

Hormigón con materias primas secundarias: de los residuos de demolición a la reutilización de residuos industriales

Concrete with secondary raw materials: from demolition waste to the reuse of industrial wastes

Estefania Cuenca^a, Marco Davolio^b, Marco Del Galdo^c, Liberato Ferrara^d

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Politecnico di Milano. Assistant Professor. estefania.cuenca@polimi.it

^bIngeniero Civil. Politecnico di Milano. Doctorando. marco.davolio@polimi.it

^cIngeniero Civil. Politecnico di Milano. Técnico Superior de laboratorio. marco.delgaldo@polimi.it

^dIngeniero Civil. Politecnico di Milano. Catedrático. liberato.ferrara@polimi.it

RESUMEN

Este artículo sintetiza las últimas investigaciones del grupo sobre conceptos de economía circular en el sector del hormigón. En primer lugar, se estudia el reciclado de hormigón de ultra altas prestaciones, entendido como residuo de construcción y demolición, utilizando diferentes fracciones de árido reciclado obtenido a partir del hormigón triturado, en sustitución tanto de áridos naturales como de cemento. Y se continua con el reciclado de geomateriales de residuos de minas de carbón. En conclusión, el presente trabajo resume los resultados de las investigaciones realizadas que abordan la viabilidad de las tecnologías propuestas considerando también su impacto general.

ABSTRACT

This paper summarises the group's latest research on circular economy regarding the concrete sector. Firstly, the recycling of ultra-high-performance concrete, understood as construction and demolition waste, is studied using different fractions of recycled aggregate obtained from crushed concrete, replacing both natural aggregates and cement. Then, research on recycling of geomaterials from coal mine waste is shown. In conclusion, this paper summarises the research results regarding the viability of the proposed technologies, also considering their general impact.

PALABRAS CLAVE: economía circular, hormigón reciclado, residuos, carbón

KEYWORDS: circular economy, recycled concrete, wastes, carbon

1. Introducción

Gracias a su conveniencia económica (bajo costo) y excelentes propiedades termomecánicas que incluyen resistencia, durabilidad, resistencia

al fuego y alta inercia térmica, el hormigón es el material de construcción más utilizado y, con

diferencia, el segundo material más utilizado en el mundo después del agua [1].

Es un hecho que la producción de enormes cantidades de hormigón tiene un fuerte impacto medioambiental en las emisiones de CO₂ y la explotación de recursos. En 2020, la industria de la construcción representó el 36% de la demanda mundial de energía y el 37% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía (8,7 Gigatoneladas), de las cuales el 10% se produjo directamente mediante la fabricación de materiales de construcción, principalmente cemento [2]. De hecho, se estima que por cada tonelada de cemento Portland ordinario producida, se libera a la atmósfera una cantidad aproximada de 930 kg de CO₂ [3]. Este trabajo resume algunas de las últimas investigaciones realizadas por nuestro grupo de investigación consistentes en la implementación de conceptos de economía circular relacionados con el hormigón. La investigación aborda el reciclaje de hormigón de muy altas prestaciones y el uso de geomateriales residuales de las minas de carbón como sustitución de áridos naturales.

2. Autorreparación (self-healing) de hormigón reciclado de Ultra Alta Resistencia (R-UHPC) sometido a ambientes ricos en cloruros

2.1 Introducción

Las estructuras pueden aprovechar las características de los hormigones de ultra alto rendimiento (UHPC) para lograr una durabilidad a largo plazo sin un excesivo mantenimiento. Sin embargo, en algunos casos, es posible que aún sea necesario demoler las estructuras antes mencionadas. Por lo tanto, la posibilidad de reciclar el UHPC puede influir significativamente en los impactos ambientales asociados con el uso de esta categoría de materiales, dado el alto contenido de materiales y de energía necesaria. Este estudio investigó el

rendimiento de autosanado de un UHPC fabricado a partir de UHPC reciclado. Se estudiaron dos mezclas diferentes, ambas con sustitución total de arena y sustitución parcial de cemento por áridos reciclados de UHPC. En una de las mezclas (C100F mix) la arena natural se sustituyó por áridos reciclados gruesos y finos, mientras que en la otra mezcla (C100C mix) los áridos reciclados fueron solo gruesos. La capacidad de autorreparación de las mezclas fue evaluada con pruebas mecánicas y de durabilidad durante seis meses, con exposición continua a una solución rica en cloruros, simulando el ambiente marino. Las partículas de cemento no hidratadas conservaron la capacidad de autocuración del UHPC original. Ambas mezclas demostraron su potencial de sellado de fisuras incluso después de varios ciclos de fisuración/autorreparación, mostrando una ligera disminución sólo después de seis meses. El cierre de las fisuras permitió obtener un rendimiento mecánico constante mantenido en el tiempo.

