con el solvente CleaVER, de manera que se pueden separar los tejidos de la resina, que se recupera en forma de oligómeros[83].

Finalmente, cabe mencionar varias familias de termoplásticos en el mercado basados en enfoques de desreticulación inversa que son termoformables, soldables y reciclables. **Arkema** (Francia), comercializa la resina Elium, un termoplástico de metacrilato de metilo (MMA) que, como una resina termoestable, exhibe altas propiedades mecánicas. Los composites fabricados con resina Elium se pueden reciclar después del final de su vida útil de dos maneras diferentes. La primera implica triturar y hacer un compounding de fibra corta y la segunda se basa en un proceso de termólisis que permite la recuperación de fibras y monómeros mediante despolimerización. La temperatura máxima continua en servicio de estas resinas es de 85°C[84]. **Cecence** (Reino Unido) comercializa una familia de productos bajo la marca K_Series: K_Chip, K_Plate y K_Rod, todos ellos basados en enfoques de descruzamiento inverso, con una temperatura máxima de uso continuo de 100°C[85]. **SustFibre** (España), spin-off creada por el CSIC, comercializa la resina acrílica Akelite, con buenas propiedades mecánicas y la capacidad de ser termoconformada y soldada tras su curado. Además, la fibra puede recuperarse mediante inmersión del composite en acetona[86].

La siguiente tabla resume las principales características de los productos comerciales mencionados:

Producto	Química	Funcionalidades que ofrecen	Límite térmico
VITRIMAX™ (Mallinda)	Vitrimero (poliimida termoestable con una combinación de endurecedores de diamina, dialdehído y triamine, basado en reacciones de intercambio imina-amina)	Soldadura, moldeo y reciclado mediante disolución	Tg=130°C



Estherm TM , Self-Bond TM , NOWE TM (ATSP)	Vitrimer (copoliésteres termoendurecibles aromáticos, basado en reacciones de transesterificación)	Reciclado similar a termoplásticos, uniones/des-uniones/re-uniones adhesivas	T _{uso} =350°C
Recyclamine (Aditya Birla)	Química dinámica (endurecedor de éter de poliamina escisable para epoxi termoestable)	Reciclado mediante disolución	T _g =110°C
EzCiclo (Swancor)	Química dinámica	Reciclado mediante disolución con CleaVER	Desconocido
Elium (Arkema)	Termoplástico (Metacrilato de metilo MMA que polimeriza con peróxidos)	Soldadura, moldeo y reciclado mediante disolución o compounding	T _{uso} = 85°C
K-series (Cecence)	Termoplástico (epoxi polimerizable in situ)	Moldeo y reciclado basado en re-moldeo.	T _{uso} = 100°C
Akelite (SustFibre)	Termoplástico (resina acrílica reactiva que polimeriza con peróxido de benzoílo)	Soldadura, termoconformado y reciclado mediante disolución en acetona	Desconocido

Tabla 1: Productos comerciales basados en químicas dinámicas

5 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] Andradý, A.L.; Neal, M.A. Applications and Societal Benefits of Plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **2009**, 364, 1977–1984, doi:10.1098/rstb.2008.0304.
- [2] Cantor, K.M.; Watts, P. 12 - Plastics Processing. In *Applied Plastics Engineering Handbook*; Kutz, M., Ed.; William Andrew Publishing: Oxford, 2011; pp. 195–203 ISBN 978-1-4377-3514-7.
- [3] Vidil, T.; Tournilhac, F.; Musso, S.; Robisson, A.; Leibler, L. Control of Reactions and Network Structures of Epoxy Thermosets. *Prog Polym Sci* **2016**, 62, 126–179, [doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.06.003>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.06.003>.]
- [4] Helms, B.A.; Russell, T.P. Reaction: Polymer Chemistries Enabling Cradle-to-Cradle Life Cycles for Plastics. *Chem* **2016**, 1, 816–818.
- [5] Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. Plastics Recycling: Challenges and Opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **2009**, 364, 2115–2126.
- [6] Post, W.; Susa, A.; Blaauw, R.; Molenveld, K.; Knoop, R.J.I. A Review on the Potential and Limitations of Recyclable Thermosets for Structural Applications. *Polymer Reviews* **2020**, 60, 359–388, doi:10.1080/15583724.2019.1673406.
- [7] Bin Rusayyis, M.; Torkelson, J.M. Recyclable Polymethacrylate Networks Containing Dynamic Dialkylamino Disulfide Linkages and Exhibiting Full Property Recovery. *Macromolecules* **2020**, 53, 8367–8373, doi:10.1021/acs.macromol.0c01539.
- [8] Majumdar, S.; Zhang, H.; Soleimani, M.; van Benthem, R.A.T.M.; Heuts, J.P.A.; Sijbesma, R.P. Phosphate Triester Dynamic Covalent Networks. *ACS Macro Lett* **2020**, 9, 1753–1758, doi:10.1021/acsmacrolett.0c00636.
- [9] Kloxin, C.J.; Bowman, C.N. Covalent Adaptable Networks: Smart, Reconfigurable and Responsive Network Systems. *Chem Soc Rev* **2013**, 42, 7161–7173, doi:10.1039/C3CS60046G.
- [10] Bowman, C.; Du Prez, F.; Kalow, J. Introduction to Chemistry for Covalent Adaptable Networks. *Polym Chem* **2020**, 11, 5295–5296, doi:10.1039/D0PY90102D.
- [11] Kloxin, C.J.; Scott, T.F.; Adzima, B.J.; Bowman, C.N. Covalent Adaptable Networks (CANs): A Unique Paradigm in Cross-Linked Polymers. *Macromolecules* **2010**, 43, 2643–2653, doi:10.1021/ma902596s.
- [12] Alabiso, W.; Schlögl, S. The Impact of Vitrimers on the Industry of the Future: Chemistry, Properties and Sustainable Forward-Looking Applications. *Polymers (Basel)* **2020**, 12, doi:10.3390/polym12081660.
- [13] Van Zee, N.J.; Nicolaÿ, R. Vitrimers: Permanently Crosslinked Polymers with Dynamic Network Topology. *Prog*



Polym Sci **2020**, *104*, 101233, [doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101233>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101233>.]

[14] Chakma, P.; Konkolewicz, D. Dynamic Covalent Bonds in Polymeric Materials. *Angewandte Chemie International Edition* **2019**, *58*, 9682–9695, [doi:<https://doi.org/10.1002/anie.201813525>. doi:<https://doi.org/10.1002/anie.201813525>.]

[15] Scheutz, G.M.; Lessard, J.J.; Sims, M.B.; Sumerlin, B.S. Adaptable Crosslinks in Polymeric Materials: Resolving the Intersection of Thermoplastics and Thermosets. *J Am Chem Soc* **2019**, *141*, 16181–16196, doi:10.1021/jacs.9b07922.

[16] Podgórski, M.; Fairbanks, B.D.; Kirkpatrick, B.E.; McBride, M.; Martinez, A.; Dobson, A.; Bongiardina, N.J.; Bowman, C.N. Toward Stimuli-Responsive Dynamic Thermosets through Continuous Development and Improvements in Covalent Adaptable Networks (CANs). *Advanced Materials* **2020**, *32*, 1906876, [doi:<https://doi.org/10.1002/adma.201906876>. doi:<https://doi.org/10.1002/adma.201906876>.]

[17] Porath, L.E.; Evans, C.M. Importance of Broad Temperature Windows and Multiple Rheological Approaches for Probing Viscoelasticity and Entropic Elasticity in Vitrimers. *Macromolecules* **2021**, *54*, 4782–4791, doi:10.1021/acs.macromol.0c02800.

[18] Lessard, J.J.; Scheutz, G.M.; Sung, S.H.; Lantz, K.A.; Epps, T.H.I.I.I.; Sumerlin, B.S. Block Copolymer Vitrimers. *J Am Chem Soc* **2020**, *142*, 283–289, doi:10.1021/jacs.9b10360.

[19] Ling, F.; Liu, Z.; Chen, M.; Wang, H.; Zhu, Y.; Ma, C.; Wu, J.; Huang, G. Compatibility Driven Self-Strengthening during the Radical-Responsive Remolding Process of Poly-Isoprene Vitrimers. *J Mater Chem A Mater* **2019**, *7*, 25324–25332, doi:10.1039/C9TA09292G.

[20] Li, L.; Chen, X.; Jin, K.; Rusayyis, M. Bin; Torkelson, J.M. Arresting Elevated-Temperature Creep and Achieving Full Cross-Link Density Recovery in Reprocessable Polymer Networks and Network Composites via Nitroxide-Mediated Dynamic Chemistry. *Macromolecules* **2021**, *54*, 1452–1464, doi:10.1021/acs.macromol.0c01691.

[21] Meng, F.; Saed, M.O.; Terentjev, E.M. Elasticity and Relaxation in Full and Partial Vitremer Networks. *Macromolecules* **2019**, *52*, 7423–7429, doi:10.1021/acs.macromol.9b01123.

[22] Porath, L.E.; Evans, C.M. Importance of Broad Temperature Windows and Multiple Rheological Approaches for Probing Viscoelasticity and Entropic Elasticity in Vitrimers. *Macromolecules* **2021**, *54*, 4782–4791, doi:10.1021/acs.macromol.0c02800.

[23] Jourdain, A.; Asbai, R.; Anaya, O.; Chehimi, M.M.; Drockenmuller, E.; Montarnal, D. Rheological Properties of Covalent Adaptable Networks with 1,2,3-Triazolium Cross-Links: The Missing Link between Vitrimers and Dissociative Networks. *Macromolecules* **2020**, *53*, 1884–1900, doi:10.1021/acs.macromol.9b02204.

[24] Fortman, D.J.; Brutman, J.P.; Cramer, C.J.; Hillmyer, M.A.; Dichtel, W.R. Mechanically Activated, Catalyst-Free Polyhydroxyurethane Vitrimers. *J Am Chem Soc* **2015**, *137*, 14019–14022, doi:10.1021/jacs.5b08084.

[25] Brutman, J.P.; Fortman, D.J.; De Hoe, G.X.; Dichtel, W.R.; Hillmyer, M.A. Mechanistic Study of Stress Relaxation in Urethane-Containing Polymer Networks. *J Phys Chem B* **2019**, *123*, 1432–1441, doi:10.1021/acs.jpcc.8b11489.

[26] Elling, B.R.; Dichtel, W.R. Reprocessable Cross-Linked Polymer Networks: Are Associative Exchange Mechanisms Desirable? *ACS Cent Sci* **2020**, *6*, 1488–1496, doi:10.1021/acscentsci.0c00567.

[27] Guerre, M.; Taplan, C.; Winne, J.M.; Du Prez, F.E. Vitrimers: Directing Chemical Reactivity to Control Material Properties. *Chem. Sci.* **2020**, *11*, 4855–4870, doi:10.1039/D0SC01069C.

[28] Obadia, M.M.; Jourdain, A.; Cassagnau, P.; Montarnal, D.; Drockenmuller, E. Tuning the Viscosity Profile of Ionic Vitrimers Incorporating 1,2,3-Triazolium Cross-Links. *Adv Funct Mater* **2017**, *27*, 1703258, [doi:<https://doi.org/10.1002/adfm.201703258>. doi:<https://doi.org/10.1002/adfm.201703258>.]

[29] Yang, Y.; Terentjev, E.M.; Wei, Y.; Ji, Y. Solvent-Assisted Programming of Flat Polymer Sheets into Reconfigurable and Self-Healing 3D Structures. *Nat Commun* **2018**, *9*, 1906, doi:10.1038/s41467-018-04257-x.

[30] Van Lijsebetten, F.; Holloway, J.O.; Winne, J.M.; Du Prez, F.E. Internal Catalysis for Dynamic Covalent Chemistry Applications and Polymer Science. *Chem Soc Rev* **2020**, *49*, 8425–8438, doi:10.1039/D0CS00452A.

[31] Cuminet, F.; Caillol, S.; Dantras, É.; Leclerc, É.; Ladmiral, V. Neighboring Group Participation and Internal Catalysis Effects on Exchangeable Covalent Bonds: Application to the Thriving Field of Vitremer Chemistry. *Macromolecules* **2021**, *54*, 3927–3961, doi:10.1021/acs.macromol.0c02706.



- [32] Zhang, H.; Majumdar, S.; van Benthem, R.A.T.M.; Sijbesma, R.P.; Heuts, J.P.A. Intramolecularly Catalyzed Dynamic Polyester Networks Using Neighboring Carboxylic and Sulfonic Acid Groups. *ACS Macro Lett* **2020**, *9*, 272–277, doi:10.1021/acsmacrolett.9b01023.
- [33] Delahaye, M.; Tanini, F.; Holloway, J.O.; Winne, J.M.; Du Prez, F.E. Double Neighbouring Group Participation for Ultrafast Exchange in Phthalate Monoester Networks. *Polym Chem* **2020**, *11*, 5207–5215, doi:10.1039/D0PY00681E.
- [34] Ruiz de Luzuriaga, A.; Martin, R.; Markaide, N.; Rekondo, A.; Cabanero, G.; Rodriguez, J.; Odriozola, I. Epoxy Resin with Exchangeable Disulfide Crosslinks to Obtain Reprocessable, Repairable and Recyclable Fiber-Reinforced Thermoset Composites. *Mater Horiz* **2016**, *3*, 241–247, doi:10.1039/c6mh00029k.
- [35] Ruiz de Luzuriaga, A.; Martin, R.; Markaide, N.; Rekondo, A.; Cabanero, G.; Rodriguez, J.; Odriozola, I. Correction: Epoxy Resin with Exchangeable Disulfide Crosslinks to Obtain Reprocessable, Repairable and Recyclable Fiber-Reinforced Thermoset Composites. *Mater Horiz* **2020**, *7*, 2460–2461, doi:10.1039/d0mh90047h.
- [36] Rowan, S.J.; Cantrill, S.J.; Cousins, G.R.L.; Sanders, J.K.M.; Stoddart, J.F. Dynamic Covalent Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition* **2002**, *41*, 898–952, doi:10.1002/1521-3773(20020315)41:6<898::AID-ANIE898>3.0.CO;2-E.
- [37] Wojtecki, R.J.; Meador, M.A.; Rowan, S.J. Using the Dynamic Bond to Access Macroscopically Responsive Structurally Dynamic Polymers. *Nat Mater* **2011**, *10*, 14–27, doi:10.1038/nmat2891.
- [38] Roy, N.; Bruchmann, B.; Lehn, J.-M. DYNAMERS: Dynamic Polymers as Self-Healing Materials. *Chem Soc Rev* **2015**, *44*, 3786–3807, doi:10.1039/C5CS00194C.
- [39] Maeda, T.; Otsuka, H.; Takahara, A. Dynamic Covalent Polymers: Reorganizable Polymers with Dynamic Covalent Bonds. *Prog Polym Sci* **2009**, *34*, 581–604, doi:10.1016/j.progpolymsci.2009.03.001.
- [40] Chen, X.; Dam, M.A.; Ono, K.; Mal, A.; Shen, H.; Nutt, S.R.; Sheran, K.; Wudl, F. A Thermally Re-Mendable Cross-Linked Polymeric Material. *Science (1979)* **2002**, *295*, 1698–1702, doi:10.1126/science.1065879.
- [41] Denissen, W.; Rivero, G.; Nicolaÿ, R.; Leibler, L.; Winne, J.M.; Du Prez, F.E. Vinylogous Urethane Vitrimers. *Adv Funct Mater* **2015**, *25*, 2451–2457, doi:10.1002/adfm.201404553.
- [42] Bowman, C.N.; Kloxin, C.J. Covalent Adaptable Networks: Reversible Bond Structures Incorporated in Polymer Networks. *Angewandte Chemie International Edition* **2012**, *51*, 4272–4274, doi:10.1002/anie.201200708.
- [43] Azcune, I.; Odriozola, I. Aromatic Disulfide Crosslinks in Polymer Systems: Self-Healing, Reprocessability, Recyclability and More. *Eur Polym J* **2016**, *84*, 147–160, doi:10.1016/j.eurpolymj.2016.09.023.
- [44] Erice, A.; Ruiz de Luzuriaga, A.; Matxain, J.M.; Ruipérez, F.; Asua, J.M.; Grande, H.-J.; Rekondo, A. Reprocessable and Recyclable Crosslinked Poly(Urea-Urethane)s Based on Dynamic Amine/Urea Exchange. *Polymer (Guildf)* **2018**, *145*, 127–136, doi:10.1016/j.polymer.2018.04.076.
- [45] Winne, J.M.; Leibler, L.; Du Prez, F.E. Dynamic Covalent Chemistry in Polymer Networks: A Mechanistic Perspective. *Polym Chem* **2019**, *10*, 6091–6108, doi:10.1039/C9PY01260E.
- [46] Montarnal, D.; Capelot, M.; Tournilhac, F.; Leibler, L. Silica-Like Malleable Materials from Permanent Organic Networks. *Science (1979)* **2011**, *334*, 965–968, doi:10.1126/science.1212648.
- [47] Denissen, W.; Winne, J.M.; Du Prez, F.E. Vitrimers: Permanent Organic Networks with Glass-like Fluidity. *Chem Sci* **2016**, *7*, 30–38, doi:10.1039/C5SC02223A.
- [48] Krishnakumar, B.; Sanka, R.V.S.P.; Binder, W.H.; Parthasarthy, V.; Rana, S.; Karak, N. Vitrimers: Associative Dynamic Covalent Adaptive Networks in Thermoset Polymers. *Chemical Engineering Journal* **2020**, *385*, 123820, [doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123820>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123820>.]
- [49] Self, J.L.; Dolinski, N.D.; Zayas, M.S.; Read de Alaniz, J.; Bates, C.M. Brønsted-Acid-Catalyzed Exchange in Polyester Dynamic Covalent Networks. *ACS Macro Lett* **2018**, *7*, 817–821, doi:10.1021/acsmacrolett.8b00370.
- [50] Otera, Junzo. Transesterification. *Chem Rev* **1993**, *93*, 1449–1470, doi:10.1021/cr00020a004.
- [51] Yu, K.; Taynton, P.; Zhang, W.; Dunn, M.L.; Qi, H.J. Reprocessing and Recycling of Thermosetting Polymers Based on Bond Exchange Reactions. *RSC Adv.* **2014**, *4*, 10108–10117, doi:10.1039/C3RA47438K.
- [52] Obadia, M.M.; Mudraboyina, B.P.; Serghei, A.; Montarnal, D.; Drockenmüller, E. Reprocessing and Recycling of Highly Cross-Linked Ion-Conducting Networks through Transalkylation Exchanges of C–N Bonds. *J Am Chem Soc* **2015**,



137, 6078–6083, doi:10.1021/jacs.5b02653.

[53] Kantor, S.W.; Grubb, W.T.; Osthoff, R.C. The Mechanism of the Acid- and Base-Catalyzed Equilibration of Siloxanes. *J Am Chem Soc* **1954**, 76, 5190–5197, doi:10.1021/ja01649a076.

[54] Osthoff, R.C.; Bueche, A.M.; Grubb, W.T. Chemical Stress-Relaxation of Polydimethylsiloxane Elastomers ¹. *J Am Chem Soc* **1954**, 76, 4659–4663, doi:10.1021/ja01647a052.

[55] Gilbert, A.R.; Kantor, S.W. Transient Catalysts for the Polymerization of Organosiloxanes. *Journal of Polymer Science* **1959**, 40, 35–58, doi:10.1002/pol.1959.1204013603.

[56] Schmolke, W.; Perner, N.; Seiffert, S. Dynamically Cross-Linked Polydimethylsiloxane Networks with Ambient-Temperature Self-Healing. *Macromolecules* **2015**, 48, 8781–8788, doi:10.1021/acs.macromol.5b01666.

[57] Wu, X.; Yang, X.; Yu, R.; Zhao, X.-J.; Zhang, Y.; Huang, W. A Facile Access to Stiff Epoxy Vitrimers with Excellent Mechanical Properties via Siloxane Equilibration. *J Mater Chem A Mater* **2018**, 6, 10184–10188, doi:10.1039/C8TA02102C.

[58] Li, X.; Yu, R.; Zhao, T.; Zhang, Y.; Yang, X.; Zhao, X.; Huang, W. A Self-Healing Polysiloxane Elastomer Based on Siloxane Equilibration Synthesized through Amino-Ene Michael Addition Reaction. *Eur Polym J* **2018**, 108, 399–405, doi:10.1016/j.eurpolymj.2018.09.021.

[59] Nishimura, Y.; Chung, J.; Muradyan, H.; Guan, Z. Silyl Ether as a Robust and Thermally Stable Dynamic Covalent Motif for Malleable Polymer Design. *J Am Chem Soc* **2017**, 139, 14881–14884, doi:10.1021/jacs.7b08826.

[60] Scholl, M.; Ding, S.; Lee, C.W.; Grubbs, R.H. Synthesis and Activity of a New Generation of Ruthenium-Based Olefin Metathesis Catalysts Coordinated with 1,3-Dimesityl-4,5-Dihydroimidazol-2-Ylidene Ligands. *Org Lett* **1999**, 1, 953–956, doi:10.1021/ol990909q.

[61] Lu, Y.-X.; Guan, Z. Olefin Metathesis for Effective Polymer Healing via Dynamic Exchange of Strong Carbon–Carbon Double Bonds. *J Am Chem Soc* **2012**, 134, 14226–14231, doi:10.1021/ja306287s.

[62] Lu, Y.-X.; Tournilhac, F.; Leibler, L.; Guan, Z. Making Insoluble Polymer Networks Malleable via Olefin Metathesis. *J Am Chem Soc* **2012**, 134, 8424–8427, doi:10.1021/ja303356z.

[63] Roy, D.; Cambre, J.N.; Sumerlin, B.S. Triply-Responsive Boronic Acid Block Copolymers: Solution Self-Assembly Induced by Changes in Temperature, PH, or Sugar Concentration. *Chemical Communications* **2009**, 2106, doi:10.1039/b900374f.

[64] Fernandes, P.A.; Ramos, M.J. Theoretical Insights into the Mechanism for Thiol/Disulfide Exchange. *Chemistry – A European Journal* **2004**, 10, 257–266, doi:10.1002/chem.200305343.

[65] Canadell, J.; Goossens, H.; Klumperman, B. Self-Healing Materials Based on Disulfide Links. *Macromolecules* **2011**, 44, 2536–2541, doi:10.1021/ma2001492.

[66] An, S.Y.; Noh, S.M.; Nam, J.H.; Oh, J.K. Dual Sulfide–Disulfide Crosslinked Networks with Rapid and Room Temperature Self-Healability. *Macromol Rapid Commun* **2015**, 36, 1255–1260, doi:10.1002/marc.201500123.

[67] Pepels, M.; Filot, I.; Klumperman, B.; Goossens, H. Self-Healing Systems Based on Disulfide–Thiol Exchange Reactions. *Polym Chem* **2013**, 4, 4955, doi:10.1039/c3py00087g.

[68] Gyarmati, B.; Némethy, Á.; Szilágyi, A. Reversible Disulphide Formation in Polymer Networks: A Versatile Functional Group from Synthesis to Applications. *Eur Polym J* **2013**, 49, 1268–1286, doi:10.1016/j.eurpolymj.2013.03.001.

[69] Nevejans, S.; Ballard, N.; Miranda, J.I.; Reck, B.; Asua, J.M. The Underlying Mechanisms for Self-Healing of Poly(Disulfide)s. *Physical Chemistry Chemical Physics* **2016**, 18, 27577–27583, doi:10.1039/C6CP04028D.

[70] Black, S.P.; Sanders, J.K.M.; Stefankiewicz, A.R. Disulfide Exchange: Exposing Supramolecular Reactivity through Dynamic Covalent Chemistry. *Chem. Soc. Rev.* **2014**, 43, 1861–1872, doi:10.1039/C3CS60326A.

[71] García, F.; Smulders, M.M.J. Dynamic Covalent Polymers. *J Polym Sci A Polym Chem* **2016**, 54, 3551–3577, doi:10.1002/pola.28260.

[72] Banchereau, E.; Lacombe, S.; Ollivier, J. Solution Reactivity of Thiyl Radicals with Molecular Oxygen: Unsensitized Photooxidation of Dimethyldisulfide. *Tetrahedron Lett* **1995**, 36, 8197–8200, doi:10.1016/0040-4039(95)01698-H.



- [73] Fairbanks, B.D.; Singh, S.P.; Bowman, C.N.; Anseth, K.S. Photodegradable, Photoadaptable Hydrogels via Radical-Mediated Disulfide Fragmentation Reaction. *Macromolecules* **2011**, *44*, 2444–2450, doi:10.1021/ma200202w.
- [74] Ruiz de Luzuriaga, A.; Matxain, J.M.; Ruiperez, F.; Martin, R.; Asua, J.M.; Cabanero, G.; Odriozola, I. Transient Mechanochromism in Epoxy Vitrimers Composites Containing Aromatic Disulfide Crosslinks. *Journal of Materials Chemistry C: Materials for Optical and Electronic Devices* **2016**, *4*, 6220–6223, doi:10.1039/c6tc02383e.
- [75] Ruiz de Luzuriaga, A.; Solera, G.; Azcarate-Ascasua, I.; Boucher, V.; Grande, H.-J.; Rekondo, A. Chemical Control of the Aromatic Disulfide Exchange Kinetics for Tailor-Made Epoxy Vitrimers. *Polymer (Guildf)* **2022**, *239*, 124457, doi:10.1016/j.polymer.2021.124457.
- [76] Rekondo, A.; Martin, R.; Ruiz de Luzuriaga, A.; Cabañero, G.; Grande, H.J.; Odriozola, I. Catalyst-Free Room-Temperature Self-Healing Elastomers Based on Aromatic Disulfide Metathesis. *Mater. Horiz.* **2014**, *1*, 237–240, doi:10.1039/C3MH00061C.
- [77] Ruiz de Luzuriaga, A.; Markaide, N.; Salaberria, A.M.; Azcune, I.; Rekondo, A.; Grande, H.J. Aero Grade Epoxy Vitrimers towards Commercialization. *Polymers (Basel, Switzerland)* **2022**, *14*, 3180, doi:10.3390/polym14153180.
- [78] Kosarli, M.; Foteinidis, G.; Tsirka, K.; Markaide, N.; Ruiz de Luzuriaga, A.; Zapateria, D.C.; Weidmann, S.; Paipetis, A.S. 3R Composites: Knockdown Effect Assessment and Repair Efficiency via Mechanical and NDE Testing. *Applied Sciences* **2022**, *12*, 7269, doi:10.3390/app12147269.
- [79] Builes Cardenas, C.; Gayraud, V.; Rodriguez, M.E.; Costa, J.; Salaberria, A.M.; Ruiz de Luzuriaga, A.; Markaide, N.; Dasan Keeryadath, P.; Calderon Zapateria, D. Study into the Mechanical Properties of a New Aeronautic-Grade Epoxy-Based Carbon-Fiber-Reinforced Vitrimers. *Polymers (Basel, Switzerland)* **2022**, *14*, 1223, doi:10.3390/polym14061223.
- [80] Taynton, P.; Ni, H.; Zhu, C.; Yu, K.; Loob, S.; Jin, Y.; Qi, H.J.; Zhang, W. Repairable Woven Carbon Fiber Composites with Full Recyclability Enabled by Malleable Polyimine Networks. *Advanced Materials* **2016**, *28*, doi:10.1002/adma.201505245.
- [81] Frich, D.; Goranov, K.; Schneggenburger, L.; Economy, J. Novel High-Temperature Aromatic Copolyester Thermosets: Synthesis, Characterization, and Physical Properties. *Macromolecules* **1996**, *29*, doi:10.1021/ma960862d.
- [82] La Rosa, A.D.; Blanco, I.; Banatao, D.R.; Pastine, S.J.; Björklund, A.; Cicala, G. Innovative Chemical Process for Recycling Thermosets Cured with Recyclamines® by Converting Bio-Epoxy Composites in Reusable Thermoplastic-an LCA Study. *Materials* **2018**, *11*, doi:10.3390/ma11030353.
- [83] <https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/swancor-launched-recyclable-thermosetting-epoxy-resin-eziclo-leading-to-zero-carbon-era/>.
- [84] https://www.arkema.com/global/en/products/product-finder/product-range/incubator/elium_resins/.
- [85] <https://cecence.com/products-services/>.
- [86] Carnicero, R.; Cano, L.; Lopez-Manchado, M.A.; Verdejo, R. Manufacturing, Testing and Recycling of a Small Recyclable Wind Turbine Blade. In Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series; 2022; Vol. 2265.



Capítulo 18: RESINAS TERMOPLÁSTICAS REACTIVAS

Cristina Elizetxea¹, S. García-Arrieta¹, A. de la Calle¹, M.A. López Manchado², Raquel Verdejo², A. Santiago-Bethencourt²

¹ Área de Aeroespacial, División de Industria y Transporte, TECNALIA

² Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC

Abstract

One of the main challenges currently faced by the composite materials sector is to ensure its sustainability, both at the level of the raw materials used, the production means necessary for its transformation, as well as its management and treatment at the end of its useful life.

Especially critical is the situation of thermostable composite materials, widely used in structural applications due to their excellent performance/weight ratio. There are different fields of research, oriented towards the search for more sustainable alternatives for these matrices so that these high mechanical performances continue to be guaranteed and that they can be transformed by conventional manufacturing processes.

Reactive thermoplastic resins are a sustainable alternative for the manufacture of recyclable, weldable and processable structural composite components by conventional manufacturing technologies (Infusion, RTM, Pultrusion, Filament Winding)

 OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - INTRODUCCIÓN

Como se ha comentado, las matrices termoplásticas ofrecen beneficios en reciclabilidad, soldabilidad y termoformabilidad sobre las matrices termoestables, pero, por otro lado, sus elevados puntos de fusión y sus altas viscosidades en fundido hacen necesarias altas temperaturas y presiones en sus procesos de fabricación.

Las tecnologías de polimerización in situ, permiten obtener matrices de naturaleza termoplástica (resinas reactivas) a partir de sus monómeros o precursores. La baja viscosidad de estos compuestos (<100 cP) facilita la impregnación de las fibras de refuerzo, con lo que esta tecnología es especialmente atractiva para la fabricación de materiales compuestos altamente reforzados. En la actualidad, las resinas termoplásticas reactivas se basan en sistemas acrílicos, poliamidas y de politereftalato de butileno, existiendo algunas de ellas a nivel comercial como la resina acrílica Elium® de Arkema, el sistema para poliamida Bruggolen® distribuidas por Brüeggemann Chemical, y la de politereftalato de butileno Cyclics PBT® de Cyclics Corporation [1].

Las resinas acrílicas están compuestas básicamente por una mezcla de monómeros acrílicos, donde uno de los más empleados es el metil metacrilato (MMA) (Figura 1) donde se encuentran disueltos sus respectivos polímeros. Estas resinas se emplean en diversos sectores, desde la construcción, pinturas, industria automotriz, fabricación de productos de consumo o en odontología y, ya en 1990, Ma y col. [2] prepararon el primer material compuesto con resina metacrílica reforzada con fibras de vidrio, carbono y aramida mediante la técnica de pultrusión usando un baño del monómero prepolimerizado. La polimerización se produce por la incorporación de un iniciador, que suele ser un peróxido, y mediante una reacción radicalaria a temperaturas inferiores a 70 °C, dando lugar a polímeros termoplásticos amorfos.

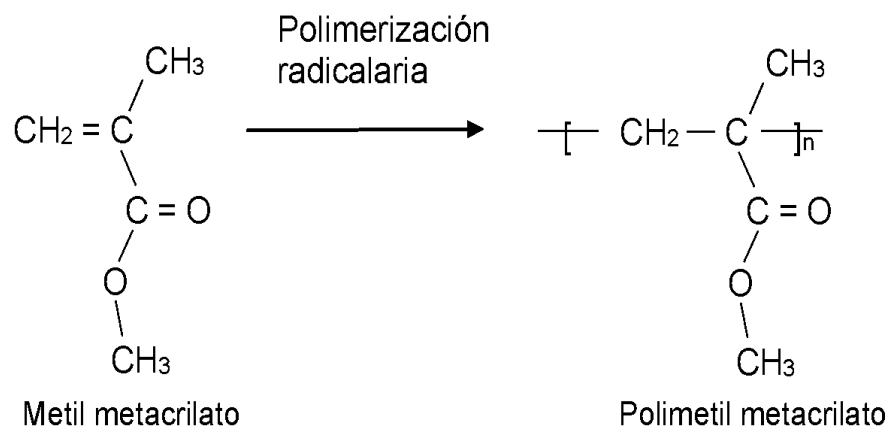


Figura 1: Esquema de polimerización radicalica del polimetil metacrilato (PMMA).

A partir de otros monómeros, como tereftalato de butileno cíclico (TCC), la caprolactama o la laurolactama se obtienen también por vía líquida, matrices termoplásticas como el tereftalato de polibutileno (PBT), poliamida-6 (PA-6) y poliamida-12 (PA-12) respectivamente.

El proceso reactivo de polimerización in-situ de PA6 es conocido desde los años 60 (Bayer, BASF) [3], pero sólo ha sido utilizado de forma industrial para la obtención de semielaborados en diferentes formatos, barras, tubos o planchas, que posteriormente son mecanizados para la obtención de piezas técnicas como rodamientos, poleas o casquillos. En los 2000, algunas empresas químicas, como Brüggemann, empezaron a desarrollar procesos de colada usando la reacción de polimerización aniónica para obtener piezas de geometría más compleja y sólo unos años después, universidades (Universidad de DELF [4]) y centros tecnológicos (Tecnalia [5] y Fraunhofer) comienzan su investigación para utilizar esta reacción en una tecnología de producción de productos finales de poliamida y composites termoplásticos reforzados con fibras de vidrio, carbono y aramida. A partir de 2010-2015, las diferentes líneas de investigación llegan a TRL (Technology Redineess Level) más alto y algunos fabricantes de máquinas desarrollan equipamiento para llevar estas tecnologías a la industria. La figura 2 muestra imágenes de la evolución de las tecnologías y equipamientos de fabricación de poliamida 6 aniónica (APA6) durante los últimos 60 años.

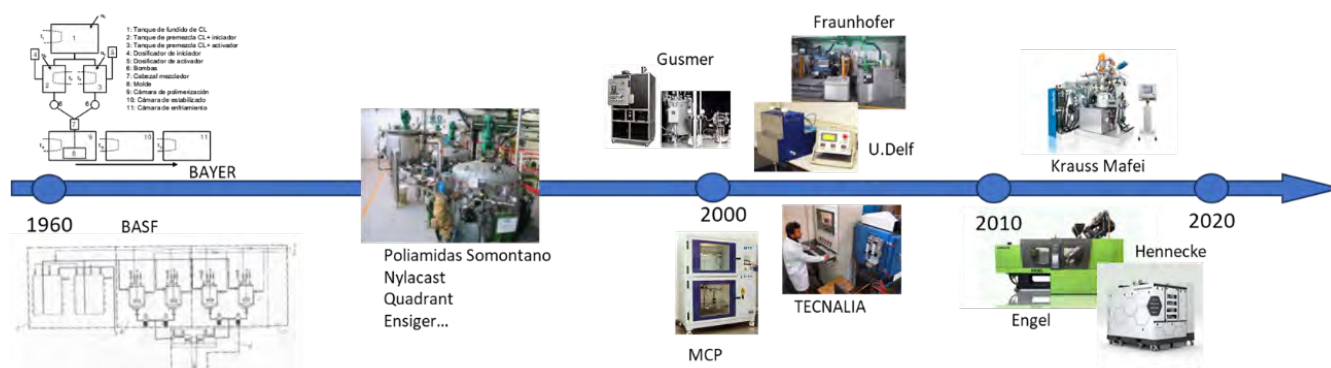


Figura 2: Evolución de las plantas de producción y equipamientos para la obtención de PA6 mediante reacción aniónica.

A continuación, se detallan los desarrollos de dos tipos de resinas termoplásticas desarrolladas por las unidades de investigación ICTP-CSIC y TECNALIA.

2 - AKELITE

2.1 - CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LA RESINA AKELITE

Akelite es una resina termoplástica líquida de naturaleza acrílica patentada por el grupo de Compuestos Poliméricos del ICTP-CSIC [6]. Consiste en una mezcla de monómeros acrílicos que polimerizan en presencia de un iniciador térmico, tipo peróxido de benzoilo o azobisisobutironitrilo. En función de la formulación, se puede controlar la viscosidad de la resina de manera que sea óptima para su uso con diferentes técnicas de transformación convencionales como VARI, RTM, filament winding, pultrusión o SMC. A diferencia de la resina Elium®, que emplea aminas para una polimerización de tipo redox, la resina Akelite se polimeriza mediante una reacción de polimerización en masa iniciada térmicamente que hace que la reacción esté más controlada y no sea tan exotérmica. La principal

ventaja de la resina Akelite es su fácil manipulación respecto a la resina de Arkema, con un tiempo de gel a temperatura ambiente de más de 7 días mientras que la resina de Arkema cuenta con un tiempo de gel más corto (Fig. 3).

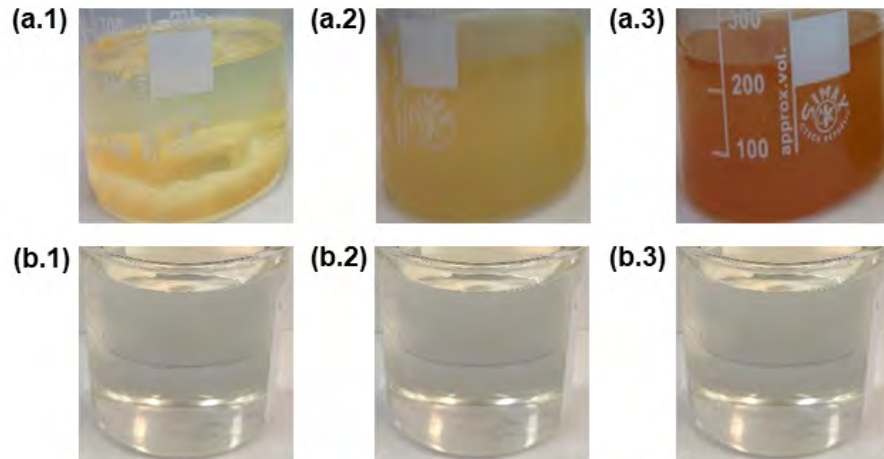


Figura 3: Cambio de color de la resina: (a) Elium y (b) Akelite a 1, 5 y 15 minutos

En la Tabla 1, se indican la densidad y las propiedades mecánicas a tracción y flexión de la resina Akelite en comparación con las resinas comerciales, termoplástica Elium[®] 180 de Arkema y una epoxi de Sicomin SR1280.

Propiedad	Elium [®] 180	Epoxi Sicomin	Akelite
Densidad (g/cm ³)	1,01	1,15	1,14 ± 0,02
Resistencia a tracción (MPa)	66,0	74	68,1 ± 2,0
Módulo de Young (GPa)	3,2	3,3	3,9 ± 0,3
Resistencia a flexión (MPa)	111,0	113	127,8 ± 6,5
Módulo de flexión (GPa)	2,9	3,1	3,4 ± 0,5

Tabla 1: Comparativa de las propiedades mecánicas de Akelite, Elium y Sicomin

Tal y como se ha comentado, la fabricación de los laminados con fibras continuas con las resinas acrílicas no requiere una modificación en los procesos productivos actuales obteniéndose propiedades similares a las resinas epoxi. Así, por ejemplo, la tabla 2 muestra las propiedades obtenidas en un proceso de infusión asistido por vacío de un laminado de 4 capas de fibra de carbono unidireccional (12 K, de gramaje 340 g/m²) con un 70% en peso de fibra aproximadamente curado a 70 °C durante 2h. Es importante destacar que se usan fibras de carbono comerciales sin ningún tratamiento superficial específico para resinas acrílicas.

	Flexión		Tracción		ILSS	Flexión		Tracción	
	$\sigma_{f \max}$ (MPa)	E_f (GPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	E (GPa)		$\sigma_{f \max}$ (MPa)	E_f (GPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	E (GPa)
Akelite	1.045±59	59±4	1.946±80	116±3	58±1	79±5	5,1±0,5	37±2	7,4±0,1
Elium	1.076±56	54±4	1.754±99	94±10	61±3	77±7	5,6±0,3	29±2	5,1±1,4
Resoltech	957±67	59±7	1.724±32	106±10	50±3	90±5	6,6±0,8	40±2	9,0±0,4

Tabla 2: Comparativa de las propiedades mecánicas de un laminado de fibra de carbono fabricado por VARI con las resinas Akelite, Elium 180, y Resoltech 1050.

Estos resultados sugieren que la resina Akelite es una alternativa factible para producir materiales compuestos con altas prestaciones similares a las que se obtienen con resinas epoxi, pero con la principal ventaja de que los materiales fabricados con Akelite se pueden termoconformar y reciclar lo cual es imposible con los materiales actuales. El termoconformado se realiza a temperaturas por encima de los 130 °C y una ligera presión, adaptándose a la forma deseada. La Figura 4 muestra un ejemplo de esta característica con el termoconformado de una pieza con ángulos de 90° y tubular a partir de un laminado plano de 4 capas de un tafetán de fibra de carbono. Otra característica de los materiales compuestos con matrices termoplásticas es su capacidad de soldadura de piezas sin la necesidad de utilizar adhesivos.



Figura 4: Termoconformado de un laminado fabricado con 4 capas de tafetán adoptando ángulos de 90° y formato tubular.

Otra de las ventajas de utilizar la resina Akelite es que permite un reciclado completo del material recuperando la fibra y la resina en óptimas condiciones para la fabricación de una nueva pieza, sumergiendo el material en acetona durante 18 horas. La resina se separa de la acetona mediante un rotavapor por lo que es un proceso 100 % reciclable. Se fabricó una nueva pieza con material 100 % reciclado obteniéndose propiedades mecánicas similares a las del material compuesto virgen (Figura 5).

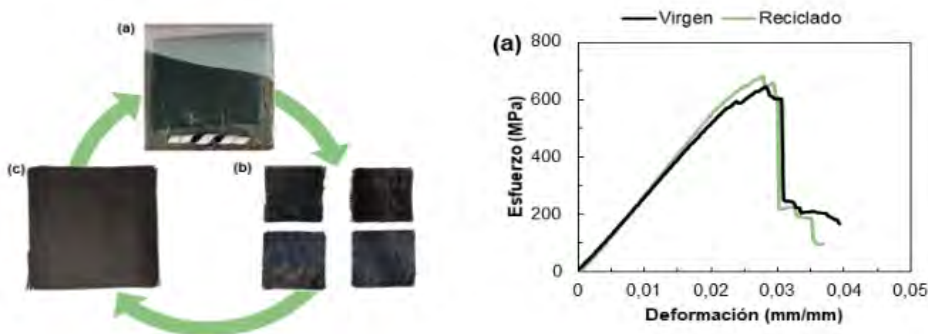


Figura 5: Fabricación y propiedades a flexión de un laminado fabricado con material 100 % reciclado

2.2 - FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE PALA DE MINI-AEROGENERADOR

En colaboración con el CEDER-CIEMAT en Soria, se fabricaron palas eólicas de 1 metro de longitud con la siguiente configuración para cada concha: 45° de fibra de carbono/0° de fibra de vidrio/0° de fibra de carbono/0° de fibra de vidrio (45C/0G/0C/0G), con una proporción de fibra de aproximadamente el 70 % del peso total de la pala. Se realizaron ensayos estáticos y centrífugos no observándose diferencias significativas entre las palas fabricadas con Akelite y éstas fabricadas con una resina epoxi Sicomin típicamente usada en la fabricación de palas eólicas. Para comprobar el rendimiento real, se instalaron dos palas Sicomin junto con una de las palas de Akelite, en un pequeño aerogenerador de 1 kW instalado en la azotea del edificio del CIEMAT para comprobar algunos parámetros de potencia, funcionalidad y seguridad, recogidos en la norma IEC 61400-2 (Figura 6). El aerogenerador funcionó de manera continua durante un período de 5 meses, manifestando un comportamiento normal sin experimentar problemas en su funcionamiento o aspectos relacionados con la seguridad y obteniendo curvas de rendimiento eléctricas con relación al nivel de carga de la batería, con resultados coherentes. Las palas con Akelite superaron los ensayos centrífugos y los de rendimiento en funcionamiento mostrando un comportamiento similar al de las palas con resina epoxi [7].



Figura 6: Instalación del aerogenerador y tablero de medición (Imágenes cedidas por CIEMAT)

Al finalizar los ensayos, la pala de aerogenerador Akelite se recicló siguiendo el proceso descrito anteriormente, recuperando todos los componentes (fibras, adhesivos, espumas y resina) en 24 horas a temperatura ambiente (Figura 7). El disolvente se separó de la resina disuelta en un rotavapor a 50 °C. Tanto la fibra como la resina se recuperaron en óptimas condiciones pudiéndose reutilizar para la fabricación de una nueva pala eólica.

