

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE HORMIGÓN CON ADICIONES SIMULTÁNEAS DE TRITURADO DE PALAS DE AEROGENERADOR Y ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN

NEREA HURTADO-ALONSO¹, JAVIER MANSO-MORATO²,
VÍCTOR REVILLA-CUESTA², MARTA SKAF¹

¹*Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno, Universidad de Burgos, 09001, España*

²*Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Burgos, 09001, España*

Resumen

El desarrollo de materiales más sostenibles para el sector de la construcción comienza con el uso óptimo de los recursos naturales y el reciclaje adecuado de los residuos producidos al final del ciclo de vida de las infraestructuras. En los próximos años, se dismantlarán muchos parques eólicos, lo que proporcionará grandes cantidades de Triturado de Palas de Aerogenerador (TPA). Estos residuos pueden ser una oportunidad para descarbonizar la industria de la construcción, que causa enormes emisiones de gases de efecto invernadero cada año, poniendo en peligro el medio ambiente. Los residuos generados durante la demolición de elementos de hormigón se han utilizado en los últimos años para la fabricación de hormigón estructural en forma de Áridos Reciclados de Hormigón (ARH). La viabilidad de la combinación de ARH con TPA aún no se ha estudiado en mezclas de hormigón. Este estudio tiene como objetivo analizar el uso simultáneo de ARH y TPA para producir una mezcla de hormigón más verde como un esfuerzo para transformar una industria hasta ahora considerada contaminante en una más sostenible. Con este fin, se fabricaron tres mezclas de hormigón con diferentes combinaciones en volumen de cada residuo: 0% de TPA y 0% de ARH; 5% de TPA y 50% de ARH; y 10% de TPA y 100% de ARH. La resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson se han evaluado todos a una edad de 28 días. Los resultados muestran que una dosificación adecuada de ambos tipos de residuos puede dar como resultado una mezcla de hormigón estructural que conserva las propiedades básicas de resistencia a la compresión al mismo tiempo que proporciona una salida para una gran cantidad de residuos generados tanto en la construcción como en el sector de la energía eólica.

Palabras clave: hormigón, Áridos Reciclados de Hormigón (ARH), Triturado de Palas de Aerogenerador (TPA), resistencia a compresión.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón se establece como el material artificial más utilizado en el sector de la construcción, con más de 14 mil millones de m³ consumidos en 2022 [1]. Sus propiedades en términos de resistencia, durabilidad, trabajabilidad y coste lo convierten en el material ideal para el desarrollo de una amplia gama de infraestructuras. Sin embargo, todas sus propiedades se ven eclipsadas por su significativo impacto medioambiental. Por un lado, dado que sus principales componentes son áridos naturales, cemento y agua; el hormigón es un gran consumidor de recursos naturales. Por otro lado, el cemento es el segundo recurso más utilizado en la Tierra después del agua, con una producción de 4,2 mil millones de toneladas a nivel global cada año [1]. Para 2050, se espera que la demanda de cemento haya aumentado un 45% si el crecimiento continúa con las tendencias actuales [2]. El crecimiento de la población a nivel global, nuevas infraestructuras en países en desarrollo y nuevos patrones de urbanización están entre los factores que contribuyen a este aumento. Este aumento del consumo de cemento es un claro riesgo medioambiental, ya que los procesos involucrados en la producción de cemento lo convierten en una de las mayores fuentes de emisiones de CO₂ a la atmósfera, representando el 8% de las emisiones totales cada año a nivel mundial [3]. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de buscar alternativas para reducir el impacto medioambiental del hormigón.

Además de los problemas medioambientales relacionados con la producción de hormigón, la demolición de estructuras de hormigón una vez alcanzado el final de su ciclo de vida plantea un nuevo problema respecto al tratamiento de los residuos derivados del sector de la construcción. La opción tradicional de su depósito en vertederos ya no es viable debido al problema de escasez de ubicación de los mismos [4]. Dada la insuficiencia de áridos naturales para la producción de hormigón, el uso de Áridos Reciclados de Hormigón (ARH) es una forma alternativa de dar a este material una segunda vida y reducir significativamente el consumo de materias primas.

