

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Pavimentos asfálticos de alto
valor añadido con fibra de
vidrio recuperada
mecánicamente de palas de
aerogenerador en desuso

LIFE REFIBRE



PAVIMENTOS ASÁLTICOS DE ALTO VALOR AÑADIDO CON FIBRA DE VIDRIO
RECUPERADA MECÁNICAMENTE DE PALAS DE AEROGENERADOR EN DESUSO



Autor Principal: Alicia Aguado Pesquera (CARTIF Centro Tecnológico)

Otros autores: Francisco Verdugo González (CARTIF Centro Tecnológico)

1. TÍTULO

Pavimentos asfálticos de alto valor añadido con fibra de vidrio recuperada mecánicamente de palas de aerogenerador en desuso

2. PALABRAS CLAVE

Palas aerogenerador, reciclado, fibras de vidrio, aglomerado asfáltico, economía circular

3. RESUMEN

La energía eólica sigue siendo la segunda fuente más importante de generación de energía en Europa en 2019. Esta capacidad energética es generada por turbinas eólicas las cuales tienen una vida de 20-25 años. La cantidad de palas producida por el desmantelamiento de parques eólicos irá aumentando con el tiempo, lo cual va a suponer un gran problema medioambiental debido a que actualmente todas van a vertedero. Por ejemplo, en 2025 se espera que se generen 500.000 toneladas de residuos de palas en Europa, los cuales suponen 324.738 toneladas de fibra de vidrio. Este trabajo, desarrollado en el proyecto LIFE REFIBRE, tiene como objetivo diseñar un innovador prototipo de reciclaje mecánico para valorizar la fibra de vidrio que conforman las palas del aerogenerador, promoviendo la reciclabilidad completa y de alta calidad de estas fibras de vidrio, y favoreciendo la recuperación de estos residuos en pro de una reducción de su presencia en vertederos y dotándoles de un segundo ciclo de vida para una aplicación de alto valor añadido. Para demostrar la utilidad de estas fibras de vidrio se han incorporado en aglomerado asfáltico, construyendo un tramo demostrador de carretera de 1.500 metros, el cual ha estado monitorizado durante un año para estudiar la mejora de sus propiedades mecánicas, siendo las más importantes un incremento de la vida útil del pavimento, un incremento de su resistencia, y una mejora de sus cualidades acústicas. Mediante todos estos objetivos se va a conseguir cerrar el ciclo de vida de estos residuos, dotando de un gran valor añadido tanto al residuo como al nuevo producto resultante.

4. INTRODUCCIÓN

La potencia eólica mundial total instalada en 2018 ha sido de 51,3 GW con un total acumulado de 591 GW (Figura 1). Esta energía, trasladada a cantidad de palas, supone un total de 5,4 millones de toneladas de palas instaladas. Los países con más potencia acumulada mundial son China, EEUU, Alemania, India y España (GWEC, 2019).

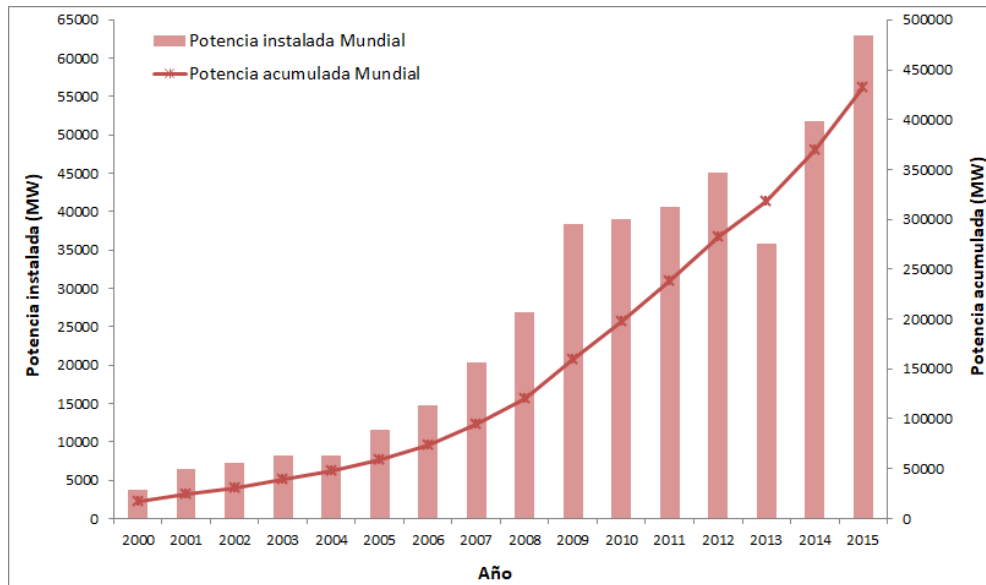


Figura 1. Potencia eólica instalada y acumulada en el mundo (2000-2015) (Fuente: GWEC, 2019).

En Europa, en 2018 se instalaron 11,7 GW de nuevos aerogeneradores (9 GW terrestres y 2,65 GW marítimos) suponiendo una acumulación total de 189 GW (170 GW terrestres y 19 GW en el mar) (Figura 2). Esta energía, supone un total de 1,7 millones de toneladas de palas instaladas. El ranking de países por potencia acumulada en Europa son Alemania, España, Reino Unido, Francia e Italia. Estos 5 países tienen instalada el 68% de toda la potencia eólica europea. Suecia, Turquía, Polonia, Dinamarca y Portugal son los siguientes con más de 5.000 MW acumulados. Por último, otros cinco países tienen más de 3.000 MW acumulados y son Holanda, Irlanda, Bélgica, Austria y Rumanía (WindEurope, 2019).

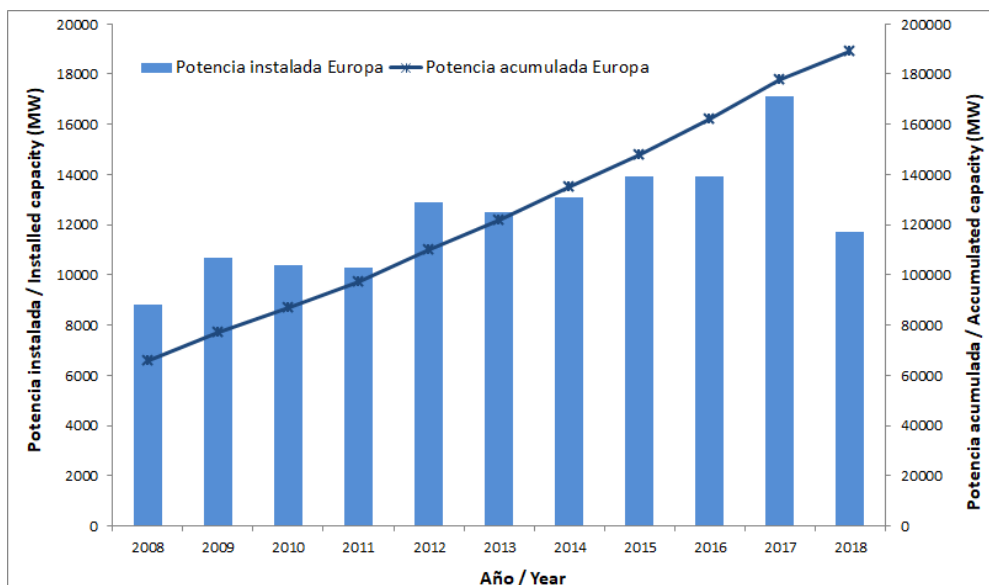


Figura 2. Potencia eólica instalada y acumulada en Europa (2008-2018) (Fuente: WindEurope, 2019).

En España, a finales de 2018 había instalados 1.123 parques eólicos en 807 municipios, suponiendo un total de 20.306 aerogeneradores, con una potencia eólica acumulada de 23,5 GW, equivalente a 0,2 millones de toneladas de palas instaladas (Figura 3). A pesar de haber tenido un parón entre 2013 y 2017 debido a la crisis, España es el quinto país a nivel mundial y el segundo a nivel europeo con más cantidad de potencia eólica instalada en 2018, lo cual indica que se dispone de una gran cantidad de palas de aerogenerador que se convertirán en residuo en cuanto lleguen al final de su vida útil en unos 20-25 años (AEE, 2019; WindEurope, 2019).