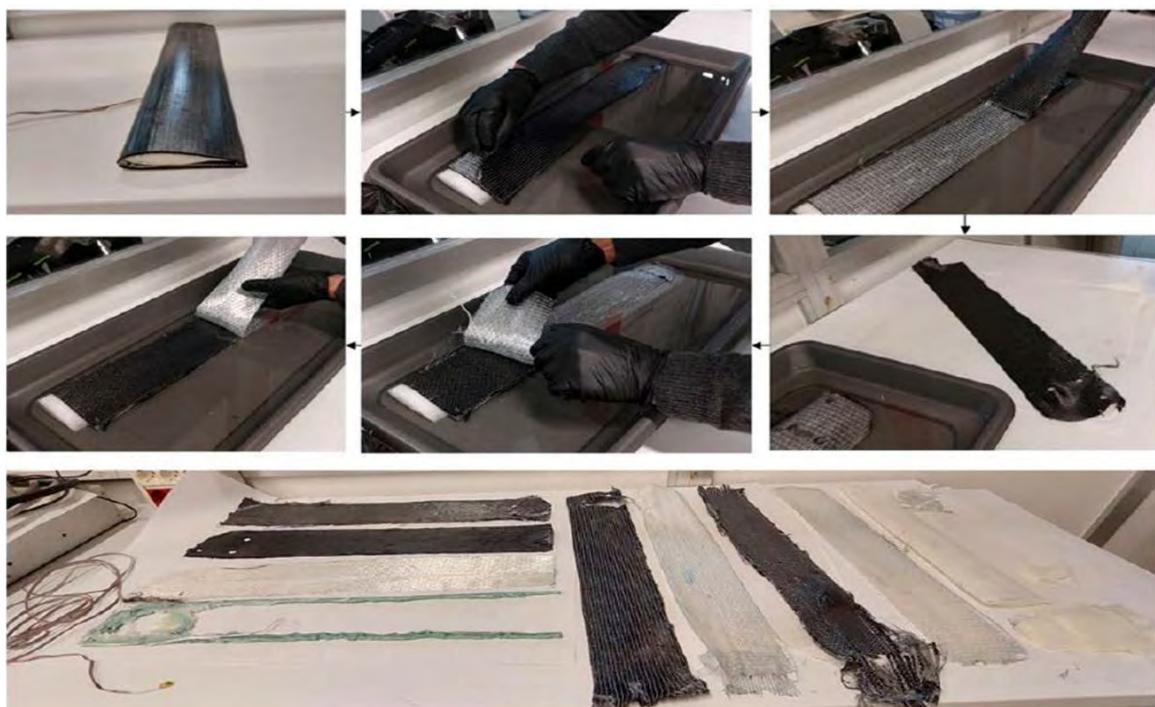


Figura 7: Proceso de reciclado de la pala de aerogenerador Akelite

3 - CAPROCAST: Tecnología para la obtención de poliamida 6 (APA6) POR REACCIÓN REACTIVA ANIÓNICA

La versatilidad del sistema de APA6 desarrollado dentro de la tecnología Caprocast permite fabricar muchos productos diferentes utilizando diferentes procesos. De esta forma, si queremos obtener piezas másicas, como poleas o engranajes, se utiliza el proceso de colada junto con un mecanizado posterior [8]. Si lo que queremos es obtener productos huecos, se puede utilizar el proceso de rotomoldeo [9]. Para geometrías más complejas se desarrolló el conocido proceso "NyRIM" en el que se inyectaba la mezcla en moldes calefactados para obtenerla pieza [10]. Los composites termoplásticos se pueden obtener de igual forma mediante el proceso de RTM (Resin Transfer Molding) termoplástico para placas o geometrías tipo cáscara [11] o mediante el proceso de pultrusión termoplástica reactiva para la obtención barras y perfiles [12].

3.2 - MATERIALES Y REACCIONES DE OBTENCIÓN DE LA APA6

La APA6 se obtiene mediante una reacción de apertura de anillo a partir de su monómero: ϵ -caprolactama.

El grupo amida de las lactamas, hace que esta molécula tenga una alta reactividad, debido a la deslocalización de electrones entre los átomos O-C-N y a su carácter ácido-base. Esto permite al grupo -NH- (ácido) actuar como donador en puentes de hidrógeno cuando interacciona con bases débiles o desprotonarse para formar sales cuando interacciona con bases fuertes. El grupo carbonilo (-CO-) actúa como aceptor en puentes de hidrógeno, lo que permite formar complejos entre el grupo -NH- y el grupo -CO- de la propia lactama formando su típica estructura cristalina. Este carácter ácido-base hace que las lactamas sean altamente hidrofílicas generando puentes de hidrógeno entre moléculas de agua y moléculas de lactama. En caso de altas concentraciones de agua, las lactamas rompen totalmente su red cristalina disolviéndose en el agua.

La polimerización de lactamas mediante apertura de anillo consiste en una transamidación en la cual los grupos amida cíclicos se convierten en grupos amida lineales. Esta reacción se puede dar mediante una reacción catiónica, una reacción aniónica o una reacción hidrolítica. Las polimerizaciones aniónicas son adecuadas para polimerizar lactamas no sustituidas. Además, debido a la fuerte activación de los núcleos de crecimiento y de los monómeros, las lactamas pueden ser polimerizadas mediante procesos aniónicos a menor temperatura que en procesos catiónicos, razón que junto a la posibilidad de acelerar la reacción mediante los efectos catalizadores de las acil-lactamas hacen que esta reacción tenga un alto interés industrial [13].

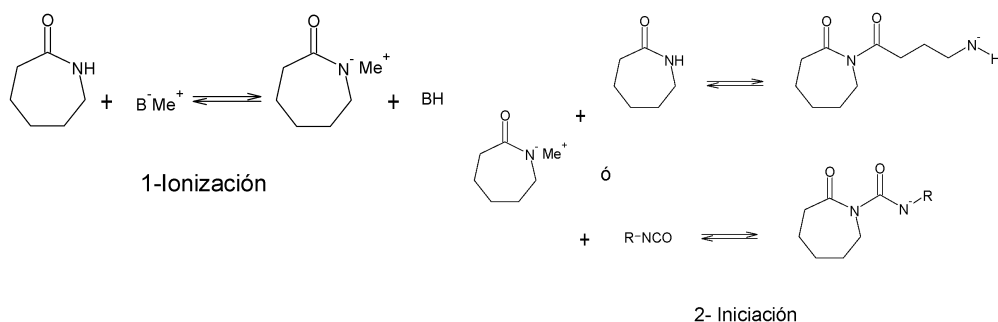
Para obtener la poliamida 6 mediante una reacción aniónica es necesario hacer reaccionar la ϵ -caprolactama con un sistema catalítico formado por un iniciador y un activador. Esta reacción se produce a temperaturas de entre 130 y 190°C obteniéndose unos tiempos de reacción de entre 1 y 60 minutos [14]. Una de las características principales de esta reacción es que el monómero es un líquido de baja viscosidad, similar a la del agua a una temperatura de fusión relativamente baja ($T_f = 70^\circ\text{C}$) [15]. Además, la reacción de polimerización se produce por debajo de la temperatura de fusión de la poliamida 6 ($T_f = 220^\circ\text{C}$ [16]), obteniéndose una poliamida sólida y semi-cristalina.

Estas características químico-físicas hacen que los procesos de moldeo por vía líquida típicamente utilizados para el moldeo de materiales termoestables puedan ser evaluados como procesos factibles para el moldeo de este material termoplástico, tal y como se ha explicado en el apartado anterior.

La reacción de polimerización aniónica de la ϵ -caprolactama (Figura 8), se produce mediante un mecanismo de apertura de anillo inducido por aniones. Los compuestos que pueden ser utilizados como iniciadores pertenecen a los siguientes grupos: lactamatos, bases fuertes o sustancias de media o baja basicidad. Los activadores suelen ser N-acil-lactamas, ésteres o acil-haluros [17] o sustancias que produzcan lactamas N-sustituidas como son los isocianatos.

La reacción de ionización requiere altas energías de activación produciendo una reacción muy lenta o teniéndose que realizar la polimerización a más de 250°C. Es por esta razón que se añade un activador, disminuyendo la temperatura de reacción a 130-190°C.

El grado de polimerización obtenido en este tipo de reacciones debe ser suficientemente alto, para que no exista un exceso de caprolactama en el material, ya que éste actuaría sobre la APA6 de la misma forma que lo hace el agua de la humedad ambiental, introduciéndose en la parte amorfa del polímero e impidiendo que se formen puentes de hidrógeno entre los grupos -CO- y -NH-. Estos puentes de hidrógeno son los precursores de la cristalinidad de la APA6, tal y como se muestra en la Figura xx, característica que proporciona las buenas propiedades mecánicas a este polímero [18].



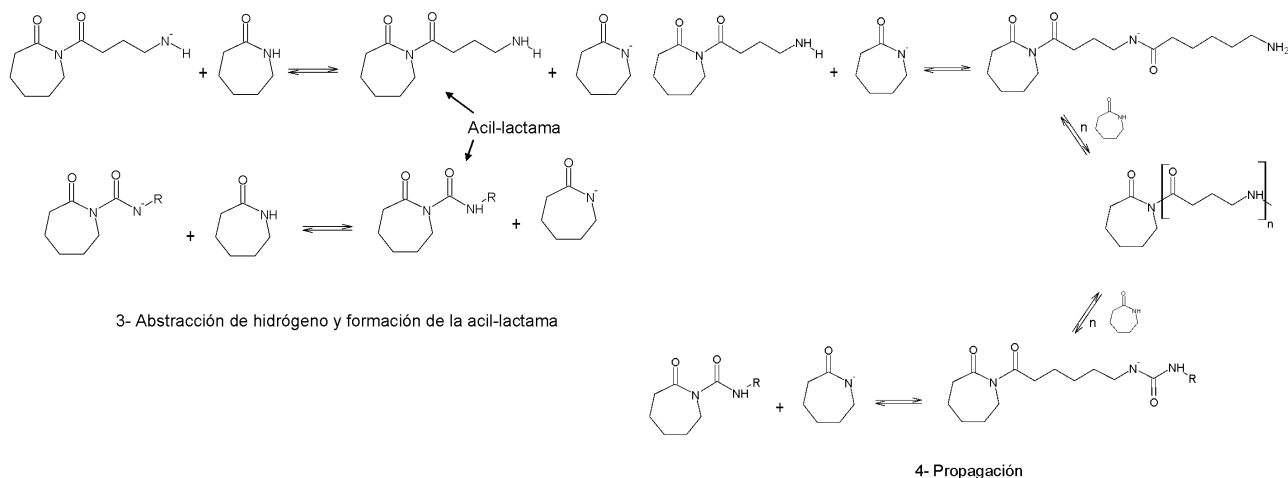


Figura 8: Polimerización aniónica de la ϵ -caprolactama para la obtención de la APA6.

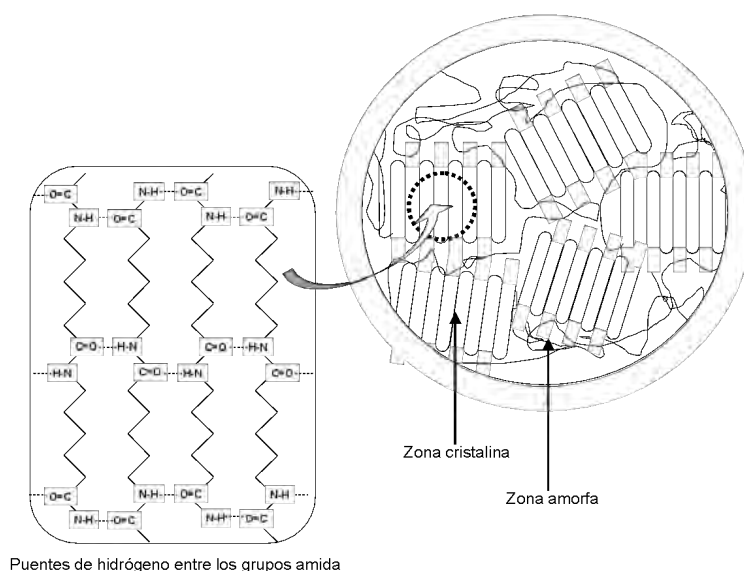


Figura 9: Esquema de cristalinidad de la APA6.

3.3 - EL PROCESO DE POLIMERIZACIÓN Y SUS PARÁMETROS DE CONTROL

La posibilidad de utilizar diferentes sistemas catalíticos en diferentes porcentajes permite ajustar la reacción de polimerización al proceso y tecnología de fabricación. Los catalizadores tienen influencia en la reactividad y en la sensibilidad que este tipo de polimerización tiene a la humedad y al oxígeno y que podría producir la inhibición de la polimerización. Además, parámetros como las temperaturas y presiones del procesado permiten adecuar los tiempos de reacción a las necesidades de llenado de las piezas a fabricar. Estos parámetros también tienen influencia en las propiedades finales de la poliamida 6, por lo que se deben variar dentro de unos rangos controlados.

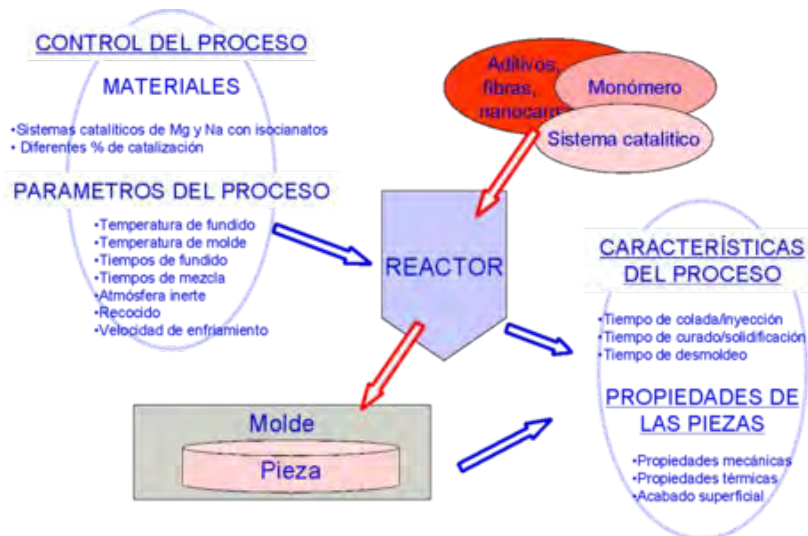


Figura 10: Parámetros del proceso que afectan a las propiedades de las piezas.

El proceso de polimerización de la APA6 se puede monitorizar fácilmente mediante un control térmico, en el que se obtiene una curva tiempo-temperatura característica en la que se visualizan las etapas más importantes del proceso.

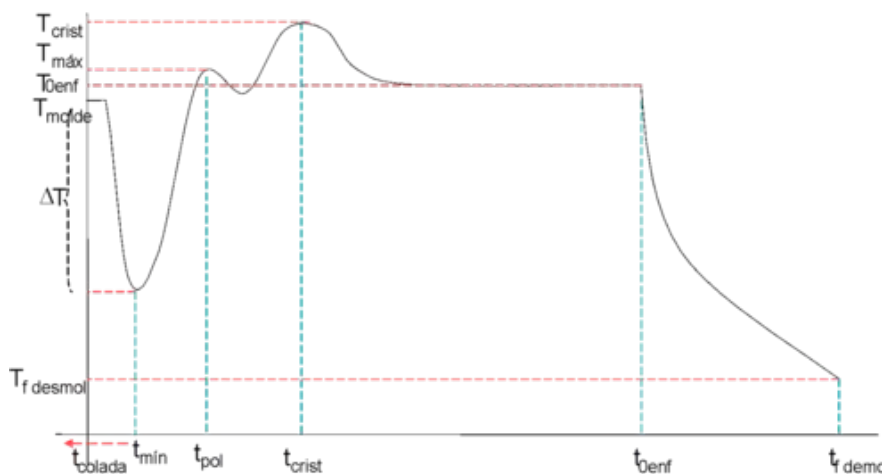


Figura 11: Curva de evolución de la temperatura en el tiempo para la polimerización de la APA6

3.4: CAPROCAST VERSUS OTROS PROCESOS DE OBTENCIÓN DE APA6

En la polimerización de la APA6 se necesitan 3 compuestos químicos: el monómero, el iniciador y catalizador. Debido a que los tres compuestos son sólidos a temperatura ambiente y a que el porcentaje de mezcla del iniciador y catalizador es mucho menor que el de la caprolactama, suele ser necesario realizar una premezcla inicial del 50% de la caprolactama con el iniciador y el otro 50% de la caprolactama con el catalizador. Ambas mezclas son fundidas en dos reactores diferentes que posteriormente se alimentan mediante un cabezal 2K en el molde de producción.

Sin embargo, CAPROCAST utiliza un sistema de iniciador y catalizador líquidos a temperatura ambiente que aporta ventajas durante el procesado y obtención de piezas.

Las principales ventajas que aporta CAPROCAST frente a otras tecnologías del mercado son:

- El iniciador y el catalizador pueden dosificarse fácilmente con bombas independientes hacia el cabezal de mezcla.
- No existe una premezcla reactiva en los reactores o depósitos de las máquinas dosificadoras, lo que evita que el material premezclado tenga un tiempo de vida límite. En los procesos 2K este tiempo de vida suele ser aproximadamente 4 horas, tras el cual debe vaciarse el depósito y añadir premezcla nueva.
- La versatilidad del proceso en una máquina dosificadora 3K es mucho mayor que en una 2K, debido a que se puede variar la ratio de mezcla de los 3 componentes fácilmente cambiando la dosificación de las bombas. El cambio en la ratio de mezcla de los 3 componentes permite ajustar los tiempos de reacción, por lo que, en función

del tipo de proceso, de la presión de dosificación y del tamaño de la pieza a obtener, se puede optimizar el proceso a una gran variedad de aplicaciones.

En la Figura 12 se presenta un esquema de la tecnología CAPROCAST, que se caracteriza por su proceso 3K, tal y como se detalla en las patentes.

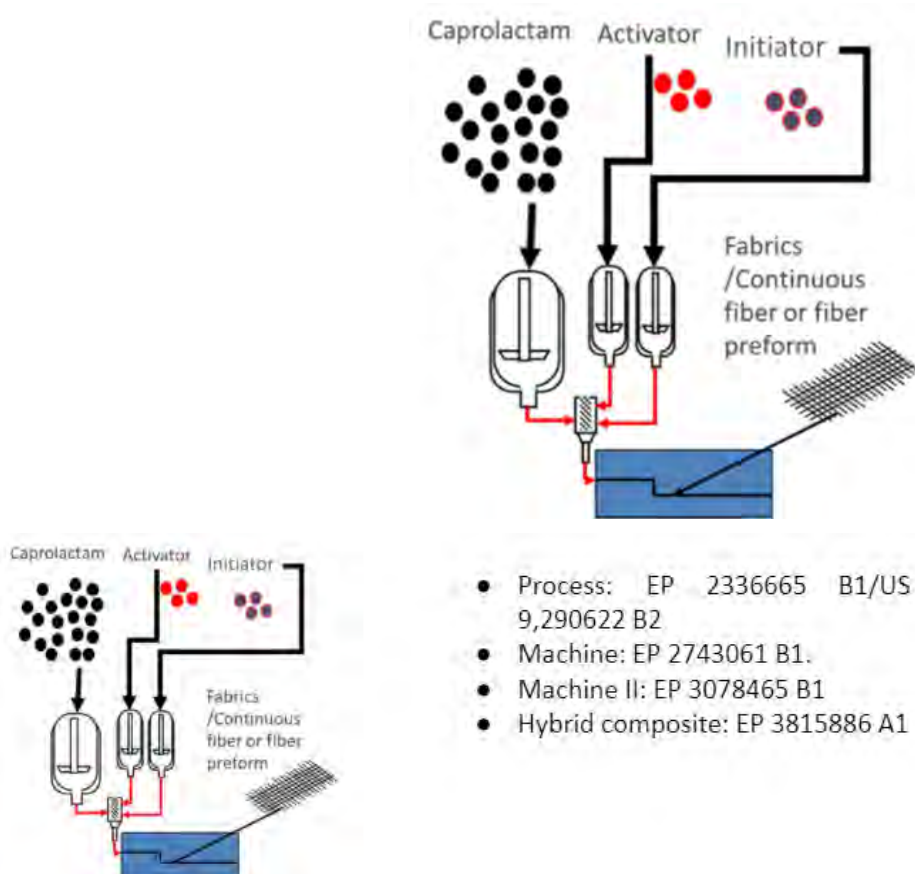


Figura 12: Esquema del proceso 3K desarrollado por Tecnalia para la fabricación de materiales compuestos termoplásticos de matriz APA6 y patentes de proceso, maquina y concepto híbrido.

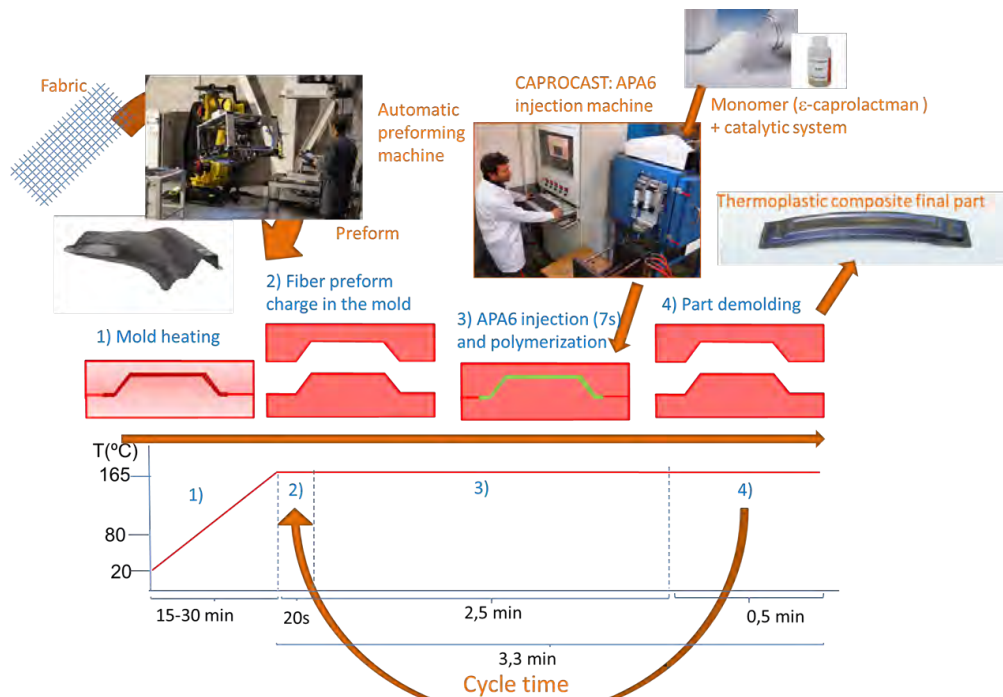


Figura 13: Etapas y tiempo de ciclo para el proceso de fabricación de un composite de matriz termoplástica de APA6 con la tecnología CAPROCAST: 1) calentamiento del utillaje, 2) Preformado y carga del refuerzo de fibra, 3) Inyección de monómero, iniciador y catalizador y tiempo de polimerización, 4) Apertura de utillaje y desmoldeo.

Actualmente, la tecnología CAPROCAST está a un nivel de desarrollo TRL7, que se ha demostrado mediante la investigación, desarrollo y validación de diferentes casos de usos industriales. Los diferentes proyectos realizados gracias a socios industriales han llevado al desarrollo de formulaciones aptas para (a) procesos de colada de piezas de un volumen de hasta 6 kilos, (b) procesos de T-RTM con tiempos de ciclo de 2 minutos, (c) procesos de rotomoldeo para la obtención de piezas huecas. Se ha validado el diseño específico de moldes para estas tres tecnologías. En paralelo, se ha trabajado con suministradores de materias primas (compuestos químicos y fibras de vidrio y carbono) para el desarrollo conjunto de ensimajes compatibles con la reacción polimérica y que produzcan un adecuado anclaje entre fibra y matriz. Por último, se continúa trabajando con fabricantes de máquinas industriales para llevar esta tecnología a la industria de una forma robusta.

Eikartek ASEGURA Elevator pulley Machined part from rods and plates CAPROCAST technology mass samples 6kg pulley	Biharkonp: FAGOR Front lower suspension arm Steel suspension arm CF/APAS prototype 41% lighter
Cliente/Socio: Polifluor Desarrollo de pulea para ascensor (APA6)	Cliente/Socio: Fagor Ederlan Desarrollo de brazo de suspensión (APA6/CF)

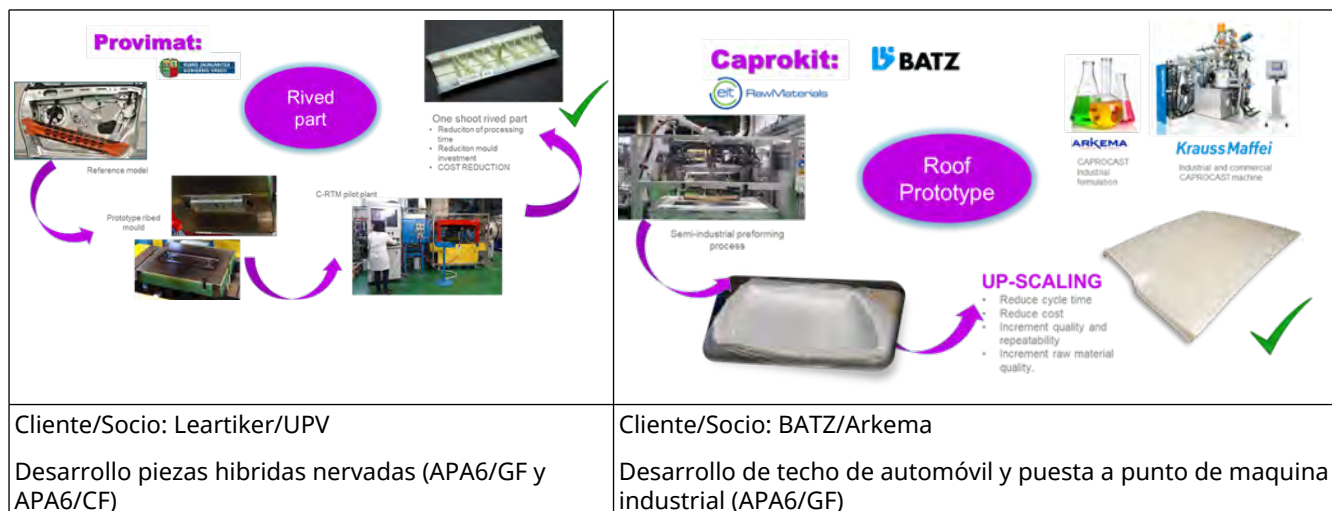


Figura14: Ejemplos de proyectos desarrollados con la tecnología CAPROCAST.

4 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] Miranda Campos B, Bourbigot S, Fontaine G, Bonnet F. *Thermoplastic Matrix-Based Composites Produced by Resin Transfer Molding: A Review*. Polymer Composites, 43(5), 2485–2506, 2022.
- [2] Ma CM, Chen C -H. *Pultruded Fiber Reinforced Thermoplastic Poly(Methyl Methacrylate) Composites. Part I. Correlation of Processing Parameters for Optimizing the Process*. Polymer Engineering & Science, 31(15), 1086–1093, 1991.
- [3] G. Carlyon, M.I. Kohan, *Monomer casting in Nylon Plastic*, Ed: John Wiley & Sons. New York, 1973.
- [4] K. van Rijswijk, *Thermoplastic composite wind turbine blades. Vacuum Infusion Technology for Anionic Polyamide 6 Composites*, Ph. D. Thesis in Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, 2007.
- [5] S. Garcia, *Industrialización del proceso de moldeo y polimerización de la poliamida 6 aniónica*, Ph. D. Thesis in Faculty of Basque Country, 2012
- [6] A. Santiago Bethencourt, R. Verdejo Márquez, M.A. López Manchado, *Polímeros Reforzados Con Fibras Basados En Matrices Termoplásticas*. WO2022079336A1. 2022.
- [7] R. Carnicero R, L. Cano, M.A. Lopez-Manchado, R. Verdejo, *Manufacturing, Testing and Recycling of a small recyclable wind turbine blade*, Journal of Physics: Conference Series, 2265 (3), art. no. 032013, 2022.
- [8] M. Miscevic, I. Catic, M. Serce, *Production of nylon 6 castings by anionic polymerisation of E-caprolactam*. International Polymer Science and Technology, 20(11), 90-98, 1993.
- [9] Gh. Rusu, K. Ueda, E. Rusu, M. Rusu, *Polyamides from lactams by centrifugal molding via anionic ring-opening polymerization*. Polymer, 42 (13), 5669-5678, 2001.
- [10] J.U. Otaigbe, W.G. Harland, *Studies in the properties of Nylon 6- Glass Fiber Composites*. Journal of Applied Polymer Science, 36 (1), 165-175. 1988.
- [11] S. Pillay, U. Vaidya, G. M. Janowski, *Liquid molding of fabric reinforced thermoplastic composites*. Composites 2006 Convention and Trade Show: St. Louis, MO USA, 2006.
- [12] A. Luisier, P.-E. Bourban, J.-A.D. Manson, *Reaction injection pultrusion of PA12 composites: process and modeling*. Composites, Part A-34, 583-595, 2003.
- [13] C.E. Barnes, *Nylon 4 – development and comercialization*, Lenzinger Bers., 62, 62, 1987.



- [14] R.M. Hedrick, W.R. Richard Jr, *Reinforced Polyamides and Process of Preparation Thereof*, Monsanto Company,. 1968: Patent US 3418517.
- [15] C.L. Zhang, L.F. Feng, G.H. Hu, *Anionic Polymerization of Lactams: A comparative study on various methods of measuring the conversion of ϵ -Caprolactam to polyamide 6*. *Journal of Applied Polymer Science*,. 101, 1072-1981. 2006.
- [16] L. Ricco, S. Russo, G. Orefice, F. Riva, *Caprolactam-Laurolactam Copolymers: Fast Activated Anionic Synthesis, Thermal Properties and Structural Investigations*. *Macromol. Chem. Phys.*, 202(10), 2114-2121, 2001.
- [17] J. Merna, D. Chromcová, J. Brožek, J. Roda. *Polymerization of lactams: Anionic polymerization of ϵ -caprolactam activated by esters*. *European Polymer Journal*, 42(7), 1569-1580, 2006.
- [18] L.H. Sperling, *Introduction to physical polymer science*. Ed: John Wiley & Sons. 1992.



Capítulo 19: MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES

Angel Renato Pozo Morales¹, Antonio Fernández¹, Alfredo Güemes¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

Abstract

This technical report addresses the study of composite materials with natural fibers as reinforcement. The properties, applications and manufacturing processes of these materials are explored, highlighting their relevance in various industries. The environmental and sustainable benefits associated with the use of natural fibers instead of traditional materials are analyzed, as well as the current issues to overcome.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - INTRODUCCIÓN

A partir de 1950 se desarrollaron los primeros materiales compuestos de fibras naturales, para la industria del automóvil. Las compañías Ford y Mercedes Benz fabricaron parte de los interiores de las puertas y ventanas, paneles frontales del salpicadero y elementos decorativos. El método de fabricación empleado fue la impregnación con resina de un fieltro de fibra de algodón, y curado en prensa. Los elementos fabricados carecían de sollicitación estructural y en la mayoría de los casos eran simplemente elementos decorativos. Por lo tanto, dichos materiales compuestos fueron desarrollados para cumplir criterios medioambientales, amortiguamiento de ruido y vibraciones, ahorros de coste y requerimientos estéticos del sector.

En la última década, se ha incrementado el interés en el desarrollo y fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras naturales para aplicaciones estructurales de bajo coste. Se trata de una solución en principio viable, debido a la baja densidad de la fibra, mejora de los procesos de extracción, bajo coste de la materia prima, su carácter renovable y biodegradable, alta disponibilidad, reciclabilidad, y avance en los conocimientos de los procesos de fabricación de materiales compuestos convencionales. Hay que destacar que la energía necesaria para producir fibras naturales es del orden de 4 MJ/kg, muy inferior a la necesaria para producir fibra de vidrio (30 MJ/kg) y fibra de carbono (130 MJ/kg).

Sin embargo, se deben solventar problemas relacionados con la falta de bases de datos robustas con las propiedades de cada fibra y de sus materiales compuestos, baja adherencia entre la fibra y matriz debido al carácter hidrófilo e hidrófobo de la fibra y matriz, respectivamente, alto grado de absorción de humedad, compatibilidad entre las capacidades térmicas de degradación de las fibras y los procesos de fabricación, baja resistencia al fuego, bajas temperaturas de servicio, baja durabilidad en ambientes agresivos y carencia de un método de fabricación robusto, industrializable y de bajo coste. Las propiedades mecánicas, publicadas en la literatura, tienen rangos muy amplios y altas desviaciones estándar. Para una misma fibra, se puede encontrar estudios con valores medios de la resistencia a tracción en un rango (140-800) MPa. Ello es debido a la influencia de factores como las condiciones de cultivo, zona y método de extracción. Incluso dentro de la misma planta, las fibras del interior tienen propiedades diferentes a la fibra de la corteza. Además, por lo general los ensayos no se han llevado a cabo bajo una norma estándar, lo que dificulta la comparativa entre diversos estudios. Respecto a los otros inconvenientes como la humedad, resistencia frente a agentes externos, fuego, durabilidad, falta de adhesión; se aplican tratamientos químicos, pero se debe tener en cuenta el coste e impacto medioambiental de los mismos.

Actualmente existe una gran cantidad de investigaciones y productos en el mercado. En la mayoría de aplicaciones se ha utilizado fibra corta y sin orientación, puesto que facilita el proceso de fabricación, pero las propiedades que se obtienen son muy bajas. A su vez, el mercado ha tratado de solventar los inconvenientes de baja adherencia en la interfase, utilizando polímeros termoestables no biodegradables, con contenidos en resina cercanos al 50%. Dichas soluciones no resolverían el problema del reciclado, ni el uso de recursos renovables.

La producción estimada de materiales compuestos de fibras naturales en Europa para construcción, automóviles, muebles y aplicaciones no estructurales es elevada. En la industria del automóvil se pretende utilizar cerca de 10-15 kg de fibra natural por vehículo. En el caso de que se llegue a desarrollar un material compuesto del tipo estructural, el



mercado de las fibras naturales será aún mayor, permitiendo resolver problemas como el reciclado y utilización de recursos renovables.

Este informe pretende proporcionar una visión de los materiales compuestos de fibras naturales, destacando su importancia en términos de sostenibilidad y rendimiento. La información presentada está extraída de dos fuentes principales: la Tesis Doctoral de D. Angel Renato Pozo Morales (1), y un reciente review publicado en la revista J. Composite Science (2). Ambas son de libre acceso por internet, y contienen muy amplia y comentada bibliografía, por lo que se omiten otras referencias en este artículo, para una mayor concisión.

2 - FIBRAS NATURALES

Las fibras naturales se clasifican en tres tipos: vegetal, animal y mineral. Las fibras con mayor uso en la industria de los materiales compuestos son las vegetales, las cuales se pueden clasificar, de acuerdo a la parte de la planta de donde se extrae, en seis tipos: del tallo (lino, esparto, cáñamo, yute, ramio), de la hoja (palma, piña, sisal, también llamado agave o henequen), semilla (algodón), fruta (coco), caña (bambu), y madera. De los troncos de madera no se van a sacar fibras reforzantes, solamente pasta de celulosa. Las fibras de origen animal (lana, seda) tienen mayor coste que las fibras vegetales, por lo que su uso es principalmente textil, y no se han empleado como refuerzo para materiales compuestos.

Las fibras de origen natural mineral que resultan más interesantes actualmente son las de basalto. El proceso de producción de fibras de basalto presenta aspectos similares al de fibras de vidrio. El basalto se tritura y funde para obtener, mediante hilas, filamentos continuos que se enrollan en bobinas. Las fibras pueden tejerse para obtener con distintos sistemas para matriz (epoxi, etc.) preimpregnados y tejidos secos que pueden luego convertirse en elementos mediante técnicas como RTM (Resin Transfer Moulding). Mediante procesos de pultrusión se obtienen perfiles y tuberías, entre otros elementos.

Son fibras con densidad de 2,65 g/cm³, buenas propiedades mecánicas (resistencia a tracción de 3000 a 5000 MPa, módulo elástico de hasta 110 GPa y alargamiento a rotura de hasta 3,5%), presentan buena resistencia al fuego y a temperaturas altas (hasta unos 700°C) y tienen elevada estabilidad química. No son tóxicas y al ser naturales (el basalto es lava enfriada y solidificada al aflorar a la superficie del terreno) son ecológicas, reciclables y sostenibles. Presentan buena compatibilidad con resinas epoxi, viniléster y uretanos y son fibras muy duraderas.

Las fibras naturales se han utilizado por todas las civilizaciones desde la antigüedad, para fabricar cuerdas, cestos, tejidos, etc. En todos los casos se empleaba la fibra de plantas de la región, y los procedimientos actuales para la extracción y tratamiento de la fibra son en muchos casos similares a los empleados hace siglos.

La producción mundial de fibras naturales de origen vegetal es elevada. En 2022, se llegó a una producción de 33 millones de toneladas, sin contabilizar la producción de la madera. El principal uso es la fabricación de elementos del tipo artesanal o estructuras del tipo decorativo. La siguiente tabla resume la producción anual y coste de las principales fibras.

Fibra	Produccion anual (millones de Tm)	Coste (€/kg)	Modulo elastico (GPa)
Algodón (cotton)	18,5	2,1 – 4,2	6- 10
Bambu (bamboo)	10	0,5	17-90
Yute (jute)	2,5	0,4 – 1,5	20-55
Cañamo (hemp)	0,21	1 – 2,1	30-60
Lino (flax)	0,81	2,1 – 4,2	50-70
Kenaf (kenaf)	0,77	0,3 – 0,5	20-60
Sisal (sisal)	0,38	0,7	10-20
esparto	0,06	1,7	

La densidad de todas estas fibras está en el rango 1-1,5 g/cm³, y el alargamiento a rotura es del orden del 3%, semejante a las fibras sintéticas poliméricas.

2.1 - COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LAS FIBRAS VEGETALES

La fibra natural está compuesta por una matriz de lignina y microfibrillas de celulosa y hemicelulosa, ordenadas en anillos concéntricos como una celda primaria y varias secundarias. En cada celda, las microfibrillas de celulosa se encuentran orientadas en espiral, con un determinado ángulo respecto del eje de la fibra, que influye en el modulo elástico (E); en el caso del algodón, el ángulo es alto, y por eso su bajo E, lo contrario que en el lino. El diámetro de una



fibra individual es alrededor de 10 μm , y el diámetro de cada microfibrilla en torno a 2-20 nm, formadas por 30-100 moléculas de celulosa. El contenido de celulosa aumenta y el de lignina disminuye desde la celda primaria a las secundarias y el contenido en hemicelulosa se mantiene constante.

- La celulosa es un polisacárido semicristalino que le transfiere el carácter hidrófilo y otorga la rigidez estructural. La estructura química de la celulosa es una cadena polimérica lineal, de anillos bencénicos que contienen grupos hidroxilo (-OH) y alcohol (-CH₂-OH), enlazados con puentes de -O-.
- La hemicelulosa es un polímero ramificado y amorfo. Se encuentra unida fuertemente a la celulosa presumiblemente por puentes de hidrógeno. La estructura, contiene grupos hidroxilos (-OH) y acetilos (CH₃CO-), siendo parcialmente soluble en agua e higroscópica.
- La lignina es amorfa y principalmente aromática, le confiere resistencia química adicional y acoplamiento con la hemicelulosa.

Además de los componentes principales, la fibra contiene pectina, grasas, ceras y sustancia solubles en agua. La composición varía en función de las condiciones de crecimiento, zona de la planta y técnica de medición, por ello presenta un amplio rango de los valores.

2.2 - TIPOS DE FIBRAS NATURALES

Solamente se describen las tres principales, mas amplia discusion está en la Ref (1).

2.2.1 - BAMBÚ

Es una planta perenne en forma de caña hueca perteneciente a la familia de las gramíneas, bajo su denominación existen cerca de 1250 especies. Su mayor particularidad, es la elevada tasa de crecimiento, que puede alcanzar 0.2 m/día, en función de la especie y condiciones de cultivo.

Se cultiva en diversas áreas de Asia, América del Sur y África, con una producción anual de 10 millones de toneladas. La baja densidad de la planta 0.6 g/cm³ y sus buenas propiedades mecánicas, le trasfiere altos coeficientes específicos. Las propiedades son fuertemente dependientes de las condiciones climáticas, edad de maduración, especie, condiciones de cultivo, tratamiento químico de conservación, proceso y zona de extracción. El precio de la materia prima varía entre (0.2 -1) [€/m lineal de caña] en función del diámetro, espesor de pared, alineamiento de la caña y tratamiento químico de conservación. El precio en Europa se multiplica más de 10 veces, debido al transporte. Se utiliza ampliamente en sectores como la construcción, fabricación de tarimas, muebles, elementos de deporte.

Los procesos a nivel industrial se centran en obtener un producto final de bajo coste, a través de maximizar el material extraído y una alta tasa de producción. Aunque es posible obtener fibras sueltas mediante procesos químicos, es mas frecuente el empleo de listones, de 1 a 4 mm de espesor. En el campo de materiales compuestos, los productos comerciales e investigaciones desarrolladas utilizan listones con la fibra orientada, de distintos espesores. Las resinas utilizadas son el epoxi, poliéster, fenólica, colas blancas. A nivel industrial, los procesos de fabricación utilizados son la inyección de resina en un molde cerrado y prensa de platos calientes, dando como resultado un producto de bajo coste y medias propiedades mecánicas.

2.2.2 - LINO

El lino es una planta perteneciente a la familia de las lináceas (*Linum usitatissimum*), bajo la denominación existen cerca de 80 variedades. La longitud de la planta es alrededor de 1 m, con un tiempo de cultivo de 100 días. Se cultiva en zonas templadas, en terrenos arcillosos y húmedos cercanos al mar. Europa tiene el 85% del cultivo mundial de lino, siendo Francia, Bélgica y Países Bajos los países con mayor producción.

El rango de las fibras de lino en longitud es de hasta 90 cm y de 12 a 16 micras de diámetro. Las fibras de lino se encuentran embebidas en la matriz de lignina en los tallos. A nivel macroscópico, el tallo se compone de haces de fibras. En la escala microscópica, cada haz de fibras se compone de capas concéntricas que difieren en espesor, composición química y estructura. Cada capa está compuesta de microfibrillas de celulosa formando un ángulo microfibrilar con la dirección de la fibra.

Los métodos tradicionales para separar la fibra son la inmersión de la planta en agua ("Water Retting": el tallo del lino se sumerge en agua y se produce un ataque microbacteriano) o el método del rocío en condiciones de ambiente ("Dew Retting") que consiste en cortar los tallos de lino y se dejan en el campo para que se pudran. La pectina se elimina mediante la acción combinada de bacterias, sol y aire. En ambos se requiere un tiempo de (14-28 días) para degradar los componentes de pectina, hemicelulosa y lignina. Estos procesos se conocen como enriado de fermentación microbiológica (maceración). También pueden extraerse las fibras por tratamiento químico, utilizando habitualmente hidróxido de sodio. Es un proceso altamente eficiente y produce una fibra de mejor calidad.



Después de la extracción, las fibras se secan al aire libre o en estufa, se clasifican y realiza el proceso de hilatura. En la actualidad, diversas compañías como Safilin, han implementado un control de calidad al proceso (materia prima, número de fibras por haces, retorcimiento del haz, diámetro, defectos, densidad de masa lineal tex), con el fin de obtener una bobina de fibra natural del tipo técnico, para aplicaciones estructurales.

Compañías europeas como Club Master of Linen, Safilin, Familin, Procotex, Lineo, Flaxcomposites han desarrollado una fibra técnica continua, a través del control de la materia prima, proceso de extracción y procesos de fabricación. Sin embargo, soluciones completamente biodegradables con buenas propiedades no han sido desarrolladas o al menos no han tenido el éxito que cabría de esperar. En la actualidad, se ha optado por el uso de resinas del tipo epoxi, con resultados positivos en propiedades mecánicas (383 MPa y 32 GPa). Sin embargo, desde un punto de vista medioambiental completamente negativos, puesto que no resuelve la dependencia con los recursos no renovable y reciclables.

Como ejemplo de aplicaciones prototipo, la compañía Suiza (Bcomp) en 2017, ha desarrollado el capó de un coche deportivo con fibra natural de lino tejida, con el fin de reducir el peso. El coche demostrador LINA de EconCore's technology en 2017, ha utilizado el concepto de estructura sándwich fabricada con lino unidireccional continuo y matriz PLA para fabricar el cuerpo del vehículo.

2.2.3 - ALGODÓN

El algodón es casi celulosa pura, con suavidad y permeabilidad al aire que lo han hecho la fibra textil más popular. El largo de la fibra varía de 10 a 65 milímetros y el diámetro de 1 a 22 micras, es necesario un proceso de hilatura para hacer un hilo continuo, como con el resto de fibras naturales. Absorbe la humedad rápidamente, lo que hace comfortable la ropa de algodón.

La fibra pertenece al género *Gossypium*, siendo la especie más cultivada originaria de México. Se trata de una fibra casi celulosa pura con alto ángulo microfibrilar, por lo que su modulo elástico es mas bajo que el de otras fibras. Los productos comerciales son del tipo textil, careciéndose de una aplicación como material compuesto.

2.2.4 - FIBRAS NATURALES ANIMALES: SEDA

Producida por el gusano de seda (*Bombyx mori*). El mayor productor es China, Brasil e India. La longitud de la fibra alcanza los 1500 mm y diámetro (10-13) μm . Uno de los mayores inconvenientes es el elevado coste, siendo 20 veces superior al del algodón. Los productos comerciales son del tipo textil y elementos quirúrgicos, careciéndose de una aplicación como material compuesto.

Para el resto de fibras incluidas en la tabla 1 (página 3), el proceso de extracción es similar al ya descrito para el lino. Se utilizan en productos artesanales, careciendo en la mayoría de casos de una fibra técnica para aplicaciones estructurales. Por su bajo coste, varias de ellas se han empleado para compuestos de fibra corta, no orientada.

En todos los casos, las propiedades mecánicas presentan un amplio rango de valores y en determinados estudios valores del coeficiente de variación o desviación estándar del 60 %. Los motivos se discuten detalladamente en la Ref (1), destacando que se debe analizar críticamente los valores presentados en la literatura. Todas estas consideraciones complican una adecuada comparación y selección entre las distintas fibras naturales entre los diversos estudios, aunque en todos los casos son fibras celulósicas, que se diferencian en el porcentaje y ángulo de microfibrillas. Siendo químicamente similar a las fibras sintéticas poliméricas, como las fibras de nylon y poliéster, sus propiedades serán similares, y las poliamidas serian su límite superior alcanzable.

3 - MATRICES ORGÁNICAS

El propósito de la matriz es aglutinar el refuerzo (fibra) en la orientación adecuada y transferir carga hacia y entre las fibras de forma uniforme, proporcionar la resistencia a la propagación de grietas y de daños inducidos de forma externa y proporcionar la resistencia a cortadura interlaminar, rigidez y resistencia a compresión. Un aspecto fundamental es la compatibilidad química que debe existir entre la fibra y la matriz, compatibilidad con el proceso de fabricación, a fin de obtener un material compuesto con altas prestaciones mecánicas.