La literatura existente sobre el uso de ARH en mezclas de hormigón presenta varios desafíos en cuanto al diseño de las mezclas. En primer lugar, el tamaño máximo del árido, la tipología, la forma, la textura superficial y la relación agua/cemento (a/c) de la mezcla de hormigón original de la que se obtiene el ARH, son factores que condicionan tanto la trabajabilidad como la fluidez de la mezcla [5]. El uso de ARH como reemplazo de los áridos naturales resulta en una reducción en los valores de trabajabilidad del hormigón debido a la naturaleza porosa del material, lo que requiere un aumento en el contenido de agua de la mezcla para lograr la trabajabilidad deseada. Se han adoptado nuevos procedimientos, como la saturación de ARH antes del proceso de dosificación en lugar de usar áridos secos como se hace en el hormigón convencional [6], para compensar la pérdida de trabajabilidad al añadir este residuo. La alta capacidad de absorción de ARH supone que el agua adicional

requerida por la mezcla aumente ligeramente la relación a/c. Por lo tanto, la adición de ARH requiere un diseño de mezcla adecuado para no afectar la resistencia del material.

Los esfuerzos del sector de la construcción por explorar alternativas para el desarrollo de hormigón sostenible también incluyen el uso de diferentes tipos de fibras para mejorar su rendimiento mecánico. En Europa, el desmantelamiento de un gran número de parques eólicos que alcanzarán el final de su vida útil en los próximos años está provocando la aparición de un nuevo residuo, las palas de los aerogeneradores. Su composición compleja dificulta su reciclaje y tratamiento. La fibra de carbono, fibras de vidrio, poliuretano y madera de balsa están entre algunos de los componentes [7], que, tras un proceso de trituración no selectivo adecuado, generan lo que se conoce como Triturado de Palas de Aerogenerador (TPA). Este residuo está compuesto fundamentalmente por fibras de polímero reforzado con fibra de vidrio.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar la viabilidad de producir hormigón estructural al agregar los dos tipos de residuos definidos anteriormente: ARH grueso y TPA. Con este fin, se prepararon tres mezclas de hormigón con diferentes contenidos de residuos, para evaluar posteriormente su comportamiento tras un curado de 28 días. En primer lugar, se estudian las propiedades de ambos residuos y demás materias primas, junto con el proceso de mezcla y el programa experimental seguido. Después de evaluar las propiedades en fresco, se analiza el comportamiento a compresión y la rigidez. Finalmente, se alcanzan conclusiones de acuerdo con el objetivo inicial de la investigación.

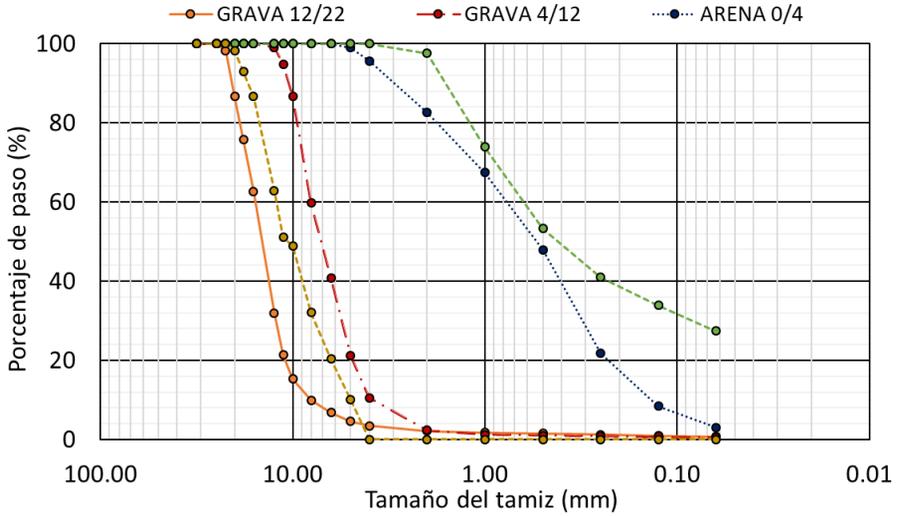
2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

Para la producción de las tres mezclas de hormigón, se utilizó CEM II/A-L 42.5 R (EN 197-1[8]). Además del agua suministrada por la red de abastecimiento de la ciudad de Burgos, se utilizaron dos tipos de aditivos para lograr los valores deseados de trabajabilidad. En cuanto a los áridos empleados, se utilizaron diferentes fracciones: áridos de naturaleza caliza como la arena fina 0/2 mm y áridos de naturaleza silíceo de las fracciones 0/4 mm, 4/12 mm y 12/22 mm. En la Fig. 1 queda reflejada la granulometría de las fracciones utilizadas en las mezclas. Para cada una de las fracciones mencionadas anteriormente, se realizó una caracterización completa para determinar los valores de densidad de acuerdo con la norma EN 933-1 [8]. Se midieron densidades alrededor de 2,60-2,65 kg/dm³. Los valores de absorción de agua en 24 horas fueron alrededor de 0,10-0,50%.