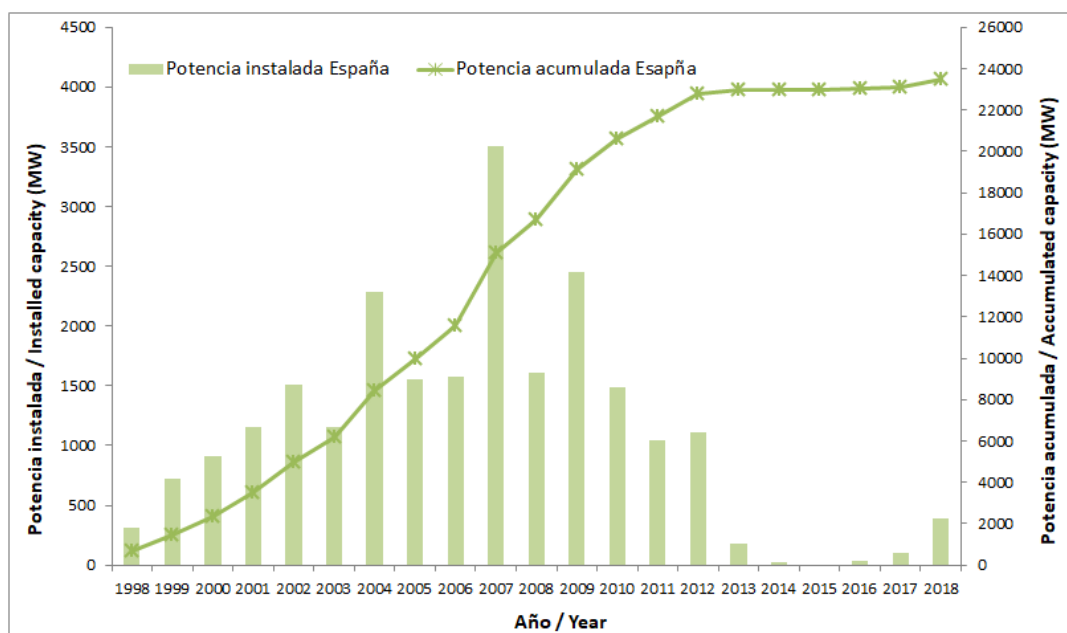


Figura 3. Potencia eólica instalada y acumulada en España (1998-2018) (Fuente: AEE, 2019).

En 2018 en Europa, 421 MW fueron decomisionados, y 683 MW en 2017. La decomisión de 2018 se llevó a cabo en Alemania (249 MW), Holanda (72 MW), Austria (29 MW), Grecia (15,4 MW), Portugal (13,7 MW), Suiza (13,3 MW), Dinamarca (12,7 MW), Francia (12,6 MW) y Finlandia (3 MW). A parte de esos 421 MW, otro gran número fue repotenciado (GWEC, 2019). En estos últimos años, la cantidad de aerogeneradores decomisionados no ha sido muy elevada debido a que la mayoría de ellos han sido repotenciados. También es debido a que los aerogeneradores que se están decomisionando corresponden con los que se instalaron en el año 2000, cuya cantidad instalada era muy baja en comparación a los instalados en los últimos años. En cambio, los estudios muestran que el flujo de residuos al final de su vida útil generará anualmente más de 2 millones de toneladas en 2050 y los residuos acumulados de palas en 2050 estarán entre 21,4 y 69,4 millones de toneladas, siendo el nivel de residuos más probable 43,4 millones de toneladas (Liu, 2017). Por otro lado, la situación en España en cuanto a decomisión y repotenciación no es diferente, siguiendo la misma tónica que en Europa, con muy pocos aerogeneradores llegando a su fin de vida en estos últimos años, pero los cuales se prevé que van a aumentar exponencialmente en los próximos años. Por ejemplo, en 2050 se espera que se generen en España casi 100.000 toneladas de residuos procedentes de las palas (Franco, 2019).

Generalmente, un aerogenerador está formado por cuatro secciones, cimentación, torre, góndola y rotor. Suele tener un 60-95% en peso de hormigón, un 30-35% en peso de acero, <5%

en peso en materiales menores y entre un 2-3% en peso en polímeros (Andersen, 2014). La mayoría de estos materiales tienen un ratio de reciclaje alto al final de su vida útil. Sin embargo, el principal desafío surge del reciclaje del polímero presente en las palas.

Los plásticos reforzados con fibra de vidrio, PRFV, son materiales compuestos formados por una matriz de plástico o resina termoestable o termoplástica, reforzada con fibras de vidrio. Se trata de materiales ligeros, resistentes y muy fáciles de moldear, por lo que son muy usados ya que aportan una gran rigidez (Chen, 2013). Este material compuesto es el punto de partida de la presente comunicación, ya que se ha elegido como residuo estas palas de aerogenerador una vez han llegado a su fin de vida útil para estudiar su reciclado. Las palas contienen altas cantidades de PRFV (un 67% según la caracterización realizada) siendo el componente más predominante y más difícil de reciclar. En la Figura 4 se muestra el detalle de una pala de aerogenerador.

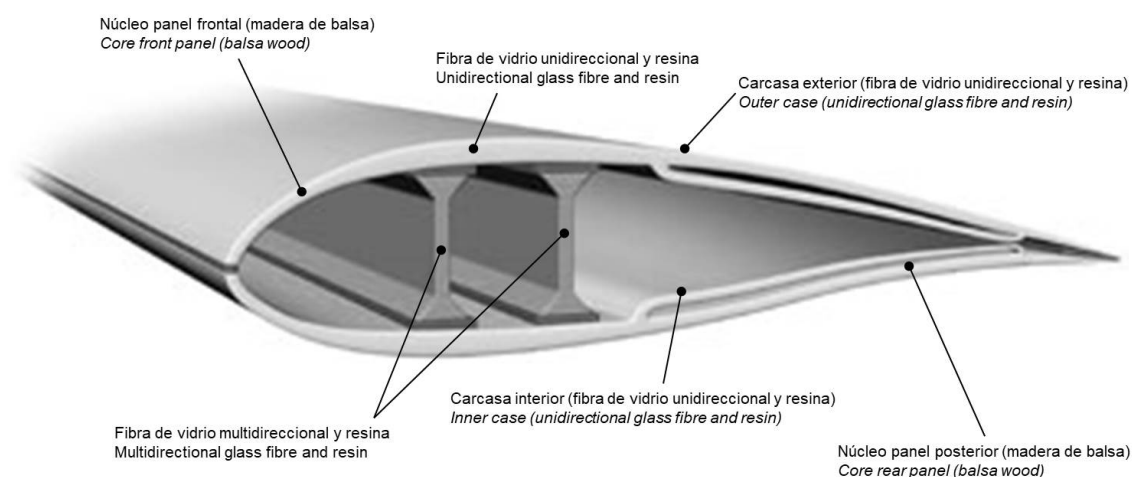


Figura 4. Sección de una pala de aerogenerador.

En cuanto a la relación entre las palas de los aerogeneradores y la potencia, los molinos instalados hace casi 30 años tenían un diámetro medio de rotor de 15 m con una potencia inferior a 1 MW (longitud de pala de 7 m). Hoy en día, la longitud media ha crecido hasta aproximadamente 50 m con una potencia de entre 2,5 y 7,5 MW, la cual se espera que continúe creciendo en el futuro (AEE, 2019). Hasta ahora, la turbina más grande instalada ha sido en Reino Unido, con una potencia de 8,8 MW y un diámetro de palas de 164 metros. En un futuro, se espera que la potencia de las turbinas aumente entre tres a cuatro veces su valor actual, lo cual significa aumentos significativos también en el tamaño de las palas.