3.1 - TERMOESTABLES

Al tratarse de polímeros sintéticos basados en recurso derivados del petróleo, los termoestables no son considerados como una alternativa ecológica. Sin embargo son mayoritariamente utilizados, debido a su naturaleza reactiva, buena compatibilidad e impregnación con los refuerzos convencionales. En el campo de los materiales compuestos de fibras naturales, debido al amplio abanico de formatos y conocimientos de su comportamiento, se ha optado por el uso de resinas termoestables como las epoxi, poliéster y fenólica. Se considera que resinas como la bismaleimida no pueden



ser utilizadas con la fibra natural, debido a que su temperatura de curado ($\sim 200^\circ \text{C}$) es incompatible con la temperatura de degradación de la fibra natural.

Cabe señalar, la existencia de resinas denominadas "Green epoxi", las cuales se caracterizan, según sus desarrolladores, por ser más respetables con el medioambiente, puesto que parte de los materiales proviene de recursos vegetales. Sin embargo, poca información se encuentra disponible en el mercado y la mayoría de productos tienen un elevado coste.

3.2 - TERMOPLÁSTICOS

En las industrias de materiales plásticos para envases y uso general, y bajo coste, los cuatro polímeros Polietileno (PE), Poli cloruro de vinilo (PVC), Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS) cubren casi el 70% del consumo total.

Se dispone además de los termoplásticos técnicos, como las poliamidas, poliésteres, policarbonatos, y otros muchos, entre los que el Nylon es uno de los más conocidos y empleados, aunque su coste es al menos 5 veces mayor que los anteriores.

En uno y otro caso, se encuentran publicaciones de termoplásticos que incorporan fibra corta de origen natural, con orientación aleatoria, aunque por los problemas de adhesividad es mucho más frecuente el empleo de fibra corta de vidrio.

3.3 - POLÍMEROS BIODEGRADABLES

Actualmente varios polímeros biodegradables y basados en recursos renovables han aparecido a nivel comercial, debido a la concienciación medioambiental y limitación de los recursos no renovables basados en derivados del petróleo.

Los polímeros biodegradables son materiales cuyas propiedades físicas o mecánicas se deterioran o degradan completamente cuando se exponen a un microorganismo, dióxido de carbono (proceso aeróbico), metano (proceso anaeróbico) o agua (proceso aeróbico y anaeróbico). Sin embargo, no todos ellos son basados en recursos renovables. La velocidad de biodegradación, depende de las condiciones ambientales (número y tipo de microorganismos, temperatura, humedad) de cada polímero, con un tiempo entre 6-12 semanas, produciendo biomasa, agua y dióxido de carbono. En el caso de los polímeros biodegradables, existen cuatro formas de producirlos:

1. Extraídos de biomasa como el almidón, polisacáridos, celulosa, proteínas, lípidos.
2. Síntesis química de monómeros derivados de la biomasa.
3. Fermentación natural o bacterias, tales como el poli-hidroxialcanoato (PHA) y poli-hidroxibutirato (PHB).
4. Síntesis química, a partir de recurso fósiles como la poli- ϵ -caprolactona (PCL).

Los polímeros de mayor uso en aplicaciones de envases son los basados en almidón, el PE de procedencia biológica, el PLA (Ácido Poliláctico) y PHAs.

3.4 - ALMIDÓN

El almidón es una macromolécula compuesta de dos polisacáridos (amilosa y amilopectina). Puede encontrarse en varios recursos renovables como el arroz, patata, maíz y presenta ventajas como el precio y variedad de procesados (extrusión, inyección para moldeo y termo conformado). Las desventajas están relacionadas con su baja temperatura de descomposición, baja resistencia a impacto, alta absorción de agua y bajas propiedades mecánicas. El polímero suele ser modificado con la completa o parcial esterificación de grupos hidroxilos, producto comercialmente disponible (Sconacell A).

3.5 - POLIHIDROXIALCANOATO (PHA, PHB)

Los PHA son polímeros biosintéticos producidos por la fermentación de azúcares o lípidos. En función de la longitud de la cadena lateral de sus unidades monoméricas se puede obtener PHA con diversos puntos de fusión, cristalización, flexibilidad, resistencia a la tracción, biocompatibilidad y velocidad de biodegradación (PHB, copolímeros PHB-V). En el mercado existen más de 100 monómeros diferentes. El PHB es altamente cristalino y previo a su punto de fusión tiene un nivel de descomposición elevado, resultando un material frágil. Estas propiedades pueden ser controladas con el contenido de "hydroxy valerato" en el copolímero PHB-V, resultando ser menos cristalino y más procesable. El PHB-V es un termoplástico, puede ser procesado por extrusión, inyección, coating y con técnicas de laminado vía húmeda. Actualmente, el coste es elevado, pero su interés ha crecido debido a su similitud en términos mecánicos y térmicos con el polipropileno y polietileno. Tianan Biologic Material Co. (China) es el mayor productor de PHB con una capacidad



anual de 10 kTde producción.

3.6 - ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

Es un poliéster alifático lineal termoplástico, producto de la esterificación del ácido láctico. El proceso de mayor uso para la obtención del monómero es por vía ROP (Ring Opening Polymerization). Se trata de un proceso de carácter renovable, bajo coste energético, medioambiental y económico (3 \$/kg). Se procesa como granza de polilactida de alta masa molar ($M_w \sim 100000$ Da). El producto final es transparente, de apariencia brillante, alta rigidez y procesable en varios formatos

4 - PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES

A pesar, de las prometedoras propiedades mecánicas encontradas en la literatura para las fibras naturales, las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales son generalmente más bajas de lo esperado. Actualmente, los productos finales o materiales se utilizan solo en aplicaciones sin solicitud estructural (muebles, suelos, equipos de deporte, embalaje, artículos decorativos) con limitadas o nulas aplicaciones estructurales

Por lo general, los materiales fabricados por las empresas con mejores prestaciones mecánicas, no son biodegradables. Utilizan altos contenidos de resina epoxi o poliéster, llegando a tener contenido en volumen de resina del 50%. Las compañías han optado por esta solución, debido principalmente a los problemas de fabricación con los polímeros biodegradables, relacionados con la baja adherencia en la interfase fibra matriz.

En el caso de materiales completamente biodegradables, en la literatura pocas investigaciones o productos comerciales existen con altas propiedades mecánicas. Aunque se han hecho ensayos de materiales compuestos de fibras naturales y resina biodegradable termoplástica (PLA), es actualmente es un reto a superar.

5 - PROCESOS DE FABRICACIÓN

Existen diversos procesos de fabricación convencionales compatibles con las fibras naturales. En el caso de fibra corta aleatoriamente orientada se tiene el moldeo por compresión de láminas (SMC), el método de impregnación con pistola o manual y método de inyección de resina. En el caso de fibra continua, se tiene el método de laminado manual por vía húmeda y curado en estufa o condiciones ambiente, bolsa de vacío, moldeo por autoclave, proceso de inyección o infusión de resina (RTM, RFI, RLI).

5.1 - MODELO POR COMPRESIÓN DE LÁMINAS (SHEET MOULDING COMPOUND)

El SMC es utilizado en procesos de moldeo por compresión en caliente de una fibra en formato corta de vidrio, carbono o natural y una resina termoestable, generalmente poliéster insaturado. Se utiliza para producir piezas de geometría compleja, con bajas propiedades mecánicas, buen acabado superficial y alta cadencia. Durante el proceso se añaden otros ingredientes, tales como aditivos termoplásticos, catalizadores, inhibidores, espesantes y pigmentos, para mejorar sus características y su comportamiento durante el proceso de moldeo del producto final. El material inicial se suministra en forma de lámina y posteriormente a través de la compresión en un molde cerrado se realiza el curado de la resina, bajo presión alrededor de 30-120 bar.

La principal ventaja es la automatización del proceso para cadencias de productos elevada, permitiendo fabricar geometrías complejas con un coste mínimo. Los productos comerciales de fibra natural, no superan los 40 MPa de resistencia a tracción con módulos a flexión por debajo de los 5.0 GPa .

5.2 - LAMINADO MANUAL VÍA HÚMEDA

Proceso desarrollado en un molde abierto, que utiliza generalmente fibra seca en formato corto o tejido y resina aplicada in-situ por vía manual ("Hand lay-up") o con pistola ("Spray lay-up"). El proceso de curado se realiza en condiciones atmosféricas estándar. Se utiliza para fabricar elementos de baja solicitud estructural y bajo coste como cuerpos de caravanas, carenados de camiones, bañeras, platos de ducha, botes pequeños y palas de aerogenerador. La formulación de la resina (epoxi, poliéster, viniléster o fenólica) será específica para conseguir piezas con baja porosidad, curados a temperatura ambiente, bajo coeficiente de contracción y buen acabado superficial .

6 - DESAFÍOS Y LIMITACIONES

6.1 - ABSORCIÓN DE HUMEDAD

Las fibras naturales tienen grupos polares en la celulosa, la cual atrae a las moléculas de agua a través de puentes de



hidrógeno, por lo que tienen una alta tendencia a la absorción de humedad. La absorción de agua causa una inestabilidad dimensional, hinchamiento y pérdida de composición química de la fibra, a través de cambio en el contenido de lignina y despegue entre la fibra y matriz. Todo ello, se traduce en una pérdida de propiedades mecánicas como la rigidez y resistencia a flexión, a tracción, a compresión e impacto. La absorción de humedad por las fibras, puede ser reducida por modificaciones químicas de la fibra con tratamientos de acetilación, metilación, cianoetilación, benzoilación, tratamiento de permanganato o acrilación.

6.2 - TEMPERATURA DE DEGRADACIÓN DE LA FIBRA

La temperatura de degradación de las fibras se encuentra alrededor de los $215 \pm 10^\circ \text{C}$. Se considera que a mayor contenido en celulosa mayor flamabilidad y por lo tanto mayor degradación. Por el contrario, cuanto mayor contenido en lignina menor degradación, debido a la formación de carbón que auto protege el núcleo de la fibra. Agentes acoplantes como el MAPP (Maleic Anhydride grafted Polypropylene) pueden mejorar la estabilidad térmica.

6.3 - COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO

Al tratarse de fibras naturales, las exigencias frente a comportamientos agresivos como el fuego o disolventes, ha de ser limitada. La adición de agentes retardantes como el polifosfato de amonio pueden mejorar el comportamiento frente al fuego, pero su uso en un concepto respetable con el medioambiente se vería limitado por el alto precio (14 \$/kg) y coste ecológico.

6.4 - MEJORA DE LA INTERFASE

La interfase fibra matriz es una zona de difusión o reacción, en la cual dos fases o componentes son química o mecánicamente parcialmente combinados.

Algunas características del material compuesto vienen definidas por las propiedades de la interfase. En el caso de tener una pobre adhesión, las cargas no son transferidas correctamente, lo que se traduce en unas malas propiedades mecánicas. Para mejorar la adhesión entre fibra y matriz, se debe modificar la estructura o morfología de la fibra, eliminando las ceras o pectinas que actúan como barrera para anclar fibra y matriz, modificar o reducir el comportamiento hidrófilo de los grupos hidroxilos (OH) de la fibra, para mejorar la compatibilidad con la matriz. Para ello, se utiliza diferentes tratamientos químicos, aditivos reactivos o agentes acoplantes.

6.5 - TRATAMIENTOS QUÍMICOS PARA MITIGAR LOS INCONVENIENTES

Existe una gran variedad de tratamientos para mitigar los inconvenientes mencionados. Entre ellos, se puede mencionar el tratamiento alcalino, silano, acetilación, benzoilación, acrilación, acrilonitrilo, agentes de acoplamiento maleico, permanganato, peróxido, isocianato, ácido esteárico, clorito de sodio, triazina, derivado de ácido graso (cloruro de oleoil) y bacterias. El objetivo principal de los tratamientos químicos, es eliminar los componentes no celulósicos como las ceras, pectinas, componentes inorgánicos que forman el lumen de la fibra, sustancias aditivas, para transformar la superficie de la misma.

7 - PERSPECTIVAS FUTURAS

Las fibras naturales de origen vegetal pueden competir con la fibra de vidrio; sus costes son similares, las propiedades mecánicas del mismo orden, aunque con mayor variabilidad, y se emplean procesos de fabricación similares, de fibra corta como SMC y de impregnación de tejidos. Como tal, sus posibles aplicaciones son los mercados actuales del GRP ("Glass Reinforced Plastics), principalmente en sectores del automóvil y construcción.

El principal argumento a favor de las fibras naturales está en su sostenibilidad: el consumo de energía es muy inferior, al igual que la producción de CO₂. Los residuos generados en su extracción y tratamiento químico pueden ser controlados, así como el consumo de agua. Si se emplean resinas termoestables el reciclado tiene las mismas dificultades que los compuestos de GRP, aunque si la eliminación es por incineración no quedará ningún resto, aprovechando su combustión. Un inconveniente potencial es que la vida útil del producto puede ser mas corta, al comparar con GRP, por los problemas mencionados de durabilidad.

Considerando todo lo anterior, los análisis de mercado le dan un potencial de crecimiento superior al 10 % en los próximos años.

8 - BIBLIOGRAFÍA

[1] Angel Renato Pozo Morales, 'Materiales Compuestos de Fibras Naturales'.



Tesis Doctoral UPM (2019). Disponible en <https://oa.upm.es/55053/>

[2] P. Pecas et al, 'Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review'.

J. Compos. Sci. 2018, 2(4), 66; <https://doi.org/10.3390/jcs2040066>



Capítulo 20: CALENTAMIENTO RÁPIDO Y DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO

Xabier Irastorza Arregui¹, Miguel Segura Moreno¹, Aroa Iriarte Legarreta¹, Ricardo Mezzacasa Lasarte¹

¹ TECNALIA

Abstract

Many manufacturing processes for composite material structures are based on large and expensive facilities that result in slow, expensive, and energy-inefficient processes. The preforming of dry fiber fabrics, for example, is carried out in large hot drape forming facilities, where conventional heating sources based on infrared lamps are not very efficient, since much of the heat supplied is transferred to the heavy aluminum molds in which the preforming process is carried out. In the current context in which it is essential to reduce the carbon footprint of each component, it is essential to reduce the energy needed in production processes and at the same time achieve competitive cycle times.

In this context, Tecnalia has been working for years on the direct resistive heating technology in order to accelerate and optimize composite material manufacturing processes. The direct application of a current to the carbon fiber material to be processed has the advantage of avoiding the heating and cooling of the molds or other adjacent tools, obtaining the results much more quickly and efficiently than with the methods used until now. In the case, for example, of the preforming process of carbon fabrics, applying heat only to the preform allows reducing cycle times and energy consumption by more than 60% and 80% respectively. This means reducing the cost of the process related to lower energy consumption and shorter cycle time. The quality of the preforms obtained through resistive preforming is the same to that obtained through conventional hot drape forming technology and, in addition, it is a repetitive process that has been validated in industrial manufacturing environment.

The article also indicates that this direct resistive heating technology is not only applicable in carbon fiber preforming processes but could also be used in other manufacturing processes for composite material components.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords:

Fibra de carbono
Preformado
Electroconductor
Calentamiento resistivo directo
Procesos de fabricación
Sostenibilidad
Carbon fibre
Performing
Electroconductive
Direct resistive heating
Efficient manufacturing
processes
Sustainability

1 - INTRODUCCIÓN

En el mercado aeronáutico se está produciendo una transformación sin precedentes en su historia. Los fabricantes de aviones están utilizando tecnologías cada vez más avanzadas para mejorar la eficiencia y reducir el impacto medioambiental, por lo que el driver de sostenibilidad ambiental está transformando toda la cadena de valor de la industria aeronáutica, empujándola a invertir en tecnologías más limpias.

Por otro lado, la competencia entre los fabricantes de aviones es cada vez más importante, lo que supone una mayor innovación y mejora continua en todos los ámbitos. La introducción de nuevos materiales y técnicas de fabricación transforma la construcción y el mantenimiento de aviones y todo ello, además, debe situarse en un escenario de creciente demanda de soluciones de movilidad aérea en el interior de la ciudad, junto con el auge del comercio electrónico y la entrega de paquetes que impulsa la demanda de aviones/ drones de reparto de mercancías.

El proceso de fabricación de Resin Transfer Moulding (RTM), por ejemplo, está adquiriendo una creciente importancia en la industria aeronáutica. Su uso en la fabricación de aeroestructuras está aumentando por su capacidad para producir piezas ligeras y resistentes y porque permiten utilizar materias primas de menor coste y, al mismo tiempo, ofrece un gran potencial de automatización. El proceso de RTM requiere preformas para prevenir distorsiones de la fibra, con lo que la fase de producción de preformas se convierte en una etapa fundamental.

El proceso de fabricación de preformas actual se basa en máquinas de hot drape forming (HDF) donde se instalan moldes pesados de aluminio. Los tejidos de carbono son apilados según la secuencia de laminación definida previo a su transferencia a la instalación de preformado. Los binders típicos utilizados para la consolidación de las preformas se activan en un rango de temperatura de entre 90°C y 120°C. La instalación de HDF da forma 3D a los tejidos

utilizando membranas elastoméricas de alta elongación, mientras aplica calor mediante lámparas infrarrojas. En el proceso, una parte importante de la energía proporcionada se disipa a la membrana, al molde y a los accesorios metálicos circundantes de la máquina, haciendo que el calentamiento de los tejidos de carbono sea muy lento. Además, a medida que se acumula calor en las piezas metálicas, también se necesita un tiempo y energía importante para enfriar las preformas antes de su desmoldeo.

En el proceso global, la mayor parte de la energía consumida se utiliza para calentar elementos que no son necesarios. Por lo tanto, el sistema de refrigeración requiere energía adicional para acelerar el proceso. En consecuencia, el proceso de preformado actual está lejos de ser energéticamente eficiente.

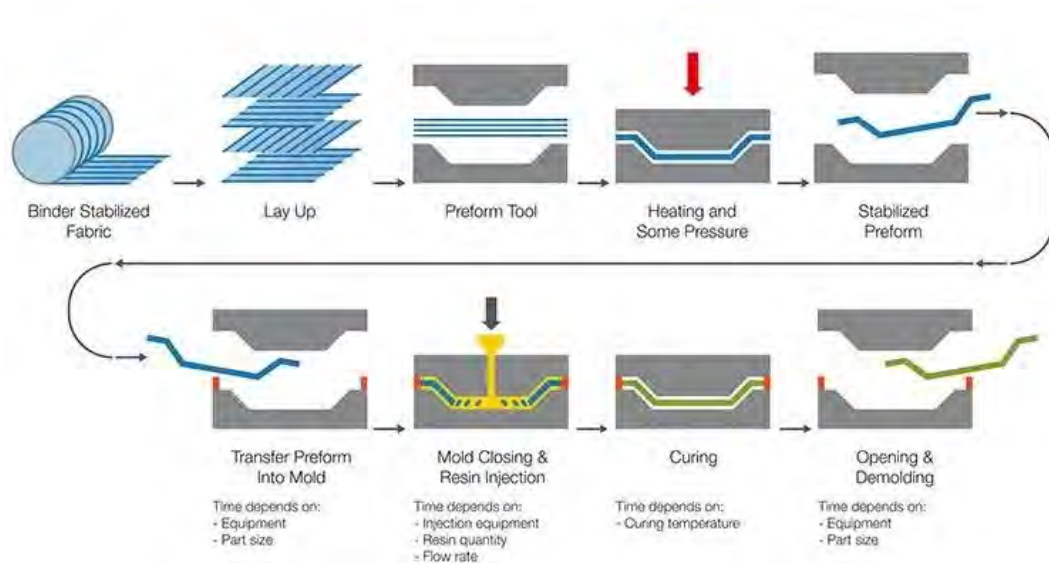


Figura 1: Proceso de Resin Transfer Molding (RTM) en detalle [1]

El Método Resistivo Directo de Preformado viene a dar respuesta a esta problemática de baja eficiencia que presenta el proceso llamado HDF. En esta tecnología de calentamiento, los tejidos de carbono que forman la pieza son utilizados como circuitos eléctricos resistivos para conseguir su rápido calentamiento hasta la temperatura de activación del binder, obteniendo de esta manera la consolidación de las preformas. Mediante el uso de utillajes específicos equipados con electrodos, se consigue que la corriente eléctrica, por efecto Joule, genere el calor exactamente donde se necesita, en los tejidos de carbono. El calentamiento es muy rápido y, en consecuencia, sólo una pequeña fracción de la energía total se disipa hacia el utillaje y la membrana. Esto, a su vez, también acelera la fase de enfriamiento y no es necesario utilizar un sistema de enfriamiento forzado, como pasa en el caso de las instalaciones convencionales de HDF.

2 - CALENTAMIENTO RESISTIVO DIRECTO. ESTADO DEL ARTE

La tecnología de calentamiento resistivo directo está basada en la aplicación directa de corriente eléctrica a las telas de fibra de carbono que forman la preforma [2], aprovechando que éstas son electro-conductoras. La conductividad de la fibra de carbono es mucho menor que la de los materiales metálicos como el aluminio o el cobre, siendo interesantes las fibras para calentamientos tecnológicos [3].

Para aplicar este potencial eléctrico es necesario poner en contacto unos electrodos de cobre al principio y al final de la fibra de carbono.



Figura 2: Aplicando un potencial eléctrico en las fibras de carbono se obtiene calor [4] [5]

Para la implementación del método resistivo directo en procesos de preformado, se desarrollan utillajes de preformado específicos y optimizados, basados en material altamente aislante a nivel eléctrico y térmico para minimizar la disipación de calor. En esos utillajes de preformado se insertan los electrodos que posibilitan el proceso de calentamiento resistivo de los tejidos de carbono.

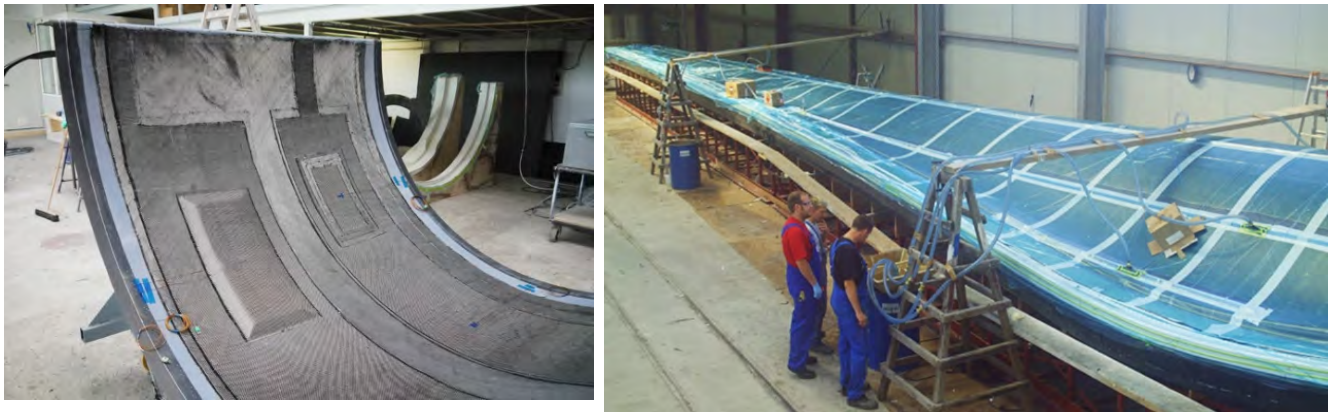


Figura 3: Utillajes de preformado equipados con calentamiento resistivo directo [6]

La tecnología del calentamiento resistivo directo no solo es aplicable al preformado de materiales de fibra de carbono, sino que podría utilizarse en otros procesos de fabricación de componentes de fibra de carbono. A continuación, se detallan aplicaciones en las que se ha utilizado la tecnología del calentamiento resistivo directo.

- Calentamiento resistivo para curado de laminados termoestables. [7]
- Calentamiento resistivo en el preformado de estructuras de tipo sándwich con pieles de carbono.
- Calentamiento resistivo en las líneas de fabricación de towpregs. [8]
- Calentamiento resistivo en aplicaciones de conformado de materiales termoplásticos. [9]
- Calentamiento resistivo en aplicaciones de unión/soldadura de materiales termoplásticos con fibra de carbono.
- Calentamiento resistivo en aplicaciones de cabezales de deposición de cinta tipo ATL o AFP [10]. La solución de calentamiento resistivo vendría a sustituir a los costosos y menos eficientes energéticamente sistemas láser o de luz pulsada empleados habitualmente.

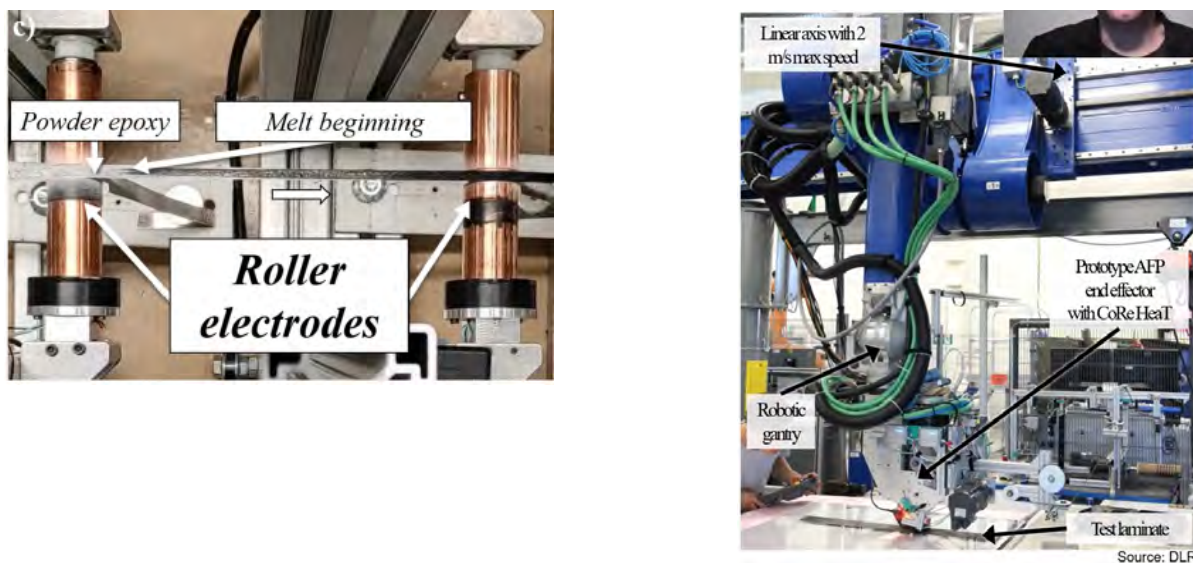


Figura 4: Ejemplos de aplicaciones de calentamiento resistivo aplicado a líneas de fabricación de towpregs [8] a la izquierda y a cabezales de AFP [10] a la derecha

3 - FASE DE DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA EN TECNALIA

Tecnalia comenzó a trabajar en el Método Resistivo Directo para procesos de preformado o de calentamiento de materiales de fibra de carbono en el año 2009. Tras algunas pruebas exploratorias, esta tecnología se implementó en una celda de preformado automatizada que consistía en un utillaje de preformado equipado con electrodos para el calentamiento resistivo de la preforma. Esta invención dio como resultado la primera patente de Tecnalia en este ámbito. [11]

A continuación, Tecnalia continuó evaluando diferentes tejidos de carbono dado que existen diferencias en el comportamiento eléctrico entre los distintos formatos textiles, si bien la mayoría de ellos son adecuados para la tecnología. Para ello, se llevó a cabo una caracterización eléctrica exhaustiva de algunos de los tejidos de carbono más utilizados en el sector aeronáutico. La caracterización incluyó no solo la resistividad de los tejidos en diferentes espesores y configuraciones, sino también la medición de la resistencia eléctrica de contacto entre los tejidos y los electrodos, ya que este es un parámetro clave para controlar el gradiente térmico en la preforma. Para ello, Tecnalia ha desarrollado un método para la caracterización eléctrica de tejidos de carbono y de las resistencias de contacto asociadas al proceso.

Posteriormente, se desarrolló un modelo térmico para el cálculo de la densidad de potencia necesaria en el proceso. Junto con la caracterización eléctrica de los tejidos, el modelo permite una estimación rápida de los parámetros eléctricos que se aplicarán a una preforma específica, en función del tejido de carbono utilizado, las condiciones de contorno, la configuración del laminado y las dimensiones.

Inicialmente, la tecnología sólo podía aplicarse a determinadas geometrías de espesor y sección transversal uniformes, como vigas y largueros. Para hacerlo más universal, se desarrolló una técnica de compensación de resistencia utilizando resistencias variables y estrategia de multi-electrodos que permite su aplicación a geometrías más complejas.

A continuación, se muestran los desarrollos más relevantes llevados a cabo por Tecnalia en relación al calentamiento resistivo directo aplicado a procesos de preformado.

3.1 - DESARROLLO DE UNA INSTALACIÓN DE FABRICACIÓN DE PREFORMAS DE COSTILLAS AERONÁUTICAS PEQUEÑAS Y DE GEOMETRÍA VARIABLE

Para geometrías complejas de pequeño tamaño, Tecnalia ha desarrollado y validado el proceso de preformado resistivo empleando una estrategia de molde con múltiples electrodos, combinado con un sistema externo de compensación de la resistencia eléctrica para mejorar la uniformidad térmica en toda la geometría de la preforma. Para ello, Tecnalia ha desarrollado una célula de preformado basada en una pequeña mesa de compactación mediante vacío en la que se ha integrado un sistema de electrodos que permite adecuar moldes con geometría variables. De esta manera es posible preformar en la misma mesa costillas aeronáuticas que requieren molde s diferentes (de forma secuencial). De esta manera, el trabajo necesario para el intercambio de moldes es mínimo.

En la siguiente figura puede apreciarse la célula de preformado resistivo para costillas desarrollada por Tecnalia, con uno de los moldes validados. A continuación, se incluye la imagen de termografía de una de las costillas y la rampa de calentamiento, en la que se aprecia que todo el ciclo de calentamiento y enfriamiento se realiza en solo 3 minutos.

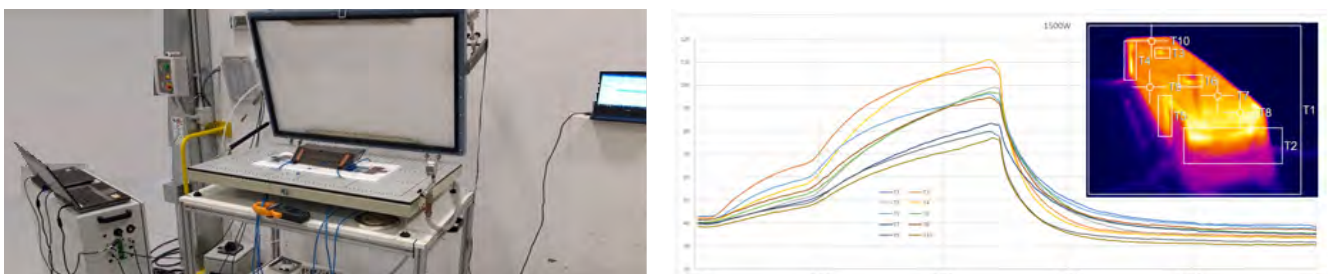


Figura 5: Vista de la célula en las pruebas de validación y ejemplo de termografía de costilla y curva de calentamiento con un ciclo < 3 minutos

3.2 - DESARROLLO DE UNA INSTALACIÓN DE FABRICACIÓN DE PREFORMAS AERONÁUTICAS DE GRAN TAMAÑO

Tecnalia ha colaborado con Fagor-Arrasate para desarrollar una nueva línea de máquinas de hot drape forming (HDF) flexible que permita tanto el preformado tradicional basado en lámparas infrarrojas como el preformado resistivo. Fagor-Arrasate dispone en su catálogo de instalaciones HDF con soluciones de calentamiento tradicionales, pero quería diferenciarse añadiendo a su solución una tecnología de calentamiento rápida, barata y eficiente energéticamente. Es por ello por lo que Tecnalia y Fagor-Arrasate han colaborado en el desarrollo de una instalación HDF que permita el preformado de piezas de carbono de gran tamaño mediante calentamiento resistivo directo.

La validación de la solución se ha realizado sobre una viga aeronáutica representativa de 1500x300mm. Este demostrador tiene las características típicas que posee una viga de este tipo, transiciones bruscas en el número de telas, zonas de drop-off y reducciones de sección muy significativas. Todas estas complejidades de la viga han hecho que se hayan tenido que implementar diferentes estrategias de optimización de proceso con el fin de cumplir las estrictas uniformidades térmicas de calentamiento exigidas por el sector aeronáutico. El tejido de carbono empleado en el demostrador es el habitual aeronáutico Hexply G0926 0/90 5HS 390gsm de Hexcel, que lleva un binder que se activa a una temperatura de 80-100°C y que admite un gradiente de temperatura de 15°C en la fase de preformado.

La fase de desarrollo de la tecnología ha consistido en el habitual proceder de Tecnalia al implementar el calentamiento resistivo en procesos de preformado:

- Caracterización eléctrica de los tejidos de carbono en función del nº de capas de cada sección de la viga.
- Dimensionamiento de la potencia eléctrica global y de cada sección de la viga mediante la herramienta de cálculo Isim-heat desarrollada.
- Optimización del calentamiento de la preforma de la viga en plano. Se han empleado distintas estrategias de optimización con el objetivo de obtener una densidad de potencia uniforme en cada una de las secciones de la viga. La potencia total necesaria para calentar la preforma con un ratio de calentamiento de 15°C/min es de solo 1600W, manteniendo el voltaje por debajo de los 25v.
- Diseño y optimización del utillaje 3D de preformado con la estrategia de electrodos y demás elementos disipadores desarrollados en la fase anterior.

El proceso de preformado desarrollado para esta viga de 1500x300mm, teniendo en cuenta la fase de calentamiento y enfriamiento previo a su desmoldeo, dura solamente 22min.



Figura 6: Perfil térmico del preformado (arriba izq.), imagen del demostrador final (arriba dcha.) e imagen CAD de la instalación de HDF con la solución de calentamiento resistivo integrada (abajo)

3.3 - OTROS TIPOS DE APLICACIONES EN LOS QUE SE HA UTILIZADO EL CALENTAMIENTO RESISTIVO

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, el calentamiento resistivo directo no solo es aplicable al proceso del preformado, sino que podría tener aplicaciones más allá de ese proceso. Las pruebas experimentales realizadas y mostradas aquí abajo corresponden a líneas de trabajo en las que Tecnalia está trabajando.

Set up for resistive welding of PEEK

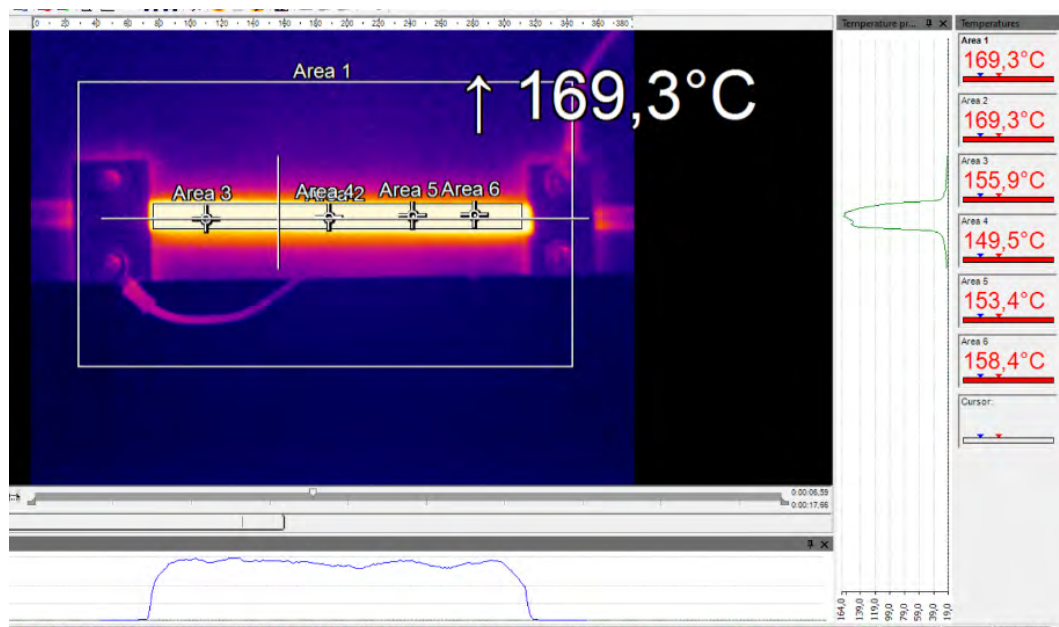
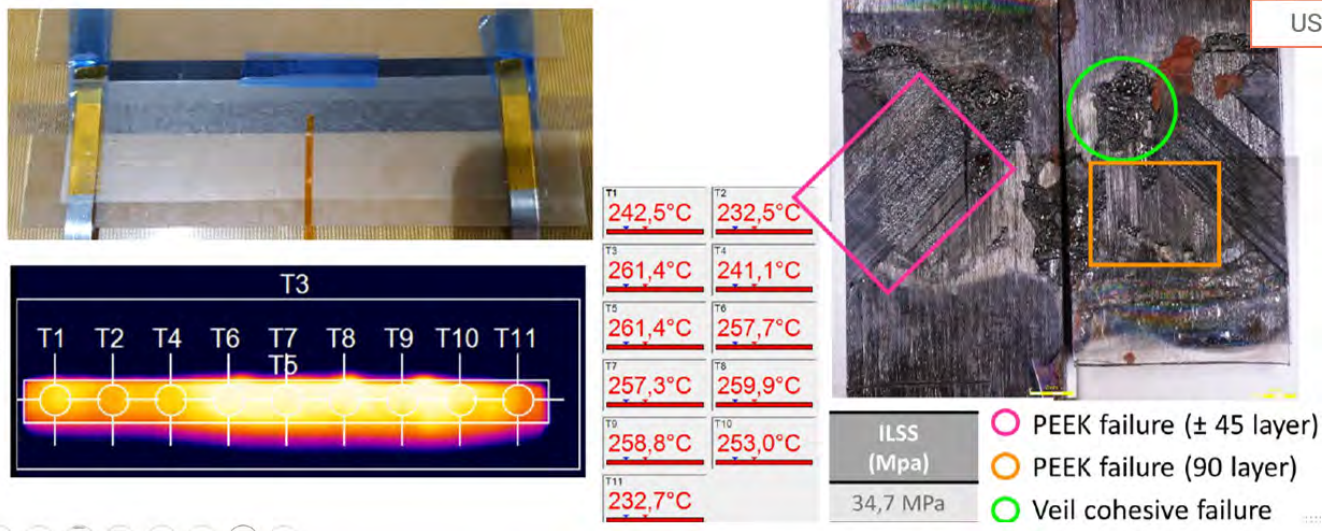


Figura 7: Calentamiento resistivo aplicado a proceso de soldadura de composites (imagen superior) y aplicado a cabezales tipo AFP o ATL para el calentamiento de las cintas (imagen inferior)

Adicionalmente, aunque no sea una aplicación de calentamiento resistivo directo, Tecnalia también ha trabajado intensamente en el desarrollo de utillajes rígidos o membranas flexibles autocalefactados 3D, optimizando (en tiempo de ciclo y consumo de energía) de esta manera los procesos de preformado o curado de materiales compuestos termoestables. En este caso, se fabrican circuitos resistivos de fibra de carbono o metálicos en una máquina automatizada de cosido, y posteriormente estos circuitos resistivos son embebidos cerca de la superficie de los moldes de preformado/curado o en membranas flexibles elastoméricas.

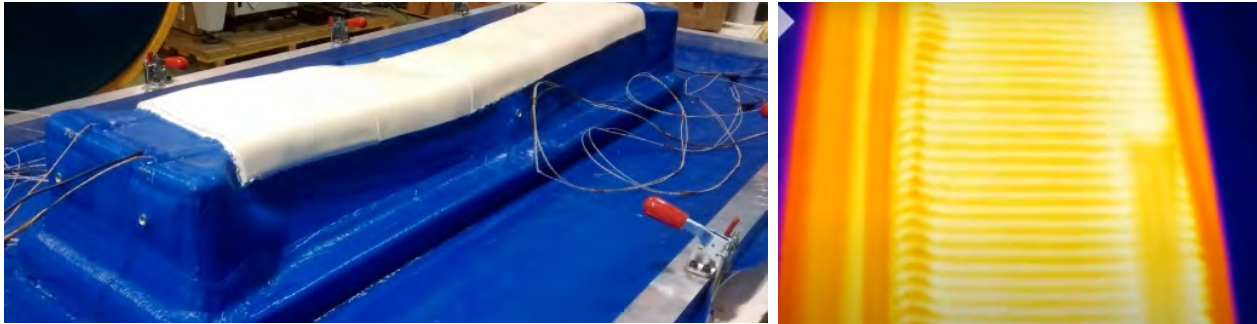


Figura 8: Membrana autocalefactada para curado de pieza termoestable integrando en la propia membrana un circuito resistivo

4 - CONCLUSIONES

La tecnología desarrollada resuelve uno de los inconvenientes asociados a los composites, la lenta y costosa fabricación, en concreto, optimizando los procesos de calentamiento involucrados. Este método de calentamiento de materiales de fibra carbono (por ejemplo, para un proceso de preformado) ultra eficiente energéticamente contribuye a reducir aún más la huella de carbono asociada a la fabricación de componentes en composite de aviones o de otros sectores. Además, permite aumentar la productividad al reducir el tiempo requerido en el proceso de preformado, identificado por la industria como uno de los obstáculos que impiden la difusión de tecnologías de moldeo vía líquida, de menor coste que las tecnologías de los materiales preimpregnados.

Las principales ventajas de esta tecnología de calentamiento resistivo son las siguientes:

- En un proceso de preformado, se alcanzan ratios de calentamiento de entre 10-50°C/min, mientras que en el proceso tradicional rondan los 5-6°C/min.
- En un proceso de preformado, se alcanzan ratios de enfriamiento de entre 10-30°C/min, mientras que en un proceso tradicional rondan los 4-5°C/min.
- En total, en un proceso de preformado, esta tecnología permite reducir los tiempos de ciclo más de un 60%.
- Reducciones del consumo energético mayores que un 80%.
- Tecnología de calentamiento no solo aplicable a procesos de preformado de tejidos de carbono.

5 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://midwestcomposites.com.my/all-you-need-to-know-about-composites/>
- [2] Agencia (2022, 6 de junio). Preformado rápido y eficiente de fibra de carbono basado en calentamiento resistivo directo. Revista Dyna, Noticias de ingeniería. Preformado rápido y eficiente de fibra de carbono basado en calentamiento resistivo directo - REVISTA DE INGENIERIA DYNA (revistadyna.com)
- [3] L. C. Kontaxis, I. E. Chontzoglou, G. C. Papanicolaou (2021). Efficient Use of Carbon Fibers as Heating Elements for Curing of Epoxy Matrix Composites. *Molecules* 2021, 26, 5095. <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/16/5095>
- [4] Fibretemp GmbH & Co. KG (Recuperado el 6 de julio de 2023). *The Idea. The Idea* (fibretemp.de)
- [5] D. Karthik, J. Militky, Y. Wang, M. Venkataraman (2023). Joule Heating of Carbon-Based Materials Obtained by Carbonization of Para-Aramid Fabrics. *C* 2023, 9, 23. <https://doi.org/10.3390/c9010023>
- [6] https://www.fibretemp.de/en/about_fibretemp/application_examples/
- [7] Hayes, S. A., Lafferty, A. D., Altinkurt, G., Wilson, P. R., Collinson, M., & Duchene, P. (2015). Direct electrical cure of carbon fiber composites. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 1(2), 112–119. <https://doi.org/10.1179/2055035915Y.0000000001>
- [8] Murat Çelik, James M. Maguire, Thomas Noble, Colin Robert & Conchúr M. Ó Brádaigh. (2023) Numerical and experimental investigation of Joule heating in a carbon fibre powder epoxy towpregging line. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 164, pages 107285.
- [9] Reese J, Vorhof M, Hoffmann G, Böhme K, Cherif C. Joule heating of dry textiles made of recycled carbon fibers and



PA6 for the series production of thermoplastic composites. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2020;15. doi:10.1177/1558925020905828

[10] <https://event.dlr.de/en/jec2019/core-heat/>

[11] M. Segura Moreno, R. Mezzacasa Lasarte, F.J. Estensoro Astigarraga, J.R. García Martínez, X. Irastorza Arregui, V. Collado Jiménez, O. Beloki Zubiri. Fundación Tecnalia Research&Innovation (2012). Device for the preparation of preforms of carbon fiber-reinforced components (número EP 2511080A1) Espacenet - Datos bibliográficos



Capítulo 21: MATERIALES AUXILIARES REUTILIZABLES. BOLSAS DE VACÍO ALTERNATIVAS

M^a Eugenia Rodríguez ¹

1 EURECAT

Abstract

Auxiliary materials are essential elements for polymer composites manufacturing. Each of these elements performs a specific function and requires particular characteristics depending on the process parameters.

They are generally single-use materials (consumables) and thermoplastics nature, so they could be recovered and recycled. However, due to the manufacturing process of composite parts, this recycling becomes complex due to contamination by resin and fibers and the heterogeneity of the different auxiliary materials.

Because of this, one of the alternatives to reduce the consume of these elements and minimize their environmental impact is to use of reusable auxiliary materials. Currently, there are commercial solutions based on silicones. This alternative must be evaluated for each case, considering parameters such as the number of parts to be manufactured or their size and geometry.

 OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - INTRODUCCIÓN

Muchos de los procesos de fabricación de piezas estructurales en composite polimérico requieren de una serie de materiales auxiliares, también denominado consumibles, que, en su mayoría, no pueden ser reutilizados para una segunda fabricación. La causa principal es su contaminación por contacto directo con la resina, encontrarse pegados entre sí o incluso rasgados o rotos.

Dentro de los materiales auxiliares están las herramientas para la distribución de la resina y para hacer el vacío, conectores, bolsa de vacío, masilla de cierre, tejidos “pelables”, mallas de distribución, manta de absorción y film de sangrado entre otros. Cada uno de estos productos está fabricado con diferentes materiales en función de las condiciones y su finalidad dentro del proceso de manufactura.

Así, por ejemplo, las bolsas de vacío convencionales están compuestas de 3 capas: Un copolímero y una película interior de PA impermeable al estireno. En la figura 1 se incluyen imágenes de diferentes materiales auxiliares utilizados en la fabricación de composites.

