

HORMIGÓN SOSTENIBLE CON ALTOS PORCENTAJES DE TRITURADO DE PALA DE AEROGENERADOR

JAVIER MANSO-MORATO¹, NEREA HURTADO-ALONSO², VÍCTOR REVILLA-CUESTA¹,
VANESA ORTEGA-LÓPEZ¹

*¹Departamento de Ingeniería Civil,
Universidad de Burgos, 09001, España*

*²Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la
Construcción y del Terreno,
Universidad de Burgos, 09001, España*

Resumen

Una gran cantidad de aerogeneradores tendrán que ser desmantelados y reemplazados en un corto periodo de tiempo, debido a que se están acercando al final de su vida útil. Estos aerogeneradores, en especial sus palas, tendrán que ser reciclados, para evitar los importantes problemas medioambientales que conlleva su transporte a vertedero. Sin embargo, los métodos actuales de reciclaje se postulan como altamente demandantes, tanto económica como medioambientalmente. Por lo tanto, en la presente investigación se estudia la idoneidad de añadir al hormigón triturado de las palas de aerogenerador (TPA), para así poder favorecer la sostenibilidad de los parques eólicos españoles, a la vez que emplear este residuo para fabricar hormigón reforzado con fibras (HRF) con menor contaminación asociada, pero manteniendo sus características mecánicas. Debido al gran número de palas de aerogenerador que hay que reciclar, se propone la incorporación del TPA en altos porcentajes (0%, 5% y 10% en volumen como adición al cemento de la mezcla) en el hormigón, favoreciendo así su reciclaje continuo. Los resultados de la presente investigación resaltaron la necesidad de ajustar la cantidad de agua y plastificantes para asegurar una correcta trabajabilidad en fresco de las mezclas, lo cual se pudo observar en el descenso de la densidad en fresco de la mezcla y el aumento del contenido de aire ocluido a medida que aumentó el porcentaje de TPA. Sin embargo, de cara al comportamiento a compresión de las mezclas, los resultados de los ensayos realizados a 7 y 28 días permitieron dilucidar la sobrada capacidad mecánica de todas las mezclas para su uso estructural. Por lo tanto, la campaña experimental de la presente investigación dejó ver que se pueden incorporar altos porcentajes de TPA al hormigón, manteniendo las características necesarias tanto en estado fresco como endurecido para su uso en cualquier aplicación posible, siendo así una solución real, aplicable y efectiva

para los problemas de sostenibilidad del sector tanto de la construcción y del hormigón como del sector eólico y del reciclaje.

Palabras clave: Sostenibilidad, Hormigón Reforzado con Fibras (HRF), alto porcentaje de Triturado de Palas de Aerogenerador (TPA), comportamiento en fresco, resistencia a compresión.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales más usados a nivel mundial. Su gran habilidad para adaptarse a cualquier requerimiento estructural y/o estético le permite ser de gran utilidad, que junto con sus importantes capacidades mecánicas lo convierten en un material con el que es posible construir cualquier tipo de elemento [1]. Además, el hormigón con sus diferentes variedades puede solucionar disyuntivas diversas. El hormigón en masa se utiliza cuando se necesitan grandes volúmenes de este material sometido a altas cargas compresivas y muy bajas flexotensiones, como en pavimentos, cimentaciones, muros o presas [2,3]. Sin embargo, este hormigón se puede reforzar de varias maneras, ya sea mediante armaduras de acero para obtener hormigón armado y resistir cargas de flexotracción [4], o añadiendo fibras para crear un refuerzo tridimensional homogéneamente distribuido por toda la masa del elemento a fabricar, obteniendo hormigón reforzado con fibras (HRF) [5].