2.2 Materiales y métodos

Las mezclas de UHPC estudiadas se diseñaron a partir de una mezcla de UHPC de referencia, que se muestra en la Tabla 1. El material original se trituró en una parte gruesa y otra fina y se utilizó para sustituir completamente la arena. Además, el contenido de cemento en las dos mezclas analizadas se redujo al 70% del contenido inicial y se sustituyó por finos reciclados de UHPC para la mezcla C100F (Coarse and Fines, Grueso y Fino), y por más agregados gruesos reciclados de UHPC para la mezcla C100C (Coarse only, sólo árido grueso).

La contribución de áridos gruesos y finos reciclados en el rendimiento del UHPC reciclado ha sido analizada desde diversas perspectivas, utilizando pruebas físicas y mecánicas. Se realizaron pruebas de absorción para caracterizar las condiciones iniciales de cada muestra. Para

evaluar las prestaciones mecánicas del material se realizaron ensayos de flexión en 3 puntos (EN 1015) y se prefisuraron nueve probetas prismáticas 40x40x160mm por mezcla. Después de la fisuración inicial, se repitió la medición de la absorción junto con la observación directa de la fisura con un microscopio digital. A continuación, las probetas prismáticas se sumergieron en una solución de NaCl al 3,3% para simular el entorno marino. Al final de los períodos fijados, 1, 2, 3 y 6 meses, se repitió el proceso evaluando el estado de autorreparación con mediciones de la absorción de las fisuras. Luego, parte de las muestras se volvieron a re-fisurar y medir para establecer la condición de referencia antes del siguiente ciclo de exposición. Al inicio de la campaña experimental se ensayaron tres muestras por mezcla para establecer el comportamiento de referencia. El resto se fisuró previamente hasta una abertura de fisura de 150 μm y luego se siguió el esquema que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. Dosificaciones

Materiales (kg/m ³)	Ref.	C100F	C100C
Cemento 52.5R	700	490	490
Humo de sílice	400	400	400
Superfluidificante ACE 442	64	64	64
Agua	231	231	231
Fibras de acero (lf=22mm, df=0.2mm)	0	160	160
Aditivo cristalino	0	5.6	5.6
Arena	817	0	0
Árido reciclado grueso	0	817	1027
Árido fino reciclado	0	210	0

2.3 Resultados

2.3.1. Pruebas de absorción

Las dos mezclas diferentes se comportaron de manera similar después de repetidos ciclos de periodo de healing y refisuración. En particular, se puede observar que la recuperación para la mezcla sólo con áridos gruesos reciclados (C100C) fue más efectiva que la mezcla con áridos reciclados finos

y gruesos (C100F mix), mostrando valores similares después de cada ciclo de exposición (Figura 1). De hecho, los áridos finos reciclados presentan una mayor absorción de agua en comparación con los correspondientes áridos gruesos reciclados [4]. Aún más notable es que la brecha significativa entre la absorción de agua antes y después de la prefisuración ya casi se había compensado después del primer mes. Ambas mezclas recuperaron eficazmente el daño repetido inducido por la nueva fisuración después de 3 y 6 meses de exposición (Figura 1).