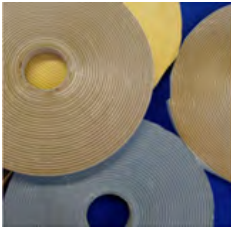
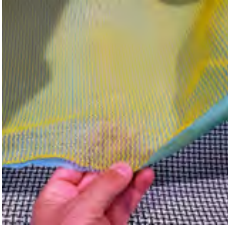
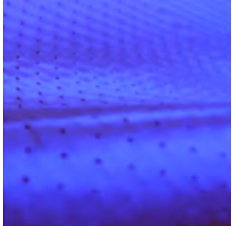
			
Bolsa de vacío	Masilla de cierre	Tejido pelable	Tubería de distribución
			
Malla de distribución	Manta de absorción	Film sangrador	Fittings y conectores

Figura 1: Materiales auxiliares utilizados en la fabricación de composites. Fuente: Resinas Castro

Como se muestra en la tabla 1, cada material auxiliar está fabricado con diferentes materias primas, en su mayoría termoplásticos. En algunos casos, como en los films o bolsas, están formados por varios films de diferente termoplásticos difíciles de separar por medios mecánicos.

Materiales auxiliares	Materias primas
Bolsa de vacío	Poliamida, multicapa polietileno y poliamida, termoplásticos elastoméricos
Masilla de cierre	Elastómero (caucho butílico),
Tejido pelable	Poliamida, poliéster
Tubería de distribución	Polietileno de baja densidad, polietileno alta densidad, silicona
Malla de distribución	Poliéster, multicapa poliéster - polietileno
Manta de absorción	Poliamida, poliéster o tejido mixto poliamida-poliéster
Película de sangrado	Polietileno, polimetilpentano, politetrafluoroetileno
Fittings y conectores	Metálicos, polietileno de alta y baja densidad

Tabla 1: Ejemplo de materias primas utilizadas en la fabricación en los diferentes materiales auxiliares.

Por lo tanto, el reciclado de cada uno de estos materiales tiene una gran complejidad, no sólo por su contaminación con la resina o fibra sino también porque están compuestos por varios materiales difíciles de separar de manera mecánica antes de su reciclado.

En los últimos años, se están buscando alternativas más sostenibles que permitan reutilizar alguno de los consumibles para nuevas fabricaciones y así reducir de manera significativa la cantidad de residuo generado.

Una de las soluciones de mercado actuales, son las bolsas o membranas de silicona que se pueden aplicar directamente en el molde y así conseguir un contramolde elástico y reutilizable. Esta alternativa tiene viabilidad económica para la fabricación de un número elevado de piezas ya que su coste inicial es mayor que las bolsas de vacío convencionales. Sin embargo, como ventaja, se puede señalar la facilidad de uso y la reducción de tiempos de colocación. Además, el empleo de bolsas de vacío de silicona permite reducir o eliminar alguno de los consumibles tradicionales, como el tejido pelable (peel play) o la película de separación.

Se pueden identificar dos tipologías principales; las bolsa o membranas de silicona fabricadas utilizando el molde como modelo y las láminas de silicona. En el caso de la bolsa de vacío de silicona, esta adopta la forma de la geometría a conformar de manera irreversible y, por lo tanto, sólo se podrá utilizar para fabricar una única geometría. Por otro lado, en el caso de las láminas, estas pueden ir sujetas a un marco y el propio sistema de vacío provoca la adopción de la geometría a conformar y, una vez eliminado el vacío la membrana, vuelve a su estado original.

En ambos casos, es posible fabricar hasta 100 piezas, incluso más, si se hace un buen uso durante el procesado del composite.

Sin embargo, para la elección de una u otra se deberán tener en cuenta varios factores como el tamaño de pieza, la geometría a conformar, el número de piezas a fabricar, así como la especialización de los técnicos.

A partir de estos dos conceptos y teniendo en cuenta la pieza y el proceso de fabricación, es posible encontrar en el mercado diferentes soluciones basadas en siliconas como; bolsas tipo sobre, bolsas de silicona con marco, mesa con membrana de silicona, intensificadores o vejigas entre otras. La figura 2, muestra varios ejemplos de siliconas utilizadas para la fabricación de composites.



Figura 2: Bolsa o membra de silicona: a) Silicona con forma b) Lámina de silicona. Fuente: Smooth on y Vacform Composites

2 - RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los procesos en los que los materiales auxiliares son empleados incluyen el procesado de preimpregnados, la infusión de resinas, la laminación manual, el enrollamiento de filamento el moldeo por compresión de composites termoplásticos, etc.

Estos materiales son un problema medioambiental importante en el sector, ya que en su mayoría son de un solo uso y se convierte en un residuo. Este residuo, es voluminoso, está contaminado de resina y, además, está compuesto de diferentes materias primas difícil de separar de manera mecánica.

Actualmente, las bolsas de silicona reutilizables son una alternativa comercial existente para la sustitución de las bolsas de vacío convencionales. Las bolsas de silicona permiten su reutilización para la fabricación de más de una pieza de composite. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, al ser un material termoestable, una vez acabada su vida útil, no podrá recuperarse y reciclarse con los medios técnicos actuales.

Capítulo 22: CONCEPTOS DE DISEÑO BASADOS EN CONSIDERACIONES Y METODOLOGÍAS DE BAJA HUELLA DE CARBONO, FACILIDAD DE SEGREGACIÓN Y RECUPERACIÓN

Blanca Lekube¹, Pablo Larreategi¹

¹ LEARTIKER

Abstract

In the current context of transitioning towards a circular economy and the digital age, the design of products based on composite materials requires a rethinking of decision-making processes. It is necessary to incorporate methodologies that include sustainability concepts, from selecting materials that can be revalorized to designing a product so that segregation at the end of its useful life is as simple as possible, always ensuring the technical, functional, and safety requirements of the products. This presents a complex scenario that will be elaborated on in the following sections:

 OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

1 - SELECCIÓN DEL MATERIAL

Hasta hace poco y aún hoy en día, la elección del material a utilizar en una pieza se ha basado mayormente en dos variables: por una parte, en el cuaderno de especificaciones del componente y, por otra parte, en el precio del material. La integración de criterios basados en análisis de ciclo de vida (ACV, detallado en el capítulo xx) para el uso de materiales con menor impacto ambiental será clave para aumentar la circularidad en el proceso de diseño de componentes basados en composites.

El uso de materiales más sostenibles incluye tanto matrices como refuerzos reciclados (Cap. 16) y biobasados (Cap. 16). También es necesario evitar el uso de sustancias tóxicas y peligrosas, teniendo en cuenta aquellas en las que su uso esté en proceso de ser restringido, dado que serán un problema para cuando el producto llegue a su final de vida. En cada caso y aplicación se debe valorar la posibilidad de utilizar uno u otro material, teniendo en cuenta los aspectos comentados anteriormente, pero también la disponibilidad de materiales.

Las fibras recicladas, por ejemplo, se encuentran mayormente en forma de fibra corta en la actualidad, por lo que aplicaciones que requieran refuerzos continuos tendrán que buscar alternativas más sostenibles en las resinas utilizadas. Otro factor a tener en cuenta es la variabilidad que presentan los materiales reciclados, por lo que, su uso tendrá que ir acompañado de estrategias de modificación de las formulaciones de material, así como de monitorización y control durante el proceso de fabricación.

La reciclabilidad, es decir, tener en cuenta el final de vida del producto durante la concepción del mismo, es un factor indispensable en la actualidad. Es necesario integrar diferentes conceptos que faciliten el reciclaje del producto a final de vida, como la minimización del uso de diferentes materiales, priorizando conceptos monomaterial a ser posible. Acciones encaminadas a este objetivo serían la funcionalización de materiales, para que un mismo material pueda aportar más funciones al producto, o funcionalizar el diseño, para reducir el número de piezas.

2 - PROCESO DE PRODUCCIÓN

La etapa de producción presenta altos impactos ambientales debido a los consumos energéticos de los procesos y los residuos generados en los mismos. Desde el punto de vista del diseño hay menos áreas de actuación para minimizar estos impactos, sin embargo, hay aspectos que se pueden considerar. Por una parte, diseñar los procesos para conseguir un producto con un conformado próximo a la forma final o *near net shape*, reduciendo así el número de etapas en la producción, incluyendo los procesos de ensamblado. Por otra parte, hay que intentar diseñar procesos más eficientes, es decir, de menor consumo energético y menor producción de emisiones y residuos. En este último caso, los scraps producidos pueden reutilizarse de forma continua reintroduciéndolos en el proceso, práctica ya bastante extendida por ejemplo en el moldeo por inyección.

3 - DISEÑO DE COMPONENTE

Las decisiones tomadas en las etapas tempranas del diseño y desarrollo de un producto tienen que estar orientadas a minimizar el impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida y fundamentalmente deben de tener en cuenta:

- **Mejorar el concepto del producto:** Repensar la función del producto y ofrecer soluciones innovadoras. Agrupar funciones y reducir la necesidad de postprocesados.
- **Desmaterialización:** Sustituir el producto físico por una alternativa digital. Avanzar en la precisión de las simulaciones (Proceso, estructural o función).
- **Optimización** del uso de materiales sin perjudicar a la calidad del producto, utilizando, en la medida de lo posible, materiales de bajo impacto ambiental. La utilización de herramientas de optimización topológica nos ayuda a optimizar la forma y la estructura del producto para reducir el consumo de material y energía.
- **Incrementar la vida útil del producto:** Diseñar productos duraderos, reparables y actualizables, utilizando herramientas de predicción de vida.
- **Optimización al final de la vida útil:** Facilitar la reutilización, el reciclaje y la valorización de los componentes del producto.
- **Diseño modular:** Promover diseño de componentes modulares de fácil desmontaje y reensamblado, donde la separación de materiales para su correcto tratamiento sea sencilla.

Esta mejora se puede abordar por una parte desde el diseño clásico, básicamente apoyándose en la experiencia del diseñador. Por otra parte, existen las metodologías avanzadas, en las que se va a centrar este apartado. El desarrollo de producto digital se puede definir como un método computacional integrador que tiene como objetivo diseñar nuevos materiales, productos o estructuras que cumplan criterios de rendimiento específicos y nos permita reducir su impacto ambiental, además de los costos asociados.

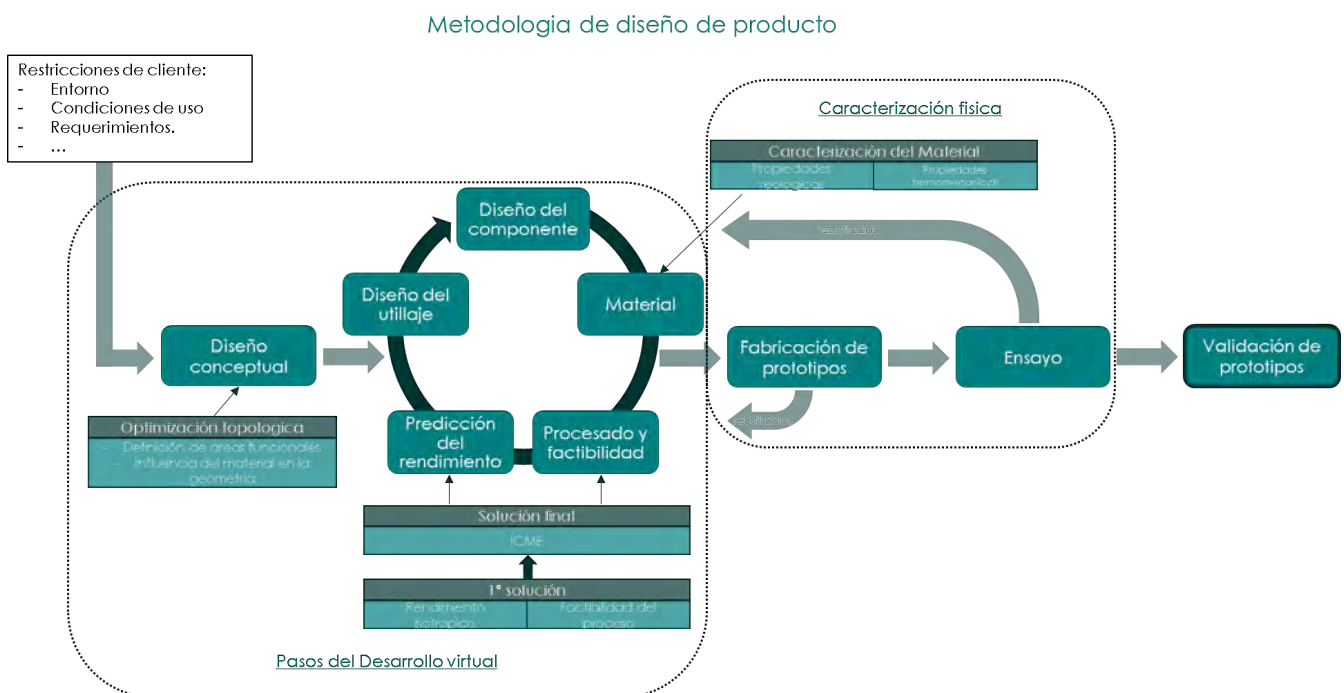


Figura 1: Metodología de diseño de producto. Fuente: Leartiker

Esta metodología está dividida en las siguientes fases:

- Diseño conceptual: Optimización topológica.
- Diseño integrativo del componente.
 - Caracterización de material.
 - Simulación de proceso.
 - Simulación estructural y de función.
 - Diseño de los utillajes.



3.1 - OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Es una metodología que lleva implantada desde hace años, pero que requiere de mayor recorrido para desarrollarse. Apoyado en la inteligencia artificial, puede contribuir a la reducción del impacto ambiental, disminución de la incertidumbre y de los márgenes de seguridad en la concepción del diseño.

La optimización topológica nos permite explorar e identificar la distribución de material óptima dentro de un espacio de diseño definido, teniendo en cuenta las cargas, restricciones aplicadas y procesos de fabricación. Su implementación en el ámbito de los composites ofrece una serie de ventajas significativas.

- **Reducción de peso:** Eliminando material en zonas de baja tensión y redistribuyéndolo en zonas de alta tensión, hasta alcanzar la solución óptima que cumpla con los criterios establecidos, sin aminorar el rendimiento y mejorando su eficiencia estructural. Al reducir la cantidad de material, reduce los costes y minimiza el impacto ambiental asociado a la producción.
- **Mayor libertad de diseño:** Ofreciendo la capacidad para generar formas complejas y orgánicas.

La combinación de este método con el conocimiento experto en materiales y fabricación, permite a los ingenieros analizar la configuración resultante y exportar el modelo para su posterior análisis estructural y fabricación.

3.2 - DISEÑO INTEGRATIVO

En el ámbito del desarrollo de productos con materiales compuestos, la simulación computacional para crear un gemelo digital se ha convertido en una herramienta indispensable para evaluar su comportamiento antes de la fabricación. Ha abierto la puerta al uso de materiales compuestos en aplicaciones históricamente exclusivas para materiales metálicos. Una alta correlación en las simulaciones, es decir, una estrecha similitud entre los resultados de la simulación y el comportamiento real del producto, ofrece una serie de beneficios específicos para este tipo de materiales y la reducción de su impacto ambiental:

- **Disminución en la Fabricación de Prototipos y Uso de Materiales:** La necesidad de construir prototipos físicos se reduce considerablemente, lo que genera un ahorro significativo en costos de materiales, mano de obra y tiempo. Se minimiza el desperdicio de material compuesto, que suele ser costoso y difícil de reciclar, contribuyendo a la sostenibilidad del proceso.
- **Reducción del Tiempo de Desarrollo:** La detección temprana de errores y problemas de diseño reduce la necesidad de rediseños y modificaciones posteriores, optimizando el tiempo de desarrollo.
- **Mayor Precisión en la Predicción de Propiedades:** Las simulaciones pueden predecir con mayor precisión las propiedades mecánicas, térmicas y otras propiedades del producto final, como la resistencia, la rigidez y la resistencia a la fatiga, proporcionando información crucial para el diseño. Los componentes poliméricos exigen una evaluación precisa de su vida útil para garantizar su seguridad, confiabilidad y rendimiento a lo largo del tiempo, buscando alargar la vida útil del producto. Debido a la complejidad de estos materiales, con diferentes estructuras moleculares, aditivos y propiedades, se requiere un conocimiento profundo de su comportamiento para una predicción precisa. La predicción de la vida útil siempre implica un cierto grado de incertidumbre, por lo que es necesario realizar una validación constante de los modelos y pruebas de comparación de los resultados con datos de productos en uso real. La realización de estas pruebas constituye largos tiempos de ensayo, por lo que es cada vez más importante el desarrollo de metodologías aceleradas basadas en técnicas de Machine Learning, que nos ayudan a realizar ensayos en tiempos más cortos y sostenibles desde el punto de vista de consumo energético.
- **Optimización de la Fabricación:** La simulación de proceso puede ayudar a optimizar los procesos de fabricación de composites, como la laminación, el moldeo por inyección y el curado, mediante la identificación y corrección de problemas potenciales. Se pueden predecir y prevenir defectos como la formación de vacíos, la delaminación y las distorsiones, mejorando la calidad del producto final. La simulación puede ayudar también a optimizar el diseño de utillajes específicos para composites antes de su fabricación, reduciendo costos y tiempo de producción. Se pueden identificar y corregir problemas potenciales en la fase de diseño, evitando la necesidad de modificar o rehacer utillajes, mejorando la eficiencia del proceso.

La reducción del tiempo de desarrollo, la disminución de prototipos, el uso eficiente de materiales y la optimización de la fabricación son solo algunos de los aspectos que la convierten en una herramienta indispensable en la industria de composites actual, permitiendo un desarrollo de productos más eficientes, competitivos y sostenibles, impulsando la innovación y el crecimiento del sector.



4 - REDUCCIÓN DEL IMPACTO DURANTE EL USO

Un objetivo importante en la fase de diseño es intentar extender la funcionalidad del producto en el tiempo, tanto a nivel técnico como estético, para evitar lo posible un reemplazo de este.

Para ello, como se ha comentado en la sección anterior, se debe contar con metodologías avanzadas para diseñar productos con mayor durabilidad y fiabilidad durante su vida útil. Además de esto, otro aspecto importante es la integración de elementos de monitorización del producto, que permitan controlar el estado del producto a través de la adquisición de datos en tiempo real. De esta forma, se pueden identificar estados o defectos previos a un daño irreversible, lo que permite reparar el defecto y reemplazar piezas específicas del producto.

Al mismo tiempo, el producto deberá ser diseñado para facilitar dicha reparación, incluyendo conceptos de modularidad y fácil desensamblado. Por una parte, las estructuras modulares proporcionan la posibilidad de reemplazar solo la parte del producto que haya sido dañada. Un ejemplo de esto son las baterías de los coches eléctricos, donde cada vez es más frecuente encontrar diseños modulares, para que, en caso de daño de alguna celda, no haya que reemplazar las baterías completas.

Por otra parte, pensar en el desensamblado durante la etapa de diseño posibilita el facilitar el acceso a las diferentes piezas que necesiten ser reparadas o reemplazadas. Una consideración importante pensando en la etapa de uso del producto es, que las uniones a través de fijación mecánica son la opción más sencilla de desensamblado, por lo que será la opción preferente en los casos en los que se prevea la necesidad de un desensamblado frecuente para reparación, revisión o mantenimiento.

Por otra parte, es favorable también hacer diseños estándar de piezas auxiliares de fabricación u otro tipo de útiles de unión que simplifiquen la búsqueda de reemplazos.

5 - CONSIDERACIONES DE FIN DE VIDA EN EL DISEÑO

Una vez que el ciclo de vida del producto ha llegado a su fin, las decisiones tomadas durante la fase de diseño son críticas para que se pueda llevar a cabo una gestión adecuada del residuo, con el objetivo de valorizar la mayor parte de este.

La primera opción a priorizar es el reúso del producto, para la misma finalidad para la que fue creado, o para un producto que responda a otras funcionalidades. Para ello habrá que diseñar el producto para alargar su vida útil más allá de un solo ciclo de vida, intentando que no pierda características técnicas en la medida de lo posible. En estos casos, será necesario en la mayoría de los casos llevar a cabo procesos para recuperar una estética o un cambio de funcionalidad, para reutilizar el producto.

En caso de no poder ser reutilizado, la opción más deseada es la revalorización de los materiales y componentes que constituyen el producto. Para favorecer esta vía, hay varios aspectos que se pueden considerar durante el diseño relativos al desensamblado y al tipo de unión en caso de materiales disimilares:

- Como se apuntaba en la sección anterior, la facilidad de desensamblado posibilitará la extracción de las diferentes piezas con facilidad, haciendo este proceso más económico y eficiente, por tanto, favoreciendo su revalorización. También en este caso, las uniones a través de fijación mecánica será la opción más sencilla para separar componentes de materiales disimilares.
- El uso de adhesivos químicos con reacción química irreversible puede ser necesaria en ciertos casos debido a su gran poder adhesivo y resistencia a otros factores como la temperatura, pero presentan un problema para el desensamblado y para la revalorización de los materiales en su fin de vida. Por lo tanto, hay que ponderar la idoneidad de su uso en cada caso.
- Hay otro tipo de adhesivos que incorporan partículas que pueden expandirse con la temperatura, lo que permite un despegado aplicando un proceso de temperatura controlada. Es una tecnología innovadora que está siendo estudiada actualmente y presenta un potencial para uniones multimaterial.
- Existe la posibilidad de promover las uniones a través del proceso en combinación con tratamiento superficiales, lo que evita el uso de adhesivos. En este caso hay una variedad de tratamientos dependiendo de los materiales utilizados, como tratamientos de texturizado láser, de plasma o tratamientos químicos. Una vez tratado el sustrato, se promueve la adhesión a través del proceso, utilizando técnicas como el sobremoldeo o la compresión.

Una vez ponderados los procesos de unión y desensamblado de los mismos, la elección de los materiales durante la etapa de concepción del producto será clave para la revalorización, por lo que se deberán elegir materiales reciclables en la medida de lo posible, priorizando flujos de material en los que actualmente existan canales de reciclaje. También el uso de materiales compostables en los casos en los que sea posible y tenga sentido, posibilita la

valorización de estos residuos en compost. Cuando las opciones de reúso, revalorización y compostaje no sean posibles, se encaminará el residuo a incineración con recuperación de energía. En caso de que cualquiera de las opciones mencionadas no fuera posible, los residuos serán depositados en vertedero. Sin embargo, es necesario evitar esta opción siempre que sea posible, dado que es el final de vida menos deseable desde el punto de vista de sostenibilidad.

6 - MARCAJE DE PRODUCTOS E INTEGRACIÓN DE DATOS PARA PASAPORTE DIGITAL

Incluir el marcaje de productos puede promover y facilitar el reúso y revalorización de estos. Actualmente existen infinidad de materiales compuestos y combinaciones de estos con otros composites o metales, que complican mucho el proceso de revalorización.

Integrar un marcaje de productos y un proceso de adquisición de datos a través del mismo durante la etapa del diseño contribuiría a la sostenibilidad del producto a través de la recopilación de datos del producto, desde el origen del material, tipo, información del proceso utilizado para su manufactura, incluyendo métodos de unión, instrucciones de desensamblado, tiempo de uso, información sobre el mantenimiento y reparaciones llevadas a cabo, terminando con las opciones de final de vida para el mismo. Toda esta información incrementaría el potencial del producto para ser reutilizado o revalorizado.

Existen opciones de marcaje como por ejemplo la identificación por radiofrecuencia (RFID por sus siglas en inglés), donde se capturan datos de productos en forma automática y efectiva, utilizando la radiofrecuencia para la identificación de objetos a distancia. Lo más adecuado sería implantar un sistema estandarizado para la adquisición y almacenaje de datos.

Hay que tener en cuenta también que la legislación a nivel europeo pretende implantar el Pasaporte Digital de Producto en los años venideros, por lo que facilitar la captura de datos de los productos será de vital importancia.

7 - CONCEPTOS LOGÍSTICOS EN EL DISEÑO

En el proceso de diseño también se tendrá en cuenta conceptos logísticos como el almacenaje. Por ejemplo, en el caso de piezas voluminosas se tendrá en cuenta que puedan ser apilables, para optimizar el espacio utilizado para almacenaje. La ergonomía de los productos para su manipulación puede también tenerse en cuenta.

Otras decisiones de diseño afectarán también a la logística de piezas intermedias, que deben ser almacenadas antes de su ensamblaje. El hecho de diseñar una pieza con procesos near shape que eviten pasos de ensamblado, o sustituir piezas de diferentes materiales por una única pieza monomaterial, evitará necesidades de almacenaje y hará los procesos de producción más eficientes y sostenibles.

8 - EJEMPLO LLEVADO A CABO EN LEARTIKER

A continuación, se presenta un ejemplo de ecodiseño llevada a cabo en Leartiker, con un rediseño de la pieza metálica original. Se muestra el proceso de ecodiseño llevado a cabo apoyados en herramientas digitales, para conseguir una pieza más ligera que incorporara diferentes piezas de materiales de origen disimilar en un monomaterial, evitando un ensamblaje intermedio además de la aplicación de un coating.

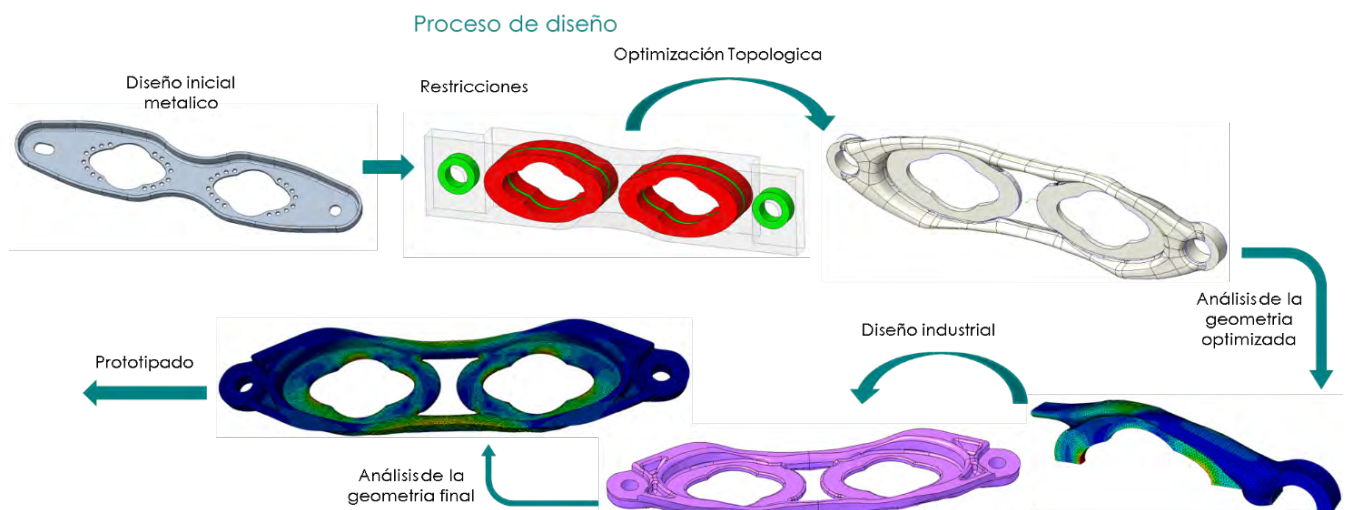


Figura 2: Proceso de ecodiseño. Fuente: Leartiker



Capítulo 23: REVALORIZACIÓN DE FIBRAS DE REFUERZO RECICLADAS MEDIANTE TECNOLOGÍAS TEXTILES

Iván Doménech Martínez¹, Javier Pascual Bernabeu¹

¹ Asociación de investigación de la industria textil (AITEEX)

Abstract

This chapter addresses the environmental and energy challenges posed by the increasing production of composite materials, particularly those reinforced with carbon and glass fibres. Current recycling technologies focused on fibre recovery, such as thermal and chemical methods, now enable the production of fibres suitable for reintegration into the value chain. The chapter details adapted textile technologies for processing these recycled fibres, covering methods from non-woven fabric production to the newest manufacturing technology of yarns and unidirectional tapes. Technologies such as carding and yarn formation are analyzed, highlighting the need for hybridization with virgin materials to enhance the mechanical properties of the final products. While current advances do not yet match the performance of virgin materials, ongoing research continues to optimize these processes, paving the way for the industrialization of more sustainable composites, with applications ranging from lightweight structures to sectors with higher mechanical requirements.

OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords:

Reuse
Recycling
Recycled filaments
Nonwovens
Ud tapes
Textile technologies
Weaving
Reutilización
Reciclado
revalorización
Hilos fibra reciclada
No-tejidos
Cintas unidireccionales
Tejeduría
Composites sostenibles
Tecnologías textiles

1 - INTRODUCCIÓN

El crecimiento en la utilización de materiales compuestos supone un reto ambiental asociado a la gestión del residuo procedente del fin de la vida útil de los composites, el cual se estima que sea de 34,2 kt de material compuesto de fibra de carbono para 2050, además del coste energético que supone fabricar dicha fibra virgen [1-2]. Por ello, existe un gran número de investigaciones enfocadas en el reciclado de los composites de fibra de carbono (rCF) y vidrio (rGF) para su posterior uso como material de refuerzo principalmente focalizados en la recuperación de la fibra al presentar el mayor valor añadido de los componentes del composite [3].

El método de reciclado por molienda es el más económico, por tiempo, energía y por la ausencia de reactivos ni acelerantes. El problema de este método de reciclado es la limitación en la longitud de la fibra por el propio proceso de molienda [4-5-6].

Con el fin de conseguir una fibra reciclada de mayor longitud se opta por métodos de reciclado con los que se consigue eliminar la resina (matriz) para obtener la fibra seca con la máxima longitud posible. Tanto el reciclado químico como el térmico persiguen este fin con resultados prometedores en la actualidad.

En el caso del reciclado químico, el objetivo es conseguir la disolución de la resina, generalmente por el procedimiento de solvólisis [3], mientras que el reciclado térmico consiste en la pirólisis de la resina, dada la baja temperatura de degradación que posee con respecto a las fibras de carbono o de vidrio que la refuerzan. El proceso de pirólisis generalmente se realiza en dos pasos, en un primer paso se eleva la temperatura hasta 500-700°C en atmósfera inerte (N₂). Y en el segundo paso se oxidan parcialmente los restos de carbón pirolizado a 550°C para limpiar la fibra [7]. Se ha observado una reducción de alrededor -10% en las propiedades mecánicas de las fibras recicladas respecto de las vírgenes de ahí su interés en la reutilización de las mismas al ser poco significativa [8]. No obstante, aunque menos instaurado en la actualidad, la pirólisis mediante lecho fluidificado permite extraer una fibra con mejores propiedades mecánicas sumergiendo el composite en un lecho de arena de sílice a temperaturas de entre 400-650°C [3].



Ambas tecnologías de reciclado en el caso de la fibra de carbono presentan un balance energético positivo, situándose entre los 5-30 MJ/kg para las tecnologías de pirólisis y entre 21-91 MJ/kg para las tecnologías de solvólisis, siendo considerablemente menor que el necesario para obtener la fibra virgen de carbono 183-286 MJ/kg [9]. Por ello, con el fin de introducir las fibras recicladas en la cadena de valor para conseguir los productos textiles intermedios de máximo valor añadido, el reciclado químico y térmico son las opciones más adecuadas por la longitud y calidad de las fibras obtenidas [10].

Por este motivo, la investigación y adaptación de tecnologías textiles para el procesado de fibra cortada, como el cardado, la hilatura y la tejeduría, que se tratan en este capítulo, son soluciones de gran interés para la industria, ya que permiten obtener artículos textiles intermedios aptos para la generación de nuevos composites.

2 - TECNOLOGÍAS DE REVALORIZACIÓN MEDIANTE PROCESOS TEXTILES

Con longitudes de fibra superiores a 25-30mm actualmente es posible la obtención de no-tejidos a escala industrial mediante tecnología seca o “drylaid” y con longitudes inferiores <10mm por fabricación en húmedo “wetlaid”, no obstante, aunque con menor grado de madurez se están desarrollando tecnologías alternativas viables para la obtención de hilados y la posterior obtención de tejidos con fibras recicladas con longitudes superiores >30mm, los cuales a diferencia de los no-tejidos, son similares en cuanto a aspecto a los tejidos habitualmente utilizados en la industria y presentan mayor longitud de fibra, mejorando con ello las posibles aplicaciones finales.

En el caso de los no-tejidos, principalmente su obtención se realiza mediante dos tecnologías: wet/dry-laid. En estos no-tejidos obtenidos dry-laid con carda es posible conseguir una alta orientación de las fibras, como demuestra M. Khurshid et al. [11], aunque como contrapartida presentan un porcentaje de fibras con pérdida de longitud muy significativo implicando un bajo rendimiento mecánico de los intermedios finales obtenidos.

En el caso de la formación de hilos con fibras de carbono recicladas, a pesar de tratarse de una tecnología innovadora con bajo grado de madurez dada la dificultad de procesado que presentan las fibras de refuerzo. Actualmente, hay numerosos estudios sobre la influencia en la longitud de la fibra de carbono durante su procesado en aspectos como el retorcido de los hilos y el porcentaje de fibra carbono resultado, y su afectación en las propiedades del hilo final y del composite. De estos estudios se extrae que, a mayor longitud de fibra, mejores propiedades mecánicas del hilo resultante y, en consecuencia, del composite [12], mientras que también se hace patente la existencia de una disminución de las propiedades a tracción con el aumento del retorcido (necesario para obtener hilos manipulables) debido a la rotura de fibras, siendo necesario buscar el equilibrio entre ambos parámetros para la obtención de hilados adecuados [13]. No obstante, estas tecnologías en la actualidad desafortunadamente no permiten la obtención de intermedios compuestos 100% por fibras recicladas, siendo necesario la introducción de fibras de otra naturaleza para su revalorización [11].

El principal reto tecnológico de estas tecnologías versa en la modificación y adaptación de las tecnologías tradicionales textiles, de forma que permitan procesar fibras intrínsecamente frágiles en procesos mecánicos, con alta conductividad eléctrica (rCF), con alta generación de electricidad estática y con una baja resistencia a flexión, todo ello con el objetivo de minimizar la disminución de la longitud de las fibras y, en consecuencia, mejorar las propiedades mecánicas de los composites obtenidos a partir de estos intermedios [14].



Figura 1: Diagrama de revalorización de fibras de refuerzo mediante tecnologías textiles (AITEX)

2.1 - TECNOLOGÍAS DE OBTENCIÓN DE NO-TEJIDOS (NONWOVENS)

Para el procesamiento de las fibras de refuerzo recicladas en no-tejidos, se han desarrollado principalmente, dos tecnologías clasificadas según su nomenclatura en no-tejidos obtenidos por: vía seca (Drylaid) y vía húmeda (Wetlaid).

El proceso en vía seca es un proceso habitual en la industria textil desde la antigüedad, tanto para la obtención de no-tejidos como para el desarrollo de hilados de fibra cortada, tal como se describe en el siguiente apartado. En los últimos años, la tecnología de cardado se ha habilitado para fabricación principalmente de no-tejidos de fibra de carbono reciclada que dan lugar a intermedios anisotrópicos aptos para la obtención de nuevos composites termoplásticos y termoestables con muy bajos requerimientos mecánicos, pero con gran disminución del peso específico [15].

Estos métodos suelen escogerse en función de la longitud de las fibras. Por ejemplo, en el caso de las fibras cortas con longitudes inferiores a 10 mm., estas pueden procesarse para la obtención de no-tejidos por vía húmeda. Y en el caso de las fibras más largas, generalmente superiores a 25-30mm, estas pueden procesarse para obtener no-tejidos e hilados por vía seca (carda).

2.1.2 - TECNOLOGÍA POR VÍA SECA: CARDA Y CONSOLIDADO POR PUNZONADO

El principal propósito del cardado es desenredar y mezclar las fibras para formar un velo homogéneo de peso uniforme por unidad de área. Este velo se forma a través de la apertura y paralelización de las fibras mediante unos rodillos dentados situados en la máquina de cardado. Los cilindros de la carda se combinan de forma que unos trabajen las fibras dando lugar a su peinado y paralelización y otros limpian el exceso de fibras del velo que están formando para mejorar su homogeneidad. Los cilindros de las cardas cuentan con unos dientes llamados "guarnición" que en función de su geometría y sentido de giro realizan el proceso de cardado, siendo necesario diseñarlos y adaptarlos para el procesamiento de cada tipo de fibra en función de sus características. Especialmente con las fibras de refuerzo, para evitar su degradación y rotura.

Normalmente en la configuración de las cardas, se cuenta con un cilindro central de mayor tamaño encargado de la distribución de las fibras y el transporte del velo (cilindro central). Este cilindro está rodeado de pequeños cilindros satélites de cardado, que pueden ser "trabajadores" o "limpiadores" y normalmente están situados por parejas. Las combinaciones de distintos tipos de cilindros permiten que una proporción de la fibra que pasa a través de la máquina se retrase a medida que gira a la superficie de los cilindros trabajadores y limpiadores, antes de ser devuelta al cilindro central.

Por otro lado, hay unos cilindros llamados "doffers" que se encargan de eliminar la fibra del cilindro central y condensarlas en el velo precursor al no-tejido. Esta tipología de no-tejidos obtenidos tras procesos de cardado,

habitualmente presentan una anisotropía alta, con un ratio de MD:CD > 5:1. Siendo “MD” la dirección de avance de la máquina y “CD” la dirección transversal.

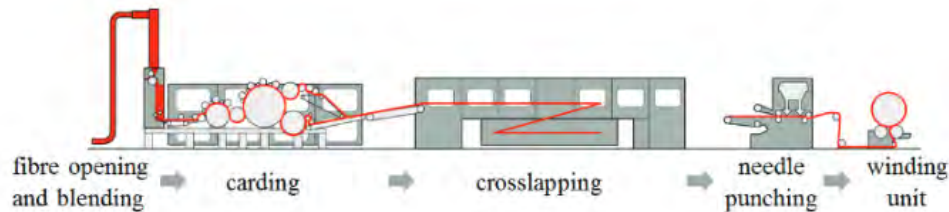


Figura 2: Diagrama proceso Drylaid (carda + punzonado) para la obtención de no-tejidos (Aurefa solutions GmbH)

Posteriormente, para las fibras de refuerzo el consolidado suele realizarse mediante punzonado, en este proceso las fibras se entrelazan mediante la penetración alternada de muchas agujas dentadas situadas sobre una placa de soporte sobre el velo de fibras obtenido. A medida que el velo pasa por las placas de agujas, estas van enredando las fibras de forma progresiva y coherente formando un no-tejido consolidado por el entrelazado de las propias fibras. Siendo especialmente crítico en las fibras de refuerzo la búsqueda de la tipología y configuración óptima de las agujas para evitar la rotura de estas fibras y alcanzar el grado de cohesión necesario para su manipulación [15,17].

2.1.3 - TECNOLOGÍA POR VÍA HÚMEDA: WET-LAID

La tecnología de formación por vía húmeda (wetlaid) es uno de los procesos más antiguos para la fabricación de no tejidos. En este proceso las fibras son suspendidas en un medio acuoso y posteriormente se colectan en una telera perforada en forma de filtros que absorben el agua y depositan las fibras en forma de velo.

Su principio de funcionamiento parte de la industria papelera con maquinaria muy similar. Las fibras que se utilizan están suspendidas en el agua y pasan a través del cabezal de distribución que procede a la separación del agua de las fibras para formar una lámina uniforme de material (pasta) la cual se deposita sobre una telera perforada que succiona el agua sobrante y retiene las fibras en forma de velo, el cual posteriormente debe ser cohesionado y consolidado.

El material más común usado en la unión de no tejidos WetLaid es el consolidado químico, siendo el más utilizado una emulsión a base de agua y un (látex) de un polímero sintético, tal como un poliacrilato, un polímero de estireno-butadieno, acetatos de etileno - vinilo, cloruros de vinilo y similares. No obstante, también es posible su consolidado térmico, mediante la aplicación de un proceso de calandrado que cohesiona el velo de fibras, al cual se le añade una fibra termoplástica que actúa de binder o ligante dando cohesión al no-tejido final. Su principal desventaja con las fibras de refuerzo es la generación de láminas con poca porosidad que dificultan su utilización con resinas termoestables [16].

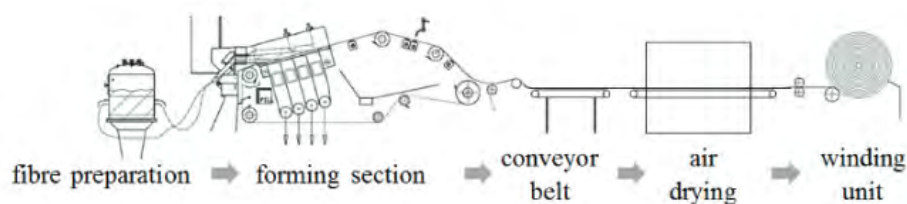


Figura 3: Diagrama proceso Wetlaid para la obtención de no-tejidos (Fuchs H. et al [16])

La principal ventaja de esta tecnología radica en la reutilización de fibras de longitud corta no aptas para su revalorización con otras tecnologías, así como la posibilidad de obtener no-tejidos con densidades laminares muy bajas comparadas con los no-tejidos obtenidos por vía seca o carda. No obstante, la corta longitud de las fibras utilizadas da lugar a no-tejidos con muy baja resistencia mecánica, comparado con los obtenidos por tecnología Drylaid [15,17].

3 - TECNOLOGÍAS DE OBTENCIÓN DE HILOS Y TEJIDOS

Con el objetivo de mejorar las prestaciones mecánicas de los no-tejidos, existen tecnologías disruptivas con menor grado de madurez en la actualidad que permiten revalorizar las fibras de refuerzo en forma de hilados, las cuales permiten el diseño de nuevos intermedios textiles en los cuales las fibras recicladas tras procesos de hilatura y tejeduría pueden ser dispuestas en las direcciones deseadas y no de forma aleatoria tal como ocurre en los no-tejidos,

consiguiendo mejorar con ello las propiedades mecánicas de los intermedios obtenidos.

Centros tecnológicos como AITEX, pioneros en esta tecnología, han desarrollado y patentado [18] procesos de obtención de hilados de fibra cortada basados en principios de tecnologías textiles tradicionales, pero con importantes modificaciones tecnológicas que permiten la procesabilidad de fibras de refuerzo, principalmente fibra de carbono debido a su alto valor añadido.

El principio de funcionamiento de esta tecnología es similar al de la obtención de no-tejidos, el sistema de carda o dry-laid anteriormente comentado. La principal diferencia se produce durante la extracción del velo de fibras parcialmente alineadas y paralelizadas ya que, en el caso de la producción de hilados, este velo converge en una estructura laminar cilíndrica denominada cinta de carda.

Esta tecnología es de gran utilidad para la obtención de nuevos composites termoplásticos, ya que en la actualidad una de sus principales limitaciones reside en la necesidad de incorporar fracciones de fibras de arrastre, principalmente fibras termoplásticas con porcentajes mínimos del 15-20%. Siendo objeto de investigación en la actualidad, la disminución de estos porcentajes para obtener precursores con utilidad en aplicaciones de obtención de composites termoplásticos con el aumento de su contenido en fibra de refuerzo reciclada.

Esta cinta de carda o precursor de hilatura generalmente presenta unas densidades lineales entre 1.0 y 10.0 kTex o gramos por metro lineal, sin apenas resistencia y cohesión, pero en el cual las fibras se encuentran condensadas y parcialmente alineadas. Con el objetivo de mejorar su homogeneidad, el grado de alineamiento de las fibras y disminuir la densidad lineal a valores aptos para posteriores procesos de hilatura. Varias cintas de carda se introducen en equipo denominado manual mechera en el cual mediante la aplicación de distintos ratios de estiraje, generalmente mediante la variación de la velocidad entre cuatro pares de cilindros y mediante su posterior paso por unas cintas de fricción transversal que le aportan torsión, dan lugar a la obtención del intermedio o precursor de hilatura denominado mecha con un aspecto más similar al del hilado final.



Figura 4: De izq. a dcha. Mezcla de fibra rCF y fibra termoplástica, cinta de carda, mecha de manual (AITEX)

Esta mecha, semejante en aspecto a un hilado, pero todavía con muy baja cohesión, es el intermedio textil necesario para posteriores procesos de hilatura, presentando densidades lineales entre 0.1-2.5 kTex o gramos por metro lineal y con mayor grado de cohesión que las cintas de carda previas.

Para que los hilos sean aptos para posteriores procesos de tejeduría, las mechas tienen que ser procesadas mediante tecnologías de hilatura que les aporten resistencia y cohesión mediante la aplicación de torsión. De las diversas tecnologías de hilatura disponibles, la tecnología de hilatura por anillos (ring-spinning) o retorsión sin estiraje son las

más adecuadas para el procesado de fibras de refuerzo, no obstante, existen investigaciones con tecnologías alternativas con peores resultados dado su bajo grado de desarrollo, como la hilatura por fricción y la hilatura por envoltura [12].

El principio de funcionamiento de estas tecnologías está basado en retorcer la mezcla de fibras mediante la acción de un anillo metálico o cursor y un huso que gira a alta velocidad. En el caso de la hilatura por anillos la alimentación de la mecha se realiza a través de un conjunto de rodillos de estirado que disminuye su densidad lineal. Y en el caso de la hilatura por retorsión únicamente se produce la acción de retorsión por acción del cursor sin la aplicación de estiraje.

El mecanismo clave de ambas tecnologías incluye un anillo fijo y un cursor (una pequeña pieza metálica) que se desliza alrededor del anillo a medida que el huso gira. Este cursor controla la tensión y la torsión del hilo mientras se enrolla en la bobina del huso. La torsión generada determina la resistencia del hilo siendo especialmente crítico de controlar en el caso de las fibras de refuerzo de composites, ya que un excesivo grado de torsión causa la rotura de estas fibras y un bajo grado de torsión da lugar a un hilo débil y poco cohesionado no apto para procesos de tejeduría.



Figura 5: De izq, a dcha, Hilado rCG+PA6 50:50 obtenido por hilatura ring spinning, hilador rCG+PA6 70:30 e hilador rCF+PA6 50:50 obtenidos por hilatura mediante retorsión (AITEK)

El estado de la técnica actual permite la obtención de hilados de bajo grosor mediante hilatura por anillos con densidades lineales típicas entre 10-50 Nm (miles de metros por kg de hilo) los cuales no tienen grandes aplicaciones en la industria de los composites dada su finura. No obstante, la tecnología de hilatura por retorsión, sí que permite obtener hilados con densidades lineales altas, similares a los filamentos de carbono virgen, pudiéndose obtener homólogos a los comunes multifilamentos de fibra de carbono 3K, 6K, 12K y 24K (200, 400, 800 y 1600 Tex respectivamente, siendo su equivalente el número de gramos por cada 1000 metros de hilo).