Por todo lo mencionado anteriormente, está claro que las palas fuera de uso son un residuo que por sus elevadas cantidades y volumen van a provocar un gran problema medioambiental. Actualmente no existe un método de gestión específico para las palas de aerogenerador fuera de uso yendo a parar a vertedero, ya que no hay ninguna ley o directiva que rijan su destino una vez llegado a su fin de vida, suponiendo un gran impacto ambiental negativo (Cherrington, 2012). Además, es un compuesto inerte y no biodegradable, pero que si se corta, tritura o machaca, el polvo de fibra de vidrio generado supone graves riesgos para la salud humana debido a su inhalación, ingestión o contacto con la piel causando irritación de la piel y dificultad para respirar. La inhalación de polvo de fibra de vidrio puede agravar el asma u otras enfermedades respiratorias crónicas en personas susceptibles, e incluso las partículas de polvo

más pequeñas pueden ser más dañinas para la salud humana debido a su capacidad para llegar a las partes más profundas de los pulmones (Papadakis, 2010). Otra de las opciones además del vertedero es la incineración, donde solo el 10% de la cantidad de energía que se utiliza para producir el producto composite, se recupera por incineración. Además, se han demostrado muchos problemas técnicos durante la incineración, causados por la presencia de fibras en el gas de combustión que dañan el sistema de limpieza del gas, y grandes cantidades de cenizas volantes que deben eliminarse (Wackernagel, 1998; Sikdar, 2003). Por todo ello, tanto el vertedero como la incineración deberían ser las últimas opciones para el fin de vida de las palas. A continuación se describen otras opciones de tratamiento para las palas de aerogenerador.

El reciclado mecánico consiste en la trituración de las fibras y la matriz (Beauson, 2016; Mamanpush, 2018; Liu, 2004). El material compuesto se rompe mediante trituración, molienda u otros procesos similares. Es barato pero muy agresivo y destructivo para las fibras. En el caso de este trabajo, la fibra de vidrio es recuperada en buen estado y se utiliza para introducirla en mezclas bituminosas. La ventaja es que para este uso elegido, la longitud de la fibra debe ser corta y no importa que esté impregnada con restos de resina.

El reciclado químico (Mantaux, 2009; Oliveux, 2012; Pimenta, 2011) tiene como objetivo la despolimerización química o la eliminación de la matriz y la liberación de las fibras de vidrio para su posterior reciclaje usando disolventes y productos químicos orgánicos o inorgánicos, con temperaturas inferiores a 450 °C y presión de alrededor de 250 bar, dependiendo del grado de polimerización de la matriz.

A través del reciclado térmico (Pickering, 2006; Yang, 2012; Mantaux, 2004), la pirólisis es la técnica más común en la actualidad. El efecto oxi-térmico sobre las fibras reduce sus propiedades mecánicas iniciales. Utiliza alta temperatura (entre 300 °C y 1000 °C) para descomponer la resina y separar las fibras de vidrio. Se obtienen fibras de vidrio limpias y filler y se puede producir combustible secundario o energía térmica mediante pirólisis, gasificación o combustión. Entre las diferentes tecnologías de pirólisis destaca la pirólisis por microondas. La energía de microondas es extremadamente eficiente en el calentamiento selectivo de materiales ya que no se desperdicia energía en el calentamiento de la muestra.

Por todo lo anterior expuesto, y para evitar el gran problema medioambiental que supone el envío a vertedero de las palas de aerogenerador fuera de uso, se ha desarrollado un prototipo para su reciclado y aprovechamiento de la fibra de vidrio presente en su interior, encontrando un nuevo uso como materia prima en mezclas asfálticas aportando mejores propiedades mecánicas.

Los materiales de construcción son muy importantes en la sostenibilidad, debido a las grandes cantidades de materias primas y energía utilizadas para su producción, así como a la gran cantidad de gases de efecto invernadero que generan (Elizondo-Martínez, 2020). Por todo ello, el consumo de residuos, materiales fibrosos y materiales reciclados se ha convertido en una solución alternativa para reducir la utilización de materias primas en las industrias de la construcción (Choudhary, 2018; Alaskar, 2021). Algunos de estos materiales usados en la industria de la construcción, son refuerzos de fibra sintética o natural. Entre las fibras sintéticas las más comunes son polipropileno (Vishnuvardhan, 2020), polietileno (Al-Hadidy, 2009), acero (Hussain, 2020), vidrio (Patel, 2017), etc., las cuales mejoran las propiedades físicas y mecánicas del producto donde se han añadido. Entre todas ellas, la fibra de vidrio es la más usada, ya que

su comportamiento en mezclas asfálticas es similar al comportamiento de materiales composites. Por ejemplo, varios estudios muestran que la introducción de la fibra mejora la flexibilidad de las mezclas bituminosas, aumenta la tensión por compresión, la resistencia a la tracción y disminuye la formación de grietas entre otras cosas (Abiola, 2014; Ali, 2020; Mahrez, 2003; Rabab'ah, 2021).

Por lo tanto, la introducción y uso de estas fibras sintéticas también requiere una gran cantidad de energía para su producción, por lo que en este trabajo se estudia si las fibras de vidrio recuperadas de las palas de aerogenerador a través del reciclado mecánico, las cuales todavía tienen resina y están reforzadas, tienen el mismo efecto beneficioso al aplicarse en pavimentos asfálticos.

5. METODOLOGÍA

5.1. Materiales

Se han utilizado doce palas de aerogenerador fuera de uso las cuales suponen una cantidad total de 40 toneladas y han sido todas ellas tratadas dentro del proyecto LIFE REFIBRE a través de reciclado mecánico. Cuatro de estas palas de aerogenerador de 36 metros cada una, han sido suministradas por General Electrics. Tres palas de 15 metros, dos palas de 21 metros y una pala de 34 metros han sido suministradas por EDP. Por último, dos palas de 34 metros cada una han sido suministradas por Gamesa. Estas palas han sido trituradas en el mismo parque eólico para reducir su tamaño hasta 5 metros aproximadamente y facilitar su transporte hasta el lugar donde se encuentra la planta de reciclado.

5.2. Caracterización de la palas de aerogenerador

Los principales componentes que forman la estructura de la pala han sido determinados por un sistema de flotado-hundido debido a las diferentes densidades de los componentes. Estos componentes son fibra de vidrio reforzada, madera de balsa y otros materiales en cantidad despreciable como poliuretano. Para su análisis cuantitativo, se ha utilizado una balsa de separación de agua, donde se introduce una muestra representativa de los materiales obtenidos en la primera etapa del reciclado, una vez rota su unión. De esta manera, se puede separar la fibra de vidrio de la madera y posterior a su secado, calcular su contenido en peso.

5.3. Reciclado mecánico de palas de aerogenerador

Un innovador prototipo de reciclado mecánico de palas de aerogenerador ha sido diseñado y construido dentro de este trabajo para reciclar las palas de aerogenerador y poder recuperar la fibra de vidrio de su interior. Antes de comenzar el proceso de reciclado, se realiza otro pretratamiento a las palas de aerogenerador. Este pretratamiento consiste en reducir de nuevo su tamaño, hasta 50x50 cm aproximadamente, para facilitar su entrada al equipo.

Este proceso de reciclado ha sido diseñado en cuatro etapas y está formado por dos equipos tal y como resume la Figura 5. El primero de los equipos consiste en un molino de martillos, donde el diseño más importante se ha centrado en los martillos, su forma y disposición. En este molino se realiza una trituración primaria y posteriormente una trituración secundaria. El segundo es una mesa vibrante compuesta por dos distribuciones diferentes, un sistema de barras con un tamaño y distancia definida entre ellas y un sistema de tamices con diferentes luces de malla, todo ello con un movimiento vertical continuo.

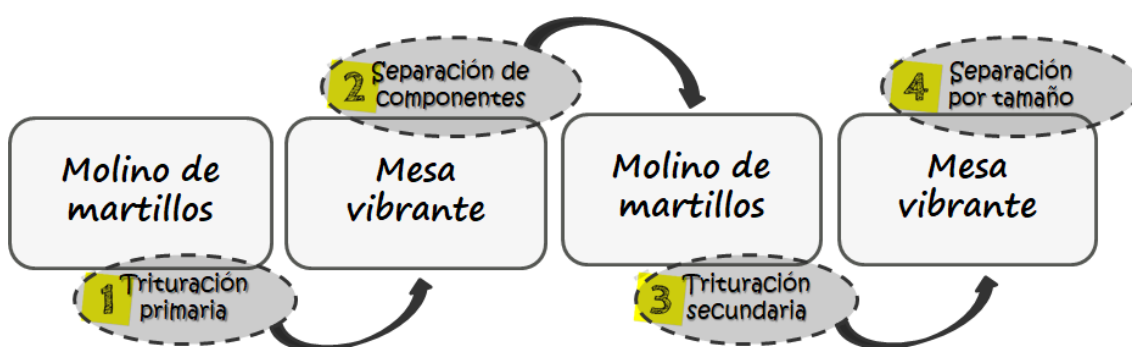


Figura 5. Esquema proceso reciclado mecánico palas de aerogenerador.

