



## **CARACTERIZACIÓN E IDONEIDAD DE LA UTILIZACIÓN DE TRITURADO DE PALAS DE AEROGENERADOR EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN**

MANSO-MORATO, J. (1), HURTADO-ALONSO, N. (2), REVILLA-CUESTA, V. (1), SKAF, M. (2), ORTEGA-LÓPEZ, V. (1), MANSO, J.M. (1)

(1) Departamento de ingeniería civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Burgos, España.

(2) Departamento de construcciones arquitectónicas e ingeniería de la construcción y del terreno, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Burgos, España.

### **Abstract**

Muchos de los primeros aerogeneradores están acercándose al final de su vida útil. Así, sus palas deben ser desmanteladas, necesitando soluciones para su reciclaje innovadoras, por los materiales que la componen. Esta solución aborda su tratamiento mediante corte y machaqueo, generando así Triturado de Pala de Aerogenerador (TPA), válido para su incorporación en hormigón. Se realizó un diseño del hormigón específico para contenidos de TPA de hasta el 6% vol., para asegurar su adecuado comportamiento. Además, se desarrolló un proceso de mezcla con 5 etapas con correcciones de plastificante según el porcentaje de residuo añadido. Al añadir TPA al hormigón se obtuvieron mejores resultados en capacidad portante, aunque se produjo una leve disminución en resistencia a compresión. Este enfoque ofrece una solución válida para el reciclaje de palas de aerogeneradores.

### **1. Introducción**

Debido al envejecimiento de los aerogeneradores y desmantelamiento de parques eólicos en los próximos años, el sector eólico debe priorizar el complicado reciclaje de las palas de estos aerogeneradores, haciendo que dicho reciclaje lleve siendo estudiado durante años, pero sin una solución comúnmente aceptada [1].

El tratamiento propuesto aborda el triturado no selectivo de las palas para su incorporación en el hormigón, que produce el residuo denominado por los autores como Triturado Pala de Aerogenerador (TPA). La composición tan variada [2] de estas palas contiene varias fracciones que pueden reemplazar a los áridos naturales y otras que podrían funcionar como fibras recicladas, recuperando y dando utilidad a las palas desmanteladas y mejorando la sostenibilidad del hormigón y su capacidad portante, gracias a las fibras. El objetivo final es definir si esta solución planteada para la recuperación de las palas de aerogeneradores es factible en cuanto al comportamiento (en fresco y endurecido) del propio hormigón, para después avanzar hacia un estudio más detallado del material y su comportamiento en compresión en conjunto con el hormigón.

## 2. Materias primas sostenibles del hormigón

España se encuentra en la quinta posición mundial en productores de energía eólica y fue pionera en la instalación de aerogeneradores en 1998 [3]. La vida útil de una turbina eólica es de aproximadamente 25 años, por lo que muchos aerogeneradores han de ser desmantelados en los años venideros.

Por lo tanto, el enfoque de este estudio es procesar las palas de los aerogeneradores mediante corte no selectivo y machaqueo, rápido y estandarizable, frente a otros procesos. El residuo obtenido, conocido como Triturado de Pala de Aerogenerador (TPA), es una mezcla integral de los componentes de cada pala, compuesta por fibras de carbono o de vidrio, madera de balsa, plásticos y resinas. Además, las palas incorporan un revestimiento exterior de resina [2] y, en algunos casos, se utilizan rigidizadores de PVC [2], como se puede apreciar en la **Figura 1**.

El proceso consistió en realizar cortes regulares de los paneles sándwich para obtener fragmentos cuadrados de entre 20–30 cm de lado, un primer machacado y tamizado para obtener fragmentos de entre 5–15 mm de tamaño y un segundo machacado y tamizado para tamaño máximo del TPA de 10 mm (**Figura 1**). Todas las características obtenidas se pueden ver en la **Tabla 1**, donde se estudia la idoneidad de este material a la producción de hormigón siguiendo las normas EN-1097-6 y EN 1097-3 [4,5]. La caracterización física del TPA determinó que se puede utilizar en el hormigón como fibras o áridos, debido a la existencia de fibras y microfibras en conjunto con partículas de menor tamaño.