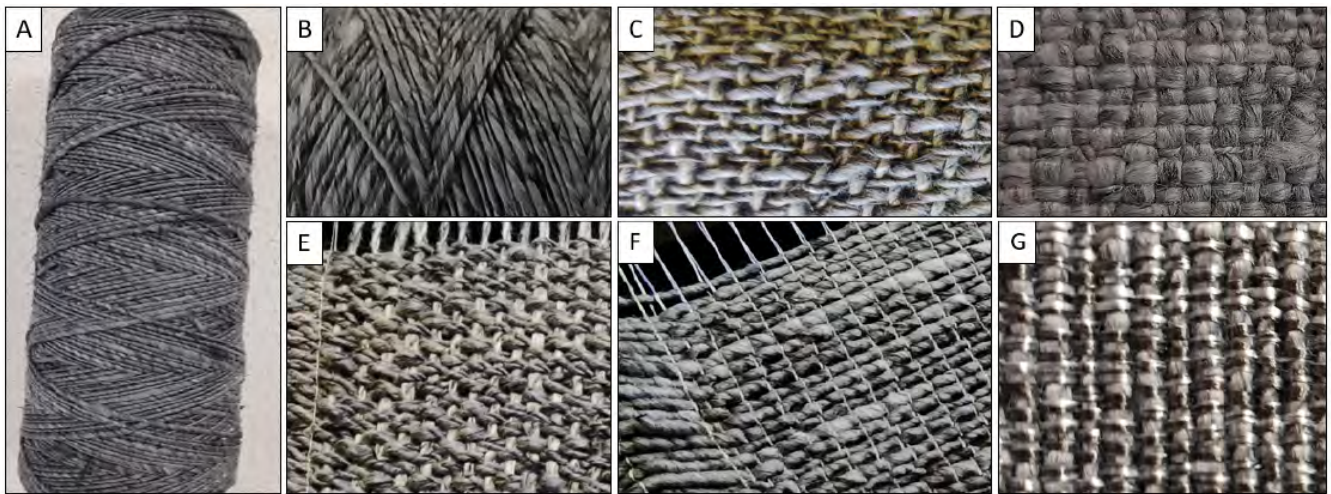


Figura 6: Ejemplos de tejidos obtenidos con hilos rCF. (A) Hilado rCF/PA6, (B) Detalle hilado rCF/PA6, (C) Tejido 5-Hard.Satin rCF/PA6, (D) Tejido Plain rCF/PA6, (E) Tejido Twill 2.2 rCF/PA6, (F) Tejido UD rCF/PA6, (G) Tejido híbrido Plain CF3K y rCF/PA6. (AITEX)

En la actualidad, estos hilados debido a la discontinuidad que presentan por la utilización de fibras cortadas (<120mm), dan lugar a que sus propiedades mecánicas sean bajas y no adecuadas para su aplicación en composites estructurales, pero sí para aplicaciones en las que se requiera ligereza o bajo peso específico.

No obstante, la gran ventaja de la revalorización mediante tecnología de hilatura versa en la posibilidad de hibridar estos hilados con filamentos vírgenes de fibra de carbono, de forma que se potencien enormemente sus propiedades mecánicas a la vez que se disminuye de manera notable el impacto ambiental y la energía embebida de los productos desarrollados al incorporar porcentajes significativos de fibra reciclada [14].

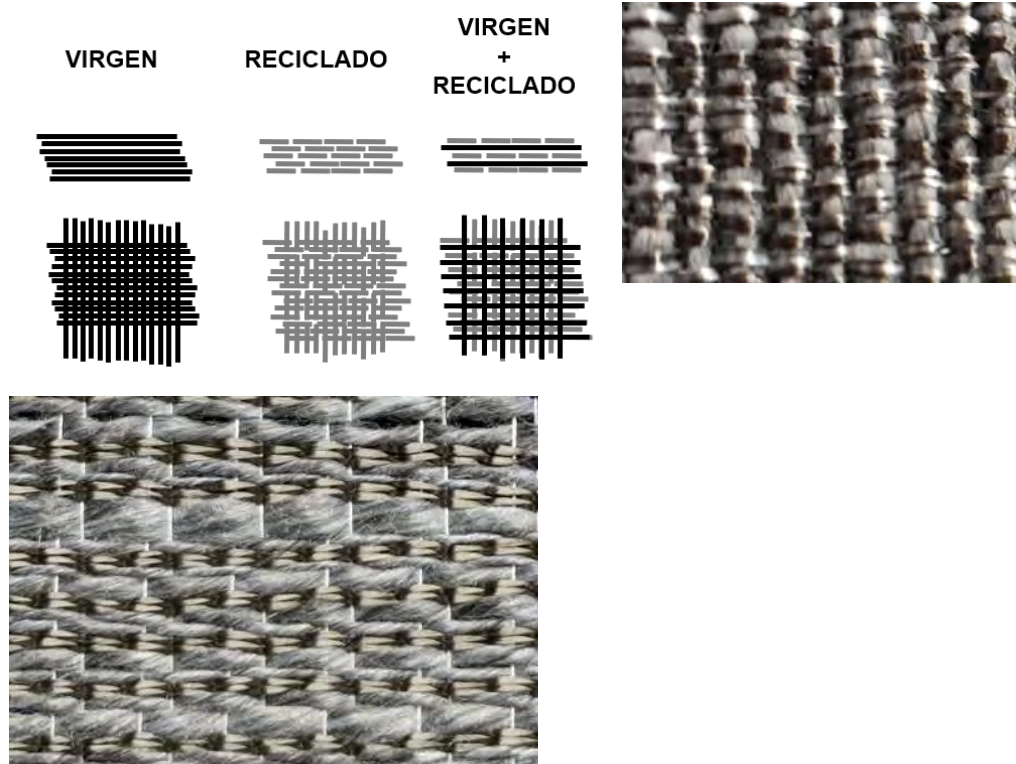


Figura 7: Diagrama comparativo tejido con filamento virgen, filamento reciclado e híbrido (reciclado + virgen) y ejemplo de tejido híbrido (AITEX)

La máquina utilizada en la industria textil para el procesamiento posterior de la cinta

4 - TECNOLOGÍAS DE OBTENCIÓN DE UD-TAPES

Complementando a la tecnología de hilatura, en la actualidad se están realizando investigaciones para la obtención de cintas unidireccionales (UD-tapes) basados en fibras de refuerzo. Aprovechando el conocimiento generado en los procesos de carda y afinado de cintas mediante manual, el centro tecnológico AITECH ha desarrollado y solicitado la patente [19] de un equipo y método para la obtención de estas cintas unidireccionales, presentando mayor facilidad de procesamiento que la obtención de hilados y altas expectativas de posibilidad de aplicación en tecnologías AFP ("automated fiber placement") y ATL ("automated tape lay-up") para la obtención de composites termoplásticos evitando el proceso de tejeduría y simplificando el proceso productivo.

Partiendo de las cintas de carda homogeneizadas y con las fibras ya alineadas en la dirección longitudinal de la cinta, mediante diversos procesos térmicos, estas son consolidadas en formato bidimensional y posteriormente cortadas al ancho deseado, presentando un algo grado de alineación de las fibras y la posibilidad de variar sus espesores y anchos, en función de los parámetros definidos durante la obtención de las cintas de carda.



Figura 8: Cinta tape UD con fibra reciclada. De izq. a dcha. Cinta de manual, cinta pre-consolidada, cinta UD tape final. (AITECH centro tecnológico)

5 - EJEMPLOS DE DESARROLLOS DE TECNOLOGÍAS DE REVALORIZACIÓN EN ESPAÑA

La obtención de no-tejidos todavía no está instaurada en España, pero si a nivel europeo dónde es posible encontrar varias empresas como la británica Gen2Carbon que comercializa no-tejidos con fibra de carbono reciclada en diversos formatos. En lo que respecta a la fibra de vidrio no es tan común encontrar artículos obtenidos a partir de estas fibras, pero varias iniciativas nacionales a través de proyectos de investigación como el proyecto Eocene [20] están en la actualidad buscando soluciones que permitan su revalorización, principalmente a partir de residuos de aerogeneradores dado el gran volumen de residuos que se está generando en los últimos años. Su principal objetivo es volver a poner en el mercado estos materiales para aplicaciones que requieran menores requerimientos mecánicos.

En cuanto la obtención de hilados con fibra reciclada, preferentemente con fibra de carbono por su alto valor añadido y coste de obtención, centros tecnológicos como AITECH de forma individual y en colaboración con otras instituciones y empresas del sector, han apostado firmemente en el desarrollo de estas tecnologías. Ejemplo de ello, es la solicitud de patente P202330884, así como numerosos proyectos nacionales [21-22-23] y europeos [24], en los cuales se han

desarrollados intermedios textiles en forma de hilados y posteriormente tejidos, que una vez transformados en composites han demostrado mejorar las propiedades mecánicas respecto a soluciones como los no-tejidos, así como facilitar su procesado mediante tecnologías habituales para la obtención de composites, tanto termoplásticos como termoestables



Figura 9: Ejemplos de demostradores, composites termoplásticos rCF/PA6 obtenidos en el proyecto OSIRIS (AITEX centro tecnológico)

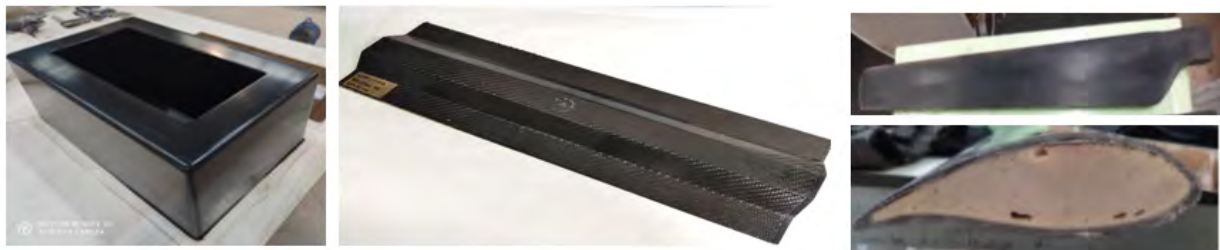


Figura 10: Ejemplos de demostradores, composites termoestables rCF/epoxi obtenidos en el proyecto OSIRIS (AITEX)

En lo que respecta a sus propiedades mecánicas, todavía es necesario un profundo estudio del comportamiento de estos nuevos intermedios y composites obtenidos a partir de fibra reciclada. Principalmente, en la demostración de la mejora de las propiedades mecánicas de actuales soluciones comerciales como los no-tejidos respecto a soluciones innovadoras como los tejidos obtenidos a partir de hilados de fibra reciclada.

Estas investigaciones se están llevando a cabo en la actualidad, no obstante, los primeros resultados realizados sobre composites termoplásticos en el marco del proyecto EU r-LightBioCom [24] con aplicación de los materiales desarrollados a campos estratégicos como la automoción, aeronáutica e ingeniería civil, han demostrado que la mejora en el alineamiento y paralelización de las fibras durante la obtención de los hilados da lugar a mejoras en el comportamiento mecánico con el aumento de propiedades clave como el módulo de Young y el módulo de flexión de los materiales obtenido. Sin embargo, tal como se aprecia en la siguiente gráfica, a igualdad de condiciones (densidad), todavía están lejos de los valores obtenidos con material virgen. Por ello, se constata la necesidad de hibridar estos intermedios con material virgen, de modo que se mejoren sus propiedades mecánicas y a su vez se mantenga la componente de sostenibilidad de estos materiales.

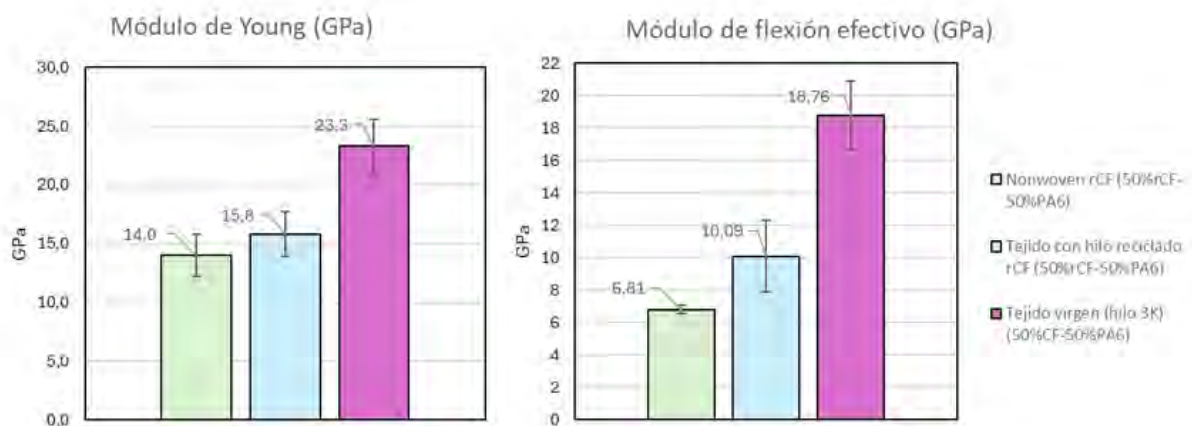


Figura 11: Comparativa mecánica a tracción y flexión de composites termoplásticos con material reciclado y material virgen. Proyecto EU r-LightBioCom. (AITEX)



6 - CONCLUSIONES

En este capítulo se ha expuesto el potencial de revalorización de fibras de refuerzo mediante la aplicación y modificación de tecnologías textiles que permiten la obtención de nuevos intermedios textiles aptos para la obtención de composites. En la actualidad, los esfuerzos se centran en la revalorización de fibras de carbono debido a su alto valor añadido y elevado coste energético de obtención, no obstante, dichas tecnologías son de aplicación para otras fibras de refuerzo tales como el vidrio, las aramidas e incluso las fibras naturales.

Se espera que en los próximos años al igual que ocurrió con los no-tejidos, las tecnologías de revalorización por hilatura y obtención de UD-tapes sean escaladas a nivel industrial abriendo con ello nuevos mercados y ámbitos de aplicación de las fibras de refuerzo, generando nuevos composites más sostenibles al partir de material reciclado. La investigación en las tecnologías de hibridación y “commingling” permitirá potenciar y diseñar composites con propiedades mecánicas mejoradas llegando incluso a ser aptos para aplicaciones con requisitos estructurales.

7 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Zhang, V. S. Chevali, H. Wang y C. H. Wang, «Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 193, 7 2020. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108053 .
- [2] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan y S. Zafar, «A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 215, p. 108768, 6 2021. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108768.
- [3] E. Pakdel, S. Kashi, R. Varley y X. Wang, «Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 166, p. 105340, 3 2021. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105340.
- [4] R. Thamizh Selvan, P. C. Vishakh Raja, P. Mangal, N. Mohan y S. Bhowmik, «Recycling technology of epoxy glass fiber and epoxy carbon fiber composites used in aerospace vehicles,» *Journal of Composite Materials*, vol. 55, n° 23, pp. 3281-3292, 4 2021. doi: 10.1177/00219983211011532.
- [5] M. Pietroluongo, E. Padovano, A. Frache y C. Badini, «Mechanical recycling of an end-of-life automotive composite component,» *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 23, p. e00143, 4 2020. doi: 10.1016/j.susmat.2019.e00143.
- [6] N. Giani, L. Mazzocchetti, T. Benelli, F. Picchioni y L. Giorgini, «Towards sustainability in 3D printing of thermoplastic composites: Evaluation of recycled carbon fibers as reinforcing agent for FDM filament production and 3D printing,» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 159, p. 107002, 8 2022. doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107002
- [7] D. He, P. Compston, E. Morozov y M. Doolan, «Reducing down-cycling of carbon fibre by fibre architecture preservation: Multi-layer fibre surface quality investigation,» *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 637-641, 1 2022. doi: 10.1016/j.procir.2022.02.106
- [8] S. R. Naqvi, H. M. Prabhakara, E. A. Bramer, W. Dierkes, R. Akkerman y G. Brem, «A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 136, pp. 118-129, 9 2018. doi: 10.1016/j.RESCONREC.2018.04.013
- [9] Amaechi C.V. Agbomarie, C.O. Orok. E.O. Ye, J. Economic aspects of fiber reinforced polymer composite Recycling in *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, Elsevier, BV Oxford UK, 2020. Pp 377-397
- [10] F. Manis, G. Stegshuster, J. Wölling y S. Schlichter, «Influences on Textile and Mechanical Properties of Recycled Carbon Fiber Nonwovens Produced by Carding,» *Journal of Composites Science*, vol. 5, p. 209, 8 2021. doi: 10.3390/jcs5080209.
- [11] M. F. Khurshid, C. Cherif y A. Abdqadir, «Processing of waste carbon and poly-amide fibers for high performance thermoplastic composites: Influence of carding parameters on fiber orientation, fiber length and sliver cohesion force,» *Journal of the Textile Institute*, vol. Online, pp. 1-12, 11 2019. doi: 10.1080/00405000.2019.1690918.
- [12] M. Hasan, S. Nitsche, A. Abdkader y C. Cherif, «Properties of CF/PA6 friction spun hybrid yarns for textile reinforced thermoplastic composites,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 254, p. 042013, 10 2017. doi: 10.1088/1757-899X/254/4/042013
- [13] M. Hengstermann, K. Kopelmann, A. Nocke, A. Abdkader y C. Cherif, «Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibres for high-performance composites: Part IV: Measurement of recycled carbon fibre length,» *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 15, 5 2020. doi: 10.1177/1558925020910729
- [14] I. Doménech, J. Pascual, F. Fornés and C. Santamaría, *Revaluation of recycled reinforcement fibers through innovative*



textile technologies for developing new thermoplastic composites, *Materiales Compuestos* (2023). Vol. 08 - COMUNICACIONES MATCOMP21 (2022) Y MATCOMP23 (2023), (Núm. 2 - Fabricación y Aplicaciones Industriales - Sostenibilidad y Reciclaje.), 40 URL https://www.scipedia.com/public/Domenech_et_al_2023a

[15] Wölling, J., Schmieg, M., Manis, F., & Drechsler, K. (2017). *Nonwovens from Recycled Carbon Fibres – Comparison of Processing Technologies*. *Procedia CIRP*, 66, 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.281>

[16] Fuchs H., Albrecht W.: *Vliesstoffe - Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2012.

[17] Heilos, K., Fischer, H., Hofmann, M., & Miene, A. (2020). *NONWOVENS MADE OF RECYCLED CARBON FIBRES (rCF) USED FOR PRODUCTION OF SOPHISTICATED CARBON FIBRE-REINFORCED PLASTICS*. 12.

[18] Patent application ES-P202330884, AITEX “Equipment for obtaining a continuous hybrid yarn, production process using such equipment and continuous hybrid yarn obtained by such process”. 2023.

[19] Patent application (number not assigned), AITEX “Equipment and procedure for obtaining thermoplastic tape”. 2024.

[20] Eocene | Proyecto Eocene (proyecto-eocene.com) (12/05/2024); Proyecto subvencionado por CDTI

[21] *rGENERA_informe_final_web-1.pdf* (www.aitex.es) (27/08/2024);

[22] *RGENERA II - FIBRA DE CARBONO REUTILIZADA PARA TEXTILES* (www.aitex.es) (27/08/2024)

[23] Red Osiris Network Reciclado de Plásticos (27/08/2024); Proyecto subvencionado por CDTI

[24] European project “r-LightBioCom” <https://www.r-lightbiocom.eu/> (27/08/2024); GA ID: 101091691



CAPITULO 24: LEGISLACIÓN ACTUAL EN ESPAÑA Y UE: PRESENTE Y FUTURO

Teresa de Bernardo López¹

¹ Airbus

Abstract

Los residuos procedentes de los materiales compuestos están regulados por la **normativa básica de residuos** (Directiva Marco y normativas asociadas a la misma y sus trasposiciones), no existiendo actualmente una legislación específica para ellos como existe para determinados tipos de residuos. En lo que respecta a su **composición**, es la normativa relativa al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos la que los regula. La **clasificación de los residuos**, según la Lista Europea de Residuos (códigos LER), es fundamental para asegurar una correcta gestión así como interpretación de las regulaciones aplicables. Una correcta identificación como **no residuo después de una operación de valorización** o conseguir las consideraciones de **"subproducto" y/o "fin de condición de residuo"** si resulta necesario para dejar de tratarlos como tales, es fundamental para lograr un ecosistema adecuado que propicie el reciclado, por lo que hay que abordar este camino en los próximos años por parte de fabricantes y recicladores y contar con el apoyo de la administración para agilizar dichos trámites.

El contexto actual y futuro contribuye a potenciar el reciclaje de estos materiales, ejemplo de ello son las políticas y estrategias ambientales en curso y futuras; como la **estrategia europea del plástico**, los **planes de economía circular** de las distintas administraciones, los **compromisos de sectores industriales como el eólico**, así como las **ayudas públicas dirigidas a mejorar la circularidad de los materiales** como las recogidas a nivel estatal en el Plan de Recuperación y Resiliencia. Asimismo, las **restricciones previstas para el vertido** de determinados tipos de residuos susceptibles de reciclaje, las **normativas sobre la responsabilidad ampliada del productor** para determinados productos como medios de transporte como los vehículos donde se establecen objetivos de reciclaje y de utilización de materiales reciclados y la evolución de nuevas normativas como **el reglamento de ecodiseño**, pueden favorecer e impulsar de forma definitiva el reciclaje y reuso de los materiales compuestos.

OPEN ACCESS

Published: 27/11/2024

Keywords:

regulación
Autorregulación
Subproducto
Fin de condición de residuo
Código Europeo de Residuos
Planes de Economía Circular
Responsabilidad social corporativa
Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos

Regulación ambiental aplicable a los residuos procedentes de la fabricación, el reciclado y el fin de vida de los materiales compuestos (España, EU)

Marco regulatorio general

La legislación ambiental en España tiene un carácter piramidal y siempre debe de cumplirse a todos los niveles jerárquicos: la Unión Europea dicta unas líneas básicas definidas mediante directivas, reglamentos, etc. y a partir de ahí el Estado, las Comunidades Autónomas y los Ayuntamientos, en los ámbitos de sus competencias y mediante diferentes figuras jurídicas (leyes, reales decretos, órdenes, ordenanzas, etc.), pueden imponer condiciones más restrictivas.

En el ámbito de los residuos el marco legal viene definido en su nivel más alto por la **Directiva Marco de Residuos (2008/98/EU)**, modificada por la Directiva 2018/851. Esta normativa establece los principales requisitos para los residuos:

- Establece una **jerarquía en la gestión de los residuos** (prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización para otros fines (p. ej., valorización energética) y eliminación). Define asimismo **incentivos fiscales** para aplicar esta jerarquía, como tasas de depósito en vertederos e incineración y sistemas de pago por generación de residuos, que desarrolla en otras normativas.
- Introduce el "principio de quien contamina paga" y la definición de la **"responsabilidad ampliada del productor"**, según la cual el productor debe contribuir a la prevención de los residuos (reparabilidad,



durabilidad, etc.), a que los productos se puedan reutilizar y reciclar y a costear la gestión de los residuos derivados en su caso.

- Distingue entre residuos y “**subproductos**”, creando la posibilidad de que un material compuesto remanente de un proceso de fabricación pueda ser considerado una materia prima, y no un residuo, si cumple una serie de condicionantes que luego serán tratados en este capítulo.
- Introduce los principios para una **economía circular** con la Directiva (UE) 2018/851: diseño sostenible, fabricación y el uso de productos que sean eficientes en el uso de recursos duraderos, reparables, reutilizables, actualizables, etc.
- Define el concepto “**fin de la condición de residuo**”, muy relevante para el uso de los materiales recuperados del tratamiento de los residuos de materiales compuestos. Asimismo se debe distinguir en qué casos no haría falta por no considerarse el material resultante un residuo. (Se tratará más adelante en este capítulo).
- Introdujo **objetivos de reciclado y valorización** que debían alcanzarse para el año 2020 en relación con los residuos procedentes de la construcción y de las demoliciones (70%) y municipales tiene que reciclarse un mínimo del 55 % en peso para el 2025, 60% para 2030 y al 65% para 2035.

Otras normativas específicas sobre la clasificación de residuos, la gestión de determinados tipos de residuos (envases, baterías, plásticos de un solo uso, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, vehículos fuera de uso (VFU), buques al final de su vida útil, etc.), así como para el traslado de residuos desde la Unión Europea y las regulaciones sobre vertederos e incineración completarían el marco regulatorio sobre la gestión de residuos en Europa.

En lo que respecta al marco regulatorio nacional, la Directiva Marco de residuos fue traspuesta al reglamento español, siendo la **Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular** la normativa actual que regula de forma genérica los residuos en España, y que se complementa con los requisitos adicionales establecidos por las comunidades autónomas a este respecto en sus respectivas regulaciones. Existen, además, normativas específicas para la gestión de determinados residuos, normalmente derivados de la transposición de las normativas europeas (aparatos eléctricos y electrónicos, aceites usados, envases, residuos de construcción y demolición, plásticos de un solo uso, VFU, etc.). Además este cuerpo normativo se complementa con el reglamento que regula el traslado de residuos en España, *Real Decreto 553/2020, de 2 de junio, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado* y las regulaciones sobre vertido e incineración de residuos.

Regulación ambiental aplicable a la gestión de residuos de materiales compuestos

Los residuos procedentes de las operaciones de fabricación con materiales compuestos se ven afectados por las normativa marco de residuos (Directiva Marco y Ley 7/2022 de residuos, así como las correspondientes autonómicas) al no existir una normativa específica para esta tipología de residuos. Tampoco existe normativa específica para ninguno de sus componentes o materiales auxiliares utilizados en la fabricación ya que la normativa sobre plásticos (*Directiva (UE) 2019/904 de 5 de junio de 2019 relativa a la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente* y su transposición en España) excluye hasta la fecha las aplicaciones industriales, por lo que filmes o bolsas de vacío no se verían afectados.

Los residuos procedentes del fin de vida de algunos productos fabricados con materiales compuestos como por ejemplo, algunos medios de transporte, sí se ven afectados de forma genérica por normativa específica como la de VFU que se revisa en el punto 2 de este capítulo. No existiendo normativa específica que gestione el fin de vida de aeronaves o las palas de los aerogeneradores fuera de uso.

Todo residuo generado, incluyendo los procedentes de la fabricación o de las operaciones de reciclado o de recuperación de materiales compuestos, requiere una gestión (1). Dicha gestión debe ser realizada en España de acuerdo al artículo 20 de la Ley 7/2022 por el productor inicial u otro poseedor de residuos que encargará el tratamiento de sus residuos a un negociante registrado o a un gestor de residuos autorizado que realice operaciones de tratamiento. Las autorizaciones de estos gestores son concedidas por las comunidades autónomas en España y requieren del cumplimiento de diversa normativa ambiental adicional como la normativa de responsabilidad ambiental u otras que puedan afectar a sus instalaciones e impactos ambientales.

A la hora de gestionar un residuo hay que identificar si dicho residuo es peligroso o no peligroso porque el gestor debe estar autorizado para dicha tipología de residuos y deben ser transportados, tratados y etiquetado de una determinada manera, pudiendo aplicar en caso de residuos peligrosos incluso la normativa de transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR). La clasificación de los residuos como peligrosos o no peligrosos se lleva a cabo basándose en las características de peligrosidad que le confiere su composición. Existe además una Lista Europea de Residuos, codificados con seis dígitos (**códigos LER**) (2), en la que se ha determinado qué residuos son peligrosos y cuáles no peligrosos según su origen de producción, de manera que se garantice así

una identificación y determinación armonizada de los residuos dentro de la Unión Europea. Conforme al anexo de esta Decisión los residuos marcados con un asterisco "*" en la lista LER de residuos deberán considerarse residuos peligrosos.

En el caso de los residuos de materiales compuestos no siempre existe una identificación inequívoca que se corresponda con alguna de las tipologías de residuos listados en dicha Lista Europea de Residuos (LER). Las razones son varias: a día de hoy no están incluidas todas las actividades que dan lugar a residuos en la lista; las composiciones y orígenes de los materiales compuestos pueden ser muy variadas dadas las distintas matrices y fibras de refuerzo y las aplicaciones y técnicas de fabricación; además las propiedades pueden variar dependiendo de si el material se encuentra en estado curado o no curado o del nivel de segregación de los residuos (eliminación de filmes etc.). Por todo ello y con el fin de determinar si el residuo es peligroso o no lo es, muchas veces es requerida la realización de una caracterización del residuo previa a su gestión.

El proceso de caracterización de un residuo procedente de un material compuesto y en general de cualquier residuo, cuando no existe una identificación inequívoca en la lista LER, es un proceso complejo que consiste en evaluar si el residuo contiene alguna sustancia en una concentración tal que le confiera alguna característica que haga que sea peligroso. Las características de peligrosidad (HP) que existen son 15 y deben evaluarse basándose en la concentración de las sustancias presentes en el residuo, conforme al anexo III de la Directiva 2008/98/CE y sus modificaciones (3, 4), o cuando esto no es posible (por ejemplo mezcla de residuos de diversos orígenes o reacciones químicas previsibles) por medio de ensayos, conforme al Reglamento (CE) nº 440/2008 (5) u otras directrices y métodos de ensayo reconocidos a nivel internacional. El residuo podrá considerarse como no peligroso si, como resultado de la evaluación, no presenta características de peligrosidad (HP) y no contiene ninguno de los contaminantes orgánicos persistentes (COP) (6). Existe una Comunicación de la Comisión – *Orientaciones técnicas sobre la clasificación de los residuos* (2018/C 124/01), así como una Guía Técnica del MITERD para la clasificación de los residuos (7) que proporcionan unas directrices básicas para clasificar un residuo según la normativa vigente y la información disponible.

Algunos ejemplos de la clasificación (código LER) de los residuos procedentes de los procesos de fabricación o del reciclado de los materiales compuestos que han sido asignados se relacionan a continuación. Se debe de tener en cuenta nuevamente que la clasificación tiene que ver con el origen de su producción y que hay que buscar el código que más se ajuste de acuerdo a su origen y características.

En algunos casos de materiales compuestos, como en el *fin de vida de las palas de los aerogeneradores, los productores los asimilan a residuos de la construcción y demolición y en concreto a plásticos, código LER 170203* (AEE, Asociación empresarial eólica). En Airbus los scraps producidos en sus plantas y conforme al nivel de segregación establecido, fueron clasificados con LER 08 04 09* (para material no curado) y LER 08 04 10 (para material curado).

POSIBLES LER MATERIAL COMPUESTO

- 10 11 Residuos de la fabricación del vidrio y sus derivados.
- 10 11 03 Residuos de materiales de fibra de vidrio
- 08 04 Residuos de la fabricación, formulación, distribución y utilización (FFDU) de adhesivos y sellantes [incluyendo productos de impermeabilización].
 - 08 04 09* Residuos de adhesivos y sellantes que contienen disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas.
 - 08 04 10 Residuos de adhesivos y sellantes distintos de los especificados en el código 08 04 09
- 17 Residuos de la construcción y demolición
 - 17 02 Madera, vidrio y plástico.
 - 17 02 01 Madera.
 - 17 02 02 Vidrio.
 - 17 02 03 Plástico.
 - 17 02 04* Vidrio, plástico y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminados por ellas.

POSIBLES LER MATERIAL RESULTANTE DE LA VALORIZACIÓN

- 19 01 Residuos de incineración o pirólisis de residuos.
- 19 01 06* Residuos líquidos acuosos del tratamiento de gases y otros residuos líquidos acuosos.
- 19 01 07* Residuos sólidos del tratamiento de gases.

- 19 01 17* Residuos de pirólisis que contienen sustancias peligrosas.
- 19 01 99 Residuos no especificados en otra categoría.
- 19 02 *Residuos de tratamientos físico-químicos de residuos*
- 19 02 07* Aceites y concentrados procedentes del proceso de separación.
- 19 02 08* Residuos combustibles líquidos que contienen sustancias peligrosas.
- 19 02 09* Residuos combustibles sólidos que contienen sustancias peligrosas.
- 19 02 11* Otros residuos que contienen sustancias peligrosas.
- 19 02 99 Residuos no especificados en otra categoría.

En Airbus se realizaron estudios de caracterización de los residuos, por una entidad de inspección y por laboratorios acreditados por ENAC (según normas UNE-EN ISO/IEC 17020:2012 y UNE-EN ISO/IEC 17025:2017, respectivamente). En ellos se analizaron muestras de residuos procedentes de materiales compuestos con fibra de carbono y resina epoxi procedentes de diversos programas en la compañía, recogidos de forma muestral según la segregación habitual en las plantas. Los resultados de dichos estudios concluyeron que los residuos curados no arrojaban características de peligrosidad, sin embargo, los curados sí lo hacían, y por tanto debían de considerarse como residuos peligrosos.

Cualquier caracterización de un residuo se recomienda sea realizada por entidades acreditadas por la Entidad Nacional de Acreditación según la norma UNE-EN ISO/IEC 17020:2012, para garantizar su fiabilidad.

Consideraciones de “Subproducto” y “no residuo” o “Fin de Condición de Residuo” tras una operación de valorización

La Ley 7/2022, en consonancia con la directiva marco de residuos y en los mismos términos que dicha directiva, introduce algunos mecanismos para fomentar la circularidad de los residuos, al dejar de considerarlos como tales, facilitando su reutilización, reciclaje y posterior comercialización:

1. Subproducto: Sustancia u objeto resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto, podrá ser considerada como subproducto y no como residuo cuando se cumplan todas las condiciones siguientes:
 1. a) Que se tenga la seguridad de que la sustancia u objeto va a ser utilizado ulteriormente.
 2. b) Que la sustancia u objeto se pueda utilizar directamente sin tener que someterse a una transformación ulterior distinta de la práctica industrial habitual.
 3. c) Que la sustancia u objeto se produzca como parte integrante de un proceso de producción.
 4. d) Que el uso ulterior cumpla todos los requisitos pertinentes relativos a los productos y a la protección de la salud humana y del medio ambiente para la aplicación específica, y no produzca impactos generales adversos para la salud humana o el medio ambiente.”
2. “Fin de condición de residuo” (tras una operación de valorización): Determinados tipos de residuos, que hayan sido sometidos a una operación de valorización, incluido el reciclado, podrán dejar de ser considerados como tales, a los efectos de lo dispuesto en esta ley, siempre que se cumplan todas las condiciones siguientes:
 1. Que las sustancias, preparados u objetos resultantes deban ser usados para finalidades específicas.
 2. Que exista un mercado o una demanda para dichas sustancias, preparados u objetos.
 3. Que las sustancias, preparados u objetos resultantes cumplan los requisitos técnicos para las finalidades específicas, y la legislación existente y las normas aplicables a los productos.
 4. Que el uso de la sustancia, preparado u objeto resultante no genere impactos adversos globales para el medio ambiente o la salud humana.”
3. Consideración de “no residuo” (tras una operación de valorización). Según nota aclaratoria de la Subdirección General de Residuos del MITERD de julio 2024 (<https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-y-gestion-de-residuos/Nota%20interpretativa%20Residuo-No%20residuo%20Op.%20Valorizaci%C3%B3n.pdf>) no sería necesario solicitar la condición de fin de residuo para poder comercializar el material valorizado como un producto en los casos siguientes:
 - Cuando un residuo sea preparado para la reutilización (volver a utilizarse en el mismo fin tras operaciones como limpieza, comprobación, preparación etc. sin transformación alguna) se considerará que ha dejado de ser residuo y se deberá cumplir con las normas de producto, de tipo técnico y de consumo, aplicables a ese tipo de producto.

- Cuando en las operaciones de reciclado, el residuo se transforma para obtener un nuevo material, sustancia o producto que tiene características comparables a las del material no residuo al que sustituye, de manera que pueda utilizarse directamente en un proceso productivo, con la misma finalidad u otra diferente, sin poner en peligro la salud humana o el medio ambiente.

Si no hay establecidos criterios previos a nivel europeos para una tipología de residuo en cuestión que ya otorgue la condición de Subproducto o el Fin de Condición de Residuo, en España es necesario una solicitud y posterior autorización de la administración competente (comunidades autónomas). (El MITERD podría emitir autorizaciones si las CCAA se lo requieren o si es de interés para todo el territorio). Para el caso del Fin de Condición de Residuo sólo puede ser solicitada por un gestor de residuos.

En el caso de los materiales compuestos actualmente no consta ninguna autorización concedida como “subproducto”, aunque algunos casos se encuentran en procesos de preparación o solicitud. Sin embargo, tras la operación de valorización y siempre cuando ésta sea realizada de acuerdo a la normativa por un gestor autorizado podemos tener dos casuísticas como hemos indicado:

- Que el material resultante sea considerado no residuo (siempre y cuando el tratamiento sea preparación para reutilización o reciclado seguro y conservando propiedades similares al material original).
- O para otros casos de valorización o cuando no cumplan las condiciones anteriores de reciclado, el material será un residuo y se deberá solicitar la el “Fin de la condición de residuo”, existiendo ya algunas autorizaciones promulgadas aplicables a los materiales recuperados como los termoplásticos (*“Orden TED/646/2023, de 9 de junio, por la que se establecen los criterios para determinar cuándo los residuos termoplásticos sometidos a tratamientos mecánicos y destinados a la fabricación de productos plásticos dejan de ser residuo con arreglo a la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular”*).

Nos encontramos en pleno proceso de revisión de la Directiva Marco de Residuos que quiere abordar nuevos objetivos para la reducción del desperdicio alimentario y asegurar para 2025 la recogida selectiva de los productos textiles para su reutilización y reciclado. Sin embargo otros productos deben de ser abordados en un futuro y una regulación más exigente para la reutilización o utilización del material reciclado, creando los mercados adecuados, ayudaría mucho a avanzar hacia la circularidad. Los procedimientos administrativos para la obtención de las consideraciones de “subproducto” o “Fin de la condición de residuos” son muy tediosos, por lo que cualquier cambio para aligerar estas trabas favorecería un ecosistema apropiado para el reciclado y la recuperación de los materiales compuestos. En este sentido la reciente nota aclaratoria del MITERD busca asegurar que los materiales valorizados que cumplan con unas condiciones específicas puedan ser utilizados como materias primas sin la carga de ser considerados residuos, fomentando así una economía circular y sostenible resulta de gran interés para la valorización de los materiales compuestos que vayan a tener propiedades similares al material original aunque sea para otros usos.

Contexto actual y futuro para el reciclado de materiales compuestos

Históricamente el reciclaje de los materiales compuestos, sobre todo termoestables, no ha sido fácil debido a la complejidad técnica y a su elevado coste, lo que hace que hasta la fecha la mayoría de los residuos de estos materiales vayan a vertedero o incineración con recuperación energética. Se prevé que estos composites se conviertan en un flujo de residuos clave en todo el mundo para 2030 ya que su uso va en incremento en muchos sectores por sus excelentes prestaciones. Se estima sólo que la acumulación anual de residuos de CFRP procedentes únicamente de las industrias aeronáuticas y de turbinas eólicas superará las 840.000 toneladas en 2050. Según Euronews para el año 2025 Europa tendrá que gestionar unas 80.000 toneladas anuales de PRFV del sector eólico y se estima que alrededor de 12.000 aviones serán retirados en las próximas dos décadas (Fuente: IATA, 2018).

En 2021 la cantidad de residuos plásticos post-consumo enviados a instalaciones de reciclaje creció en un 8% respecto del año 2018 y la tasa de reciclaje se situó en el 40%. El 60 % de los residuos post-consumo restante se envió a vertederos e incineración con valorización energética. (Fuente: Eurostat 2021 (8)). La mitad del plástico recogido para su reciclaje se exporta para ser tratado en países fuera de la UE por la falta de capacidad, tecnología o recursos financieros para tratar los residuos localmente. En febrero de 2024, el Parlamento aprobó normas más estrictas para los traslados de residuos a terceros países. Las normas prohibirán las exportaciones de residuos plásticos a países no miembros de la OCDE.

A esta situación, de previsión de una alta generación de residuos de materiales compuestos y mucho camino por andar en su reciclaje, se deben destacar los compromisos por parte de todos los agentes implicados: gobiernos, asociaciones empresariales, etc. para revertir la situación. A continuación se citan algunos ejempllos:

- La **Estrategia de Plásticos de la Comisión Europea** prevé que se reciclen el 55 % de los plásticos en 2025 en lugar del 40 % actual. COM(2018) 28 final.

- El nuevo **Plan de Economía Circular** (9) de la Unión Europea, uno de los principales elementos del Pacto Verde Europeo y su réplica en España y en diversas comunidades autónomas, establecen diversas medidas para fomentar productos sostenibles, garantizar una menor producción de residuos y poner el foco en los sectores que utilizan un mayor número de recursos y que tienen un elevado potencial de circularidad como VFU y plásticos. A nivel nacional, en 2020 se aprobó la Estrategia Española de Economía Circular, España Circular 2030, la cual se alinea con el Plan de Acción de la Unión Europea El primer plan trienal asociado, I Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023, señalaba medidas específicas por ejemplo para el sector eólico y en concreto se mencionaban los materiales compuestos: elaboración de una guía para el desarrollo de criterios ambientales a tener en cuenta en el desmantelamiento y repotenciación de instalaciones de generación de energía eólica y la realización de Proyectos de I+D+i incentivadores de soluciones de EC para las palas de los aerogeneradores eólicos. Dicha guía (10) fue publicada en febrero de 2024. Asimismo también se establece que para el sector aeronáutico se debería estudiar el abordaje de la creación de marcos regulatorios para el reciclado y reutilización de materiales y componentes aeronáuticos garantizando que se cumplen con los requisitos intrínsecos de seguridad y fiabilidad que caracterizan a la industria aeronáutica.
- Como parte de las medidas recogidas por el nuevo Plan de Economía Circular Europeo se encontraba el desarrollo de una nueva normativa europea de Ecodiseño. El **Reglamento de Ecodiseño de Productos Sostenibles** fue aprobado el 23 de abril de 2024 y pretende mejorar la eficiencia energética y la circularidad y otros aspectos de sostenibilidad entre los productos comercializados en el mercado único de la UE, desde las primeras fases del diseño del producto hasta el fin de su vida útil y su posterior reciclaje. Mediante actos delegados se irán estableciendo los requisitos específicos para cada tipo de producto, encontrándose como prioritarios en la lista productos los plásticos y polímeros.
- En junio de 2021 las **industrias eólica española y europea (AEE, WindEurope) se comprometieron** a que para 2025 sea posible reutilizar, reciclar o recuperar el 100 % de las palas desmanteladas, evitando de esta manera su retirada a vertedero.
- El **Reglamento de Taxonomía Europeo** *Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo de 18 de junio de 2020 relativo al establecimiento de un marco para facilitar las inversiones sostenibles y por el que se modifica el Reglamento (UE) 2019/2088* y sus actos delegados, establecen, para diversas actividades, como la fabricación de aviones o de automóviles, criterios como priorizar el reciclaje de residuos de fabricación y de fin de vida frente a la eliminación, para justificar que una actividad es medioambientalmente sostenible frente a los mercados.
- La nueva Inversión pública en economía circular: En el **Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR)** se incluyen medidas para fomentar el impulso de la economía circular a nivel nacional. A finales de 2021 se aprobaba el PERTE de Energías Renovables, Hidrógeno Renovable y Almacenamiento (ERHA), cuya tercera medida tiene como objetivo la repotenciación de parques eólicos condicionada a la utilización de tecnologías o sistemas de reciclaje de palas eólicas (como requisito se incluye que en los proyectos a subvencionar para el reciclaje se deberán recuperar al menos el 50 % en peso de los residuos (palas y/u otros componentes del aerogenerador que utilicen materiales compuestos)). A principios de 2022 se publicó también el PERTE de Economía Circular que incluye, dentro de los objetivos para el sector eólico el impulso de medidas de ecodiseño, que permitan alargar la vida útil de las palas y mejorar su reciclabilidad (Actuaciones sobre sectores clave: textil, plástico y bienes de equipo para la industria de las energías renovables, incluyendo el desarrollo de instalaciones para incrementar reutilización y reciclaje de estos productos). Además comprende una línea de actuaciones transversales para potenciar la economía circular en las empresas que podría ser aplicable al reciclaje de los materiales compuestos.

Por otra parte se deben destacar las restricciones o fiscalidad que pueden dar un impulso al reciclaje:

- La **Directiva sobre vertederos**, *Directiva 1999/31/CE sobre vertidos de residuos, modificada por la Directiva 2018/850*, establece requisitos a fin de apoyar la transición de la Unión hacia una economía circular como la reducción progresiva del depósito de vertidos, en particular de los residuos aptos para el reciclado (en 2030) y la imposición de tasas al vertido. Además incluye restricciones para determinados residuos en cuanto a su peligrosidad por la potencial contaminación del subsuelo. La transposición en España, *Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*, establece limitaciones para el vertido de residuos municipales y el compromiso de publicación de una orden ministerial donde se recojan todos los códigos LER que tendrán limitaciones. Esta Orden Ministerial se encuentra en borrador "*Proyecto de orden por la que se establece la relación de residuos no admisibles en vertederos de 27 de julio de 2023*" y recoge en sus anexos listados de residuos prohibidos desde el momento de su publicación y otros prohibidos para el 2025 donde se encuentran residuos susceptibles de reciclaje como diversos residuos de códigos LER 19 y 20 (ej. 200301 Mezclas de residuos municipales; 191204 Plástico y caucho; 200127 Pinturas, tintas, adhesivos y resinas que contienen sustancias peligrosas), que podrían coincidir con los códigos asignados para algunos materiales auxiliares usados en la fabricación por ejemplo. Cabe señalar que dicha lista se irá ampliando y los materiales compuestos, en el momento de ser residuos susceptibles de reciclaje, podrían estar incluidos en un futuro. Además de estas



prohibiciones se debe de tener en cuenta los costes asociados al vertido, desde el 1 de enero de 2023 las tasas de vertidos o incineración están armonizadas en toda España, pudiendo las comunidades autónomas aumentarlas. Dependiendo del tipo de residuo los costes pueden oscilar entre los 3 euros a los 40 euros por tonelada. Habría que sumar además los costes asociados a las preparaciones que se exigen para la admisión de los residuos en los distintos tipos de vertedero. Muchos países de la UE han establecido requisitos más estrictos en la transposición de la Directiva de Vertederos, por ejemplo Austria y Alemania tienen restricciones para residuos con un carbono orgánico total (COT) superior al 5 y 3% respectivamente, otros países como Francia tienen restricciones a residuos no tratados previamente o fracciones segregadas. (ver <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2021/10/Landfill-taxes-and-restrictions-overview.pdf>)

- Las **normativas sobre el fin de vida** de los vehículos y de los buques establecen requisitos para el reciclaje y uso de materiales reciclados en la fabricación de nuevos vehículos o barcos. Para vehículos (*última actualización: Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a los requisitos de circularidad aplicables al diseño de los vehículos y a la gestión de los vehículos al final de su vida útil y por el que se modifican los Reglamentos (UE) 2018/858 y (UE) 2019/1020 y se derogan las Directivas 2000/53/CE y 2005/64/CE*), se mantiene el requisito de que cada vehículo nuevo desde 2015 se fabricará de modo que sea: a) reutilizable (para fabricar otro vehículo) o reciclable (cualquier aplicación) en un mínimo del 85 % en masa; b) reutilizable (para fabricar otro vehículo) o valorizable (generar energía) en un mínimo del 95 % en masa) e introduce como novedad los requisitos de que el 25% del plástico utilizado para fabricar un vehículo nuevo debe ser de origen reciclado, del cual el 25% debe reciclarse a partir de vehículos al final de su vida útil y el 30% de los plásticos de los vehículos al final de su vida útil deben reciclarse en 2035.