La primera fase, la trituración primaria, se lleva a cabo en el molino de martillos donde se produce la rotura de la estructura de la pala, consiguiendo separar los materiales mayoritarios que conforman la pala, rompiendo la unión entre la madera de balsa y la fibra de vidrio (Figura 6). En la segunda fase se realiza la separación de componentes obtenidos en la fase anterior. Para ello, la fibra de vidrio y la madera de balsa obtenidas en el molino de martillos, pasan a través de la mesa vibrante con la distribución de barras, donde la fibra de vidrio queda retenida encima de las barras por su gran tamaño, y la madera de balsa cae hacia abajo entre las barras, logrando su separación (Figura 7). En la tercera fase se lleva a cabo una trituración secundaria para reducir el tamaño de la fibra de vidrio obtenida en la fase anterior a la salida de la mesa vibrante. Por lo tanto, la fibra de vidrio se vuelve a introducir en el molino de martillos con otras condiciones de operación optimizadas, es decir, con mayores tiempos de residencia y mayor fuerza de golpeo (Figura 8). Por último, en la cuarta fase, se realiza la separación por tamaños en la mesa vibrante. En este caso, se utiliza una distribución de un sistema de tres tamices con diferente luz de malla cada uno, donde la fibra se va separando por tamaños a través de los tamices, hasta conseguir el tamaño deseado, menor de 2 cm. (Figura 9). La fibra con tamaño mayor se irá almacenando y se volverá a introducir en el molino hasta obtener el tamaño deseado.



Figura 6. Trituración primaria llevada a cabo en el molino de martillos.



Figura 7. Separación de componentes a través de la mesa vibrante.



Figura 8. Trituración secundaria en el molino de martillos.

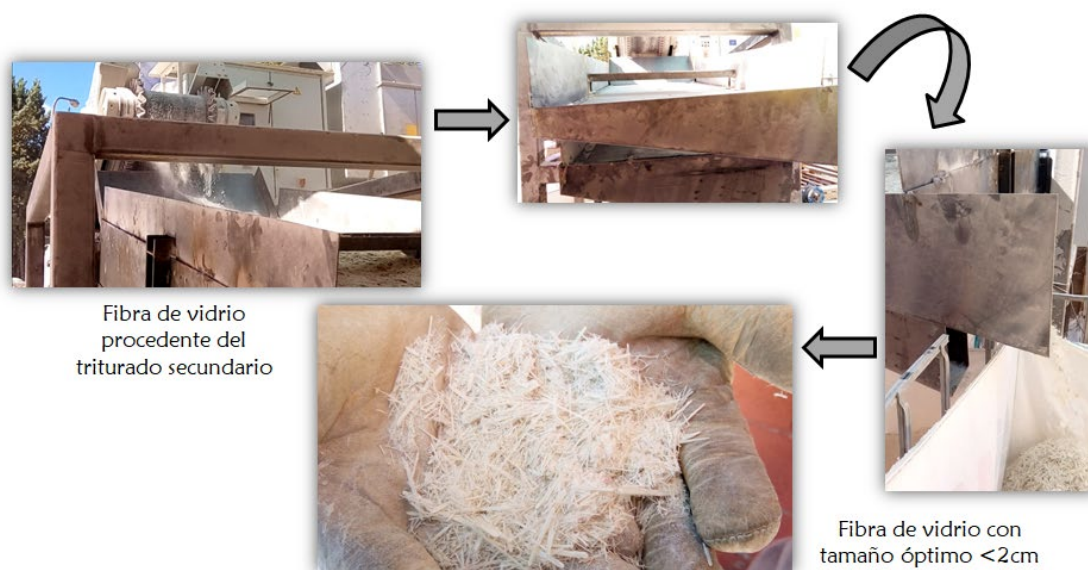


Figura 9. Separación por tamaño en la mesa vibrante.

5.4. Caracterización de los productos obtenidos

Análisis termogravimétrico, TGA

Se ha usado un analizador termogravimétrico de la marca Shimadzu y modelo DTG-60H para el análisis de la fibra de vidrio presente en las palas y para estimar la cantidad de resina que

contienen las fibras de vidrio recuperadas del reciclado mecánico. El análisis termogravimétrico se ha llevado a cabo en una atmósfera inerte de nitrógeno con una rampa de calentamiento de 20 °C/min desde temperatura ambiente hasta 800 °C. Para este análisis se han analizado tres muestras diferentes. Fibra de vidrio reforzada antes del reciclado mecánico, fibra de vidrio de 2 cm recuperada del proceso de reciclado mecánico y madera de balsa.

Microscopía electrónica de barrido, SEM

El microscopio electrónico de barrido utilizado ha sido de la marca ThermoFisher, Quanta200 FEG SEM, donde se ha determinado la morfología, el diámetro y la longitud de las fibras de vidrio y resina obtenidas del reciclado mecánico de las palas. La cámara ha sido evacuada en modo de bajo vacío y ha sido ventilada cinco veces para introducir vapor de agua. Las imágenes han sido adquiridas usando un voltaje de aceleración de 10 kV. Las muestras se colocaron en un portamuestras de 12 mm de diámetro. Se han analizado cinco muestras, las cuales consisten en fibra de vidrio reforzada antes de ser sometida al reciclado mecánico; madera de balsa; fibra de vidrio recuperada de un tamaño mayor de 3 cm (la cual queda retenida en el primer tamiz); fibra de vidrio recuperada de tamaño óptimo, 2 cm (retenida entre los dos tamices); y micro polvo de fibra de vidrio menor de 1 cm (obtenida en el último tamiz).

Calorimetría diferencial de barrido, DSC.

Para realizar una calorimetría diferencial de barrido, DSC, se utiliza un equipo TA Instrument DSC Q100, a través del cual se puede ver el comportamiento de los polímeros con el calor. Se pueden estudiar las diferentes transiciones poliméricas, por ejemplo las temperaturas de transición vítrea, de fusión o de cristalización. En este caso, también se usa para saber si la fibra de vidrio recuperada contiene madera de balsa, por lo que se han analizado dos muestras de fibra de vidrio recuperada de 2 cm de tamaño y de micro polvo, y madera de balsa.

6. RESULTADOS

6.1. Caracterización de las palas de aerogenerador

Una vez la pala ha sido sometida a la trituración primaria y sus componentes por los que está formada ya han sido separados, se realiza una caracterización cuantitativa de esos componentes. Para ello, se introducen los materiales en un tanque con agua, donde la madera de balsa flota y la fibra de vidrio se hunde, pudiendo separarse estos dos componentes. Después de su secado se pesan obteniendo las siguientes cantidades representativas. El 66% de una pala de aerogenerador corresponde a fibra de vidrio reforzada, el 33% a madera de balsa, y menos de un 1% a poliuretano.

6.2. Prototipo de reciclado mecánico de palas

El diseño y construcción del prototipo de reciclado mecánico de las palas de aerogenerador fuera de uso se ha realizado en cuatro procesos diferenciados con el diseño de dos equipos, con una capacidad de 100 kg/h y un rendimiento conseguido del 59%.

Molino de martillos

Se ha diseñado un molino de martillos de eje vertical, en el cual se realiza un triturado primario donde se realiza la separación de los componentes de las palas (madera de balsa y fibra de vidrio principalmente), y un triturado secundario donde se realiza la reducción del tamaño de las fibras de vidrio. La parte más importante en el diseño del molino de martillos es la forma, número y disposición de los martillos. Se han seleccionado cuatro martillos, localizados en el mismo eje pero a diferentes alturas. Con esta disposición se va a obtener la mayor superficie de impacto continuo, 800 cm². El diseño de estos martillos se muestra en la Figura 10. Otro factor importante en el diseño de los martillos es el material de fabricación, ya que debido a la naturaleza abrasiva del material a triturar, los martillos deben ser resistentes a la abrasión.



Figura 10. Configuración de los martillos en el diseño del molino.

El diseño de este molino de martillos se caracteriza por su versatilidad para realizar la trituración primaria y secundaria con tan solo cambiar las condiciones de operación (controlando tiempos de residencia del material dentro del molino y fuerza de impacto). Por ejemplo, en el triturado primario, se necesitan tiempos de residencia cortos y fuerza de impacto grande ya que se quiere conseguir romper la unión de los componentes de las palas pero mantener la fibra de vidrio con gran tamaño para separarla fácilmente de la madera de balsa. En cambio, en el triturado secundario se necesitan tiempos de residencia más largos y también fuerzas de impacto elevadas ya que se quiere partir esas fibras de vidrio para conseguir tamaños muy pequeños, menores de 2 cm.