Estas fibras pueden ser de muy diversos orígenes, dependiendo su elección de los requerimientos que tenga el elemento a reforzar [6]. Sus funciones principales son las de mejorar el comportamiento frente a la flexotracción, ya que cosen la matriz cementicia evitando la creación y propagación de fisuras, y ayudar a reducir los efectos de la retracción en el hormigón, reteniendo el acortamiento de la matriz cementicia al evaporarse el agua tras el fraguado [7,8]. Sin embargo, estas fibras también tienen ciertos aspectos negativos, ya que su implementación dentro de la masa de hormigón tiene un impacto negativo respecto a la trabajabilidad en estado fresco y, por lo tanto, su puesta en obra [9].

Las líneas actuales de investigación procuran mejorar lo más posible las características mecánicas del hormigón al añadirse fibras, y sin que resulten determinantes para su comportamiento en estado fresco [10]. Hay gran variedad de fibras que ya han sido estudiadas durante largos periodos de tiempo y en gran detalle, como pueden ser las fibras metálicas, poliméricas, de vidrio, de carbono o algunos tipos de fibras naturales [6]. Por otro lado, hay nuevas líneas de investigación que se basan en el uso de fibras recicladas y sostenibles, las cuales buscan mejorar la sostenibilidad del HRF. Estas fibras pueden provenir de distintos plásticos o metales [11,12], o de palas de aerogenerador desmanteladas [9,13], las cuales serán empleadas y estudiadas en el presente documento.

El triturado de pala de aerogenerador (TPA) procede de palas de aerogeneradores que han sido desmanteladas debido a la finalización de su vida útil [14]. La gran cantidad de turbinas que hay que reciclar, alrededor de 2500 antes de 2029 en España, en gran cantidad de parques eólicos está creando la necesidad imperante de encontrar formas para reciclar sus palas [15]. Estas palas de aerogenerador estas compuestas por una mezcla de fibras de carbono o vidrio con resinas poliméricas, madera de balsa y elementos poliméricos, que crean un compuesto difícil de tratar y reciclar [16].

En el presente artículo, se versa sobre la incorporación de altos porcentajes de TPA (0%, 5% y 10% en volumen), el cual presenta un elevado contenido de fibras, procedentes de palas de aerogenerador en las mezclas de hormigón, para intentar reciclarlas en tiempo y cantidad adecuadas, y manteniendo la cantidad de cemento constante entre todas las mezclas. De esta forma, se procederá a hacer una descripción de los materiales y métodos usados (**Sección 2**), seguido de los resultados en estado fresco respecto al asiento, densidad y porcentaje de aire ocluido (**Sección 3.1**) y ensayos en estado endurecido de resistencia a compresión (**Sección 3.2**).

Por lo tanto, en esta línea de investigación se pretende evaluar la posibilidad e idoneidad de la incorporación de cantidades elevada de TPA en el hormigón [4], para así poder convertirse en una opción realista y sostenible de cara al reciclaje de los parques eólicos en conjunto con la industria constructora. De esta forma, se podrán obtener grandes avances hacia una economía más verde y circular.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materias primas

En esta investigación se utilizó cemento CEM II/A-L 42.5 R (EN 197-1 [17]), áridos silíceos y calizos, agua y dos aditivos plastificantes diferentes para poder asegurar un correcto comportamiento en fresco, además de TPA. Los áridos silíceos fueron de los tamaños 12/22 mm, 4/12 mm y 0/4 mm, mientras que los áridos calizos fueron de tamaño 0/2 mm.

El TPA es denominado así por su proceso de obtención [13]. Para su producción, palas de aerogenerador de diferentes tamaños que han sido desmanteladas de los parques eólicos debido a que han alcanzado el final de su vida útil, se cortan en formas regulares, como se puede observar en la Figura 1. Después, se introducen estas piezas en un molino de cuchillas para realizar un corte no selectivo, el cual da lugar a un conjunto de fibras de distintos tamaños mezcladas con otros elementos. Este residuo fue añadido a las mezclas de hormigón manteniendo la cantidad de cemento constante, mientras que este residuo se añadió en porcentajes crecientes.