Si bien no existe una normativa similar para el fin de vida de las aeronaves, la normativa de VFU EN España incluye con el código desagregado *LER 16 01 04* 50 Aeronaves al final de su vida útil* (para ser utilizados en futura normativa) y aunque solo es aplicable actualmente a los vehículos y automóviles al final de su vida útil según un estudio reciente encargado por EASA en 2022 "Environmental sustainability status in the Aviation Maintenance and Production Organisation (M&P) Domain" se sugiere que podría aplicarse en un futuro los mismos requisitos que para los vehículos fuera de uso y la mención al código desagregado en la legislación española, lo corrobora.

Ámbito	Regulación	Alcance
Europeo	Directiva Marco de Residuos (2008/98/EU), modificada por la Directiva 2018/851	Gestión Legislación marco Clasificación de residuos: códigos LER, Residuos peligrosos/no peligrosos Operaciones de valorización y eliminación: códigos Requisitos condiciones de subproducto y fin de condición de residuo Objetivo reciclado de residuos
Nacional	Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular	Gestión Legislación marco Clasificación de residuos: códigos LER, Residuos peligrosos/no peligrosos Operaciones de valorización y eliminación: códigos Requisitos condiciones de subproducto y fin de condición de residuo (comunes a las dictadas por la UE) Objetivos reciclado Impuestos a vertido e incineración de residuos Impuesto a plásticos de un solo uso Trasposición de la Directiva Directiva (UE) 2019/904 de 5 de junio de 2019 relativa a la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente
Europeo	Directiva 1999/31/CE sobre vertidos de residuos, modificada por la Directiva 2018/850	Gestión de vertederos Restricciones de vertido Tratamiento previo al vertido Requisitos para vertederos
Estatal	Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero	Gestión de vertederos Restricciones de vertido Tratamiento previo al vertido "Proyecto de orden por la que se establece la relación de residuos no admisibles"



		en vertederos de 27 de julio de 2023"
Estatul	Orden TED/646/2023, de 9 de junio, por la que se establecen los criterios para determinar cuándo los residuos termoplásticos sometidos a tratamientos mecánicos y destinados a la fabricación de productos plásticos dejan de ser residuo con arreglo a la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular"	Condiciones para la consideración "fin de residuo" en el caso de residuos termoplásticos con un tratamiento y destino concreto
Europeo	Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a los requisitos de circularidad aplicables al diseño de los vehículos y a la gestión de los vehículos al final de su vida útil y por el que se modifican los Reglamentos (UE) 2018/858 y (UE) 2019/1020 y se derogan las Directivas 2000/53/CE y 2005/64/CE),	Objetivos reciclado y uso de productos reciclados en vehículos Condiciones responsabilidad ampliada del productor
Estatul	Real Decreto 265/2021, de 13 de abril, sobre los vehículos al final de su vida útil y por el que se modifica el Reglamento General de Vehículos, aprobado por el Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre.	Objetivos reciclado y uso de productos reciclados en vehículos Condiciones responsabilidad ampliada del productor Tramitación baja de vehículos; certificados de destrucción etc. Requisitos centros de desmantelamiento de vehículos Nuevos códigos en la categoría de VFU: 16 01 04* 30 Medio de transporte circula sobre raíles al final de su vida útil. 16 01 04* 40 Embarcaciones al final de su vida útil. 16 01 04* 50 Aeronaves al final de su vida útil. 16 01 04* 90 Otros medios de transporte autopropulsados (que se muevan por sus propios medios).
Europeo	Reglamento(UE) No 1257/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de noviembre de 2013 relativo al reciclado de buques y por el que se modifican el Reglamento (CE) no 1013/2006 y la Directiva 2009/16/CE	Regulación para garantizar la gestión respetuosa con el medio ambiente del fin de vida de los buques. Incluye además normas para garantizar la gestión racional de los materiales peligrosos en los buques. De interés en el reciclaje de otros medios de transporte como las aeronaves.

Resumen normativa relevante que pueden aplicar a los residuos procedentes de materiales compuestos

Otras regulaciones aplicables a los materiales compuestos: sustancias

La fabricación de piezas de materiales compuestos está asociada a una química muy avanzada, tanto para la obtención de las materias primas (ya sean las propias fibras de carbono o vidrio y sus resinas que componen la matriz) como de los materiales auxiliares necesarios en los procesos de fabricación (agentes desmoldeantes, cinta adhesivas, etc.). Las sustancias químicas usadas pueden tener efectos perjudiciales tanto para la salud como para el medioambiente y, durante los últimos años, se ha observado la presencia de un número creciente de diferentes sustancias químicas en el cuerpo humano y el medioambiente.

Todo esto ha llevado a la Unión Europea a definir una estrategia para la sostenibilidad de las sustancias químicas, con dos principios fundamentales:

- Durante la fase de diseño impedir el uso de sustancias químicas tóxicas.
- Sólo permitir el uso de sustancias químicas nocivas si son necesarias para la salud o la seguridad o esenciales para el funcionamiento de la sociedad.

El Reglamento (CE) n° 1907/2006 relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos, más conocido como REACH, es un reglamento cuyo objetivo principal es mejorar la protección de la salud humana y el medio ambiente frente a los riesgos que pueden plantear las sustancias químicas. El organismo responsable de la administración de este reglamento es la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos (ECHA), que promueve que las empresas cumplan la legislación, proporciona información sobre sustancias químicas, evalúa los problemas de salud relacionados con el uso de sustancias químicas, etc.

La ECHA también evalúa la inclusión de sustancias químicas en la lista de Sustancias Extremadamente Preocupantes (SVHC). Las sustancias se añaden a la lista si suponen una preocupación para la salud humana o la seguridad medioambiental. Algunos de los criterios para incluirlas son:

- Sustancias clasificadas como carcinógenas, mutágenas o tóxicas para la reproducción, concretamente las incluidas en las categorías 1A o 1B del reglamento CLP (CE) 1272/2008.
Sustancias caracterizadas como persistentes o muy persistentes, junto con sustancias bioacumulables (vPbP) y sustancias tóxicas (PBT).
- Otros compuestos para los que existan pruebas científicas suficientes que demuestren que pueden presentar un nivel de peligro comparable al de las sustancias descritas anteriormente.



Esta lista evoluciona constantemente y va asimilando sustancias a medida que salen a la luz numerosas pruebas de su peligrosidad. La inclusión en la lista de SVHC implica la responsabilidad de las empresas que utilizan estas sustancias de notificar a la ECHA si la concentración de la sustancia en el producto supera el 0,1% (m/m). En tales casos, la comercialización del producto requiere la aprobación de uso específico por parte de la ECHA.

A modo de ejemplo, en 2017, la lista sufrió una actualización que introdujo cuatro nuevas sustancias, entre ellas el bisfenol A (BPA). El bisfenol A es fundamental para la fabricación de resinas epoxis ampliamente usadas en el sector aeronáutico. El BPA ha sido identificado como un disruptor endocrino, con efectos perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Manifiesta efectos tóxicos sobre la reproducción, tiene el potencial de inducir daños oculares y respiratorios, desencadenar alergias cutáneas y, además, está clasificado como altamente tóxico para la vida acuática.

Más recientemente, en febrero de 2023, se presentó una propuesta para restringir las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), un extenso grupo que comprende más de 10.000 compuestos que se usan en adhesivos y agentes desmoldeantes empleados en los procesos de fabricación de los materiales compuestos.

Por ello es fundamental como se ha comentado anteriormente la investigación en el uso materias primas para la producción de compuestos. Esto implica seleccionar fibras, resinas y aditivos que tengan un impacto ambiental y para la salud mínimo, como biocompuestos y resinas de base biológica.

Conclusiones

La Directiva marco de residuos y su trasposición en España establecen las directrices básicas en la gestión de los residuos de materiales compuestos al no existir una legislación específica para los mismos. La clasificación de los residuos acorde a sus características y proceso de generación (códigos LER, características de peligrosidad, etc.), es fundamental para la interpretación de la regulación aplicable (ej. si las palas de los aerogeneradores los consideramos residuos de la construcción y demolición estaríamos hablando de que existiría un objetivo del reciclaje del 70% de su masa desde 2020 cuando esta asignación del código LER no es clara).

No podemos prever cuando el reciclado de los residuos de materiales compuestos será reglamentariamente obligatorio, pero sí podemos afirmar que el marco regulatorio y las políticas actuales dan señales de ello. No obstante, las administraciones, deberán seguir actuando para estimular a la vez; la demanda y la oferta de bienes y materiales circulares mediante las regulaciones y ayudas e incentivos adecuados, así como financiando programas de I+D+i relacionados con la economía circular de los materiales compuestos dada la importancia que está tomando este flujo de residuos. Las tasas de vertedero en España aún resultan demasiado bajas y aún existen muchas trabas legales que dificultan el reciclaje y la utilización de los materiales valorizados, por ello fabricantes, gestores y administración deben de enfocarse en clarificar en qué situaciones se podría considerar el material valorizado como “no residuo” y agilizar los trámites para la consideración de “subproductos” en lugar de residuos y “fin de la condición de residuo” del material valorizado si procede.

No debemos olvidar el papel fundamental que desempeña el diseño en la sostenibilidad de los materiales compuestos. Incorporar consideraciones de reciclabilidad desde las etapas iniciales de diseño puede mitigar muchos de los desafíos asociados con su gestión al final de su vida útil. Esto implica pensar en la selección de materiales con los menores impactos ambientales, los procedimientos de unión y la facilidad de desmontaje al diseñar productos compuestos. El Reglamento de Ecodiseño para productos sostenibles, recientemente publicado, ayudará sin duda a definir los requisitos para los productos fabricados por materiales compuestos.

Por otro lado, la estandarización del desmantelamiento de determinados bienes que contienen materiales compuestos son muy importantes para impulsar la adopción generalizada de prácticas de reciclaje de materiales compuestos. Establecer estándares claros y procesos definidos facilitará la implementación de técnicas de reciclaje a gran escala, reduciendo los costes y mejorando la eficiencia. Actualmente existen regulaciones para vehículos y buques al final de su vida útil y guías para el desmantelamiento de instalaciones de energía eólica o aeronaves pero falta un marco regulatorio para el fin de vida. En todos los casos se deberían de definir objetivos claros para el reciclaje de sus componentes. En el sector eólico hay un compromiso de las industrias del sector para su reciclaje completo en el 2025, para VFU en la normativa europea existen desde 2015 objetivos de reciclaje y se propone introducir nuevos objetivos para la entrada de materiales plásticos de origen reciclado en 2035. En el sector aeronáutico los diversos estudios así como la introducción de códigos desglosados para otros medios de transporte fuera de uso nos hacen pensar que la normativa específica para estos productos será una realidad en los próximos años y tendrá similitudes con la de VFU.

Los planes de economía circular (europeo, estatal, autonómicos) nos dan buenas pistas de las acciones a acometer, se debería influir en su elaboración para enfocar el camino del reciclaje de los materiales compuestos. Dichos planes deben abordar medidas como regulaciones e incentivos para acometer el objetivo general de la UE de restringir el

vertido de residuos susceptibles de reciclaje en 2030. Es de esperar que cuando exista una viabilidad técnica y económica para el reciclaje de estos materiales se prohíba su vertido. El reciclaje de los materiales compuestos no es sencillo pero es necesario abordarlo porque el marco regulatorio lo va a ir exigiendo en los próximos años y es fundamental para mantener su valor en el tiempo.

Bibliografía

- (1) «Gestión de residuos»: la recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la clasificación y otras operaciones previas; así como la vigilancia de estas operaciones y el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos. (Definiciones, Art. 2 Ley 7/2022)y. Cada una de las operaciones de valorización o eliminación de un residuo tiene un código asignado, R, D, etc. cuyo catálogo se recoge en los anexos ii y iii de la Ley 7/2022.
- (2) Decisión 2014/955/UE de la Comisión de 18 de diciembre de 2014 por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Esta Lista Europea de Residuos (LER) se divide en 20 capítulos, relativos a la fuente que genera el residuo o al tipo de residuo. Estos capítulos se dividen a su vez en subcapítulos que se refieren a los procesos de generación, a los materiales resultantes de estos procesos o al tipo de residuo
- (3) Reglamento (UE) nº 1357/2014 de la Comisión de 18 de diciembre de 2014 por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- (4) Reglamento (UE) 2017/997 del Consejo de 8 de junio de 2017 por el que se modifica el anexo III de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que atañe a la característica de peligrosidad HP 14 "Ecotóxico"
- (5) Reglamento (CE) nº 440/2008 de la Comisión, de 30 de mayo de 2008, por el que se establecen métodos de ensayo de acuerdo con el Reglamento (CE) nº 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).
- (6) Reglamento (UE) 2019/1021 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2019 sobre contaminantes orgánicos persistentes. (Actualmente en modificación: OM (2021) 656: Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Annexes IV and V to Regulation (EU) 2019/1021 of the European Parliament and of the Council on persistent organic pollutants).
- (7) https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/guiatecnicaclasificacionderesiduosnov_21_tcm30-509157.pdf
- (8) <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20181212STO21610/plastic-waste-and-recycling-in-the-eu-facts-and-figures>
- (9) https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0018.02/DOC_1&format=PDF
- (10) [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgecocr/documentacion/230321_Act.1.8_Gu%C3%ADa%20E%C3%B3lica%20\(maquetada\).pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgecocr/documentacion/230321_Act.1.8_Gu%C3%ADa%20E%C3%B3lica%20(maquetada).pdf)



Capítulo 25: CONCLUSIONES

 OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Este documento ha nacido con el fin de **recopilar**, **ordenar** y por supuesto **influir** en el área de conocimiento de materiales compuestos de altas prestaciones y especialmente en lo referente a temas de sostenibilidad:

- **Recopilar** toda la información existente en España con relación a los materiales compuestos, en especial en temas de sostenibilidad, tanto en el ámbito académico, de investigación como industrial.
- **Ordenar** y evaluar la información existente con la finalidad de organizar posteriormente las áreas de trabajo necesarias para desarrollar tecnologías viables desde el punto de vista medioambiental, pero también desde el punto de vista de desarrollo de negocio, coordinando y proponiendo proyectos de investigación a nivel nacional y posteriormente coordinando estos proyectos con otros existentes a nivel europeo.
- **Influir** en dos áreas: primero, en las futuras dotaciones de financiación para proyectos de investigación en el ámbito de materiales compuestos tanto a nivel nacional como europeo, asegurando una financiación suficiente, unos criterios de selección adecuados, así como una temática y un marco de aplicación que permita la presentación de proyectos innovadores tanto en el desarrollo de nuevos materiales y técnicas de fabricación, como en el área de reciclado de materiales con tecnologías que aseguren un impacto económico positivo. Y segundo, y muy relevante, influir en la legislación que tanto a nivel nacional como europea se esté o vaya a desarrollarse en un futuro cercano. En estos dos últimos puntos, AEMAC puede y debe jugar un papel relevante en la coordinación de comentarios y propuestas a nivel nacional, así como su presentación y negociación frente a los organismos competentes.

El propósito principal de este libro ha sido alcanzado, en nuestra opinión, al menos en los dos primeros puntos, iniciándose próximamente el tercero. El libro blanco de sostenibilidad de materiales compuestos ha nacido, por tanto, con vocación de continuidad y con la esperanza de servir de referencia a las nuevas generaciones de investigadores y usuarios en general de materiales compuestos tanto en el ámbito nacional como internacional.

Como nota final hay que indicar que, si hemos logrado el interés de las personas que hayan leído este libro permitiéndoles sorprenderse ante el elevadísimo nivel industrial, de investigación y desarrollo e ideas para el futuro que tenemos en España, el objetivo estará cumplido, y el esfuerzo de autores y editores estará justificado.

Anexo 1: RELACION DE EMPRESAS, CENTROS TECNOLOGICOS, UNIVERSIDADES Y OPERADORES

Martín Flores¹

1 INPRE

Abstract

 OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

NOMBRE	SECTOR / ACTIVIDAD	WEB	DESCRIPCIÓN
ACCIONA	EÓLICO	https://www.acciona-energia.com/	ACCIONA Energía es una compañía energética global que, desde hace más de 30 años, opera exclusivamente en tecnologías renovables. ACCIONA Energía ha anunciado la construcción de Waste2Fiber, una planta de reciclado de palas eólicas en Lumbier (Navarra). La instalación estará operativa en 2025 y dará empleo a más de 100 personas. El proyecto combina la experiencia de ACCIONA en el uso de materiales compuestos, el acceso de ACCIONA Energía a palas de aerogeneradores en desuso y su trayectoria en soluciones innovadoras para la economía circular, y las actividades de RenerCycle en el desmantelamiento de aerogeneradores.
ACITURRI	AERONÁUTICO	https://www.aciturri.com/es/	Empresa aeronáutica española con sede en Miranda de Ebro (Burgos, España). Aciturri Aeronáutica es uno de los principales líderes del sector aeronáutico en España, fundada en 1977, cuenta con 1.300 empleados y unos ingresos superiores a las 200 M€
AERNNOVA	AERONÁUTICO	https://www.aernnova.com/es/	Aernnova es un suministrador aeronáutico especializado en el diseño, fabricación, mantenimiento y servicios de aeroestructuras y componentes tales como empenajes, alas y secciones de fuselaje para los principales OEMs. Con unos ingresos de más de 740 millones de euros y 5.200 empleados, es el primer Tier 1 en España.
AEROBLADE	EÓLICO	https://www.aeroblade.com/	Aeroblade es una empresa que ha estado presente en el ámbito de la



			energía eólica desde los inicios de esta industria. Lleva un cuarto de siglo diseñando y fabricando estructuras de compuesto y de material metálico incluyendo palas de aerogenerador, actualmente Aeroblade ofrece servicios y soluciones tecnológicas para los actores principales del sector de la energía eólica.
AEROSM	CONSULTORIA	https://aerosm.com/	AEROSM es una consultoría especializada en el sector aeroespacial. Experto en defensa para estrategia y desarrollo de negocios globales. Alto nivel de experiencia en el mercado aeroespacial específicamente para: Marketing estratégico y análisis. Desarrollo de negocios. Ventas de ingeniería. Inteligencia de negocios. Soporte y mediación. Cursos.
AGOTE	MATERIAL DEPORTIVO	https://agotesurfboards.com/	Diseño y fabricación de tablas de surf.
AICIA	CENTRO TECNOLÓGICO	https://aicia.es/materiales-y-nanotecnologia/	AICIA desarrolla nuevas técnicas y herramientas para la simulación y optimización de los procesos de fabricación para la introducción de nuevos materiales aeronáuticos, fundamentalmente fibra de carbono y otros materiales compuestos, como por ejemplo los Non-Crimp Fabrics (NCF). Su laboratorio de elasticidad y resistencia de materiales está certificado por diferentes organismos nacionales e internacionales.
AIMEN	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.aimen.es/	AIMEN es un Centro de Innovación y Tecnología altamente especializado en el campo de los materiales y las tecnologías de fabricación avanzada. Especializados en tecnologías de unión y soldadura, tecnologías láser aplicadas al procesamiento de materiales, la robótica y automatización.
AIMPLAS	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.aimplas.es/	AIMPLAS dispone de más de 12.000 m2 de instalaciones con los últimos avances tecnológicos. Más de 35 plantas piloto cubren todos los procesos de transformación del plástico, tanto termoplásticos, como termoestables o composites. Sus laboratorios cuentan con el mayor



			número de acreditaciones para plásticos según la norma UNE-EN ISO/IEC 17025.
AIN	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.ain.es/tecnologia/material-es-avanzados/	AIN es una asociación privada que, a través de su conocimiento especializado en gestión y tecnología, fomenta la colaboración y la mejora de la posición competitiva de la industria Línea tecnológica multidisciplinar enfocada a desarrollar formulaciones y nuevas aplicaciones de materiales nanoestructurados. Especialización en tecnologías de síntesis química, soluciones y coloides, y biopolímeros funcionales.
AIRBUS	AERONAUTICO	https://www.airbus.com/	Como uno de los tres países fundadores de la compañía, España alberga importantes instalaciones de producción de aviones comerciales, helicópteros, actividades espaciales y de defensa, entre las que destacan las líneas de ensamblaje final de todos los aviones militares de Airbus Defence and Space. La compañía también ha establecido Centros de Investigación y Desarrollo dedicados donde se investigan proyectos a la vanguardia de la ciencia y la tecnología.
AIRTECH	MATERIALES	https://www.airtech.lu/es	División de Airtech Advanced Materials Group, es el mayor fabricante de ensacado al vacío y materiales compuestos para preimpregnados/autoclave, infusión de resina y procesos de laminación húmeda hasta 426 °C. Su línea de productos consiste en: películas de ensacado al vacío, películas de liberación, cintas sensibles a la presión, desmoldeantes (no líquidos), capas de pelado, respiraderos y purgadores, cintas selladoras, conectores y mangueras de bolsas de vacío, caucho, almohadillas de presión, herramientas de corte, detectores de fugas de vacío, cinta retráctil, etc.
AITEX	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.aitex.es/	Asociación de Investigación de la Industria Textil, AITEX es un centro de investigación, innovación y servicios técnicos avanzados para los sectores textil, hábitat, indumentaria, textiles técnicos, cosmética, belleza y otros sectores de aplicación. Con más de 35 años de experiencia, centran sus actividades en investigación aplicada, innovación tecnológica, servicios técnicos avanzados de laboratorio, certificaciones y formación técnica para empresas.



AITIIP	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.aitiip.com/	Fundación privada cuyo patronato está compuesto por grandes empresas del sector de la transformación del plástico. Con más de 25 años de experiencia, forman parte activa de varias asociaciones y plataformas a nivel regional, nacional y europeo.
ALESTIS AEROSPACE	AERONAUTICO	https://www.alestis.aero/	ALESTIS AEROSPACE es un proveedor de primer nivel (Tier-1) de Aeroestructuras, líder en ingeniería y tecnologías de fabricación de materiales compuestos. Participando en los programas más relevantes de los mayores fabricantes del sector como son Airbus, Boeing o Embraer.
ALSTOM ESPAÑA	FERROCARRIL	https://www.alstom.com/es/alstom-espana	Alstom ofrece a sus clientes amplia cartera, desde trenes de alta velocidad, metros, monorraíles, tranvías, hasta sistemas llave en mano, servicios, infraestructuras, señalización y movilidad digital, Con presencia en 63 países y más de 80.000 personas.
AMTEC	LABORATORIO / TEST	https://www.amtec-composites.com/	En AMTEC son expertos en el análisis del comportamiento mecánico y fractura de materiales compuestos y adhesivos. servicios de pruebas y valor agregado en su definición y análisis.
ANTALA	MATERIALES	https://www.antala.es/	ANTALA es una empresa especializada en la venta e implementación de productos químicos y equipos especializados para empresas industriales.
APPLUS+LABORATORIES	LABORATORIO / TEST	https://www.appluslaboratories.com/global/es/	División del Grupo Applus+ que proporciona ensayos y certificación. Gracias sus instalaciones, experiencia y capacidades colaboran con empresas tecnológicas de renombre. Desempeñando un rol clave en los avances del sector aeroespacial, de automoción, de ciberseguridad, eléctrica y electrónica, dispositivos médicos y en las industrias de energías renovables, de construcción, y ferroviaria.
AYATS	CARROCERÍA Y VEHICULOS INDUSTRIALES	https://ayats.es/	Carrocerías Ayats es un referente en el sector de la fabricación de autobuses y autocares en Europa desde hace 115 años.
BERRIA	MATERIAL DEPORTIVO	https://berriabikes.com/es/	Diseño y fabricación de bicicletas.
BH	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.bhbikes.com/es	Diseño y fabricación de bicicletas.
BIESSE IBERICA	EQUIPAMIENTO	https://www.biesse.com/es	BIESSE dispone de una gama específica de productos para el mecanizado de materiales plásticos, compuestos y termoformados, compuesta por



			seccionadores, centros de mecanizado, sistemas de corte por chorro de agua y lijadoras, así como termo-formadoras.
BIESTERFELD IBERICA	MATERIALES	https://www.biesterfeld.com/es/es/espana/	Biesterfeld comercializa polímeros en España desde 1997. Así mismo desde 2004, Biesterfeld también ofrece especialidades químicas en la Península ibérica. La filial Biesterfeld Ibérica S.L.U. se encarga de la distribución de plásticos y cauchos orgánicos. El amplio catálogo de productos incluye polímeros, caucho orgánico, elastómeros y aditivos para distintos sectores, como automoción, embalaje, electricidad y electrónica, los compuestos y masterbatches, cosmética y cable.
BIRKA COMPOSITES	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.birka.es/	BIRKA proporciona soluciones integrales en materiales compuestos avanzados, desde la definición y fabricación de los perfiles, hasta el diseño y montaje de estructuras a partir de los perfiles fabricados. Gracias a la tecnología Dual Pull Braiding, sus perfiles pueden competir mecánicamente con otros materiales tradicionales como el acero, el aluminio o la madera, con aplicaciones en sectores como la construcción, el transporte o la energía.
BLUEBERRY	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.facebook.com/BlueberrySkis/	Diseño y fabricación de skys.
BOLD	MOVILIDAD	https://boldvaluable.tech/	Fundada en 2019, BOLD surgió con una visión clara: redefinir el potencial de la electrificación y el rendimiento en todas las facetas del automovilismo. La empresa abarca el diseño, el desarrollo, las pruebas, la fabricación y la entrega sin problemas de sistemas de baterías de alto rendimiento y soluciones intrincadas de ingeniería de vehículos. En junio de 2021, BOLD se trasladó a la sede actual en Montmeló, Barcelona. En solo 18 meses, la empresa pasó de 15 empleados a más de 140.
BOREAS	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.skisboreas.com/	Diseño y fabricación de skys.
BULLPADEL	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.bullpadel.com/es/	Diseño y fabricación de palas de pádel.
CAF	FERROCARRIL	https://www.caf.net/es	CAF es un referente mundial en soluciones de transporte sostenible, ofrece alternativas innovadoras en el ámbito de la movilidad ferroviaria y de autobuses. Cuentan con instalaciones productivas no sólo en España, sino también en Francia, Reino Unido, Brasil,



Estados Unidos y México.		
CALPE Institute of Technology (CIT)	CENTRO TECNOLÓGICO https://caltech.es/	Calpe Institute of Technology (CIT) es un centro de ingeniería de excelencia, realiza ensayos in situ de aislamiento acústico, mediciones de ruido, mapas de ruido estratégicos y estudios acústicos. Proyectos de instrumentación en petroquímica, desarrollando esquemas lógicos de control y la implementación en campo, con una contrastada experiencia en plantas de productos intermedios de fibra (como TA, PTA y PIPA).
CARBOTAINER	DISEÑO/FABRICACIÓN https://www.carbotainer.es/es/	Fabricación de cilindros de fibra de carbono, proyectos a medida para pilas de combustible de hidrógeno, almacenamiento de alta capacidad, transporte, etc.
CARBOVENETA IBERICA	DISEÑO/FABRICACIÓN https://carbonveneta.es/	Carbonveneta es una Unidad de Negocio de Carbonveneta Technology en Composites - Nestech - PLD Collectors. Entre sus diversas familias de productos, también es socio en el diseño y la producción de perfiles de fibra de carbono.
CARTIF	CENTRO TECNOLÓGICO https://www.cartif.es/	CARTIF es un centro de investigación aplicada, horizontal, jurídicamente es una fundación privada y sin ánimo de lucro, surgida de la Universidad de Valladolid, cuya misión es ofrecer soluciones innovadoras a las empresas para mejorar sus procesos, sistemas y productos, mejorando su competitividad y creando nuevas oportunidades de negocio.
CASTRO COMPOSITES	MATERIALES https://castrocomposites.com/	CASTRO COMPOSITES es una empresa perteneciente a Resinas Castro S.L., dedicada comercialización de todo tipo de productos relacionados con el sector de los composites (materiales compuestos), desde hace más de 25 años. Especialistas en resinas de tipo termoestable (poliésteres, vinilésteres, epoxis, poliuretanos, siliconas, ...), fibras de refuerzo (aramidas, carbono, vidrio...) y todos los productos complementarios implicados en las aplicaciones relacionadas: gel y top coats, masillas, adhesivos, núcleos para estructuras sándwich (PVC, PU, madera de balsa, etc.), materiales de vacío, etc.
CASTROSUA	CARROCERÍAS Y VEHÍCULOS INDUSTRIALES https://www.castrosua.com/	Castrosua lleva 70 años siendo una de las compañías de referencia en la producción de carrocerías Sus modelos incorporan poliéster reforzado con fibra de vidrio en



			diferentes componentes de las carrocerías.
CATEC – Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.catec.aero/es	Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales (CATEC) es un centro tecnológico establecido y gestionado por la Fundación Andaluza para el Desarrollo Aeroespacial (FADA). Su misión es impulsar y desarrollar actividades de I+D+i para fomentar el desarrollo económico del sector Aeroespacial y promover la generación y explotación de nuevos conocimientos y tecnologías. CATEC es líder europeo y mundial en el desarrollo de tecnologías para UAVs medianos, pequeños y ligeros, y trabaja directamente en proyectos tecnológicos con las empresas líderes del sector.
CBK	MATERIAL DEPORTIVO	https://carbonbikes.es/	Diseño y fabricación de bicicletas
CENER	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.cener.com	Renovables (CENER) desarrolla investigación aplicada en energías renovables y presta soporte tecnológico a empresas e instituciones energéticas en cinco áreas: eólica, solar térmica y solar fotovoltaica, biomasa, transición energética en las ciudades, e integración en red, almacenamiento eléctrico e hidrógeno. Dispone de: Laboratorio de materiales compuestos y procesos. Laboratorio de ensayo de palas de aerogeneradores.
Centro Catalán del Plástico Universitat Politècnica de Catalunya	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.upc.edu/ccp/ca	Centro público de I + D de carácter consorcial, integrado por la Generalitat de Catalunya, la Universitat Politècnica de Catalunya, el Ajuntament de Terrassa y las asociaciones más representativas a nivel nacional del sector industrial del plástico. Creado en 1993, nació con la vocación de ser un instrumento al servicio de la mejora de las empresas y con ese mismo espíritu continua hoy desarrollando su labor.
CERVI	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.facebook.com/cerviskis/	Diseño y fabricación de skis.
CETIM	CENTRO TECNOLÓGICO	https://cetim.es/	Centro tecnológico privado, orientado a ofrecer servicios y a satisfacer las necesidades tecnológicas de los clientes, fomentando la innovación y la mejora de la competitividad empresarial.



			Trabajando en tecnologías, ofrecen conocimiento y servicios de manera transversal a todos los sectores. Materiales Poliméricos & Coatings Nuevas formulaciones poliméricas termoplásticas y termoestables con propiedades mejoradas: materiales reciclados, biodegradables y nanocomposites Metodologías de moldeo y optimización de formulaciones poliméricas. Recubrimientos: Desarrollo de recubrimientos y sus metodologías de aplicación en diferentes sustratos.
CIDAUT	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.cidaut.es/	Centro tecnológico multidisciplinar con el objetivo de aplicar la innovación en cada uno de los procesos que preceden a la aparición de un nuevo producto, actuando de forma coordinada desde su concepción, caracterización, diseño de materiales, simulación, diseño de prototipos, hasta la validación final. Sus áreas e conocimiento son la Industria 4.0, economía circular, movilidad inteligente y energía y medio ambiente.
CIDETEC	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.cidetec.es/	CIDETEC es una organización de investigación aplicada que integra tres centros tecnológicos de referencia internacional en Almacenamiento de Energía, Ingeniería de Superficies y Nanomedicina. Desde el año 2.000 CIDETEC ha desarrollado proyectos de I+D con empresas de diferentes sectores productivos. Al mismo tiempo, en colaboración con otros socios industriales, CIDETEC ha creado 6 nuevas empresas que industrializan algunos de sus desarrollos.
CIMNE	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.cimne.com/	CIMNE es un organismo de investigación creado en 1987 en el seno de la prestigiosa Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) como una asociación entre la Generalitat de Cataluña y la UPC, en cooperación con la UNESCO. El objetivo del CIMNE es el desarrollo de métodos numéricos y técnicas computacionales para el avance del conocimiento y la tecnología en ingeniería y ciencias aplicadas.
COLUER	MATERIAL DEPORTIVO	https://coluer.com/	Diseño y fabricación de bicicletas.
COMPOSITES ATE	MATERIALES	https://www.composites-ate.com/	Fabricantes de materiales compuestos



			e ingeniería de producto desde 1997. Con un amplio bagaje en el desarrollo de composites, proporcionan soluciones técnicas y exclusivas a los principales sectores industriales. La constante innovación en el desarrollo de soluciones con alto grado de dificultad y nuevos materiales desde hace 20 años, les ha permitido acceder a sectores estratégicos en los que dan servicios de ingeniería integral.
COMPOXI	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.compoxi.com/es	COMPOXI es una empresa comprometida con el desarrollo de productos composites. Contribuyendo en cada proyecto con experiencia y know-how, adquiridos después de más de una década, involucrados en el desarrollo, diseño y producción de estructuras y componentes de composites en los sectores espacial, aeronáutico e industrial.
CONOR	MATERIAL DEPORTIVO	https://conorbikes.com/es/	Diseño y fabricación de bicicletas.
CORETTI	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.coretti.es/	Diseño y fabricación de skys.
CT INGENIEROS	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.thectengineeringgroup.com/	CT INGENIEROS está presente en la industria desde hace más de 35 años, sus equipos han llevado a cabo con éxito innumerables proyectos tecnológicos. CT proporciona servicios de ingeniería para todo el ciclo de vida de los productos en la mayoría de los sectores industriales.
CTAG – Centro Tecnológico del Automóvil de Galicia	CENTRO TECNOLÓGICO	https://ctag.com/es/	El Centro Tecnológico de Automoción de Galicia, CTAG, es una entidad creada para ofrecer soluciones tecnológicas avanzadas al sector del automóvil. Apoya a las industrias del sector en general en su modernización y adaptación n a las nuevas tecnologías en sus productos y procesos de fabricación.
DELTA VIGO	EQUIPAMIENTO	https://deltagroupspain.es/es/	El Grupo Delta se compone de las empresas Delta Vigo, Delta Illescas y Delta Vigo Aeroestructuras, A lo largo de 74 años de trayectoria industrial, disponen de un amplio conocimiento interno para desarrollar con éxito todas las actividades necesarias de un proceso industrial competitivo y de calidad. Experiencia en diversos sectores industriales entre los que destaca la Automoción, Defensa y la Aeronáutica.



DROP SHOT	MATERIAL DEPORTIVO	https://dropshot.es/	Diseño y fabricación de palas de pádel.
EASY FAIRS	ORGANIZACIÓN DE EVENTOS	https://www.easyfairs.com/	Organización de eventos multiformato que cubren un amplio espectro, desde reuniones profesionales y ferias comerciales hasta exhibiciones de consumidores y festivales de fanáticos. Además, cumbres, congresos y conferencias.
EFESTO GREEN	EÓLICO	https://windbladesrecycling.com/	Efesto Green Reactors es pionera en ingeniería, construcción y puesta en servicio de equipamiento específico para procesos de reciclado. Su objetivo es liderar el reciclaje de componentes de instalaciones renovables, una iniciativa que contribuye además a la transición energética y a impulsar la economía circular en España.
ENERGYLOOP	EÓLICO	https://energyloop.es/	Este proyecto será el primero a escala industrial en Europa y contribuirá además a la creación de una cadena de valor innovadora y dinámica. EnergyLOOP espera crear en torno a 100 empleos directos e indirectos a lo largo de la década y planea invertir cerca de 10 millones de euros en la primera instalación.
ENSIA EXPERTS	EQUIPAMIENTO	https://www.testia.com/about-us/	TESTIA es una empresa de Airbus con 30 años de experiencia en inspecciones de aeroestructuras y ensayos no destructivos. Gracias a su presencia global con instalaciones en Europa, América del Norte y Asia, Testia puede proporcionar servicios en todo el mundo y una solución global a las necesidades de la industria.
EURECAT	CENTRO TECNOLÓGICO	https://eurecat.org/es/	Eurecat nace con la vocación de ser un referente en la cooperación público-privada en el ámbito de la investigación y la innovación, siendo uno de los principales actores en la implementación de la estrategia tecnológica de Cataluña, a partir de la RIS3CAT.
FAIRMAT	MATERIALES, DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.fairmat.tech/	FAIRMAT es una deeptech francesa fundada en 2020 que recicla, diseña y produce compuestos de fibra de carbono de segunda generación y soluciones industriales para un futuro circular, manteniendo materiales valiosos fuera de los vertederos y en el centro del diseño de productos. Del laboratorio a la fábrica, desarrollan sus propias innovaciones tecnológicas para crear piezas de fibra de carbono y productos a medida de bajo impacto medioambiental para aplicaciones de



			alto rendimiento en diversos sectores, desde artículos deportivos a la electrónica.
FERRER DALMAU	EQUIPAMIEN TO	https://fdindustrial.es/	Desde Ferrer-Dalmau Industrial se ofrece una amplia variedad de componentes para maquinaria de las marcas más prestigiosas del sector industrial. Bege, Rexnord, Autogard, HKS, Rexroth Group, AST y Zurrer son algunas de las firmas que representan en España.
FIBER PROFIL	PULTRUSION	http://www.fiberprofil.com/	FIBERPROFIL, a lo largo de los últimos años, ha desarrollado aplicaciones de productos fabricados con resinas reforzadas. En la industria de los composites, el proceso de pultrusión es una de las técnicas que más rápidamente se ha desarrollado. Actualmente, los materiales pultrusionados son muy utilizados para la manufactura de equipos como plataformas, suelos técnicos, escaleras, marcos de ventanas, estructuras y muchas otras aplicaciones.
FIDAMC	CENTRO TECN OLÓGICO	https://fidamc.es/	La Fundación para la Investigación, Desarrollo y Aplicación de los Materiales Compuestos (FIDAMC) El proyecto ha sido financiado por el consorcio EADS al 50%, mientras que el Estado y la Comunidad de Madrid aportan el otro 50% de los recursos Enfocado al sector de la industria aeroespacial, dado su carácter estratégico y a la necesidad de seguir investigando en el desarrollo de los materiales compuestos y otras nuevas tecnologías asociadas.
FLYSURFBOARDS	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.flysurfboards.es/	Diseño y fabricación de tablas de surf.
FUTURE FIBERS	MATERIALES, DISEÑO/FABR ICACIÓN	https://www.futurefibres.com/	FUTURE FIBRES ofrece una gama completa de soluciones de aparejos compuestos, incluidos cables estáticos, de aparejo en funcionamiento y enrollados. El soporte de ingeniería siempre ha sido una parte clave del servicio, combinando múltiples componentes para ofrecer una solución de clase mundial.
GAIKER	CENTRO TECN OLÓGICO	http://www.gaiker.es	GAIKER es una entidad privada sin ánimo de lucro, dedicado a la Investigación y la prestación de Servicios Tecnológicos e Innovadores para las empresas. Desde su creación en 1985, contribuyen al desarrollo tecnológico en tecnologías relacionadas con la Biotecnología y los Composites y Polímeros Funcionales Sostenibles.



GLOBAL COMPOSITES	MATERIALES	https://www.globalcomposites.es/	GLOBAL COMPOSITES es una empresa fundada en el 2015, para distribuir productos de SWANCOR en la mayor parte de países de Europa y norte de África Es especialista en el uso de los Materiales Compuestos y sus diferentes procesos productivos, lo que nos permite formar y asesorar a los clientes para conseguir la mejor calidad de sus productos.
GRUPO DANOBAT	AERONÁUTICO	https://www.danobatgroup.com/es/grupo	El Grupo DANOBAT es un grupo industrial especializado en el diseño y fabricación de soluciones de máquina-herramienta y fabricación avanzada. En CT IDEKO pertenece al grupo. Desarrolla soluciones para sectores como el aeroespacial, ferrocarril, automoción, etc.. Hs desarrollado sistemas de mecanizado de materiales compuestos, sistemas de inspección no destructiva y soluciones de fabricación 4.0.
GRUPO METALIA	CONSULTORIA	https://grupometalia.com/	Grupo con 20 años de historia, aportando expertise en áreas cruciales como el Marketing, la Comunicación, el Marketing Relacional, la organización de Ferias y Eventos, y especialmente, en el dominio digital e internet: Webs y blogs – SEO - Publicidad online - Redes sociales - Plataformas de vídeo. Análisis de mercados – Planes integrales – Comunicación – Captación y fidelización de clientes. Publicaciones corporativas - Memorias de empresa - Catálogos de productos y servicios.
GURIT	MATERIALES	https://www.gurit.com/	GURIT es un socio de sistemas para clientes de energía eólica en todo el mundo, con un enfoque en las palas de turbinas eólicas. Con ofertas únicas y un profundo conocimiento de la cadena de valor, mejoran la competitividad de la energía eólica y promoviendo su crecimiento sostenible. Aplicaciones de aligeramiento, materiales e ingeniería de alto rendimiento.
HEXAGON	INGENIERÍA	https://hexagon.com/es/	Las soluciones de HEXAGON ayudan a optimizar el ciclo de vida de los productos, liberando a los creadores para que puedan fabricar mejores productos de nuevas maneras innovadoras, que beneficien tanto a las personas como al planeta.
HEXCEL	MATERIALES	https://www.hexcel.com/	HEXCEL es un productor líder en refuerzos de fibra de carbono y



			sistemas de resina, y también como líder en la fabricación de honeycomb para la industria aeronáutica comercial.
HUSTA SKIS	MATERIAL DEPORTIVO	https://hustaskis.com/	Diseño y fabricación de skys.
IBERIA COMPOSITECH	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.iberiacompositech.com/	Expertos en la fabricación y diseño de piezas y componentes compuestos para una amplia gama de industrias, incluidas la automoción, aeroespacial, náutica, industrial y médica. Ofrece soluciones innovadoras y personalizadas que cumplen con los más altos estándares de calidad y rendimiento.
ICTP-CSIC	CENTRO TECNOLÓGICO	Grupo de Nanocompuestos Poliméricos – Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros, CSIC	El objetivo del grupo ICTP-CSIC es desarrollar composites poliméricos y nanocomposites con aplicaciones industriales. La investigación se lleva a cabo gracias al profundo conocimiento de las interacciones entre el relleno y el polímero, la morfología del compuesto y el efecto del relleno en las propiedades del compuesto.
IDEKO	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.ideko.es/	Centro tecnológico especializado en tecnologías de fabricación y producción industrial. Especializados en tecnologías de fabricación, desarrollan soluciones avanzadas para mejorar las capacidades de producción y competitividad de sus clientes en sectores como máquina herramienta, ferrocarril, aeronáutica, bienes de equipo, automoción y energía, entre otros.
IGESTEK	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://igestek.com/es/	IGESTEK es una empresa de Desarrollo de Proyectos Tecnológicos, especializada en Soluciones de Aligeramiento con Plásticos y Composites. Integra diferentes procesos de Fabricación Híbridos, con una alta especialización en la fabricación de componentes de material compuesto.
IKERLAN-IK4	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.ikerlan.es/	Centro tecnológico líder en la transferencia de conocimiento, cooperativa miembro de la Corporación MONDRAGON y del Basque Research and Technology Alliance (BRTA). Estructurados en tres unidades de especialización tecnológica: Tecnologías digitales e I.A., sistemas electrónicos y ciberseguridad y finalmente, energía y mecatrónica.
IMDEA	CENTRO TECNOLÓGICO	https://materiales.imdea.org/	El Instituto IMDEA Materiales, uno de



OLÓGICO			los siete Institutos Madrileños de Estudios Avanzados (IMDEA), es un centro de investigación público fundado en 2007 por el gobierno regional de la Comunidad de Madrid. El objetivo del Instituto es desarrollar ciencia en la frontera del conocimiento de la Ciencia e Ingeniería de Materiales.
INCAR-CSIC	CENTRO TECNOLÓGICO	Instituto Nacional del Carbón – CSIC	El Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR) es un centro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Organismo público de Investigación adscrito al Ministerio de Ciencia e Innovación. El INCAR pertenece al área global de Materia y está integrado en la subárea de Ciencia y Tecnologías Químicas.
INDETRUCK	CARROCERÍA Y VEHICULOS INDUSTRIALES	https://indetruck.com/	Marca referente dentro del sector de la fabricación y distribución de semirremolques frigoríficos.
INEGI	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.inegi.pt/pt/	El Instituto de Ciencia e Innovación en Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial es un Centro de Tecnología e Innovación (CTI), creado en 1986, dedicado a la realización de actividades de investigación e innovación de base tecnológica, consultoría y servicios tecnológicos.
INGENIACITY	INGENIERÍA	https://ingeniacity.com/es/	Compañía de ingeniería, tecnología avanzada y diseño que combina el pensamiento creativo, la innovación y la tecnología para ofrecer ventajas cuantificables a las personas, procesos y sistemas de la industria.
INP 96	MATERIALES	https://inp96.es/	Con más de 25 años de experiencia, distribuidores de las empresas europeas más destacadas de materiales, equipos de reparación y procesos para la industria de los materiales compuestos en diferentes sectores (aeronáutico, naval, ferroviario y automoción, entre otros) en España y Portugal.
INPRE COMPOSITES	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.inpre.es/	En INPRE composites son especialistas en componentes de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) para carrocería industrial, sector eólico y transporte. Fabricantes desde hace 30 años de carcasas de nacelles y bujes de PRFV, siendo líderes en España desde el nacimiento del sector. A su vez fue la primera empresa española de composites en la fabricación de rollos de placas de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) para el sector carrocerero.