Con el fin de determinar la viabilidad de incorporar el ARH grueso, mostrado en la Fig. 2, y el TPA en la mezcla de hormigón, se analizaron sus características físicas. El tamaño de fracción para el ARH utilizado en este estudio fue de 4/22 mm con una densidad real de 2,48 kg/dm³. En cuanto al

ARH, su capacidad de absorción de agua está condicionada por la presencia de una gran cantidad de pasta de cemento [9] adherida y puede variar entre un 5% y un 15%. Para el ARH utilizado en este estudio, se obtuvo una absorción de agua del 6,12% en peso. Las características del material de TPA se obtuvieron de publicaciones previas [10] que arrojaron los siguientes resultados: densidad real de $1,63 \text{ kg/dm}^3$, longitud media de fibra de 13,1 mm y un contenido de fibra del 66,8% en peso.



2.2. Diseño de la mezcla

Se diseñaron tres mezclas con diferentes contenidos de ARH grueso y TPA. Una primera mezcla, considerada como la mezcla de referencia, se realizó con 0% de ARH y 0% de TPA y se etiquetó como W0CRA0 (por sus siglas en inglés). Luego se produjo una mezcla de 50% de ARH y 5% de TPA, llamada W5CRA50. Finalmente, se fabricó una mezcla que contenía 100% de ARH y 10% de TPA (W10CRA100). Para cada mezcla, la cantidad de cemento se mantuvo constante con un valor de 320 kg/m^3 , siendo la adición de TPA considerada como un suplemento al cemento y el ARH grueso reemplazando al árido natural grueso. La relación a/c efectiva fue de aproximadamente 0,42 en todas las mezclas. Finalmente, los dos aditivos utilizados correspondieron al 1% de la masa de cemento. La proporción óptima de cada árido se definió según la curva de Fuller.

2.3. Preparación de muestras y procedimiento de ensayo

El proceso de fabricación utilizado para la producción de las tres mezclas constó de tres etapas. En la primera fase, las cuatro fracciones de árido natural se introdujeron en la hormigonera junto con el ARH y el 30% del agua. Después de tres minutos, se añadió el cemento junto con la cantidad correspondiente de TPA y la cantidad restante de agua determinada en la dosificación. Finalmente, después de un período de tres minutos, se agregaron las cantidades de ambos aditivos junto con medio litro de agua específicamente reservada para esta fase. La mezcla se completó tres minutos después del paso previamente definido.

Las pruebas realizadas en estado fresco se enumeran a continuación: asentamiento (EN 12350-2[8]), densidad en estado fresco (EN 12350-6 [8]) y contenido de aire (EN 12350-7 [8]). Tras estos ensayos, se procedió al llenado de los moldes para la fabricación de probetas de diferentes tamaños de acuerdo con las especificaciones de cada norma. Se produjeron tres probetas cilíndricas, de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, para ensayos de resistencia a compresión (EN 12390-3 [8]) a los 28 días, y otras tres probetas con las mismas características se fabricaron para la evaluación de la rigidez mediante el módulo de elasticidad (EN 12390-13 [8]).

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades en estado fresco

En términos de los valores de asentamiento obtenidos, se arrojaron los siguientes valores: 147 mm, 136 mm y 125mm para W0CRA0, W5CRA0 y W10CRA100 respectivamente. De acuerdo con la norma EN 206 [8], todas las mezclas fueron clasificadas como clase S3, observándose una ligera reducción en la trabajabilidad para la mezcla W10CRA100 debido al alto contenido de ARH. Esto podría explicarse por la alta capacidad de absorción de agua del ARH en la mezcla [11].

Para el caso de la densidad en estado fresco, la adición de ambos tipos de material reciclado resultó en una disminución de esta propiedad comparación con la mezcla de referencia que obtuvo un valor de $2,42 \text{ kg/dm}^3$. Esta disminución se debió a los valores de densidad aparente del material reciclado, tanto de la fibra de pala de aerogenerador como del árido reciclado, que eran mucho más ligeros que los otros componentes de la mezcla.

Finalmente, los valores de contenido de aire mostraron un ligero aumento para la mezcla W5CRA50 (2,38 %) y un aumento mucho más notable para la mezcla W10CRA100 (5,30%) en comparación con la mezcla de referencia (2,20%). Esto pudo deberse en parte debido a la alta porosidad del ARH [9], aunque la influencia del alto contenido de madera de balsa y poliuretano encontrado en el TPA también pudo ser relevante.