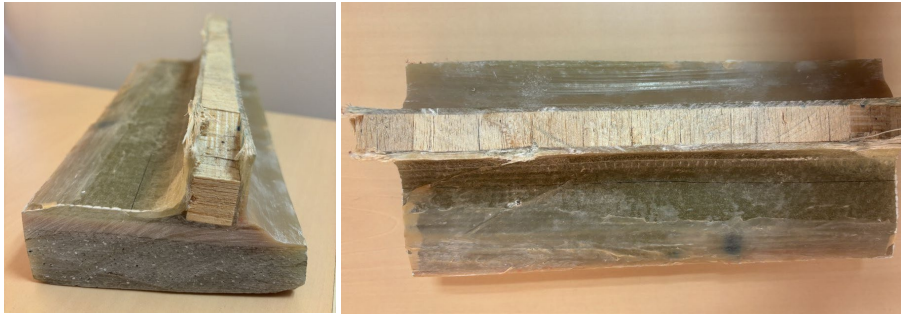


Figura 1. Trozo de pala de aerogenerador cortado para después ser introducido al molino de cuchillas.

El TPA ya ha sido caracterizado anteriormente en investigaciones por estos autores [9,13], y se ha determinado que está compuesto por macrofibras de vidrio (69% en peso), microfibras de vidrio (14% en peso), elementos poliméricos (8% en peso), madera de balsa (6% en peso) y elementos no separables de tamaños reducidos (5% en peso). Su densidad real es de 1.63 kg/dm^3 , pudiendo destacar su bajo peso respecto a su alto volumen tras el proceso de corte y machaqueo no selectivo.

2.2. Diseño de las mezclas

Las mezclas se diseñaron para incorporar porcentajes crecientes de TPA. La primera mezcla, tomada como mezcla de referencia, no incorporó TPA y se denominó W0. Dos mezclas más se realizaron con un 5% y un 10% en volumen de TPA, respectivamente (W5 y W10), manteniendo el contenido de cemento constante y variando la cantidad de áridos de las mezclas. Las tres dosificaciones que se realizaron siguieron valores estándar de los materiales según las normativas aplicables [2,4], incorporando además 37.7 kg/m^3 de TPA en el caso de la W5 y 74.4 kg/m^3 de TPA en la mezcla W10.

Para conseguir compensar la pérdida de trabajabilidad de las mezclas con altos contenidos de fibras [18], se adaptó el contenido de agua y aditivos para las dos mezclas que introdujeron TPA, como se puede ver en la **Figura 2**. La mezcla W5 tan solo necesitó añadir agua a la mezcla, mientras que W10 requirió añadir cantidades mayores de agua y aditivo que las dos mezclas anteriores, ya que las fibras impidieron el movimiento libre del resto de componentes del hormigón durante las fases de hormigonado y vibrado y el ensayo de asentamiento no cumplía los valores requeridos [9]. Para la mezcla de referencia W0, la relación agua/cemento (a/c) fue 0.40, para la W5 0.44 y para la W10 0.48.