INTA	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.inta.es/	Organismo Público de Investigación (OPI) dependiente del Ministerio de Defensa. Además de realizar actividades de investigación científica y de desarrollo de sistemas y prototipos en su ámbito de conocimiento, presta servicios tecnológicos a empresas, universidades e instituciones.
IRIZAR	CARROCERÍA Y VEHICULOS INDUSTRIALES	https://www.irizar.com/	Grupo empresarial con presencia internacional que desarrolla su actividad en los sectores del transporte de pasajeros, electromovilidad, etc. Desarrollan soluciones que contemplan el uso de materiales compuestos más ligeros que sustituyen a los materiales estructurales tradicionales.
ISOFIBRAS	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.isofibras.pt/en/	ISOFIBRES se ha dedicado desde su fundación en 1988 al diseño, construcción, instalación y mantenimiento de productos de plásticos reforzados con fibra de vidrio (FRP), la aplicación de termoplásticos, recubrimientos, aislamientos y otros productos en diseño. El acompañamiento de nuevas técnicas combinado con la formación constante de sus empleados, garantiza la calidad de los productos y el cumplimiento de las normas europeas. Sus técnicos son miembros de la Comisión Técnica Europea de Normalización de Plásticos Reforzados (CT58) desde hace más de 20 años, realizando un seguimiento constante de la evolución de estos materiales.
ITAINNOVA	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.itainnova.es/	ITAINNOVA es un centro tecnológico de referencia en investigación e innovación tecnológica. Diseñan y desarrollan proyectos en: Robótica, Logística, Mecatrónica, Materiales, Sistemas Eléctricos, Big Data y Sistemas Cognitivos, Industria 4.0, IoT, etc.
J.M. TONEU	EQUIPAMIENTO	https://jmtoneu.com/	Fundada el año 1.979, J.M. Toneu una empresa que se dedica a representar a prestigiosos fabricantes de equipos de medición on-line y de laboratorio para control de calidad, investigación y desarrollo. JM Toneu es agente comercial de la empresas Advantage Scientific, Lenzing Instruments, Mesdan, SDC Enterprises, Suragus, Texttechno, Porometer, Aiyou y Siddhi Engineering.
JOVER LABTECH	MATERIALES	http://joverlabtech.com/	JOVER LABTECH es una empresa de Terrassa (Barcelona) especializada en la



			venta de materias primas y la distribución de equipamientos para la industria cosmética y farmacéutica.
KARBONIUS	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.karbonius.es/	Establecida en 2008, la actividad de KARBONIUS se centra en el Sector Automoción y Composites avanzados. Su sistema de producción incluye todos los procesos necesarios para fabricar componentes de fibra de carbono, desde el diseño hasta la fabricación de piezas estructurales, decorativas, paneles sandwich, etc.
KING AGRO	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.kingagro.com/	KING AGRO se enfoca en desarrollar tecnologías para el uso de fibra de carbono aplicada a la agricultura, logrando establecer un nuevo paradigma en la fabricación de partes para la industria de las maquinarias agrícolas, introduciendo los beneficios de la tecnología de fibra de carbono.
KUSTOM SKIS	MATERIAL DEPORTIVO	https://kustomsports.com/	Diseño y fabricación de skis
LEARTIKER	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.leartiker.com/	Centro Tecnológico especializado en Tecnología de Alimentos y Tecnología de Polímeros. Desde el año 2.000 desarrollan dos líneas de investigación principales: Tecnología de alimentos y tecnología de polímeros.
LECITRAILER	CARROCERÍA Y VEHICULOS INDUSTRIALES	https://lecitrailer.es/es	Lecitrailer es el fabricante líder del mercado nacional de remolques y semirremolques y uno de los principales actores del mercado internacional. Se utilizan placas de poliéster reforzado con fibra de vidrio en su línea de remolques frigo.
LIDERKIT	CARROCERÍA Y VEHICULOS INDUSTRIALES	https://liderkit.com/	Liderkit es una empresa líder en el mercado nacional e internacional en la fabricación de carrocerías para vehículos que son distribuidas en kits para montar. Fabricación propia de placas de poliéster reforzado con fibra de vidrio que utilizan en sus productos.
LM WIND POWER	EÓLICO	https://www.lmwindpower.com/	LM Wind Power tiene su sede en Kolding, Dinamarca. Ha construido instalaciones de producción en los principales mercados de energía eólica: 13 ubicaciones en 8 países. En España cuenta con plantas de fabricación de palas de aerogeneradores en Castellón y Ponferrada.
MACEPLAST	MATERIALES	https://www.maceplast.es/es/	Maceplast España, sociedad del Grupo Guarniflon, líder en el sector de la transformación de productos semielaborados y piezas acabadas de PTFE.



MANKIEWICZ	MATERIALES	https://www.mankiewicz.com/en	Desde 1895, MANKIEWICZ ha estado produciendo y distribuyendo recubrimientos industriales de alta calidad y es una de las empresas de recubrimientos más exitosas a nivel mundial.
MAPER	MATERIALES	https://maper.es/	MAPER, con una experiencia acumulada de más de 30 años en la fabricación de pinturas, sigue fiel a su objetivo de poner a disposición de sus clientes un amplio abanico de productos de última generación y máxima calidad. Su principal objetivo es el servicio al cliente, asesorándole técnicamente y adecuando nuestros procesos para cumplir con los objetivos de calidad, máxima rapidez, eficacia y economía. Su evolución se ha centrado en el respeto por el medio ambiente y un importante esfuerzo en I+D+i, con la intención de conseguir, los productos más competitivos y avanzados del mercado.
MASSI	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.massi.bike/	Diseño y fabricación de bicicletas.
MEGAMO	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.megamo.com/es?id_regio=1	Diseño y fabricación de bicicletas.
MICROMAG	MATERIALES	https://www.micromag.es/es/	Las operaciones de MICROMAG están basadas en el uso inteligente de materiales desarrollados "in house", que permiten modificar las características dieléctricas y magnéticas del sustrato en el que están incrustados. Esta tecnología permite modular la reflectividad y absorción electromagnética de plataformas militares y civiles.
MMR	MATERIAL DEPORTIVO	https://mmrbikes.com/	Diseño y fabricación de bicicletas.
MOLDER DISNOVA	DISEÑO/FABRICACIÓN	http://molderdisnova.com/	En MOLDER DISNOVA están especializados en el diseño y fabricación de piezas industriales y productos fabricados en materiales composite, principalmente en Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) y otras fibras como el Carbono o la Aramida. Estos materiales tienen una alta resistencia mecánica y son los más adecuados para aplicaciones en exteriores y series cortas. Con casi 3 décadas de experiencia, está especializada en diferentes sectores, y desarrolla una amplia gama de métodos de fabricación, incluyendo desde el laminado manual, la proyección, la colada, la inyección RTM-Light y RTM.



MONDRAKER	MATERIAL DEPORTIVO	https://mondraker.com/es/es	Diseño y fabricación de bicicletas.
MTORRES	EQUIPAMIEN TO	https://mtorres.es/es	MTorres diseña soluciones innovadoras, competitivas e integrales para la ejecución de procesos industriales. La mayor parte de sus proyectos se han desarrollado en los sectores aeroespacial, packaging y paper converting, siendo un proveedor de primer nivel en maquinaria y sistemas de ensamblaje para el sector Aeroespacial. MTorres es una compañía global con tres centros con capacidades de diseño, producción e I+D. Dos de ellos situados en España; y uno, en USA y seis centros como soporte comercial y técnico para Europa, América y Asia; y varias localizaciones más que cuentan con recursos para prestar asistencia técnica.
NAITEC	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.naitec.es/	Centro Tecnológico especializado en movilidad y mecatrónica de Navarra. Cuenta con seis áreas de conocimiento: Inteligencia artificial y data analytics, electrónica y sistemas de transporte inteligente, nuevos materiales, fabricación avanzada, ingeniería de validación y ecodiseño.
NETZSCH	EQUIPAMIEN TO	http://www.netzsch.com	El Grupo NETZSCH es una empresa tecnológica internacional con sede en Alemania. Dispone de tres unidades de negocio, Análisis y Pruebas, Molienda y Dispersión, y Bombas y Sistemas, desarrollan productos excepcionales para casi todas las industrias y países del mundo. Más de 4.600 empleados en 36 países y una red mundial de ventas y servicio garantizan la proximidad al cliente y un servicio competente.
NEXUS PROJECTES	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://nexusprojectes.com/	NEXUS PROJECTES se dedica al diseño y fabricación de componentes de materiales compuestos de altas prestaciones. Ofrecen una amplia variedad de técnicas, materiales y métodos. Para garantizar acabados perfectos, cada detalle importa, desde la selección de materiales hasta el meticuloso proceso de fabricación.
NIOGLAS	PULTRUSION	https://nioglas.com/	NIOGLAS es fabricante de perfiles termoestables de fibra de vidrio-poliéster, por el proceso de pultrusión, fundada en el año 1981 como una división de Industrias Nioco, S.L. en Castellbisbal.



NORDEX ACCIONA	EÓLICO	https://www.nordex-online.com/es/	Nordex Group, uno de los mayores fabricantes de aerogeneradores del mundo, suministra aerogeneradores bajo las marcas Acciona Windpower y Nordex. Dispone de instalaciones y plantas de producción de aerogeneradores y palas en Navarra.
NORVENTO	EÓLICO	https://www.norvento.com/	Empresa productora de energía renovable de Galicia. Dispone de centros de investigación y producción propios en Lugo, diseñan y fabrican aerogeneradores y palas propias.
NOX	MATERIAL DEPORTIVO	https://noxsport.es/	Diseño y fabricación de palas de pádel.
OEM PADEL	MATERIAL DEPORTIVO	https://oempadel.com/	Diseño y fabricación de palas de pádel.
OLATU	MATERIAL DEPORTIVO	http://www.olatusurf.com/	Diseño y fabricación de tablas de surf.
OLLEARIS	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://ollearis.org/	OLLEARIS S. A. es uno de los líderes mundiales en el diseño, producción e instalación de tanques y estructuras en poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP) y termoplásticos calados (doble laminado) para aplicaciones corrosivas.
OLMAR	EQUIPAMIENTO	https://www.olmar.com/es/	Los autoclaves OLMAR ATC para tratamiento de materiales compuestos (composites) son considerados los equipos más avanzados a nivel técnico y de diseño, ya que se utilizan en los sectores con mayor inversión en investigación y desarrollo de nuevos materiales como la aeronáutica o la ingeniería aeroespacial.
ORBEA	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.orbea.com/es-es/	Diseño y fabricación de bicicletas.
POLYMEC	PULTRUSION	https://polymec.com/	POLYMEC, S.L. inició su actividad en 1981. Fabricante de perfiles de poliéster reforzado con fibra de vidrio y de carbono por el sistema de pultrusión.
PRINCIPIA	CONSULTORIA	https://principia.es/	En PRINCIPIA son consultores en Mecánica Aplicada Especialistas en Software de Diseño y Simulación.
PROSIX ENGINEERING	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://proxix.es/	PROSIX ENGINEERING cuenta con más de 20 años de experiencia en el desarrollo y fabricación de plásticos reforzados con fibra de carbono de alto rendimiento, precisión ligera, componentes satelitales para programas de investigación.
PUKAS	MATERIAL DEPORTIVO	https://pukassurf.com/surfboards/	Diseño y fabricación de tablas de surf.
QUER	MATERIAL DEPORTIVO	http://b2b.bicicletasquer.com/	Diseño y fabricación de bicicletas.



RACKETS & SPORTS WORLD	MATERIAL DEPORTIVO	https://viborapadel.com/	Diseño y fabricación de palas de pádel.
REFISA	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://refisa.com/	REFISA es una empresa líder en la fabricación con materiales compuestos, utilizando los productos y la tecnología más avanzados del mercado. Amplia experiencia vinculada al desarrollo de proyectos en el sector ferroviario.
REINFORCE3D	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://reinforce3d.com/	REINFORCE3D es una empresa dedicada al Proceso de Inyección Continua de Fibra (CFIP), tecnología basada en el refuerzo de la pieza después del proceso de Fabricación Aditiva (AM) . Consiste en inyectar las fibras continuas simultáneamente con resina líquida en el interior de las cavidades tubulares de la pieza. Después de esto, la pieza se cura para que la resina, una vez solidificada, finalmente actúe como interfaz mecánica entre las fibras y el resto de la pieza.
RIEJU BIKES	MATERIAL DEPORTIVO	https://bikes.rieju.com/	Diseño y fabricación de bicicletas.
ROBTRUSION	DISEÑO/FABRICACIÓN	https://www.robtrusion.com/es/	ROBOTRUSIÓN es una start-up industrial fabricante de perfiles curvos de fibra de vidrio. Fabricación robótica avanzada a través del empleo de robots como sistema de tirado para la fabricación de perfiles pultruidos curvos con diferentes radios y orientaciones de forma automatizada.
ROYAL PADEL	MATERIAL DEPORTIVO	https://royalpadel.com/	Diseño y fabricación de palas de pádel.
SHUNCK	EQUIPAMIENTO	https://es.schunk.com/es/es	SHUNCK es una empresa tecnológica internacional con unos 3700 empleados en más de 50 países, dirigida con visión de futuro por la tercera generación familiar. Sus especialistas tienen amplios conocimientos en portaherramientas y sistemas de sujeción estacionarios, tecnología de agarre, tecnología de automatización. Además de componentes individuales de alta tecnología, proporcionan soluciones completas inteligentes para sistemas robotizados, así como para una amplia variedad de procesos de producción y automatización.
SIEMENS GAMESA	EÓLICO	https://www.siemensgamesa.com/	En 2017, Siemens Wind Power y Gamesa concluyeron la fusión de sus negocios de energía eólica, combinando sus carteras de productos para energía eólica terrestre, marina y servicios.



			Su sede social se encuentra en Zamudio, Vizcaya, centros de ingeniería y servicios en Navarra y Madrid y planta de producción de aerogeneradores en Soria.
SIUX	MATERIAL DEPORTIVO	https://www.siuxpadel.com/	Diseño y fabricación de palas de pádel.
SOR IBERICA	CARROCERÍA Y VEHICULOS INDUSTRIALES	https://soriberica.com/	Especialistas en vehículos frigoríficos, utilizan extensivamente la fibra de vidrio para mejorar la capacidad aislante y aligerar los vehículos.
STADLER RAIL	FERROCARRIL	https://www.stadlerrail.com/es/	Stadler construye vehículos ferroviarios desde hace más de 80 años. Stadler cuenta con una planta productiva en Valencia.
SUMEPLAST	FABRICACIÓN	https://www.sumeplastsl.com/	SUMAPLAST se dedica a la fabricación de piezas Mecanizadas (CNC) Utilizando materiales como Poliamidamida (PA6), Poliacetal (POM), Polietileno (PE), Politereftalato de etileno (PETP), Polietercetona (PEEK), Polifluoruro de vinilideno(PVDF), Polipropielno (PP), Policloruro de vinilo (PVC). Fabricación de piezas mecanizadas (CNC - Láser), dobladas, encoladas, soldadas, termoconformadas Polycarbonato (PC), Poliester -G (PET-G), Poliester-A (PET), Polimetilmetacrilato (PMMA). (PVC) Policloruro de vinilo, (PP) Polipropileno, Solid Surface.
SUNSUNDEGUI	CARROCERÍA Y VEHICULOS INDUSTRIALES	https://sunsundegui.com/	Sunsundegui es una compañía líder en desarrollo de soluciones de transporte colectivo. Presente en más de 20 países de Europa, África y Asia, con más de 250 trabajadores y trabajadoras y un departamento propio de I+D .
TALGO	FERROCARRIL	https://www.talgo.com/es/	Patentes TALGO (Tren Articulado Ligero Goicoechea Oriol) se constituye en 1942 con la construcción del prototipo Talgo I. Desde entonces, está especializada en el diseño, fabricación, y prestación de servicios de mantenimiento de material rodante. La tecnología Talgo, única y altamente eficiente, es reconocida internacionalmente y está presente en las estructuras de transporte ferroviario de 44 países en cuatro continentes.
TECNALIA	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.tecnalia.com/es/	TECNALIA es el mayor centro de investigación aplicada y desarrollo tecnológico de España, un referente en Europa y miembro de Basque Research and Technology Alliance, siendo nuestros principales ámbitos de



			actuación: fabricación inteligente, transformación digital, transición energética, movilidad sostenible, salud y alimentación, ecosistema urbano y economía circular.
TECNOVE	CARROCERÍA Y VEHICULOS INDUSTRIALES	https://www.tecnove.com/ https://www.t-fiberglass.com/	Empresa líder en la fabricación, transformación y mantenimiento de carrozados y vehículos especiales. Su filial TECNOVE FIBERGLASS, está especializada en diseño, fabricación y comercialización de carrocerías y sistemas de transporte de mercancía a temperatura controlada.
TEKNIKER	CENTRO TECNOLÓGICO	https://www.tekniker.es	Centro tecnológico especializado en Fabricación Avanzada, Ingeniería de Superficies, Ingeniería de Producto y TICs para fabricación. Dispone de seis áreas tecnológicas: Sistemas mecatrónicos, mantenimiento industrial, automatización y robótica industrial, inspección y medida, superficies multifuncionales y dispositivos sensores.
THERMOEUROP	CARROCERÍA Y VEHICULOS INDUSTRIALES	https://www.thermoeurop.com/	ThermoEurop es una marca reconocida en el sector de la Fabricación de Furgones Frigoríficos e Isotermos.
TITANIA	LABORATORIO / TEST	https://titania.aero/	TITANIA es un Laboratorio de ensayos y desarrollo de proyectos de investigación relacionados con la caracterización de materiales.
TRIM COMPOSITES	INGENIERÍA	http://www.trimcomposites.com/	TRIM COMPOSITES ofrece servicios relacionados con el material compuesto para distintos sectores; aeronaves no tripuladas, aeroespacial, motorsport, telecomunicaciones, sanidad y ocio. Estudios y cálculos preliminares, diseño conceptual y de detalle. Desarrollos mediante herramientas profesionales de software.
TSI	INGENIERÍA	https://tsisl.es/es/	TÉCNICAS Y SERVICIOS DE INGENIERÍA, S.L es una sociedad privada de capital español y empresa de servicios de ingeniería, fundada en 1983 por el Ingeniero Naval D. Publio Beltrán Palomo, con el objetivo de competir en el mercado especializado de Soluciones de Ingeniería en Vibraciones y Ruido, ocupado hasta la fecha por compañías extranjeras exclusivamente.
Universidad Carlos III	UNIVERSIDAD	Grupo de Investigación en Mecánica de Materiales Avanzados Universidad Carlos III de Madrid	El grupo de Investigación en Mecánica de Materiales Avanzados está formado por un equipo multidisciplinar de Ingenieros Aeronáuticos, de Caminos, Industriales y de Materiales. Las líneas de investigación del grupo



			están centradas, principalmente, en el análisis y modelización de elementos estructurales fabricados con materiales compuestos y sándwich sometidos a cargas de tipo impulsivo, así como en el estudio de la tolerancia al daño de los mismos. El grupo dispone de una dilatada experiencia en el desarrollo de metodologías de ensayo singulares.
Universidad de Castilla la Mancha	UNIVERSIDAD ETSI Industriales. Universidad Castilla La Mancha		La Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) es la institución académica de educación superior e investigación de referencia en la comunidad autónoma que le da nombre desde hace ya casi cuatro décadas. Con campus en Albacete, Ciudad Real, Cuenca y Toledo, y sedes en Almadén y Talavera de la Reina, es generadora y transmisora de conocimiento, ciencia, tecnología e innovación, está estrechamente comprometida con su entorno territorial y su desarrollo socioeconómico, por lo que además las empresas hallarán en su oferta investigadora oportunidades de colaboración y desarrollo basado en la innovación.
Universidad de Mondragón	UNIVERSIDAD Mondragón, Eskola Politeknikoa J.M.A. S.Coop.		Mondragon Goi Eskola Politeknikoa Jose Maria Arizmendiarieta, S.Coop. es una cooperativa integrada en Corporación MONDRAGON y en Mondragon Unibertsitatea. Sus actividades principales son la formación, la investigación, la transferencia y el emprendimiento en numerosos ámbitos de la tecnología para contribuir a mejorar la posición competitiva de empresas y organizaciones.
Universidad de Oviedo	UNIVERSIDAD IEMES – Universidad de Oviedo		El Grupo de Investigación IEMES (Integridad Estructural: Materiales y Estructuras) es el resultado de la concentración de pequeños equipos de investigación de las áreas de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Ingeniería de la Construcción y Expresión Gráfica en Ingeniería del Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación y del Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Oviedo. Ello ha permitido concentrar las líneas iniciales de investigación consolidadas, centradas en: - Caracterización mecánica en servicio de materiales compuestos bajo



			distintos modos de carga y condiciones ambientales
			- Revisión crítica de la normativa existente en construcción metálica (Eurocódigo 3) y aplicación al estudio de uniones con perfiles tubulares de acero
			- Caracterización física y mecánica de residuos de construcción y demoliciones y aplicación a la fabricación de elementos en hormigón reciclado.
Universidad de Sevilla	UNIVERSIDAD	Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.	El Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM) de la Escuela de Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla tiene sus orígenes en la Cátedra del mismo nombre de la titulación de Ingeniería Industrial que en los años 80 del pasado siglo se impartía en la entonces Escuela de Ingenieros Industriales de Sevilla. Con el tiempo, En los años 90 fue reconocido como Grupo TEP-131 de la Junta de Andalucía y también como Grupo de la Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA).
Universidad Rey Juan Carlos I	UNIVERSIDAD	Universidad Rey Juan Carlos	La universidad Rey Juan Carlos I cuenta con cinco campus: Aranjuez, Alcorcón, Fuenlabrada, Madrid (con varias sedes) y Móstoles. Forman parte del Consorcio Internacional de Universidades, EULIST junto a otras 9 universidades europeas. Consciente de la importancia de las relaciones Universidad-Empresa, desarrolla diversos programas dirigidos a aunar esfuerzos en un objetivo compartido: colaborar en el desarrollo social, cultural y económico de nuestra sociedad.
Universitat de Girona	UNIVERSIDAD	AMADE. Escola Politècnica. Universitat de Girona	Dentro de la Universitat de Girona,AMADE cuenta con casi dos décadas de experiencia en el estudio, caracterización y análisis del comportamiento mecánico de materiales y estructuras avanzadas. El objetivo es comprender el comportamiento mecánico y la fractura de los materiales compuestos y desarrollar modelos numéricos robustos y fiables para un mejor diseño estructural.
UPM	UNIVERSIDAD	Dpto. Materiales y Producción Aeroespacial ETSI Aeronáuticos. Universidad Politécnica de Madrid	El Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial es responsable de la docencia de las disciplinas ligadas al conocimiento de los materiales y de los sistemas de producción en la industria aeronáutica y aeroespacial. Estas disciplinas parten



			del estudio de la composición química de los materiales, establecen la relación entre su estructura y propiedades, y optimizan el ciclo productivo, que incluye los procesos de fabricación y su organización, para adecuarlos a las necesidades de su uso en servicio. Consecuentemente, la actividad del Departamento se completa con investigación en temas concretos vinculados a las disciplinas indicadas.
UPV	UNIVERSIDAD	ITEAM – Universidad Politécnica de Valencia (UPV)	El Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) es un centro de investigación integrado en la Ciudad Politécnica de la Innovación, el nuevo parque científico de la Universitat Politècnica de València, donde desarrolla sus actividades de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+I) dentro del área de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. iTEAM está formado por 8 grupos de investigación que aglutinan a más de 100 investigadores, abarcando 5 áreas científicas relacionadas con la Ingeniería de las Telecomunicaciones. iTEAM también desarrolla actividades de I+D+I en el Campus de la EPS de Gandía, con personal y laboratorios propios.
UPV/EHU	UNIVERSIDAD	Grupo Materiales + Tecnologías. Universidad País Vasco (UPV/EHU)	El Grupo de Investigación 'Materiales + Tecnologías' fue creado por el Dr. Iñaki Mondragon Egaña en el año 1988. Constituido en sus orígenes por media docena de docentes con espíritu investigador fue formándose y formando nuevos profesionales a lo largo de los años. Su empeño por percibir y valorar el esfuerzo conjunto le ha permitido crecer hasta alcanzar en la actualidad cerca de una treintena de docentes e investigadores.
VESTAS	EÓLICO	https://www.vestas.com/	Compañía danesa dedicada a la fabricación, venta, instalación y mantenimiento de aerogeneradores. La compañía dispone de plantas situadas en todo el mundo, empleando a más de 20 000 personas. En España se encuentra la planta de Daimiel, Ciudad Real, donde se fabrican palas para diferentes modelos de aerogenerador.
WALTER+BAI	LABORATORIO / TEST	https://www.walterbai.com/	WALTER+BAI AG Testing Machines suministra una amplia gama de máquinas y sistemas de ensayo de materiales para la seguridad y la calidad de materiales, productos industriales y edificios.



		Las pruebas mecánicas se llevan a cabo en muchos sectores industriales, como la industria automotriz y aeronáutica, la industria metalúrgica, la industria del plástico y el caucho, la industria química, la industria de la construcción, la biomecánica, así como en institutos y universidades.
ZIUR COMPOSITES	DISEÑO/FABRICACIÓN https://ziurcomposites.com/	ZIUR Composites es una ingeniería de producto integral y su expertise en la fabricación de soluciones basadas en materiales compuestos, a través de procesos automatizados apoyados en la excelencia tecnológica. Diseño, desarrollo, fabricación, testeo y validación de los componentes y soluciones más innovadoras basadas en materiales avanzados, gracias al uso de la última tecnología, los procesos de fabricación más vanguardistas y la creatividad de un equipo experto y apasionado con la misión de construir un mundo más ligero y sostenible.
ZUND IBERICA	EQUIPAMIENTO https://www.zund.com/es	ZUNA desarrolla sistemas de corte de telas Sistemas modulares para el uso flexible de mesas corte, soluciones globales para flujos de trabajo y soluciones de automatización inteligentes para la preparación del trabajo o el transporte de material



Anexo 2: RELACIÓN DE PROYECTOS RELATIVOS A SOSTENIBILIDAD

Helena ABRIL¹

¹ AEMAC

 OPEN ACCESS

Published: 15/10/2024

Keywords: Composites materials Sustainability
Public funding
CDTI
AEI
Materiales compuestos
sostenibilidad
Financiación pública

1 - INTRODUCCIÓN

El objeto de este capítulo es analizar los proyectos de investigación, desarrollo e innovación en el campo de los materiales compuestos y, en concreto, los que presentan un enfoque hacia la sostenibilidad que han obtenido financiación pública en los últimos años por los organismos estatales principales en España: el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI) y la Agencia Estatal de Investigación (AEI).

Se ha realizado el estudio a través de la información obtenida de dos bases de datos que ambas entidades tienen a disposición del público en sus páginas web. Las búsquedas se han efectuado entre los años 2019 y 2023, se ha incluido el año en curso hasta el 31 de mayo de 2024.

2 - PROYECTOS FINANCIADOS POR CDTI

En la subpágina de la web del CDTI: www.cdti.es/datos-abiertos-creditos-subvenciones-y-lineas, se accede a los datos abiertos de créditos, subvenciones y líneas de proyectos de I+D+I aprobados por la entidad. Únicamente es posible filtrar la búsqueda para acceder al listado por comunidad autónoma, provincia, año y mes. Para elaborar este informe se han descargado los datos relativos a los proyectos por año de aprobación y posteriormente se han analizado los mismos manualmente.

Con un total de 7.846 proyectos a lo largo de los últimos cinco años y medio, la mayor parte de los fondos se destinan a cinco áreas: alimentación, agricultura y pesca, farmacéutica, salud y tecnologías de la información. Para este estudio se descartan estas áreas ya que en ninguna de ellas se detectan proyectos relativos a composites. Tampoco se contemplan las áreas de biotecnología y turismo (financiada únicamente hasta el año 2021). Estas siete áreas incluyen 4.404 proyectos, el 52% del total. El análisis se centrará en el resto, que engloba el sector industrial y otros sectores, con un total de 3.802 proyectos.



PORCENTAJE DE PROYECTOS CDTI

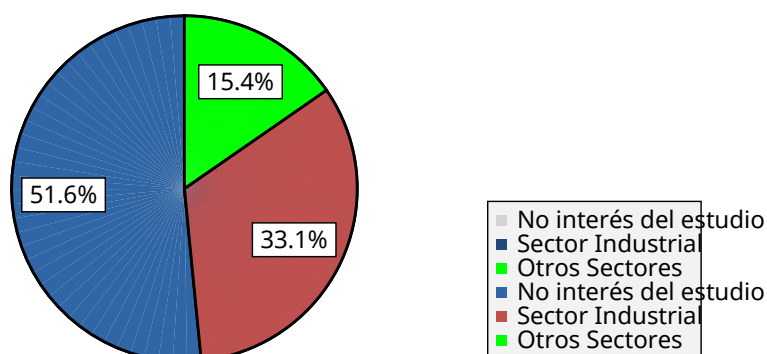


Figura 1: Distribución de proyectos financiados por el CDTI (2019 - mayo 2024) en función de las áreas de interés

En el siguiente gráfico se visualizan, por años, el número de proyectos totales, los relativos a las áreas que no se analizarán y el total de proyectos correspondientes a la industria.

PROYECTOS CDTI - 7.846

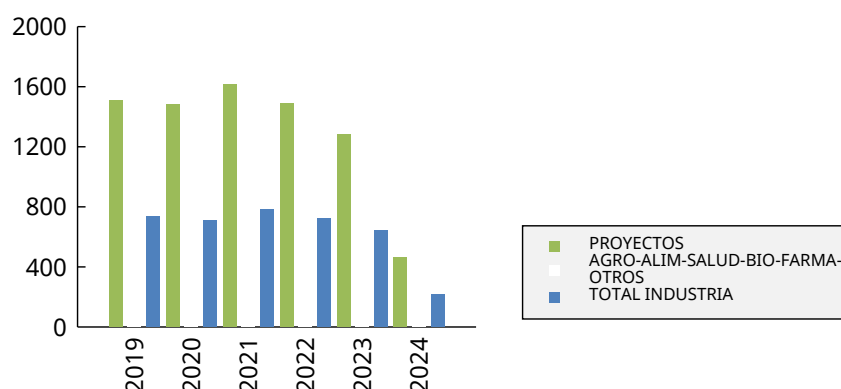


Figura 2: Número de proyectos financiados por el CDTI

Dentro del grueso de áreas que se consideran y que se han englobado como “total industria”, destaca sobre las demás la denominada “sector industrial” con un total de 2.598 proyectos, que representa, como se indica en la [Figura 1](#), el 33% del total de proyectos financiados durante estos cinco años, que a su vez constituye el 68% de los proyectos de la industria. En la [Figura 3](#) se observa que los porcentajes anuales varían entre un 70% en 2020 y un 66% en 2021. En el periodo analizado de 2024, la relación de proyectos del sector industrial ha alcanzado el 74% sobre la industria en general.

PROYECTOS CDTI - INDUSTRIA - 3.082

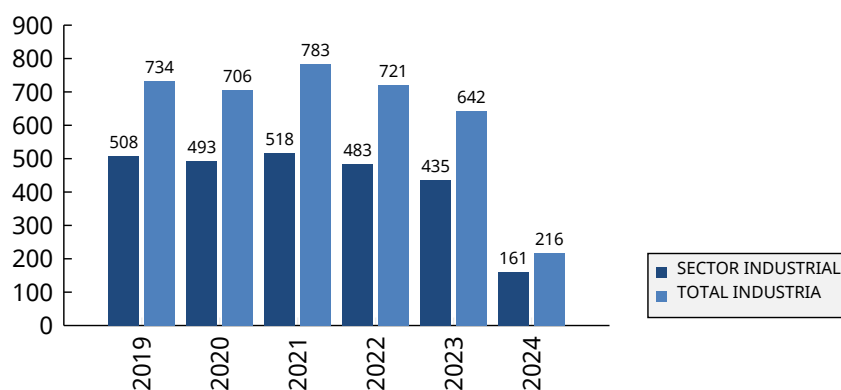


Figura 3: Número de proyectos financiados por el CDTI en el área de Industria

Se examina el sector industrial en más detalle, que se encuentra subdividido en siete grandes áreas temáticas: bienes



de equipo, materiales, químico, vehículos de transporte y la que en este estudio se etiqueta como “otros”, que comprende a los sectores tradicionales: electrotecnia, equipos eléctricos y electrodomésticos, etc. El subsector predominante es el de materiales, con 892 proyectos que suman el 34%, seguido de los bienes de equipo con 645 proyectos que representan un 25% del área denominada como sector industrial. En la [Figura 4](#) se observa la contribución de cada subárea por año.

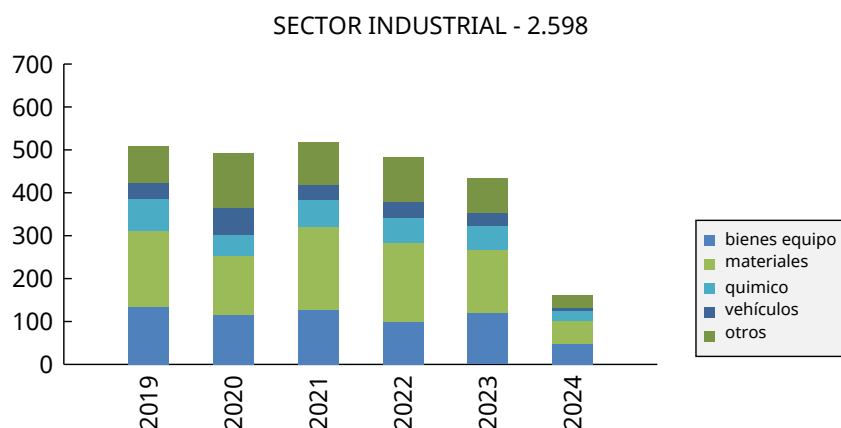


Figura 4: Contribución de subáreas al total de proyectos aprobados en el sector industrial/En cuanto al resto de áreas de la industria que reciben financiación al margen del “sector industrial” se encuentran las siguientes: aeronáutica, energía, medioambiente y eco-innovación, transporte e infraestructuras, construcción, ordenación del territorio y patrimonio cultural, y, por último, seguridad y defensa. Todas estas áreas conjuntamente suman en total 1.204 proyectos. A continuación, en el Gráfico 5, se plasman el número de proyectos aprobados por áreas y por año.

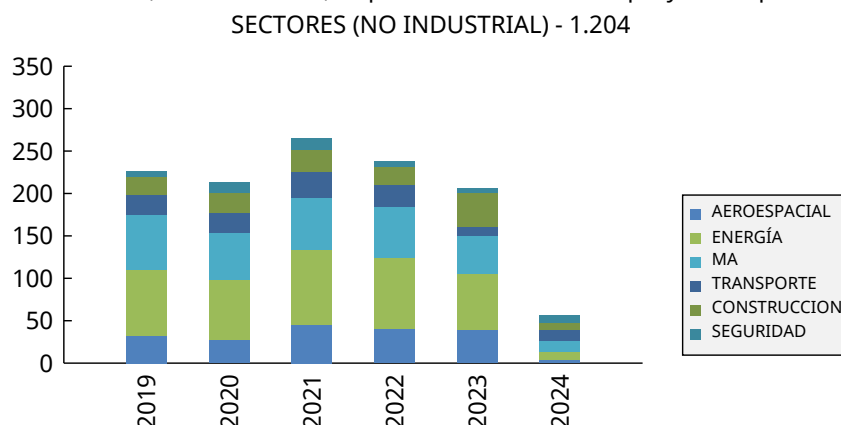


Figura 5: Número de proyectos aprobados por el CDTI en el sector no industrial

2.1 - CDTI – PROYECTOS SOBRE MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos, que son el objeto de estudio de este capítulo, son transversales y se encuentran representados de la siguiente manera en la totalidad de áreas que se han englobado como “Total Industria”:

SECTORES	TOTAL	COMPOSITES	Sostenibilidad + Composites
AEROESPACIAL	190	48	7
ENERGÍA	395	2	1
MEDIOAMBIENTE Y ECO-INNOVACIÓN	301	8	8
TRANSPORTE E INFRAESTRUCTURAS	125	14	1
CONSTRUCCION, ORDENACIÓN Y PATRIMONIO CULTURAL	140	3	3
SEGURIDAD Y DEFENSA	53	0	0
BIENES EQUIPO (Sector Industrial)	646	6	0

MATERIALES (Sector Industrial)	892	95	45
QUÍMICO (Sector Industrial)	327	9	4
VEHÍCULOS DE TRANSPORTE (Sector Industrial)	210	3	1
OTROS (Sector Industrial)	523	8	4
TOTAL INDUSTRIA	3802	196	74

Tabla 1: Distribución del número de proyectos financiados por el CDTI (2019 - mayo 2024) en función del sector industrial

Se detectan 196 proyectos relativos a los materiales compuestos, que constituyen un 5,12% de los proyectos de industria y un 2,5% del global de los proyectos financiados. A su vez, ese porcentaje se divide entre los que se centran únicamente en composites, aproximadamente un 3,21% y los que abordan su sostenibilidad, representando un 1,95% de la industria. Es decir, aproximadamente el 38% de los proyectos de composites financiados por CDTI se centran en su sostenibilidad, por lo que se concluye que el sector está plenamente concienciado con la necesidad de investigar en este ámbito.

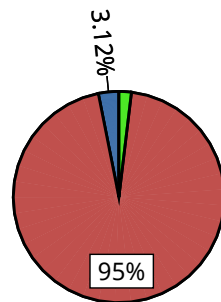


Figura 6: Porcentaje de proyectos dedicados a composites dentro del área de Industria

Examinando los datos por sectores, destacan el de materiales y el químico con un 46% y 45% respectivamente, de sus proyectos de investigación dedicados a sostenibilidad.

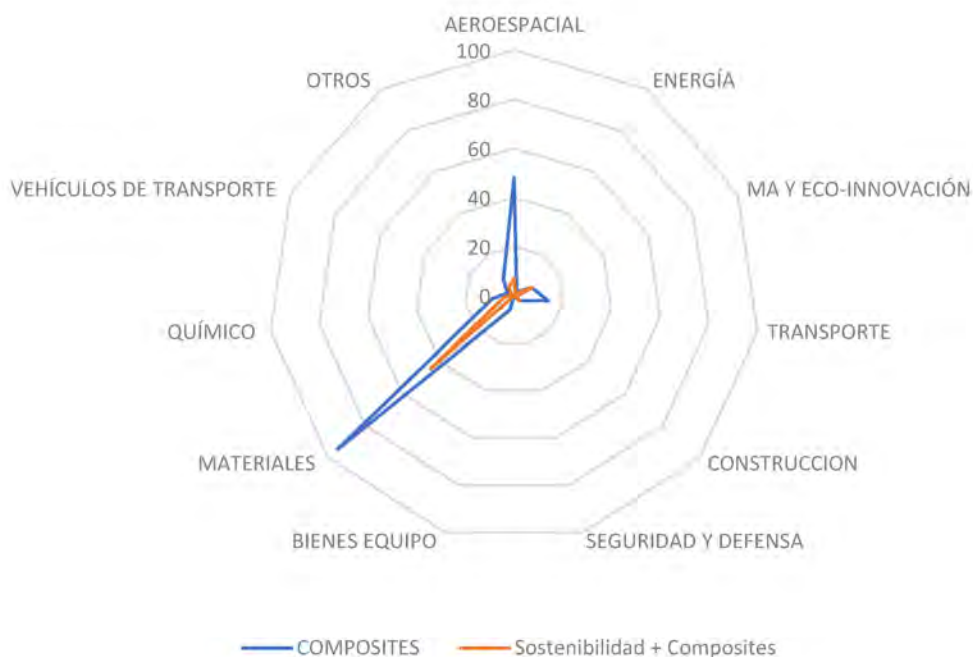


Figura 7: Diagrama de distribución del número de proyectos en función del sector de aplicación



2.2 - CDTI - FINANCIACIÓN

En CDTI los proyectos de I+D+I relativos a materiales compuestos obtienen financiación a través de seis programas distintos que se detallan a continuación.

ORIGEN DE FONDOS	COMPOSITES	Composites Sostenibilidad	Composites (% total)	C + S (% total)
Centro de Desarrollo Tecnológico e Innovación	78.072.844,85 €	18.290.700,05 €	35,16%	8,24%
Mecanismo Europeo de Recuperación y Resiliencia	107.146.648,30 €	41.405.869,05 €	48,25%	18,65%
FEDER 2021-27	13.996.509,38 €	8.220.184,78 €	6,30%	3,70%
Programa Operativo Plurirregional de España	9.841.474,98 €	7.016.348,71 €	4,43%	3,16%
Susceptible FEDER 2021-27	11.177.609,34 €	4.472.333,89 €	5,03%	2,01%
Fondo EUROSTAR + Tecnológico	1.829.378,53 €	283.407,00 €	0,82%	0,13%
TOTAL PROYECTOS	222.064.465,38 €	79.688.843,48 €	100,00%	35,89%

Tabla 2: Distribución de la financiación de los proyectos de composites y sostenibilidad de composites en función del origen de los fondos (CDTI 2019 - mayo 2024)

De todos ellos, sobresale el “Mecanismo Europeo de Recuperación y Resiliencia”, con el que se han financiado el 48,25% de los proyectos y el 18,65% de los específicos de sostenibilidad. De hecho, es reseñable que el 35,89% de la financiación en materiales compuestos se centra en materia de sostenibilidad.

En la [Figura 8](#) se contemplan las cantidades destinadas a cada uno de los fondos de financiación para los proyectos en general de composites y los específicos de sostenibilidad.

En cuanto a número de proyectos, se desglosan a continuación.

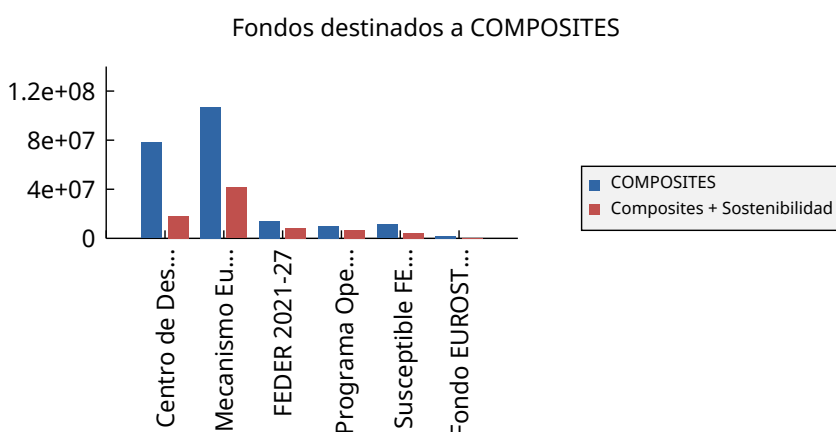


Figura 8: Totales (en €) financiados por el CDTI (2019 - mayo 2024) de los proyectos de composites y sostenibilidad de composites en función del origen de los fondos La [Figura 9](#) muestra el número de proyectos financiados por cada uno de los fondos.