**Tabla 1: Propiedades del TPA**

	Densidad saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Composición (% wt.)	Longitud (mm)	Diámetro equivalente (mm)
<b>Conjunto</b>	1630±30	246,64±12,20	-	-	-
<b>Fibras</b>					
<b>Poliuretano</b>	2040±50 *	-	66,8±3,1	13,07±4,66	0,73±0,14
<b>Madera de balsa</b>	330±20	-	8,3±0,3	-	-
<b>Microfibras</b>	-	-	6,3±0,2	-	-
<b>Partículas pequeñas no separables</b>	-	-	13,8±0,5	-	-
			4,8±0,4	-	-

\* Densidad medida en ambos componentes, fibras y poliuretano, en conjunto.

## 3. Método experimental

En primer lugar, se diseñó una mezcla sin contenido de TPA, denominada con la letra R (*Referencia*). Además, se diseñaron dos hormigones diferentes con dos contenidos distintos de TPA: 1,5% en volumen, denominando la mezcla elaborada con este contenido como L (*Low*, “bajo” en inglés) y 6,0% en volumen, denominando a la mezcla correspondiente como H (*High*, “alto” en inglés). Las dosificaciones de las tres mezclas se pueden ver en la **Tabla 2**.



Figura 1: Pala de aerogenerador: Sección genérica con identificación de componentes; Materiales resultantes de la trituración de la pala de aerogenerador (TPA); Componentes separados del TPA.

Tabla 2: Dosificación de las mezclas de los hormigones.

DOSIFICACIÓN (kg/m <sup>3</sup> )	Dosificación ajustada			Dosificación para 1 m <sup>3</sup>		
	R	L	H	R	L	H
CEM II/A-L 42,5 R	320	320	320	318	312	295
Agua	128	133	146	127	129	134
Plastificante 1	2.20	2.62	3.88	2.19	2.56	3.57
Plastificante 2	1.10	1.31	1.94	1.09	1.28	1.79
Arena 0/2 mm	500	500	500	497	488	461
Grava fina 2/6 mm	600	600	600	597	585	553
Grava gruesa 6/22 mm	900	900	900	895	878	829
Triturado de Pala de Aerogenerador	0.0	24.5	98.0	0.0	24.0	90.0
Volumen (litros)	1005	1025	1086	1000	1000	1000

Se adoptó un proceso de mezcla en 5 fases (Figura 2), donde se puede observar cómo se separó la mezcla según los áridos, agua, el cemento, los plastificantes y el TPA. Se adaptó el contenido de plastificantes y agua para obtener valores de asentamiento S3 (100-150 mm), habituales en usos estructurales.

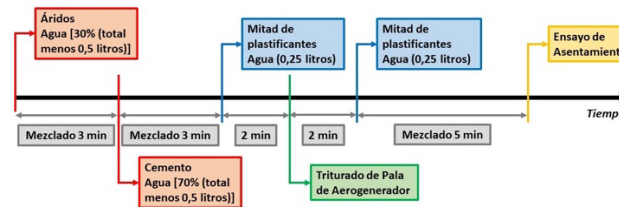


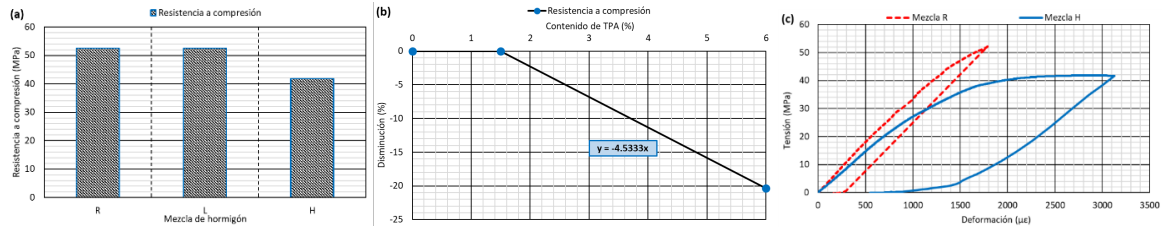
Figura 2. Proceso de mezcla en 5 fases.