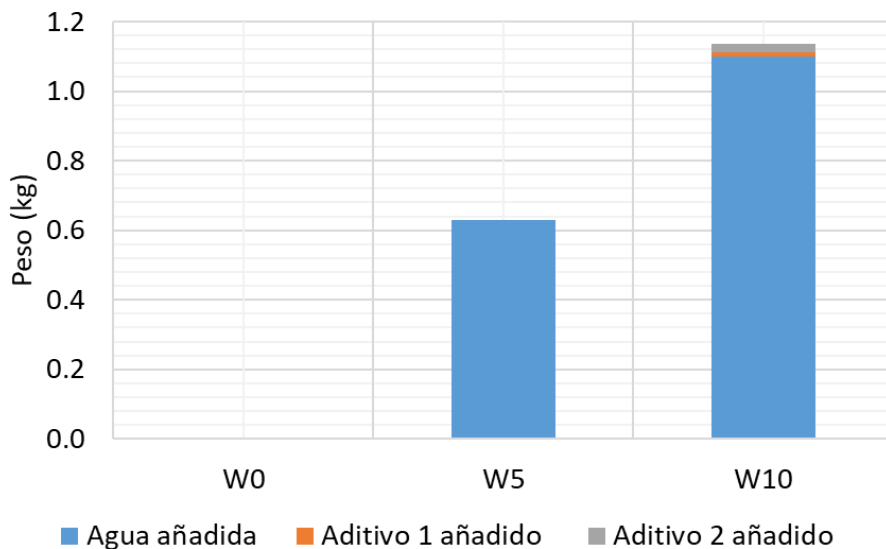


Figura 2. Cantidades de agua y aditivos añadidos a mayores en las distintas mezclas para amasada de 45 litros.

Además, para asegurar una correcta homogeneidad e hidratación de los materiales durante la mezcla, es habitual el desarrollo de procesos específicos de mezcla para incorporar y amasar estos materiales [9]. El proceso se desarrolló en tres fases diferenciadas, con una fase previa (Fase 0) de preparación y una fase final (Fase F) en la que se aseguró un correcto asentamiento mediante el ensayo del Cono de Abrams (EN 206 [17]), que se explica en la **Figura 3**.

2.3. Campaña experimental

En primer lugar, después del proceso de mezcla se evaluaron las características del estado fresco de los hormigones realizados. Un ensayo de asentamiento se realizó justo después del proceso de mezcla, verificando la categoría S3 (EN 206 [17], asentamiento entre 100-150 mm), además de mediciones de densidad en fresco y porcentaje de aire ocluido (EN 12350-6 [17]).

Para el estado endurecido, se hormigonaron seis probetas de altura 200 mm y relación diámetro/altura de 2, para realizar ensayos de resistencia a compresión tras permanecer en cámara húmeda (EN 12390-3) y ser ensayadas tres probetas a los 7 días y las otras tres a los 28 días.



Figura 3. Proceso de amasado utilizado en la presente investigación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Estado fresco

Los resultados de los ensayos de asentamiento (EN 206 [17]) se pueden ver en la **Figura 4**. Como se puede observar, todas las mezclas fueron clasificadas como S3 [17]. A medida que mayores contenidos de TPA fueron añadidos a las mezclas, los valores de asentamiento fueron disminuyendo, de manera que se necesitaron las cantidades crecientes de agua y plastificantes mencionadas para asegurar esta trabajabilidad, ayudados por el proceso de mezcla específicamente diseñado [9].

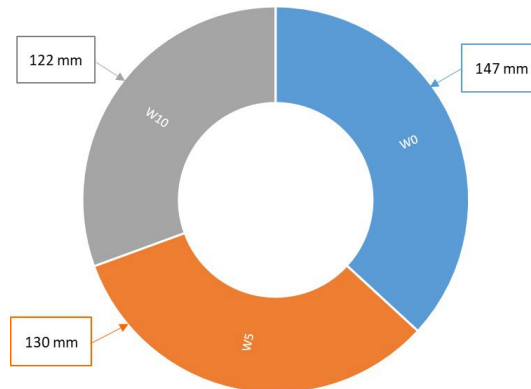


Figura 4. Resultados del ensayo de asentamiento.

Durante la evaluación de la densidad en fresco (EN 12350-6 [17]), se obtuvieron los resultados graficados en la **Figura 5**. Como se puede ver por la regresión dibujada en la figura, el comportamiento de esta propiedad siguió una tendencia muy lineal, con una caída de hasta el 7.26% para la mezcla W10 respecto a la mezcla W0, pero alcanzándose en todos los casos valores habituales para este tipo de hormigones [4]. Este fenómeno pudo ser explicado por la baja densidad del TPA, especialmente de las partículas poliméricas y de madera de balsa, que pudieron mantener el volumen de la mezcla mientras se redujo su peso [9].