Mesa vibrante

Debido a las dificultades encontradas a la hora de separar los diferentes materiales que componen las palas de aerogenerador, por sus características físicas y geométricas, se estudiaron diversas opciones (separación electrostática, separación de agua, tamices, etc.). Se ha elegido la opción de mesa vibrante como mejor opción, lo cual consta en un proceso combinado de cribado y tamizado. El diseño de la mesa vibrante se ha realizado para conseguir una separación de los componentes de las palas, y para lograr una clasificación por tamaño de las fibras de vidrio (Figura 11).

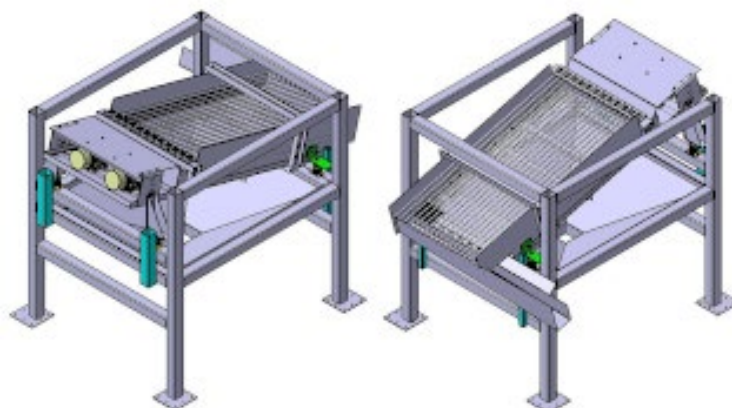


Figura 11. Diseño mesa vibrante.

El diseño de la mesa vibrante para conseguir la separación de la madera de balsa y fibra de vidrio obtenida del triturado primario, consta de un sistema de barras con un diámetro, longitud y separación entre ellas definido. Además, dispone de dos motores para conseguir un movimiento vertical continuo. Por ello, los productos obtenidos de la trituración primaria atraviesan esta mesa vibrante, donde la fibra de vidrio queda retenida en las barras debido a su elevado tamaño, y la madera de balsa cae a través de las barras debido a su pequeño tamaño y bajo peso. Como el tamaño de estas fibras de vidrio recogidas es mayor del deseado, vuelven a introducirse en el molino de martillos, consiguiéndose fibras de vidrio de tamaño muy pequeño, la cual hay que separar para conseguir el tamaño óptimo. Es por ello, que se modificó el diseño de la mesa vibrante para conseguir esta clasificación por tamaños. En este caso, se eliminan las barras de la mesa vibrante y se introduce un sistema de dos tamices, manteniendo el movimiento vertical. En el tamiz superior queda retenida la fibra de vidrio más grande (mayor de 3 cm), en el medio queda retenida la fibra deseada (entre 1 y 2 cm), y lo que pasa a través del segundo tamiz es lo que se considera micro polvo de fibra de vidrio (menor de 1 cm).

6.3. Caracterización de los productos obtenidos

Análisis termogravimétrico, TGA

Los perfiles termogravimétricos realizados a las muestras analizadas (Figura 12), muestran que la mayor parte de la degradación ocurre entre 300 °C y 450 °C para todas las muestras. Primero se ha analizado un trozo de fibra de vidrio reforzada presente en la pala antes de ser sometido al proceso de reciclado. De esta manera, se puede comparar con la fibra de vidrio recuperada en el proceso de reciclado. A 800 °C, el TGA muestra que el 62,3% de la muestra ha desaparecido correspondiendo a la resina, siendo el otro 37,7% fibra de vidrio. En la muestra de fibra de vidrio obtenida del reciclado, a 800 °C, arroja un resultado de que el 71,9% de la muestra corresponde a fibra de vidrio y el restante 28,1% es la resina. Por lo tanto, después del proceso de reciclado, la fibra de vidrio contendrá todavía algo de resina, habiéndose eliminado el 55% en el reciclado. Sin embargo, que la fibra de vidrio todavía contenga algo de resina no impide el uso de este producto en mezclas asfálticas. Por último, a 800 °C, solo el 12,5% de la muestra de madera de balsa queda de remanente, correspondiendo a cenizas de la madera.

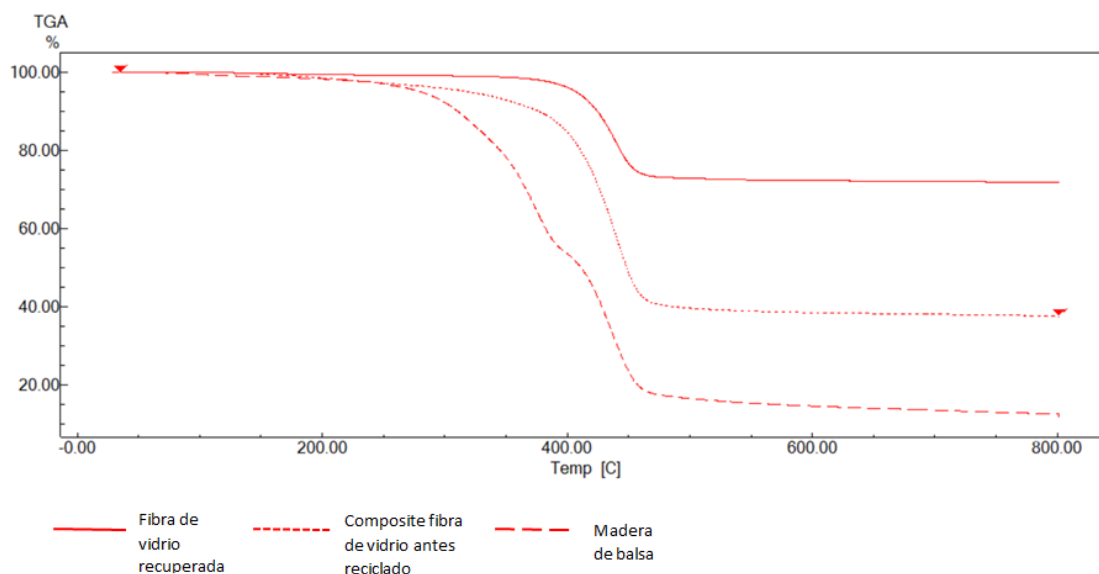


Figura 12. Perfil TGA de la fibra de vidrio y madera de balsa recuperada del reciclado y de un composite de fibra de vidrio de pala antes de su reciclado.

Microscopía electrónica de barrido, SEM.

Se ha realizado un microscopio electrónico de barrido a muestras de fibra de vidrio de varios tamaños obtenidas en el reciclado mecánico así como a una muestra de fibra de vidrio reforzada antes de ser sometida al proceso de reciclado. La Figura 13 muestra la imagen SEM de las fibras de vidrio reforzadas antes de ser sometidas al proceso de reciclado y madera de balsa. Se puede observar cómo las fibras de vidrio están entrelazadas entre sí con la matriz de resina, viéndose una gran cantidad de resina. En la Figura 14 se muestran las imágenes de la fibra de vidrio recuperada con un tamaño mayor de 3 cm. Se observa que estas fibras de vidrio son largas y están unidas entre sí por restos de resina formando haces de 1 mm de ancho aproximadamente. Las imágenes de la fibra de vidrio de tamaño deseado, menor de 2 cm, se muestra en la Figura 15. En este caso también se ven uniones de fibras de vidrio pero más estrechas, entre 0,2 y 0,4 mm, por lo que en este caso la cantidad de resina presente será menor que antes. La longitud en este caso es más corta, entre 1 y 3 cm. Por último, las imágenes de la fibra de vidrio considerada micro polvo se muestra en la Figura 16. En este caso, las fibras de vidrio están sueltas al no haber prácticamente resina que las una. Esto es debido a que al tener un tamaño más pequeño han tenido mayor fricción en el molino, eliminándose la resina. El tamaño medio de longitud de fibra en esta fracción es aproximadamente 1-2 mm.