3.2. Resistencia a compresión

Los valores de resistencia a compresión obtenidos para las mezclas de hormigón se muestran en la Fig. 3. Todos alcanzaron el mínimo de 25 MPa [12] requerido para un hormigón estructural convencional. Se puede observar que la adición de ARH grueso como reemplazo de parte de los áridos naturales junto con un 5% de TPA redujo ligeramente la resistencia (12%) sin comprometer su comportamiento mecánico. A porcentajes más elevados de TPA (10%), esta pérdida de resistencia a compresión fue mucho mayor y pudo deberse a que la presencia de una gran cantidad de poliuretano y madera de balsa llevó a una menor adherencia entre este material y la matriz cementicia [13].

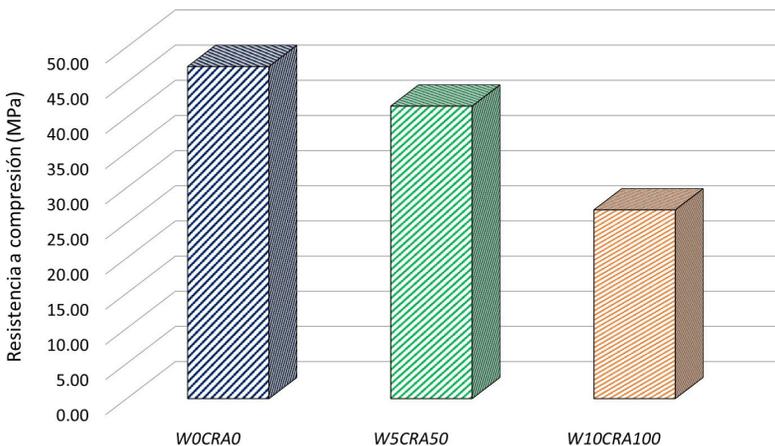


Figura 3. Evaluación de la resistencia a compresión.

3.3. Evaluación de la rigidez

El efecto de la adición de residuos en el módulo de elasticidad se muestra en la Fig. 4. Además de los valores experimentales obtenidos, la figura muestra una representación gráfica de la estimación de esta propiedad me-

cánica según el Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón (EC-2 [12]) y el Código Estructural (CE) después de 28 días. Se puede observar que la rigidez elástica de la mezcla con 100% de ARH y 10% de TPA se redujo significativamente en un 48% en comparación con la muestra de referencia. Como se mencionó en la sección anterior, esto se debió al hecho de que un alto porcentaje de TPA resultó en altas proporciones de madera de balsa y partículas de poliuretano que, debido a su alta deformabilidad [14], tuvieron este efecto en el hormigón.

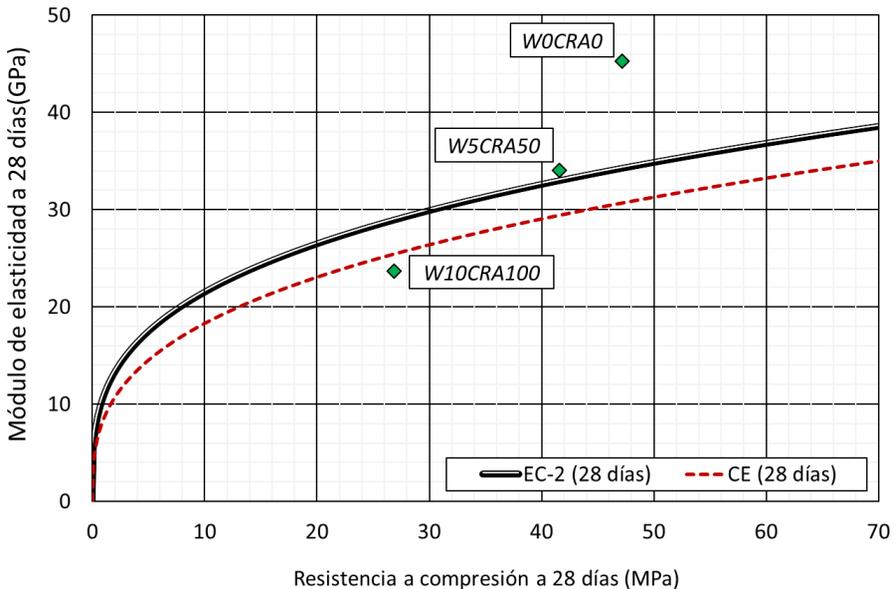


Figura 4. Relación entre los módulos de elasticidad estimados y experimentales según EC-2/CE [12] a 28 días.