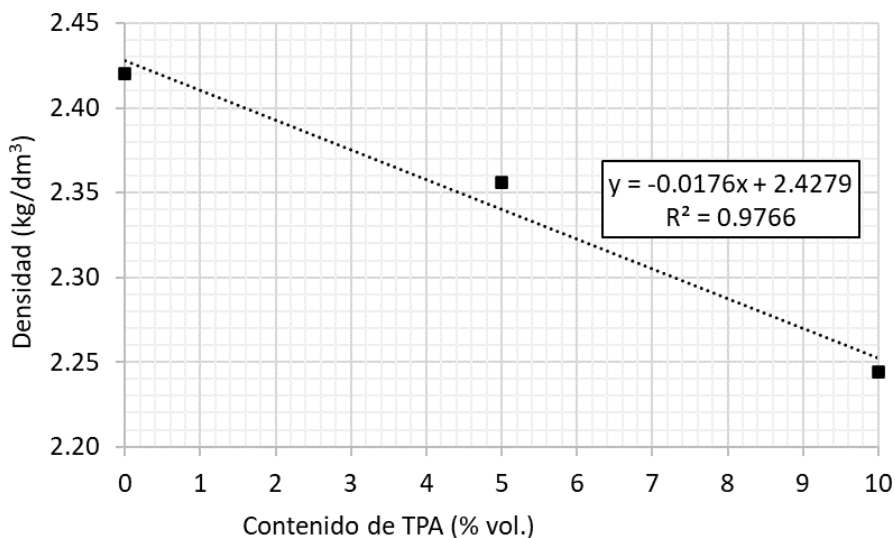


Figura 5. Resultados de ensayos de densidad en fresco y regresión lineal.

Respecto al porcentaje de aire ocluido (EN 12350-6 [17]), también se obtuvo una tendencia lineal, pero esta vez creciente, tal y como se puede observar en la **Figura 6**. A mayores cantidades de TPA, mayores cantidades de aire quedaron atrapadas en el interior de la mezcla, debido a la capacidad de las fibras para retener este aire, casi duplicándose el valor de la mezcla W0 en la mezcla W10. Además, este fenómeno fue ayudado por la gran porosidad de ciertos materiales presentes en este residuo, como puede ser la madera de balsa o las partículas poliméricas [9]. A pesar de las variaciones de los valores, los resultados de estos ensayos fueron aceptables y dentro de rangos normales para este tipo de materiales [19].

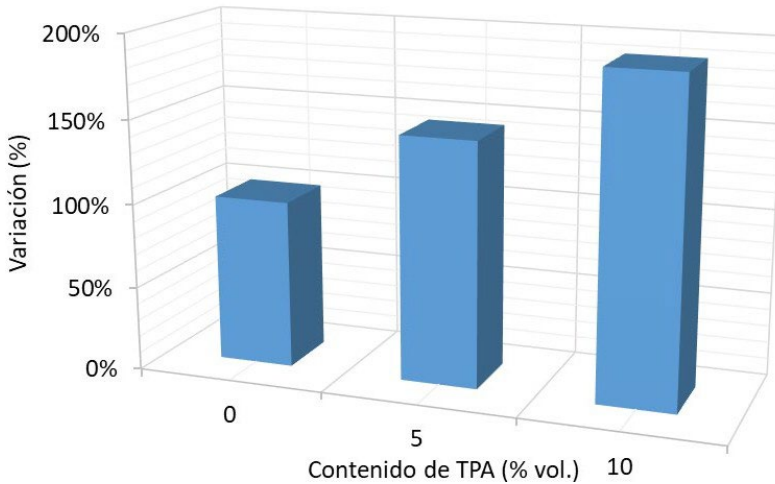


Figura 6. Variación de resultados de ensayo de aire ocluido en el hormigón fresco.