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DE ALTO VALOR AÑADIDO CON FIBRA DE VIDRIO RECUPERADA MECÁNICAMENTE DE PALAS DE AEROGENERADOR EN DESUSO

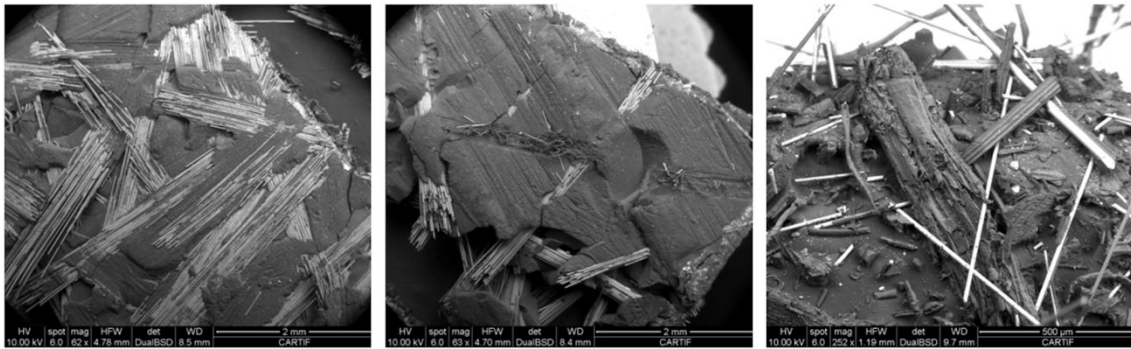


Figura 13. Imágenes de SEM de fibra de vidrio reforzada (lado superior: izquierda y lado interior: centro), y madera de balsa (derecha).

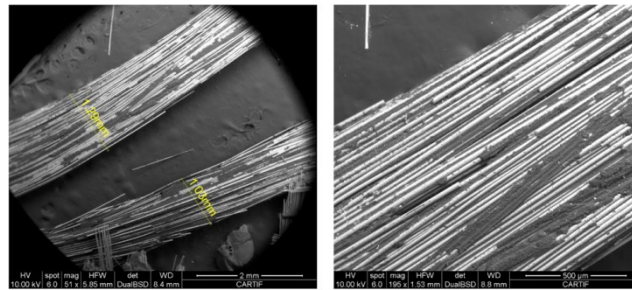


Figura 14. Imágenes de SEM de la fibra de vidrio recuperada de más de 3 cm.

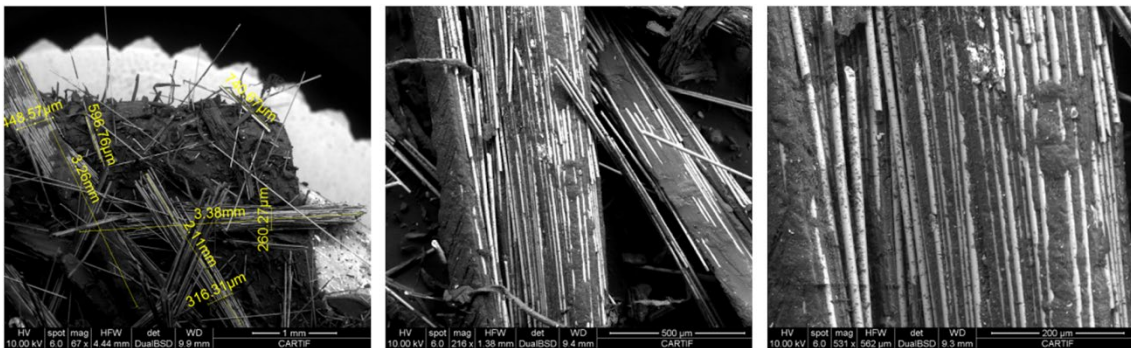


Figura 15. Imágenes de SEM de la fibra de vidrio recuperada de 2 cm.

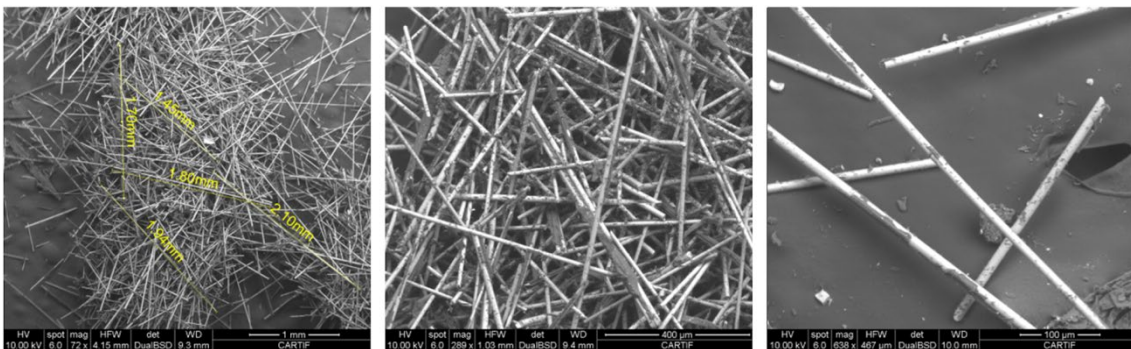


Figura 16. Imágenes de SEM de la fibra de vidrio de menos de 1 cm, micropolvo.

Calorimetría diferencial de barrido, DSC.

Los resultados obtenidos a través del DSC se muestran en la Figura 17. Se observa que las diferentes muestras de fibra de vidrio recuperadas (2 cm y micro polvo) tienen el mismo comportamiento entre ellas, y se ve un pico endotérmico a los 400 °C aproximadamente. Por otro lado, se observa que la madera de balsa muestra un pico exotérmico a 325 °C. Es por ello que queda demostrado que no hay madera de balsa presente en las fibras de vidrio recuperadas.

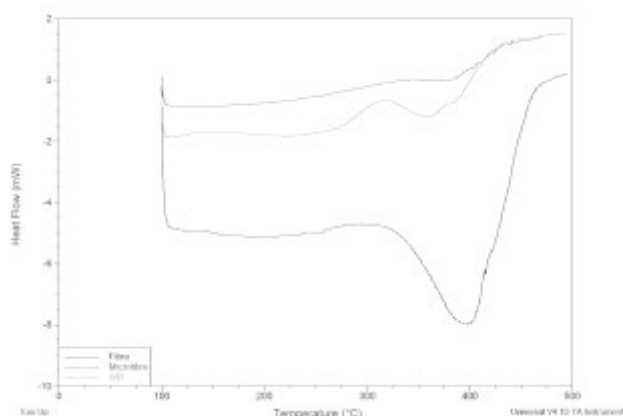


Figura 17. Curva DSC de la fibra de vidrio recuperada de 2 cm, de micro polvo de fibra de vidrio y de madera de balsa.

6.4. Uso de la fibra de vidrio recuperada en mezclas asfálticas

Se han estudiado diversas fórmulas de trabajo, variando la combinación de betún asfáltico, áridos con granulometría continua, polvo mineral y fibra de vidrio recuperada de las palas de aerogenerador, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Se ha realizado un amplio estudio basándonos en el método volumétrico y analizando los parámetros y características obtenidos para un amplio rango de variación de varios de los componentes (tamaño de fibra, porcentaje de fibra, porcentaje de betún). A las diversas fórmulas de trabajo, se les ha realizado sus correspondientes grupos de probetas para la caracterización de sus propiedades bajo la Normativa española aplicable (Artículos 542 y 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes, PG-3. Ministerio de Fomento (2015)) para las mezclas bituminosas, así como, para la aplicación de las especificaciones técnicas fijadas por la Junta de Castilla y León. Las características evaluadas en las mezclas diseñadas se han determinado mediante la realización de los siguientes ensayos: Ensayo Marshall (NLT-159), Contenido de ligante (UNE-EN 12697-39) y sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12). Por tanto, gracias a esta caracterización, la cual ha permitido conocer el comportamiento entre las materias primas tradicionales que componen las mezclas bituminosas y la fibra de vidrio añadida, se acota a un máximo de un 1% el porcentaje de fibras de vidrio a introducir, con un tamaño inferior a 2 cm.

Con la fórmula de trabajo ya optimizada, se construye un tramo demostrador de carretera de 1500 metros de largo y 8 metros de ancho para probar el resultado final del proyecto (12.000

m²). El tramo demostrador está dividido en 5 secciones diferentes de 300 metros de longitud cada una, y a las que se han agregado diferentes cantidades de fibra de vidrio para comparar los resultados entre ellas (0%, 0,50%, 0,75%, 0,85% y 1%). Estas fibras de vidrio han sido agregadas a la mezcla en el proceso de fabricación de aglomerado asfáltico cuando los áridos ya se han clasificado y dosificado de acuerdo con la fórmula de trabajo optimizada y antes de mezclarlos con el betún. El tramo es el que discurre entre los p.k. 0+440 al 1+940 de la carretera ZA-705, que une la A11 con la entrada a la localidad de Toro.