#### 4. Resultados y discusión

Se realizaron tres probetas cilíndricas de 10 cm de radio y 20 cm de altura de cada una de las mezclas, ensayadas a compresión a 28 días de acuerdo con la norma EN 12390-3 [6].

La mezcla R tuvo una resistencia a compresión de 52,5 MPa, muy parecida a la de la mezcla L (Figura 3a). En la mezcla H, se produjo una pérdida de resistencia del 20,4%, que pudo ser producido por una relación agua/cemento más alta (0,45). Se puede observar la pérdida de resistencia a compresión respecto al contenido de TPA en la Figura 3b. Respecto a la deformabilidad bajo compresión (Figura 3c), se puede ver como la deformabilidad aumentó y, a la vez, la capacidad portante del hormigón. De esta forma, se ve

que las fibras y microfibras consiguieron mantener unida la matriz cementicia incluso tras su rotura, permitiendo así que el hormigón siguiese resistiendo cargas después de su fallo.



**Figura 3: Comportamiento del hormigón en estado endurecido: (a) valores de resistencia a compresión, (b) tendencia de evolución de la resistencia a compresión, (c) curvas de tensión - deformación bajo compresión.**

## 5. Conclusiones

Actualmente, hay una necesidad imperiosa de encontrar una solución para el reciclaje de las palas de aerogenerador que llegan al final de su vida útil. Las conclusiones de todo lo expuesto son las siguientes:

- Se requiere de un proceso de mezcla específico, habiendo sido desarrollado en este estudio en 5 fases, para poder asegurar la homogeneidad y la trabajabilidad en fresco necesaria requerida en la práctica habitual para poder añadir el TPA tras el corte no selectivo en el propio hormigón.
- La resistencia a compresión no se vio reducida con contenidos bajos de TPA, pero se vio disminuida en 4,53% por cada 1% de TPA que se añade a la mezcla para contenidos más altos. La deformabilidad y la capacidad portante del hormigón aumentaron, debido al cosido de la matriz cementicia por parte del TPA, produciendo además hormigones más sostenibles.

Por lo tanto, la incorporación del TPA a la mezcla del hormigón es beneficioso para la capacidad portante del mismo, asegurando su trabajabilidad necesaria y la resistencia a compresión requerida. Además, la sostenibilidad asociada al reciclaje de las palas de aerogeneradores resulta aplicable tanto al mundo del hormigón como al sector eólico.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo de Investigación fue financiado por el Ministerio de Universidades, MICINN, AEI, UE, FEDER y NextGenerationEU/PRTR [PID2020-113837RB-I00; 10.13039/501100011033; TED2021-129715B-I00; FPU21/04364]; la Junta de Castilla y León y FEDER [UIC-231; BU066-22]; y, finalmente, la Universidad de Burgos [SUCONS, Y135.GI].



## 7. Referencias

- [1] M.J. Leon, Recycling of wind turbine blades: Recent developments, *Curr Opin Green Sustain Chem.* 39 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100746>.
- [2] [J. Joustra, B. Flipsen, R. Balkenende, Structural reuse of wind turbine blades through segmentation, *Composites Part C: Open Access.* 5 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100137>.
- [3] [World Wind Energy Association, WWEA, 2022. Statistics for the Global wind-energy sector
- [4] [EU Euronorm, UNE-EN 1097-3: 1998. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad, Rue de Stassart, 36. Belgium-1050 Brussels, 1998.
- [5] [EU Euronorm, UNE-EN: 1097-6:2014. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos Parte 6.: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua , Rue de Stassart, 36. Belgium-1050 Brussels, 2014.
- [6] [EU Euronorm, UNE-EN 12390-3:2020. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas., Rue de Stassart, 36. Belgium-1050 Brussels, 2020.