3.2. Estado endurecido

Tras su curado durante 7 o 28 días, las probetas hormigonadas fueron sometidas a ensayos de resistencia a compresión (EN 12390-3 [17]), y sus resultados se expresan en **Figura 7a**. La variación de los resultados respecto a la mezcla de referencia a las distintas edades se puede ver reflejada en la **Figura 7b**. Todos estos resultados fueron adecuados ampliamente para el uso estructural [4], pero hubo tendencias decrecientes debido al aumento de TPA en las mezclas.

Para los 7 días, las mezclas W0 y W5 dieron resultados muy parecidos, mientras que la W10 experimentó pérdidas de alrededor de 13.50%. Por lo tanto, la matriz cementicia se vio afectada al añadir TPA en contenidos altos, ya que la adherencia de materiales como la madera de balsa o elementos poliméricos es reducida en comparación con el resto de materiales utilizados [9,20]. Además, las relaciones a/c también fueron mayores y se incrementó la cantidad de aditivos, lo cual pudo resultar en pérdidas de resistencia que no pudieron ser compensadas por el efecto de cosido de las fibras y microfibras presentes en el TPA [18,21].

Observando el comportamiento a los 28 días, los mejores resultados fueron obtenidos por la mezcla W0, donde la hidratación de la matriz cementicia tuvo lugar de manera óptima. Sin embargo, se puede ver que este comportamiento fue afectado por la tendencia de la madera de balsa y las partículas poliméricas de absorber agua [20], resultando en una zona de transición intersticial de menor calidad que redujo la resistencia a compresión. Para la mezcla W5, se obtuvo una pérdida de 13.36%, mientras que para la mezcla W10 fue del 16.71%. Así, se ve que a grandes cantidades de TPA,

no decrece linealmente la resistencia a compresión, sino que tiene tendencias asintóticas, pudiendo ser factible la incorporación en altas cantidades de TPA en las mezclas.