Este tramo demostrador de carretera ha sido monitorizado durante un año con la finalidad de comprobar y verificar el comportamiento del mismo con respecto del tramo de referencia construido sin adición de fibra de vidrio. Se realizan inspecciones visuales dos veces al mes para evaluar el estado del tramo demostrador y detectar posibles patologías fundamentalmente causadas por el envejecimiento de la mezcla. Se realiza la extracción de testigos para la determinación de su densidad y espesor a través de la Norma UNE-EN 12697-6, de esta manera, la pérdida de espesor o de densidad indicará una posible deficiencia a analizar en función del resto de características. También se realizan ensayos Marshall, incluyendo la fabricación de tres probetas, determinando la densidad, estabilidad, deformación y cálculo de huecos según Normativa NLT-15-168 para evaluar la capacidad portante (rigidez), resistencia a la deformación y resiliencia. Otro ensayo realizado es el método del círculo de arena (UNE-13036-1) con una frecuencia trimestral para caracterizar la resistencia al deslizamiento (mayor o menor facilidad de evacuación de agua) y la resistencia a la desagregación (durabilidad). Trimestralmente también se evalúa la permeabilidad "in situ" (NLT-327) para comprobar la durabilidad (menor afección por el agua). Además se realizan ensayos de Inmersión-Compresión (NLT-162) para evaluar la durabilidad (resistencia a la acción del agua), y un ensayo de rodadura según la Normativa UNE-EN 12697-22 para evaluar la resistencia a las deformaciones plásticas. Por último, otros ensayos realizados son resistencia a la fatiga a través de la Metodología BCN, el índice de rigidez a través de un ensayo Fénix y el Módulo de resiliencia a través de la Metodología BCN.

Por otra parte, otra de las características previstas a analizar son las posibles mejoras a nivel acústico que se pudieran obtener con el nuevo material. La emisión sonora de una carretera depende de varios factores variables, como el número o el tipo de vehículos de tránsito, incluso la forma de conducción, pero el factor objetivo de mayor contribución a ciertas velocidades es el ruido de rodadura. Para ello, se han realizado mediciones "in situ" de los niveles sonoros producidos al paso de un vehículo tipo por los distintos tramos de pavimento en estudio, comparándolos con los obtenidos en el tramo con el pavimento en el que no se utilicen los materiales compuestos de residuos que pudieran aportar características fonoabsorbentes. Este tipo de medición puede permitir evaluar el ruido debido al contacto entre el neumático y la superficie de la carretera a una distancia lejana, de esta forma además de valorar la generación se valora la propagación acústica. Todo ello bajo normativas UNE-EN ISO 11819-2:2017 y UNE-ISO 1996 partes 1, 2 y 3.

7. DISCUSIÓN

Dentro del presente trabajo desarrollado en el proyecto LIFE REFIBRE, se ha conseguido diseñar y construir un prototipo para llevar a cabo el reciclado de las palas de aerogenerador fuera de uso. Una vez se ha construido el prototipo de reciclado mecánico diseñado, se procede a su

puesta a punto y optimización para lograr conseguir obtener la mayor cantidad de fibra posible de un tamaño menor de 2 cm consiguiendo un 59% de rendimiento y 16 toneladas de fibra de vidrio.

La fibra de vidrio recuperada del interior de las palas es caracterizada (Shuaib, 2016) a través de diversos análisis, mostrando todos ellos los mismos resultados. Según el TGA, los resultados obtenidos se corresponden con los de Mamanpush (2018), la fibra de vidrio reforzada presente en las palas contiene un 62,3% de resina y el restante 37,7% es fibra de vidrio. Lo mismo ocurre a través del SEM, donde se puede observar cómo la fibra de vidrio reforzada antes del reciclado contiene gran cantidad de resina, y las fibras de vidrio están entrelazadas entre sí. Una vez se procede a su reciclado mecánico, parte de esa resina se va eliminando con la fricción sufrida en el molino de cuchillas, consiguiendo eliminar un 55% de la resina presente en la fibra de vidrio. Este hecho también se observa en el SEM, a menor tamaño de fibra, menor cantidad de resina hay presente de acuerdo con Beauson (2016), ya que a mayor fricción en el molino de cuchillas para conseguir una fibra más corta, más resina se va eliminando. Aun así, hay que añadir que la presencia de resina en la fibra de vidrio no implica ningún problema para el uso elegido en mezclas de aglomerado asfáltico. Por último, también se corrobora que no hay madera de balsa presente en la corriente de fibra de vidrio recuperada. En este caso, la introducción de madera de balsa en mezclas asfálticas sí que causaría problemas, por lo cual es muy importante su eliminación previa. Por último, a través del DSC se obtienen las mismas conclusiones, observándose el mismo comportamiento para las muestras de fibra de vidrio recuperada a diferentes tamaños, sin observar la presencia de madera de balsa en su interior.

Una vez se tiene disponible la fibra de vidrio recuperada de las palas de aerogenerador, a través de las diferentes fórmulas de trabajo estudiadas y ensayadas para la realización de mezclas bituminosas, se elige la óptima en base a los requisitos técnicos de asfaltado según la Normativa Española así como las especificaciones técnicas que ha fijado la Junta de Castilla y León. Por ello, no se puede superar la introducción de fibra de vidrio en un 1%, ni un tamaño superior a 2 cm. Con esta fórmula de trabajo optimizada, se construye un tramo demostrador de carretera de 1500 metros de largo y 8 metros de ancho. El tramo demostrador está dividido en 5 secciones diferentes de 300 metros de longitud cada una, y a las que se han agregado diferentes cantidades de fibra de vidrio para comparar los resultados entre ellas (0%, 0,50%, 0,75%, 0,85% y 1%). Con la introducción de esta fibra de vidrio en la carretera, además de conseguir valorizar un residuo que actualmente va a vertedero (palas de aerogenerador), y recuperar la fibra de vidrio de su interior para darla un segundo uso de gran valor añadido, se consiguen mejorar una serie de propiedades mecánicas del pavimento. La comparación de los diferentes porcentajes de fibra de vidrio añadida, arroja en todos ellos resultados positivos frente al tramo 0, obteniendo los mejores resultados en tramo con mayor porcentaje de fibra de vidrio (1%). De acuerdo con Lee (2005), se mejora la trabajabilidad de la mezcla al añadir las fibras de vidrio recuperadas, consiguiendo para unos mismos medios y energías de compactación, unas mayores densidades de la muestra, lo que redundará en mejores cualidades mecánicas y por tanto, en una mayor durabilidad de la muestra al tener menos agrietamientos y una menor pérdida de resistencia y agrietamiento por fatiga. Por otro lado, se consigue aumentar la resistencia a la deformación en un 23,5%, mejorar la resiliencia en un 5,5%, aumentar la resistencia a la fatiga en un 12,2% e incrementar la rigidez un 16,6%. Además, también se ha notado una mayor resistencia de la carretera a temperaturas extremas así como una mejora en sus cualidad acústicas. Todo esto está en línea con lo estudiado por Chen (2004), Chen (2009), Putman (2004) y Wu (2007).

Además, gracias a la utilización de la fibra de vidrio recuperada como materia prima en el tramo demostrador de carretera de 1.500 metros, se ha conseguido evitar la emisión de 97 toneladas de CO₂ equivalente (en el caso de la comparación con la disposición final de las palas de aerogenerador en vertedero) y 131 toneladas de CO₂ equivalente (si este escenario se compara con la incineración de las palas de aerogenerador).

8. CONCLUSIONES

Dentro del proyecto LIFE REFIBRE, se ha hecho acopio de 12 palas de aerogenerador fuera de uso que suponen 40,2 toneladas evitadas de enviarse a vertedero, logrando demostrar su reciclado mecánico a través del prototipo diseñado y construido específicamente para ello, siendo la mejor opción (técnica, económica y ambientalmente más favorable) para poder recuperar la fibra de vidrio presente en su interior. Este prototipo de 100 kg/h consta de un molino de martillos para romper la estructura de la pala y una mesa vibratoria para separar estos componentes por tipo y por tamaño. El rendimiento de la fibra de vidrio recuperada es del 59%, logrando conseguir 16 toneladas de fibra de vidrio separada del resto de materiales con un tamaño menor de 2 cm, demostrando a escala preindustrial la eficiencia y efectividad del proceso de reciclado. Se ha caracterizado esta fibra de vidrio comprobando que se ha eliminado parte de la resina por la que estaba formada, no importando su presencia debido a que no es crítica su introducción en pavimentos asfálticos. En cambio, no puede haber madera de balsa, cumpliendo perfectamente con este requisito.