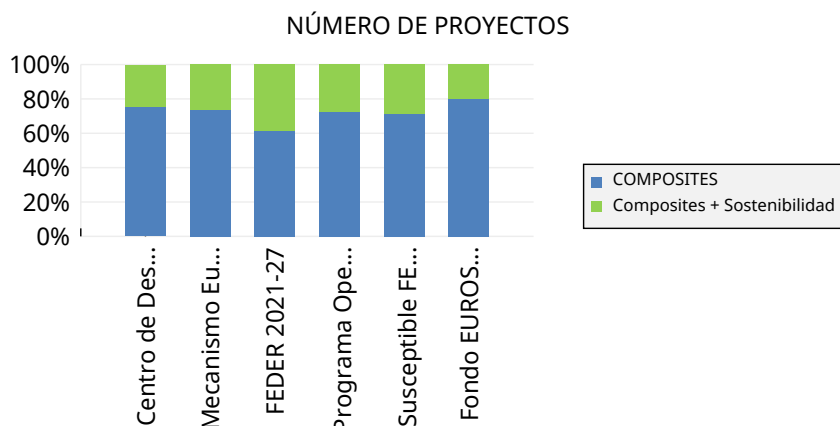


Figura 9: Número de proyectos financiados por el CDTI en función del origen de los fondos (2019 - mayo 2024)

2.3 - CDTI - PROYECTOS Y BENEFICIARIOS

La siguiente tabla indica cuáles, de todos los financiados en el ámbito de los proyectos de sectores no industriales, tratan sobre la sostenibilidad en el campo de los materiales compuestos:

RAZON SOCIAL	TITULO DEL PROYECTO – SECTORES NO INDUSTRIALES – 19 Proyectos
VENAIR IBERICA, S.A.	DESARROLLO E INDUSTRIALIZACIÓN DE NUEVOS MÉTODOS DE RECICLADO MECÁNICO DE TUBOS DE SILICONA REFORZADOS
ASOCIACION DE INVESTIGACION DE LA INDUSTRIA TEXTIL-- AITEX	ESTABLECIMIENTO DE UNA RED CERVERA PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES TÉCNICOS ALTAMENTE SOSTENIBLES DERIVADOS DE SUBPRODUCTOS O RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AGRÍCOLA Y DE LAS OPERACIONES DE CONSERVACIÓN DE ESPACIOS NATURALES.
AIRBUS OPERATIONS, S.L.	(OPTIMUS) OPTIMIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES AUTOMATIZADAS, MULTIFUNCIONALES Y SOSTENIBLES
TECNICAS REUNIDAS, S.A.	INVESTIGACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE RECICLADO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS COMPLEJOS
CLAM DESARROLLO SL	DESARROLLO DE UN NUEVO PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGÓN POLIMÉRICO A PARTIR DEL RECICLAJE DE RESIDUOS DE OBRA (1/2)
ABSARA INDUSTRIAL SL	DESARROLLO DE UN NUEVO PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGÓN POLIMÉRICO A PARTIR DEL RECICLAJE DE RESIDUOS DE OBRA (2/2)
ALUMISEL SA	IRENE - INVESTIGACIÓN SOBRE LA REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS POLIMÉRICOS PARA LA OBTENCIÓN DE NUEVOS PRODUCTOS DE CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE
MODULAR SYSTEM GLOBAL SL	DESARROLLO DE UN NUEVO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN BIOCOMPUESTO A PARTIR DE RESIDUOS DE CÁÑAMO INDUSTRIAL Y MATRIZ GEOPOLIMÉRICA PARA LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS INNOVADORES DE CONSTRUCCIÓN MODULAR
HONEXT MATERIAL SL	NUEVO PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PANELES DE FIBRAS DE NUEVA GENERACIÓN A PARTIR DE RESIDUOS DE CELULOSA RECICLADOS DE LA INDUSTRIA PAPELERA
AERNNOVA AEROSPACE, S.A.	INVESTIGACIÓN EN NUEVAS TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A DESARROLLOS AERONÁUTICOS ROBOTIZADOS PARA UNA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE
AIRBUS OPERATIONS, S.L.	TECNOLOGÍAS DE MONTAJE MULTIDISCIPLINAR PARA AERONAVES SOSTENIBLES



CITD ENGINEERING & TECHNOLOGIES SL	TECNOLOGÍAS INTELIGENTES, ADAPTATIVAS Y SOSTENIBLES PARA LA FABRICACIÓN ÁGIL Y CERO DEFECTOS DE MATERIALES COMPUESTOS POR PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE RESINA
ALTERO RECYCLING MACHINERY SL	DESARROLLO DE UN PROCESO DE RECICLADO MECÁNICO DE RESIDUOS PLÁSTICOS MÁS SOSTENIBLE PARA LA OBTENCIÓN DE POLÍMEROS RECICLADOS DE MAYOR CALIDAD
COMPAÑÍA ESPAÑOLA DE PETROLEOS, S.A.	OBTENCIÓN DE BIOCOMPUESTOS Y BIOCOMBUSTIBLES AVANZADOS MEDIANTE HTL A PARTIR DE SUSTRATOS VALORIZABLES-ALPECHIN Y MICROALGAS-
COMPUESTOS Y GRANZAS, S.A.	VALORIZACIÓN DE POLÍMEROS RECICLADOS Y FIBRAS NATURALES EN LA PRODUCCIÓN DE COMPOSITES TIPO WPC PARA TEJADOS CORRUGADOS
AIRBUS OPERATIONS, S.L.	TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES PARA UNA AERONÁUTICA SOSTENIBLE Y COMPETITIVA (TIANA)
INTEGRACION TECNOLOGICA EMPRESARIAL SL	INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA PRODUCIR CONTORNOS AERODINÁMICOS MÁS EFICIENTES HACIA UNA AVIACIÓN MÁS SOSTENIBLE Y SILENCIOSA
TITANIA ENSAYOS Y PROYECTOS IND- SL	AEROESTRUCTURAS CON PROPIEDADES SUPERFICIALES AVANZADAS PARA EL AVIÓN CERO EMISIONES
TECNOLOGIA DE SEGURIDAD VIAL Y ACUSTICA SL	INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE UN NUEVO BIOCOMPOSITE PARA APLICACIONES AVANZADAS EN SISTEMAS DE SEGURIDAD VIAL Y REDUCCIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.

Tabla 3: CDTI, categoría: sectores no industriales. Proyectos y beneficiarios. Los proyectos marcados en azul tratan sobre la sostenibilidad de los materiales compuestos.

Del mismo modo, para los proyectos financiados dentro del ámbito “sector industrial”:

RAZON SOCIAL	TITULO DEL PROYECTO – SECTORES INDUSTRIALES – 55 Proyectos
EKIDE, S.L.	UPCYCLING EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE Y LA CONSTRUCCIÓN DE RECORTES DE PREPREG Y PIEZAS DE COMPOSITES (1/3)
ULMA C Y E, S.COOP.	UPCYCLING EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE Y LA CONSTRUCCIÓN DE RECORTES DE PREPREG Y PIEZAS DE COMPOSITES (2/3)
SAINT-GOBAIN ADFORS ESPAÑA SA	UPCYCLING EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE Y LA CONSTRUCCIÓN DE RECORTES DE PREPREG Y PIEZAS DE COMPOSITES (3/3)
EUROFINS TEXTILE TESTING SPAIN SL	DESARROLLO DE APLICACIONES DE TEXTILES TÉCNICOS CON FIBRAS DE ORIGEN NATURAL (ALPACA)
INDUSTRIAL FURNACES INSERTEC SL	DISEÑO Y DESARROLLO DE UN HORNO INDUSTRIAL AVANZADO Y COMPETITIVO PARA EL RECICLADO DE RESIDUOS DE BASE FIBRA DE VIDRIO
PRODUCTOS CONCENTROL, S.A.	I+D DE NUEVA GAMA DE DISPERSIONES DE POLIURETANO CON COMPONENTES PROCEDENTES DE FUENTES RENOVABLES Y SOSTENIBLES.
INDRESMAT SL	TECNOLOGÍA DE EXTRUSIÓN REACTIVA DE POLIURETANO TERMOENDURECIBLE PARA LA FABRICACIÓN A GRAN ESCALA DE PLÁSTICOS SOSTENIBLES DE ALTAS PRESTACIONES EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.
ENCE ENERGIA Y CELULOSA SA	INVESTIGACIÓN Y OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DE COMPOSITES A PARTIR DE FUENTES NATURALES (1/7)
CREACIONES AROMATICAS INDUSTRIALES, S.A.	INVESTIGACIÓN Y OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DE



	COMPOSITES A PARTIR DE FUENTES NATURALES (2/7)
TECNOLOGIA DE POLIMEROS Q.M.C. SL.	INVESTIGACIÓN Y OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DE COMPOSITES A PARTIR DE FUENTES NATURALES (3/7)
MASTER BUILDERS SOLUTIONS ESPAÑA SL	INVESTIGACIÓN Y OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DE COMPOSITES A PARTIR DE FUENTES NATURALES (4/7)
BRUPER, S.A.	INVESTIGACIÓN Y OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DE COMPOSITES A PARTIR DE FUENTES NATURALES (5/7)
TECNOCAUCHO, S.A.	INVESTIGACIÓN Y OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DE COMPOSITES A PARTIR DE FUENTES NATURALES (6/7)
OMAR COATINGS SOCIEDAD ANONIMA	INVESTIGACIÓN Y OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DE COMPOSITES A PARTIR DE FUENTES NATURALES (7/7)
HIDROSTANK SL	DESARROLLO DE NUEVAS TAPAS DE CUBRIMIENTO Y CIERRE PARA ZONAS DE CIRCULACIÓN EN BASE A RESIDUOS Y MATERIALES COMPUESTOS (RESICOVER 2.0)
COSENTINO RESEARCH AND DEVELOPMENT SL	ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA DE COMPOSITES TERMOESTABLES
FUNDACION GAIKER	OSIRIS_COOPERACIÓN ESTRATÉGICA EN TECNOLOGÍAS PARA LA ECONOMÍA CIRCULAR DE COMPOSITES Y DE MATERIALES PLÁSTICOS COMPLEJOS DE ALTO VALOR AÑADIDO
MARISKONE SL	DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS ZERO WASTE HACIA LA OBTENCIÓN DE COMPOSITES DE CARBONO SOSTENIBLES Y COMPETITIVOS (1/4)
IGESTEK INCREASE & WIN SL	DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS ZERO WASTE HACIA LA OBTENCIÓN DE COMPOSITES DE CARBONO SOSTENIBLES Y COMPETITIVOS (2/4)
FIBERTECNIC, S.A.	DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS ZERO WASTE HACIA LA OBTENCIÓN DE COMPOSITES DE CARBONO SOSTENIBLES Y COMPETITIVOS (3/4)
SEGULA TECNOLOGIAS ESPAÑA SAU	DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS ZERO WASTE HACIA LA OBTENCIÓN DE COMPOSITES DE CARBONO SOSTENIBLES Y COMPETITIVOS (4/4)
EVERSIA SA	DESARROLLO Y DEMOSTRACIÓN DE POLÍMEROS INNOVADORES A BASE DE BIORESINAS PARA APLICACIONES INDUSTRIALES
NUEVAS TECNOLOGIAS PARA EL DESARROLLO DE PACKAGING Y PRODUCTOS AGRO. CON COMPONENTE PLASTICA S.L.	DESARROLLO Y DEMOSTRACIÓN DE POLÍMEROS INNOVADORES A BASE DE BIORESINAS PARA APLICACIONES INDUSTRIALES
BARCELONA TECHNICAL CENTER SL	DESARROLLO TECNOLÓGICO DE UN NUEVO SISTEMA DE PARACHOQUES DE COMPOSITE BASADO EN FIBRAS NATURALES.
BC NONWOVENS SL	ANÁLISIS Y DESARROLLO DE MEJORAS EN RECICLADO DE MERMAS Y DEFECTOS TÍPICOS DE CARDADO DE FIBRAS DE ORIGEN NATURAL BIODEGRADABLES Y SOSTENIBLES
CROMOGENIA UNITS, S.A.	NUEVOS POLIOLES DERIVADOS DE ACEITES VEGETALES PARA OBTENER ADHESIVOS EMPLEADOS EN ENVASES ALIMENTARIOS
REPSOL QUIMICA, S.A.	PLANTA DE RECICLAJE DE POLIURETANO A ESCALA INDUSTRIAL EN PUERTOLLANO (RECPUR)
ARNEPLANT SL	POLIURETANO RECICLADO DE ALTAS PRESTACIONES
GRUPO NEGOCIOS PO SL	INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PAVIMENTO CONTINUO BASE GEOPOLÍMERO ECO-SOSTENIBLE



UBE CORPORATION EUROPE SA	NUEVA PLANTA PILOTO DE POLIMERIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE BIOPOLÍMEROS TÉCNICOS
BIRZIPLASTIC SL	AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE BIRZIPLASTIC PARA EL RECICLADO Y REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES PLÁSTICOS
TITANIA ENSAYOS Y PROYECTOS INDUSTRIALES SL	IMPULSANDO LA COMPLETA RECICLABILIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS EN EL SECTOR AERONÁUTICO
AUTOTECH ENGINEERING SPAIN SL	DISEÑO CIRCULAR DE PRODUCTO PARA COMPONENTES DE AUTOMOCIÓN FABRICADOS CON MATERIAL COMPUESTO RECICLADO Y SOSTENIBLE
ASOCIACION DE INVESTIGACION INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL PLÁSTICO	DESARROLLO DE POLÍMEROS DE FUENTES RENOVABLES CON PROPIEDADES MEJORADAS PARA SU APLICACIÓN EN SECTORES INDUSTRIALES DE ALTO CONSUMO Y VALOR AÑADIDO
ASOCIACION EMPRESARIAL DE INVESTIGACION CT DEL MUEBLE Y LA MADERA REGION MURCIA	RED DE COLABORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS QUE IMPULSEN EL RECICLADO Y VALORIZACIÓN DE MATERIALES DE POLIURETANO Y FOMENTEN LA ECONOMÍA CIRCULAR
AZVI SA	NUEVAS TECNOLOGÍAS DE RECICLADO QUÍMICO Y MIXTO DE COMPOSITES PARA IMPULSAR LA ECONOMÍA CIRCULAR DE ESCALA (1/8)
INGENIERIA DE COMPUESTOS SL	NUEVAS TECNOLOGÍAS DE RECICLADO QUÍMICO Y MIXTO DE COMPOSITES PARA IMPULSAR LA ECONOMÍA CIRCULAR DE ESCALA (2/8)
ROVER INFRAESTRUCTURAS SA	NUEVAS TECNOLOGÍAS DE RECICLADO QUÍMICO Y MIXTO DE COMPOSITES PARA IMPULSAR LA ECONOMÍA CIRCULAR DE ESCALA (3/8)
SOFITEC AERO SL	NUEVAS TECNOLOGÍAS DE RECICLADO QUÍMICO Y MIXTO DE COMPOSITES PARA IMPULSAR LA ECONOMÍA CIRCULAR DE ESCALA (4/8)
MESLIDER GESTION DE OPERACIONES SL	NUEVAS TECNOLOGÍAS DE RECICLADO QUÍMICO Y MIXTO DE COMPOSITES PARA IMPULSAR LA ECONOMÍA CIRCULAR DE ESCALA (5/8)
AEROX ADVANCED POLYMERS SL	NUEVAS TECNOLOGÍAS DE RECICLADO QUÍMICO Y MIXTO DE COMPOSITES PARA IMPULSAR LA ECONOMÍA CIRCULAR DE ESCALA (6/8)
TECNICAS REUNIDAS, S.A.	NUEVAS TECNOLOGÍAS DE RECICLADO QUÍMICO Y MIXTO DE COMPOSITES PARA IMPULSAR LA ECONOMÍA CIRCULAR DE ESCALA (7/8)
UBE CORPORATION EUROPE SA	NUEVAS TECNOLOGÍAS DE RECICLADO QUÍMICO Y MIXTO DE COMPOSITES PARA IMPULSAR LA ECONOMÍA CIRCULAR DE ESCALA (8/8)
CAUCHOS ARNEDO, S.A.	DESARROLLO DE NUEVAS SUELAS DE CAUCHO DE MAYOR COMPONENTE BIOLÓGICO EMPLEANDO NUEVOS AGENTES DE ACOPLAMIENTO PERSONALIZADOS
COMPUESTOS Y GRANZAS, S.A.	NUEVOS CAUCHOS DE SILICONA INERTES, TERMOESTABLES Y BIO-COMPATIBLES COMO ALTERNATIVA VERSÁTIL Y SOSTENIBLE DE PLÁSTICOS DE BASE FÓSIL (SILICONSOS)
COMSA, S.A.	INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO RECICLADA PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA AERONÁUTICA



COSENTINO RESEARCH AND DEVELOPMENT SL	RE-SILESTONE: NEXT RESILIENT AGLOMMERATED STONE
CROMOGENIA UNITS, S.A.	NUEVAS VÍAS DE SÍNTESIS DE POLIURETANOS SOSTENIBLES CON PROPIEDADES DE BARRERA
ELDACORCHO SL	INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE COMPOSITES POLÍMERO-PARTÍCULA DERIVADOS DE LA INDUSTRIA DE CALZADO.
CROMOGENIA UNITS, S.A.	INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE NUEVOS BIO POLIOLES DERIVADOS DE ACEITES VEGETALES PARA LA OBTENCIÓN DE ADHESIVOS Y COATINGS DE POLIURETANO
FIBER PROFIL, S.L.	DESARROLLO DE NUEVOS PERFILES DE PULTRUSIÓN MEDIOAMBIENTALMENTE SOSTENIBLES Y RESISTENTES AL FUEGO PARA EL SECTOR FERROVIARIO
LIDERKIT SL	DISEÑO, DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE NÚCLEOS DE PANELES ECOLÓGICOS (NDPE) REALIZADOS CON MATERIALES RECICLADOS PROCEDENTES DE COMPOSITES TERMOESTABLES
PANELES DECORATIVOS PANEL PIEDRA SL	DISEÑO, DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN PROCESO DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS TEXTILES COMO LÁMINA DE MATERIAL COMPOSITE PARA RECUBRIMIENTO EN LA CONSTRUCCIÓN
SOFITEC AERO SL	DESARROLLO INNOVADOR DE REUTILIZACIÓN DE LOS DESECHOS EN EL PROCESO DE CORTE DE TELAS PARA EL SECTOR AERONÁUTICO - DIRECTOR-A
TECNOVE, S.L.	MATERIALES BIOBASADOS RECICLABLES PARA EL DESARROLLO DE COMPOSITES TERMOESTABLES PARA IMPLEMENTAR ESTRATEGIAS DE ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR AUTOMOCIÓN (BIORESET)

Tabla 4: CDTI, categoría: sector industrial. Proyectos y beneficiarios. Los proyectos marcados en azul tratan sobre la sostenibilidad de los materiales compuestos

3 - PROYECTOS FINANCIADOS POR LA AGENCIA ESTATAL DE INVESTIGACIÓN (AEI)

En la web de la AEI: www.aei.gob.es/ayudas-concedidas/buscador-ayudas-concedidas, se tiene acceso a las ayudas concedidas. En este caso es posible realizar una búsqueda más selectiva con más opciones de filtrado. Además de la comunidad autónoma, provincia, año y mes, que son los parámetros de búsqueda en la base de datos de CDTI, se incluyen doce posibilidades más. Estos criterios son los siguientes: cuantía económica, entidad, CIF, área, subárea, título, resumen, convocatoria, referencia, género y palabra clave. Para elaborar este informe se ha seguido la misma metodología que en el caso de los proyectos aprobados por CDTI con el fin de mantener el mismo método de selección.

Se financian un total de 30.450 proyectos sobre quince áreas temáticas, de las cuáles no serán incluidas diez: biociencias y biotecnología, biomedicina, ciencias agrarias y agroalimentarias, ciencias físicas, ciencias matemáticas, ciencias sociales, cultura: filología, literatura y arte, economía, estudios del pasado: historia y arqueología y tecnologías de la información y comunicaciones. Estas diez áreas suman 20.559 proyectos y representan el 67,5% de las ayudas.

En la [Figura 10](#) se indican el número de proyectos por año, desde 2019. Es muy llamativa la disminución de proyectos subvencionados en 2023 y 2024.

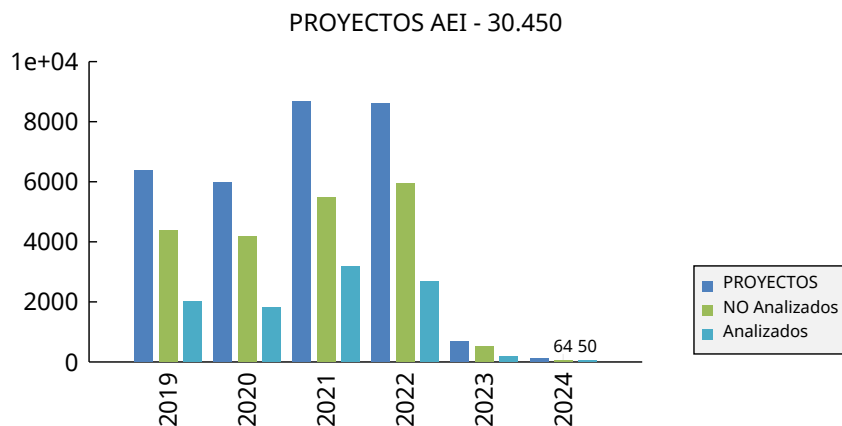


Figura 10: Número de proyectos financiados por la AEI El informe se centra en cinco áreas: ciencias y tecnologías de materiales, ciencias y tecnologías medioambientales, ciencias y tecnologías químicas, energía y transporte y producción industrial, ingeniería civil e ingenierías para la sociedad, con 9.891 proyectos. En la [Figura 11](#) se muestran los porcentajes de proyectos financiados en cada una de ellas.

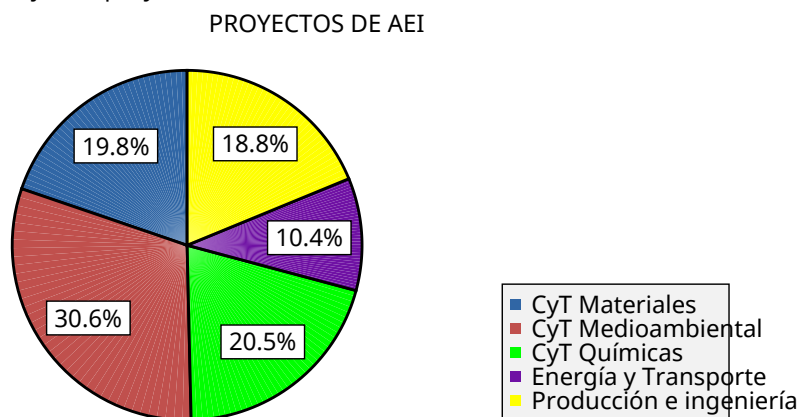


Figura 11: Porcentaje de proyectos financiados por la AEI (2019 - mayo 2024) en función del área que son objeto de estudio En la [Figura 12](#) se visualizan el número de ayudas concedidas por año en cada una de las áreas analizadas.

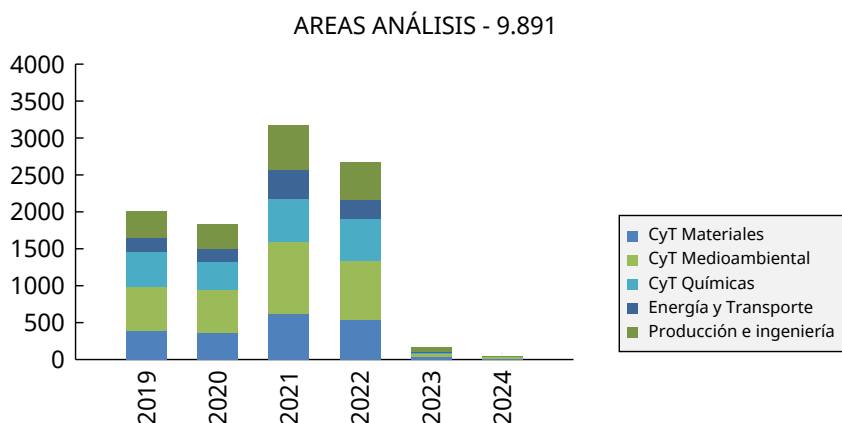


Figura 12: Número de proyectos financiados por la AEI en función del área

3.1 - AEI – PROYECTOS SOBRE MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos objeto de estudio de este capítulo son transversales y se encuentran representados en cinco de las quince áreas que reciben ayudas de la AEI, que se distribuyen como muestra la [Tabla 5](#).

Áreas	TOTAL	Composites	Sostenibilidad + Composites
Ciencia y Tecnología de Materiales	1955	83	36



Ciencia y Tecnología Medioambiental	3027	7	7
Ciencia y Tecnología Químicas	2024	16	8
Energía y Transporte	1027	9	4
Producción industrial, ingeniería civil e ingenierías para la sociedad	1858	42	18
TOTAL	9891	157	73

Tabla 5: Distribución del número de proyectos financiados por la AEI (2019 - mayo 2024) en función del área de investigación

Se detectan 157 proyectos relativos a los materiales compuestos, que representan solamente un 1,59% del total de proyectos (9.891) que han recibido ayudas en estas cinco áreas. Sin embargo, el 46,5% de los proyectos de composites están relacionados con la sostenibilidad, un porcentaje superior al de CDTI (38%). Las áreas más productivas en cuanto a proyectos de sostenibilidad en composites son la de ciencia y tecnología de materiales y la de producción industrial.

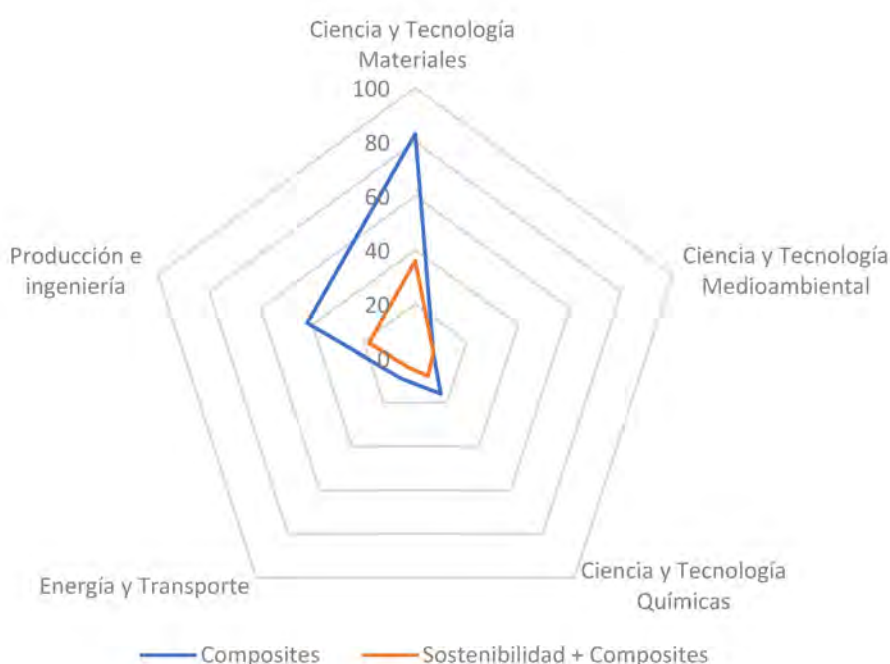


Figura 13: Diagrama de distribución del número de proyectos aprobados por la AEI (2019 - mayo 2024) en función del área de investigación

3.2 - AEI - FINANCIACIÓN

Los proyectos de materiales compuestos reciben ayudas económicas de la AEI a través de distintas convocatorias que se detallan en esta tabla:

Convocatoria	Composites	Sostenibilidad + Composites	Composites (% total)	C + S (% Total)
Contratos (predoctorales, doctorado, Juan de la Cierva, Torres Quevedo, Ramón y Cajal, etc.)	4.009.434,50	1.235.428,40	17,47%	5,38%
Retos colaboración	1.009.053,50	574.592,85	4,40%	2,50%
I+D líneas estratégicas	1.047.083,00	1.047.083,00	4,56%	4,56%
I+D generación de conocimiento	8.812.985,81	3.508.903,49	38,41%	15,29%
Colaboración público - privada	2.118.484,02	653.467,57	9,23%	2,85%
Estratégicos transición ecológica y digital	4.525.885,95	3.347.121,00	19,72%	14,59%
Otros	1.422.556,00	513.256,00	6,20%	2,24%

TOTAL	22.945.482,78	10.879.852,31	100,00%	47,42%
-------	---------------	---------------	---------	--------

Tabla 6: Distribución de la financiación de los proyectos de composites y sostenibilidad de composites en función del área de investigación (AEI, 2019 - mayo 2024)

Tabla 6: Distribución de financiación de los proyectos de composites y sostenibilidad de composites en función del área de investigación (AEI, 2019 - mayo 2024)

Los proyectos de I+D específicos de generación del conocimiento son los más destacables en materia de composites, con un 38,41%. Sin embargo, en cuanto a los proyectos de materiales compuestos centrados en sostenibilidad, están a la par los proyectos de I+D de generación de conocimiento (15,29%) con los proyectos estratégicos de transición ecológica y digital (14,59%) En conjunto, todos los proyectos sobre sostenibilidad suman un 47,42% de la financiación en composites.

En la Figura 14 se visualizan las cantidades destinadas a cada una de las ayudas de la AEI para los proyectos en general de composites y los específicos de sostenibilidad.

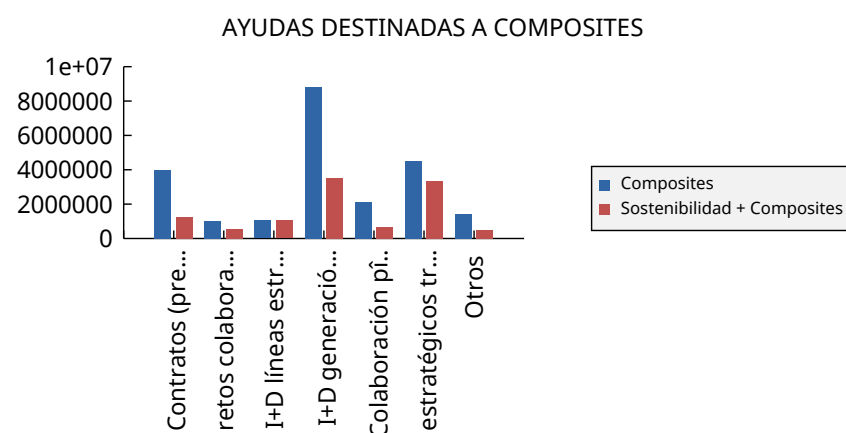


Figura 14: Totales (en €) de las ayudas de la AEI (2019 - mayo 2024) a proyectos de composites y sostenibilidad de composites aprobados por cada una de las fuentes de financiación

Y para finalizar, en el siguiente diagrama de barras se muestra el número de proyectos financiados por cada uno de las ayudas.

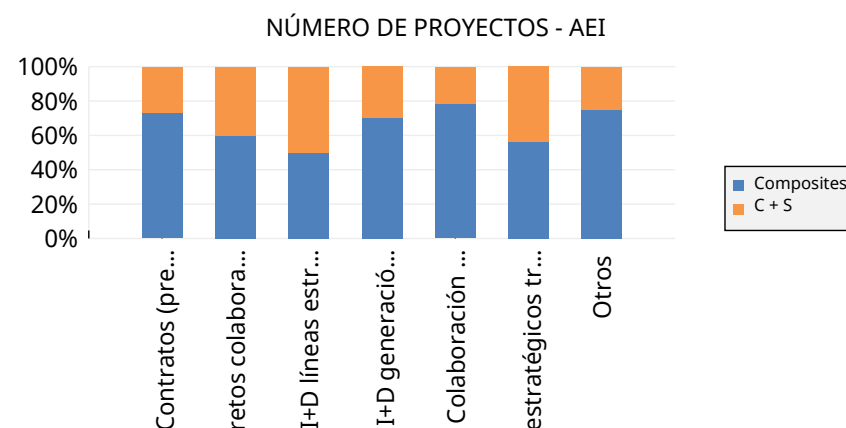


Figura 15: Número de proyectos financiados por cada fuente de financiación

3.3 AEI - PROYECTOS Y BENEFICIARIOS

La siguiente tabla detalla los proyectos relativos a sostenibilidad en el campo de los materiales compuestos en otros sectores y sus beneficiarios:



RAZÓN SOCIAL	TÍTULO DEL PROYECTO
UNIVERSIDAD DE SEVILLA	Biorefinería: Aprovechamiento de biomasa residual para la obtención de biocombustibles y compuestos de alto valor añadido
KERABEN GRUPO, S.A.	PROYECTO EROS: Economía ciRcular en compOSites: del sector eólico y aeronáutico a la industria cerámica y el transporte.
ACITURRI ENGINEERING S.L.U.	Nuevo proceso de Fabricación más Eficiente para la INdustria Aeronáutica
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	DEVELOPMENT, THROUGH A NOVEL PROCESSING, OF INNOVATIVE BIODEGRADABLE AND BIOCOMPATIBLE COMPOSITE MATERIALS FORMED BY POLYMER/METAL AND METAL/METAL
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	MODIFICACION DE SUPERFICIES DE CARBONO PARA MEJORAR SU ACTIVIDAD ELECTROCATALITICA EN REACCIONES REDOX IMPLICADAS EN SISTEMAS DE ENERGIA SOSTENIBLE
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	POLIMEROS SOSTENIBLES BIOBASADOS CON ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	GEMELOS DIGITALES EN LOS PROCESOS DE FABRICACION ADITIVA PARA COMPONENTES DE FIBRA DE CARBONO: HACIA LA MOVILIDAD SOSTENIBLE
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	FOMENTO DE LA ECONOMIA CIRCULAR A TRAVES DEL RECICLADO Y LA VALORIZACION DE FIBRAS RESIDUALES EN LA FABRICACION DE MEZCLAS BITUMINOSAS MAS SOSTENIBLES Y DURADERAS
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA	POLIESTERES BIODEGRADABLES NANOSTRUCTURADOS Y NANOCOMPOSITES PARA APLICACIONES EN REGENERACION DE TEJIDOS
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA	HACIA LA ECONOMIA CIRCULAR MEDIANTE LA OPTIMIZACION DEL RECICLADO DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA DE CARBONO POR PIROLISIS
CENTRE CATALA DEL PLASTIC	"ECOBLENDS" DE ALTO VALOR AÑADIDO PARA TECNICAS DE FABRICACION AVANZADAS
UNIVERSIDAD DE VIGO	EVALUACION ECOTOXICOLOGICA DE POLIMEROS RECICLABLES Y BIOPOLIMEROS
FUNDACION AITIIP	PREPARACION Y PRESENTACION DE UNA PROPUESTA PARA IMPULSAR EL USO DE BIOMATERIALES EN APLICACIONES DE ALTO VALOR AÑADIDO.
INSTITUTO TECNOLOGICO DEL EMBALAJE TRANSPORTE Y LOGISTICA ITENE	CLASIFICACION Y RECICLADO DE MATERIALES MULTICAPA Y COMPOSITES
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	CATALIZADORES PARA LA HIDROGENACION DE BIOCOMPUESTOS CON ACIDO FORMICO Y PARA LA VALORIZACION DE DIOXIDO DE CARBONO
UNIVERSITAT DE GIRONA	DESARROLLO DE MATRICES POLIMERICAS Y COMPOSITES AUTOREPARABLES CON IMPACTO AMBIENTAL REDUCIDO Y PARA APLICACION EN IMPRESION 3D
UNIVERSIDAD DE CORDOBA	FABRICACION ADITIVA DE NANOCOMPUESTOS AVANZADOS A PARTIR DE MEZCLAS COLOIDALES DE NANOPARTICULAS FUNCIONALES Y CELULOSA OBTENIDA DE RESIDUOS DE BIOMASA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA	SINTESIS DE NUEVOS MATERIALES BIODEGRADABLES Y COMPUESTOS DE INTERES INDUSTRIAL MAS SOSTENIBLES MEDIANTE PROCESOS CATALITICOS
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	NANOCOMPUESTOS POLIMERICOS SOSTENIBLES PARA MATERIALES MULTIFUNCIONALES
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	FOMENTO DE LA ECONOMIA CIRCULAR Y TECNOLOGIAS BAJAS EN CARBONO A TRAVES DE LA FABRICACION ADITIVA
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA	MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA DE CARBONO BIO-INSPIRADOS



AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	CO2 sequestration in composites based on MgO cement and reinforced with cellulose
FUNDACION CIDAUT	Estudio y definición de la estructura cristalina de termoplásticos reciclados para obtener matrices de materiales compuestos con capacidad de integración
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	Biobased advanced polymer nanocomposite
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	FOMENTO DE LA ECONOMIA CIRCULAR A TRAVES DEL RECICLADO Y LA VALORIZACION DE FIBRAS RESIDUALES EN LA FABRICACION DE MEZCLAS BITUMINOSAS MAS SOSTENIBLES Y DURADERAS
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA	DESARROLLO DE UN PROCESO INTEGRADO PARA EL REFORMADO OXIDATIVO DE LA CORRIENTE DE VOLATILES DE LA PIROLISIS DE BIOMASA Y RESIDUOS PLASTICOS
LABORATORIO ANDALUZ DE ENSAYOS DE CONSTRUCCIÓN SRL	MOBILIARIO URBANO DE ALTA RESISTENCIA A AMBIENTE MARINO Y ACABADO ESTÉTICO
INTERPLASP SL	Enzymatically recyclable and biodegradable polyurethane foams through innovative chemical formulations and ozonation processes (Enzyclo3)
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	APORTANDO ECONOMIA CIRCULAR Y SOSTENIBILIDAD A LOS COMPUESTOS POLIMERICOS REFORZADOS CON FIBRA
AUTOTECH ENGINEERING SL	Desarrollo de estructuras multimaterial ligeras basadas en procesos altamente automatizados y flexibles diseñados para la sostenibilidad y circularidad del sector automoción - MULTIFLEX
UNIVERSIDAD DE ALCALA	ADITIVOS FUNCIONALIZADOS BIOBASADOS PARA LA MEJORA DE LA COMPATIBILIDAD EN MATERIALES COMPUESTOS HIBRIDOS
UNIVERSIDAD DE GRANADA	FUNCIONALIZACION DE NANOMATERIALES Y NANOCOMPOSITES BASADOS EN EL CARBON PARA LA ELIMINACION DE COVS EN EFLUENTES DEL AIRE
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	NANOCOMPOSITES BLANDOS Y FUNCIONALES A BASE DE POLIMEROS NATURALES PARA LA REGENERACION DE TEJIDOS
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID	RESPUESTA FRENTE A CARGAS IMPULSIVAS DE ESTRUCTURAS SANDWICH SOSTENIBLES EN CONDICIONES DE BAJA TEMPERATURA
UNIVERSITAT DE GIRONA	EN POS DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA LARGA HIBRIDOS, BIO-BASADOS Y SOSTENIBLES PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES
UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA	RECICLADO DE ELASTOMEROS DESVULCANIZADOS, PARA LA OBTENCION DE POLIMEROS INDUSTRIALES DE ALTO VALOR AÑADIDO
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID	ESTUDIO DE LA OBTENCION DE REFUERZOS ACTIVOS PARA BIOPOLIMEROS EN LA ECONOMIA CIRCULAR
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACION A DISTANCIA	NANOMATERIALES FUNCIONALES DE CARBONO Y COMPOSITES PARA LA SINTESIS SOSTENIBLE DE HETEROCICLOS BIOACTIVOS. ESTUDIO EXPERIMENTAL Y TEORICO
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	FULLY 3D TECNOLOGIAS ADITIVAS PARA LA MOVILIDAD SOSTENIBLE. HACIA LA TRANSICION ECOLOGICA Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE (FULLY3DMOBILITY)
UNIVERSITAT DE GIRONA	REUTILIZACION DE MATERIALES COMPUESTOS PROCEDENTES DE ESTRUCTURAS AERONAUTICAS AL FINAL DE SU VIDA UTIL PARA LA MEJORA EN SERVICIO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	UNA RESINA TERMOPLASTICA LIQUIDA PARA NUEVOS MATERIALES COMPUESTOS CIRCULARES
FUNDACION CIDETEC	DESARROLLO DE MATERIALES RECICLABLES Y TECNOLOGIAS DE RECICLADO VERDES PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE H2



FUNDACIÓ INSTITUT CATALÀ DE NANOCIÈNCIA I NANOTECNOLOGIA	DISEÑO Y DESARROLLO DE NANOCOMPOSITES INTELIGENTES QUE RESPONDEN A LA RADIACION SOLAR DE BAJA ENERGIA, PARA EL AHORRO ENERGETICO EN EDIFICIOS
UNIVERSIDAD DE VALENCIA	DESARROLLO DE NUEVOS BIOCOMPOSITES DE TIPO MOF PARA TECNOLOGIAS SOSTENIBLES AVANZADAS
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID	COMPORTAMIENTO DINAMICO DE MATERIAL COMPUESTO RECICLADO DE TERMOPLASTICO (PEEK) PROCESADO PARA LA INDUSTRIA DEL TRANSPORTE
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES FABRICADOS CON MATERIALES COMPUESTOS BIODEGRADABLES FRENTE A IMPACTO DE BAJA VELOCIDAD
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA	RECICLADO DE RESIDUOS PLASTICOS MEDIANTE PIROLISIS CATALITICA EN REACTOR DE SPOUTED BED CON FUENTE CONFINADA EMPLEANDO CATALIZADORES DE FCC USADOS
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA	SEGURIDAD AMBIENTAL DE POLIURETANOS PROCEDENTES DE FUENTES RENOVABLES Y DE PLASTICOS RECICLADOS: EVALUACION DEL RIESGO BASADO EN UNA BATERIA DE METODOS ALTERNATIVOS
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	DESARROLLO Y OPTIMIZACION DE NUEVOS MATERIALES COMPUESTOS DE ALTO RENDIMIENTO MEDIOAMBIENTAL A PARTIR DE LA REVALORIZACION DE RESIDUOS DE POSIDONIA OCEANICA
UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA	RECICLADO DE RESIDUOS TEXTILES COMO MATERIAS PRIMAS SECUNDARIAS PARA SU GESTION CIRCULAR QUE EVITE SU DISPERSION EN EL MEDIO AMBIENTE Y CONTRIBUYA A LA TRANSICION ECOLOGICA
FUNDACIÓN IMDEA MATERIALES	BIO-BASED FLAME RETARDANT SYSTEM FOR SUSTAINABLE POLYMERS VIA A COMBINATION OF GREEN PREPARATION AND DIGITAL DESIGN
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	DESARROLLO DE COMPONENTES ECO-SOSTENIBLES PARA EL SECTOR DE AUTOMOCION
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA	METODOS QUIMIO-ENZIMATICOS PARA LA FABRICACION DE POLIURETANOS BIOBASADOS Y RECICLABLES
FUNDACION UNIVERSITARIA SAN PABLO CEU	TECNOLOGIA DE FABRICACION ADITIVA TOTALMENTE 3D DE MOLDES PARA LA ENERGIA DEL FUTURO. HACIA LA TRANSICION AMBIENTAL Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI	VITRIMEROS POLIIMINA-EPOXI CON PROPIEDADES TERMOMECAICAS Y DE RELAJACION CONTROLADAS A DEMANDA PARA APLICACIONES EN MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRA
UNIVERSITAT DE GIRONA	CINETICA DE POLIMERIZACION Y CARACTERIZACION MATERIAL DE UNA RESINA TERMOPLASTICA LIQUIDA PARA ESTRUCTURAS DE MATERIAL COMPUESTO CIRCULARES
CENTRO DE INVESTIGACION ENERGETICA MEDIOAMBIENTAL Y TECNOLOGICA (CIEMAT)	ANALISIS DE SOSTENIBILIDAD DE UNA PALA PARA TURBINAS EOLICAS COMPLETAMENTE RECICLABLE
UNIVERSIDAD DE CORDOBA	BIORREFINERIA DE RESIDUOS DE ORIGEN NATURAL PARA LA ADAPTACION DE MATERIALES FUNCIONALES
FUNDACION AITIIP	DESMANTELAMIENTO Y VALORIZACION DE ESTRUCTURAS DE MATERIALES COMPUESTOS PARA AUMENTAR LA CIRCULARIDAD DEL SECTOR AREONAUTICO
AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS (CSIC)	BIODEGRADACION Y VALORIZACION DE ESPUMAS DE POLIURETANO MEDIANTE EL EMPLEO DE MICROORGANISMOS E INSECTOS
UNIVERSIDAD DE ALCALA	Design of multifunctional stimuli responsive bioplastics and biocomposites for emerging applications



HISANTA S.L.	Reciclaje y economía circular para los residuos de poliuretano compacto
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	DEMOSTRACION DE LA SOSTENIBILIDAD Y RENTABILIDAD DEL USO DE FIBRAS RESIDUALES PARA EL REFUERZO DE MEZCLAS ASFALTICAS
UNIVERSIDAD DE BARCELONA	DESARROLLO DE MATERIALES CON MATERIAS PRIMAS SECUNDARIAS PARA FABRICACION ADITIVA DE BAJO COSTE HACIA UNA ECONOMIA CIRCULAR
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA	FABRICACION AVANZADA DE RESINAS TOTALMENTE RECICLABLES MEDIANTE FOTOPOLIMERIZACION VAT
UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA	RESPUESTA NO-LINEAL GOBERNADA POR LA CORTADURA EN MATERIALES COMPUESTOS CONSIDERANDO CARGAS BIAXIALES Y EL EFECTO DE RADIACION IONIZANTE
UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA	SIMULACION NUMERICA Y CARACTERIZACION MECANICA DE MATERIALES CON MATERIAS PRIMAS SECUNDARIAS PARA FABRICACION ADITIVA DE BAJO COSTE HACIA UNA ECONOMIA CIRCULAR
CROMOGENIA UNITS, S.A.	Investigación y desarrollo de un proceso sostenible para la producción de poliuretanos con aplicación en recubrimientos y adhesivos de la industria del cuero y el textil
FUNDACIÓN IMDEA MATERIALES	IMPRESION 4D DE MATERIALES INTELIGENTES PARA LA MOVILIDAD SOSTENIBLE
UNIVERSIDAD DE GRANADA	Novel Metal-Organic Frameworks and composites for energy and environmental applications.
UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA	ELASTOMEROS TERMOPLASTICOS BIOREABSORBIBLES CON RUGOSIDAD Y TOPOGRAFIA SUPERFICIAL CONTROLADA: UNA ESTRATEGIA PARA PREVENIR LA NEURONINFLAMACION DE BIOMATERIALES
MANAGING COMPOSITES SL	MULTINAT: TECNOLOGÍAS PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES (NFCM) EN COMPONENTES MULTIMATERIAL
FUNDACION CENTRO TECNOLÓGICO DE INVESTIGACION MULTISECTORIAL	Nuevos nano materiales impulsados a través de la inteligencia artificial y la biotecnología industrial

Tabla 7: AEI, categoría: Sector industrial. Proyectos y beneficiarios

4 - CONCLUSIONES

En resumen, se concluye que han sido financiados 353 proyectos que versan sobre investigación en el campo de los materiales compuestos, en concreto 196 proyectos por el CDTI y 157 por la AEI. Casi el 42% de estos proyectos, 147 en total, abordan la problemática de la sostenibilidad desde diversas perspectivas, de los cuales 74 han sido financiados por CDTI y 73 por la AEI.

Atendiendo a las cuantías económicas, indudablemente CDTI ha destinado muchos más recursos al desarrollo de los materiales compuestos, con 222 M€ respecto a la AEI, que ha aportado 23 M€. Es decir, prácticamente el 91% de la financiación procede de los fondos de financiación gestionados por CDTI. Sumando la financiación de ambas entidades, se dedica aproximadamente un 33% de la financiación económica a los proyectos de materiales compuestos que se centran en materia de sostenibilidad.

Por todo ello se concluye que las dos entidades gubernamentales, CDTI y AEI, cuentan con los mecanismos suficientes para favorecer y sufragar económicamente a empresas, pymes, centros tecnológicos, fundaciones y universidades. De hecho, los datos analizados en este estudio muestran que se está realizando una gran labor en materia de investigación, desarrollo e innovación con un tercio de las ayudas destinadas específicamente al ámbito de la sostenibilidad de los composites. Por otro lado, los agentes involucrados en el ecosistema de I+D+I acuden también a otras ayudas de ámbito local, autonómico, nacional y europeo que no se han incluido en este capítulo de la primera edición del Libro Blanco de Sostenibilidad de Composites promovido por la Asociación AEMAC.



Asociación Española de Materiales Compuestos
Juntos por un futuro mejor



AIRBUS