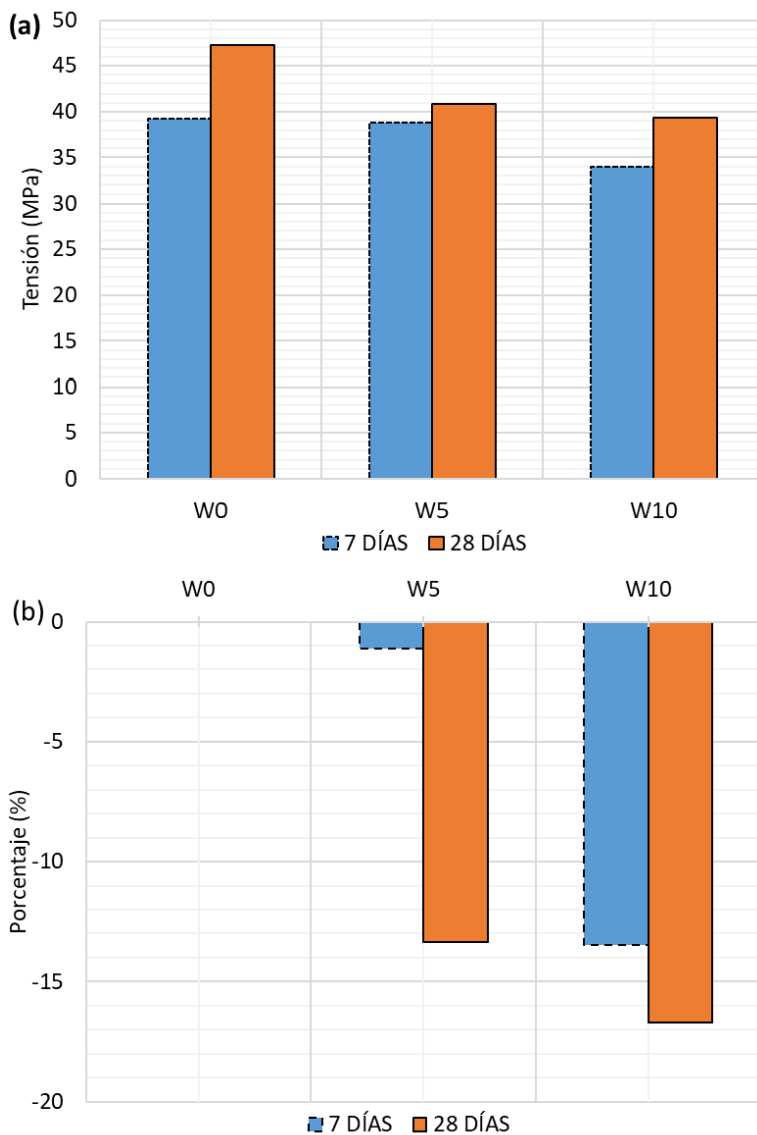


Figura 7. Ensayos de resistencia a compresión a 7 y 28 días: (a) resultados de los ensayos; (b) variación de resistencia a compresión respecto a la mezcla de referencia.

4. CONCLUSIONES

En la presente investigación, se produjo hormigón reforzado con fibras (HRF) mediante la incorporación de triturado de palas de aerogenerador (TPA) en altos contenidos, para estudiar la viabilidad de su adición y evaluar su comportamiento. Los HRFs realizados fueron más sostenibles, ya que se consiguió reducir la cantidad de áridos a añadir a la mezcla y dar una salida factible a los residuos procedentes del sector eólico español, mientras que se mantuvieron valores adecuados para cualquier uso.

De los resultados, se pudo concluir que el proceso de mezcla fue adecuado, ya que se consiguió una distribución homogénea e hidratación de las materias primas añadidas a estos HRFs. Durante este proceso de mezcla, se tuvieron que ajustar los contenidos de agua y de plastificantes necesarios para mantener el asentamiento de diseño, sin perjudicar de manera importante las características mecánicas de los hormigones. En los ensayos en fresco, se obtuvieron resultados con tendencias similares para la densidad en fresco y porcentaje de aire ocluido, explicados por la naturaleza del TPA, pero sin sufrir variaciones determinantes respecto a los valores de la mezcla de referencia W0. Para el estado endurecido, las variaciones fueron siempre inferiores al 17%, ocasionadas por la peor calidad de los materiales poliméricos y madera encontrada en el TPA, mayores relaciones a/c y mayores cantidades de plastificante, contrarrestadas en menor manera por la capacidad de cosido de las fibras contenidas en este residuo.

Este estudio por lo tanto arroja resultados en estado fresco y endurecido que demuestran la viabilidad de incorporación de altos porcentajes de TPA en las mezclas de hormigón, que resultan en HRF. Por lo tanto, se puede ver que añadir TPA en el hormigón permite obtener materiales más sostenibles, ya que se reciclan las problemáticas palas de aerogenerador de los parques eólicos y se reducen las altas cantidades de áridos a añadir en los hormigones, apuntando hacia una economía circular más eficiente y verde.

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; PID2023-146642OB-I00; FPU21/04364]; la Junta de Castilla y León y FEDER [UIC-231; BU033P23; BU066-22]; y, finalmente, la Universidad de Burgos [SUCONS, Y135.GI].

REFERENCIAS

- [1] ANEFHOP, 2022. Guide for the Carbon Footprint reduction in the Prepared Concrete Industry (GUÍA PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA INDUSTRIA DEL HORMIGÓN PREPARADO), 2022. www.anefhop.com.