Se encontró un comportamiento diferente en los resultados del coeficiente de Poisson en comparación con los valores obtenidos para el módulo de elasticidad. Se obtuvieron los siguientes valores para cada mezcla: 0,167 (W0CRA0), 0,157 (W5CRA50) y 0,182 (W10CRA100). El aumento del 8% en el coeficiente de Poisson para la mezcla con 10% de TPA reflejó un comportamiento opuesto del ARH grueso y las partículas de madera de balsa y poliuretano al causado habitualmente por la presencia de fibras en el hormigón, cuyo efecto de cosido reduce la deformabilidad del hormigón [15].

4. CONCLUSIONES

En la presente investigación, se ha evaluado el comportamiento a compresión de mezclas de hormigón con adiciones simultáneas de ARH grueso y TPA en un intento por desarrollar un material de construcción sostenible. Se pueden extraer las siguientes conclusiones de este estudio:

- El hormigón experimentó una reducción en los valores de asentamiento y densidad en estado fresco de los hormigones causada por la menor densidad de los materiales reciclados. No obstante, en todos los casos se alcanzó la trabajabilidad requerida, ya que todas las mezclas presentaron una clase de asentamiento S3.
- En comparación con la mezcla de referencia, la mezcla con un contenido del 5% de TPA mostró una buena resistencia a compresión, con una pérdida muy poco significativa. Para un contenido de residuo más alto, la pérdida fue de hasta el 43%, lo que puede explicarse por la presencia de una proporción mayor de componentes de TPA diferentes de las fibras (poliuretano y madera de balsa).
- En la mezcla con contenido del 100% de ARH grueso, la rigidez de esta se deterioró, agravada por la presencia del material TPA, alcanzando pérdidas de hasta el 48% en comparación con la mezcla de referencia en su módulo de elasticidad. Por lo tanto, las cantidades de ambos residuos en las mezclas de hormigón deben estar definidas con precisión.

Los resultados de esta investigación muestran que la combinación precisa de materiales reciclados tanto del sector de la construcción como de la energía eólica, y un procedimiento adecuado para su incorporación en mezclas de hormigón, puede resultar en un material que cumple con los requisitos existentes de sostenibilidad y rendimiento mecánico.

Agradecimientos

Este trabajo de Investigación fue financiado por el Ministerio de Universidades, MICINN, AEI, UE, FEDER y NextGenerationEU/PRTR [PID2020-113837RB-I00; PID2023-146642OB-I00; 10.13039/501100011033; TED2021-129715B-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] Global Cement and Concrete Association. About cement & concrete. Global cement and concrete association. n.d., (n.d.). <https://gccassociation.org/>.
- [2] World Economic Forum., Net-zero industry tracker - 2022 edition. Geneva: World Economic Forum; 2022., (2022).
- [3] Lehne J., Preston F., Making concrete change: innovation in low-carbon cement and concrete., The Royal Institute of International Affairs, London, 2018.
- [4] C.S. Poon, A.T.W. Yu, L.H. Ng, On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong, Resour Conserv Recycl 32 (2001) 157–172. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00052-0).

- [5] M. Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, S. Maiti, Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, *Constr Build Mater* 68 (2014) 501–516. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.07.003>.
- [6] K.P. Verian, W. Ashraf, Y. Cao, Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production, *Resour Conserv Recycl* 133 (2018) 30–49. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.02.005>.
- [7] J. Joustra, B. Flipsen, R. Balkenende, Structural reuse of wind turbine blades through segmentation, *Composites Part C: Open Access* 5 (2021) 100137. <https://doi.org/10.1016/J.JCOMC.2021.100137>.
- [8] EN-Euronorm, European Committee for Standardization, Rue de Stassart, 36. Belgium-1050 Burssels, 2020.
- [9] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Constr Build Mater* 18 (2004) 461–468. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2004.03.005>.
- [10] 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) 107160. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2023.107160>.
- [11] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cem Concr Res* 37 (2007) 735–742. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.02.002>.
- [12] Eurocode 2, Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (EN 1992-1-1), CEN (European Committee for Standardization), 2010.
- [13] N. Saikia, J. De Brito, Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate, *Constr Build Mater* 52 (2014) 236–244. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.049>.
- [14] L. Gu, T. Ozbakkaloglu, Use of recycled plastics in concrete: A critical review, *Waste Management* 51 (2016) 19–42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>.
- [15] H.R. Pakravan, M. Latifi, M. Jamshidi, Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review, *Constr Build Mater* 142 (2017) 280–294. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.03.059>.