También se han estudiado diferentes dosificaciones de fibra de vidrio en la formulación asfáltica para que cumplan con los requisitos técnicos mínimos necesarios según el reglamento asfáltico, introduciendo la fibra de un tramo demostrador de carretera de 1500 metros, consiguiendo unas mejoras mecánicas de este pavimento asfáltico.

Se ha conseguido cerrar el ciclo de vida de los residuos de palas de aerogenerador, consiguiendo una economía circular recuperando la fibra de vidrio de las palas, la cual es válida para su introducción y mejora de carreteras. Además, hay que señalar la alta replicabilidad del proyecto, lo cual evitará cantidades importantes de fibras de vidrio enviadas a vertedero, aportándoles a las mismas un segundo ciclo de vida, siendo los resultados fácilmente extrapolables al resto de España y otros países europeos, debido a la extensa red de carreteras existente en toda Europa, así como al elevado número de parque eólicos existentes.

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la confianza y el apoyo económico del Instrumento Financiero LIFE de la Unión Europea mediante la financiación del Proyecto LIFE REFIBRE (LIFE16 ENV/ES/000192).

Los autores agradecen a General Electric, EDP y Gamesa por proporcionar palas de aerogenerador fuera de uso para este trabajo.

Por último, los autores quieren agradecer a la Junta de Castilla y León la cesión de un tramo de carretera para la fabricación del tramo demostrador.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Alaskar, A., Alabduljabbar, H., Mohamed, A. M., Alrshoudi, F., & Alyousef, R. (2021). *Abrasion and skid resistance of concrete containing waste polypropylene fibers and palm oil fuel ash as pavement material*. *Construction and Building Materials*, 282, 122681.
- Ali, B., Qureshi, L. A., Shah, S. H. A., Rehman, S. U., Hussain, I., & Iqbal, M. (2020). *A step towards durable, ductile and sustainable concrete: Simultaneous incorporation of recycled aggregates, glass fiber and fly ash*. *Construction and Building Materials*, 251, 118980.
- Al-Hadidy, A. I., & Yi-qiu, T. (2009). *Effect of polyethylene on life of flexible pavements*. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1456-1464.
- Andersen, P. D., Bonou, A., Beauson, J., & Brøndsted, P. (2014). *Recycling of wind turbines*. DTU International Energy Report, 2014, 92-7.
- Asociación Empresarial Eólica. *Anuario Eólico 19. Toda la información del sector en el año 2018*. (2019) [Archivo PDF] <https://www.aeeolica.org/aee-anuario-2019> (Accessed November 2020)
- Beauson, J., Madsen, B., Toncelli, C., Brøndsted, P., & Bech, J. I. (2016). *Recycling of shredded composites from wind turbine blades in new thermoset polymer composites*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 390-399.
- Chen, H. X., Li, N. L., Hu, C. S., & Zhang, Z. (2004). *Mechanical performance of fibers-reinforced asphalt mixture*. *J Chan Univ (Nat Sci Ed)*, 24(2), 1-5.
- Chen, H., Xu, Q., Chen, S., & Zhang, Z. (2009). *Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures*. *Materials & Design*, 30(7), 2595-2603.
- Chen, J., Wang, Q., Shen, W. Z., Pang, X., Li, S., & Guo, X. (2013). *Structural optimization study of composite wind turbine blade*. *Materials & Design*, 46, 247-255.
- Cherrington, R., Goodship, V., Meredith, J., Wood, B. M., Coles, S. R., Vuillaume, A., ... & Kirwan, K. (2012). *Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe*. *Energy policy*, 47, 13-21.
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2018). *Application of waste materials as fillers in bituminous mixes*. *Waste Management*, 78, 417-425.
- Elizondo-Martínez, E. J., Andrés-Valeri, V. C., Jato-Espino, D., & Rodríguez-Hernandez, J. (2020). *Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement*. *Journal of Building Engineering*, 27, 100967.
- Franco, J. A. (17 de diciembre de 2019) *Mantenimiento de parques eólicos y gestión de residuos* [Ponencia]. Taller LIFE REFIBRE – Evolución, tratamiento y gestión de los residuos de parques eólicos. Altertec Renovables

- Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2018. (2019) [Archivo PDF]. <https://gwec.net/global-wind-report-2018/> (Accessed November 2020)*
- Hussain, I., Ali, B., Akhtar, T., Jameel, M. S., & Raza, S. S. (2020). *Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene)*. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00429.
- Lee, S. J., Rust, J. P., Hamouda, H., Kim, Y. R., & Borden, R. H. (2005). *Fatigue cracking resistance of fiber-reinforced asphalt concrete*. *Textile Research Journal*, 75(2), 123-128.
- Liu, Y., Meng, L., Huang, Y., Du J. (2004) *Recycling of Carbon/Epoxy Composites*. *Journal of Applied Polymer Science*, 94(5), 1912-1916
- Liu, P., & Barlow, C. Y. (2017). *Wind turbine blade waste in 2050*. *Waste Management*, 62, 229-240.
- Mahrez, A., Karim, M., & Katman, H. (2003). *Prospect of using glass fiber reinforced bituminous mixes*. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 794-807.
- Mantoux, O., Lorriot, T., Chibalon, L., Aurrekoetxea, J., Puerto, A., Arostegi, A., & Urrutibiascoa, I. (2004). *Recycling study of end of life products made of ABS resin*. *Journal of Materials and Science & Technology*, 20, 125-128
- Mantoux, O., Aymonier, C., & Antal, M. (2009). *Recycling of carbon fibre reinforced composite materials with supercritical water dissolution*. 16èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC 16), Toulouse (France)
- Mamanpush, S. H., Li, H., Englund, K., & Tabatabaei, A. T. (2018). *Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites*. *Waste management*, 76, 708-714
- Oliveux, G., Bailleul, J. L., & La Salle, E. L. G. (2012). *Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 1809-1818
- Papadakis, N., Ramírez, C., & Reynolds, N. (2010). *Designing composite wind turbine blades for disposal, recycling or reuse*. *Management, recycling and reuse of waste composites* (pp. 443-457). Woodhead Publishing.
- Patel, S. K., & Singh, B. (2017). *Experimental investigation on the behaviour of glass fibre-reinforced cohesive soil for application as pavement subgrade material*. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3(2), 13.
- Pickering, S. J. (2006). *Recycling technologies for thermoset composite materials—current status*. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 37(8), 1206-1215
- Pimenta, S., & Pinho, S. T. (2011). *Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook*. *Waste management*, 31(2), 378-392

- Putman, B. J., & Amirkhanian, S. N. (2004). *Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures*. Resources, conservation and recycling, 42(3), 265-274.
- Rabab'ah, S., Al Hattamleh, O., Aldeeky, H., & Alfoul, B. A. (2021). *Effect of glass fiber on the properties of expansive soil and its utilization as subgrade reinforcement in pavement applications*. Case Studies in Construction Materials, 14, e00485
- Shuaib, N. A., & Mativenga, P. T. (2016). *Effect of process parameters on mechanical recycling of glass fibre thermoset composites*. Procedia Cirp, 48, 134-139.
- Sikdar, S. K. (2003). *Sustainable development and sustainability metrics*. AIChE journal, 49(8), 1928-1932
- Vishnuvardhan, K., Rajkumar, R., Ganesh, V. N., & Santhosh, J. C. (2020). *An experimental performance evaluation of Flex Banner and polypropylene fibre reinforced bituminous mixes*. Materials Today: Proceedings.
- Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth* (Vol. 9). New society publishers.
- Wind Europe. *Wind energy in Europe in 2018. Trends and statistics*. (2019) [Archivo PDF]. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf> (Accessed November 2020)
- Wu, S., Ye, Q., Li, N., & Yue, H. (2007). *Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 22(4), 733-736.
- Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D. J., Kuiper, P., & de Wit, H. (2012). *Recycling of composite materials*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 51, 53-68