- [2] Ministry of Infrastructures of the Spanish Government, Spanish Structural Code (Código Estructural de España), 2021.
- [3] J. Calavera, Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón : en masa, armado, pretensado, 2^a ed., Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, Madrid, 2008.
- [4] CEN (European Committee for Standardization), Eurocode 2, Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (EN 1992-1-1), 2010.
- [5] B. Ali, H. Ahmed, H. Hafez, A. Brahmia, M.H.E. Ouni, A. Raza, Life Cycle Impact Assessment (Cradle-to-Gate) of Fiber-Reinforced Concrete Application for Pavement Use: A Case Study of Islamabad City, *Int. J. Pavement Eng* 16 (2023) 247–263. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00129-8>.
- [6] C. Zhao, Z. Wang, Z. Zhu, Q. Guo, X. Wu, R. Zhao, Research on different types of fiber reinforced concrete in recent years: An overview, *Constr Build Mater* 365 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130075>.
- [7] M. Amran, S.-S. Huang, A.M. Onaizi, N. Makul, H.S. Abdelgader, T. Ozbakkaloglu, Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects, *Constr Build Mater* 352 (2022) 129029. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129029>.
- [8] V. Ortega-López, V. Revilla-Cuesta, A. Santamaría, A. Orbe, M. Skaf, Microstructure and Dimensional Stability of Slag-Based High-Workability Concrete with Steelmaking Slag Aggregate and Fibers, *J. Mater. Civ. Eng.* 34 (2022). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004372](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004372).
- [9] V. Revilla-Cuesta, M. Skaf, V. Ortega-López, J.M. Manso, Raw-crushed wind-turbine blade: Waste characterization and suitability for use in concrete production, *Resour Conserv Recycl* 198 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107160>.
- [10] F. Soltanzadeh, A.E. Behbahani, K. Hosseinmostofi, C.A. Teixeira, Assessment of the Sustainability of Fibre-Reinforced Concrete by Considering Both Environmental and Mechanical Properties, *Sustainability (Switzerland)* 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14106347>.
- [11] M. Pawelska-Mazur, M. Kaszynska, Mechanical Performance and Environmental Assessment of Sustainable Concrete Reinforced with Recycled End-of-Life Tyre Fibres, *Materials* 14 (2021) 256. <https://doi.org/10.3390/ma14020256>.
- [12] C. Signorini, S. Marinelli, V. Volpini, A. Nobili, E. Radi, B. Rimini, Performance of concrete reinforced with synthetic fibres obtained from

- recycling end-of-life sport pitches, *J. Build. Eng.* 53 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104522>.
- [13] J. Manso-Morato, N. Hurtado-Alonso, V. Revilla-Cuesta, M. Skaf, V. Ortega-López, J.M. Manso, Caracterización e idoneidad de la utilización de triturado de palas de aerogenerador en la producción de hormigón (Characterization and suitability for use of crushed wind-turbine blade in concrete production), in: II International Córdoba Eco-Concrete Conference, Universidad de Córdoba (UCOPress), Córdoba, 2023: pp. 16–20. eISBN: 978-84-9927-761-5.
- [14] World Wind Energy Association, WWEA, 2022. Statistics for the Global wind-energy sector., (2022).
- [15] Asociación Empresarial Eólica, AEE, 2022. Statistics of the Spanish wind-energy sector., (2022). <https://aeeolica.org/> (accessed March 29, 2023).
- [16] 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>.
- [17] EN-Euronorm, European Committee for Standardization, Rue de Stassart, 36. Belgium-1050 Brussels, 2020.
- [18] A. Garcia-Llona, V. Ortega-Lopez, I. Piñero, A. Santamaría, M. Aguirre, Effects of fiber material in concrete manufactured with electric arc furnace slag: Experimental and numerical study, *Constr Build Mater* 316 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125553>.
- [19] F. López-Gayarre, P. Serna, A. Domingo-Cabo, M.A. Serrano-López, C. López-Colina, Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties, *Waste Management* 29 (2009) 3022–3028. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.07.010>.
- [20] V. Revilla-Cuesta, F. Faleschini, C. Pellegrino, M. Skaf, V. Ortega-López, Water transport and porosity trends of concrete containing integral additions of raw-crushed wind-turbine blade, *Dev. Built Environ.* (2024) 100374. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100374>.
- [21] V. Revilla-Cuesta, J. Manso-Morato, N. Hurtado-Alonso, M. Skaf, V. Ortega-López, Mechanical and environmental advantages of the revaluation of raw-crushed wind-turbine blades as a concrete component, *J. Build. Eng.* 82 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108383>