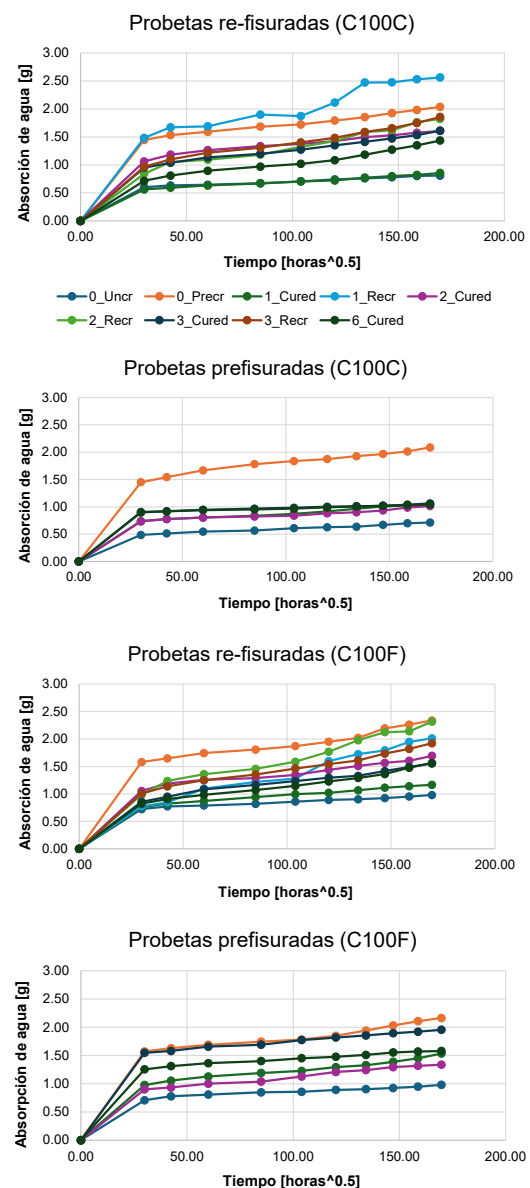


Figura 1. Pruebas de absorción después de ciclos de sanado y fisuración a 1,3 y 6 meses

Tabla 2. Esquema de fisuración

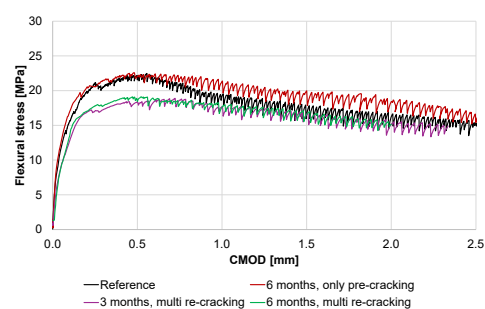
t=0	t=1	t=2	t=3	t=6
	mes	meses	meses	meses
Pre-fisura	Re-fisura	Re-fisura	Re-fisura	Rotura

Durante el ciclo de exposición final (6 meses), después de fisurar a los 3 meses más 3 meses de curación (healing), no se recuperó la brecha entre la absorción de agua inicial y final, es decir, la reparación no fue tal como para igualar al estado inicial no fisurado. Sin embargo, el valor de absorción inicial después de la refisuración fue menor que en los otros casos, reduciendo así el margen de recuperación al final del período de exposición. Kannikachalam et al. [5] obtuvieron resultados equivalentes, confirmando así la capacidad de autorecuperación residual de un UHPC obtenido a partir de un UHPC reciclado.

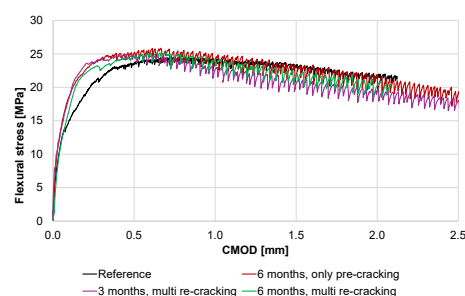
2.3.2. Ensayos de flexión

El comportamiento a flexión de las dos mezclas se evaluó mediante ensayos de flexión en 3 puntos (EN 1015) al final de los períodos de exposición de 3 y 6 meses. La Figura 2 muestra las curvas de rotura a flexión experimentales que ignoran la apertura de fisura residual resultante de los procesos de prefisuración y/o refisuración. La mezcla con finos reciclados (C100F) pudo recuperar completamente la resistencia a la flexión inicial después del daño inducido por la prefisura tras 6 meses de exposición continua en la solución de cloruro (Figura 2a). Además, cuando se aplicaron ciclos repetidos de fisuración/healing a las probetas, el rendimiento sólo se recuperó parcialmente, con diferencias mínimas entre 3 y 6 meses. La rama inicial de endurecimiento elástico de la respuesta a la flexión también experimentó una ligera disminución en la rigidez

debido a la fisuración repetido. Por el contrario, la mezcla con solo agregados reciclados gruesos (mezcla de C100C) preservó su comportamiento a flexión independientemente de las condiciones de fisuración (Figura 2b). Además, la rama de endurecimiento de la curva muestra un notable aumento de la rigidez, asociado a las propiedades de los precipitados/productos de healing que sellaron las fisuras [6]. Los efectos negativos de los finos reciclados sobre las propiedades de rotura en comparación con los áridos gruesos reciclados confirmaron los hallazgos previos de Xiao et al. [7].



(a) Mezcla C100F



(b) Mezcla C100C

Figura 2. Pruebas a flexión

3. Uso de geomateriales provenientes de residuos de minas de carbón (CMWG)

3.1 Materiales y métodos

En este estudio se realizaron ensayos en hormigones y morteros en los que se sustituyeron los áridos naturales por áridos

mono o doblemente reciclados (de ahora en adelante, bi-reciclados) procedentes de las minas de Poltegor, Marcel (Polonia) y Subterra (España). Los áridos monoreciclados son residuos de la actividad minera del carbón (Coal Mining Waste, CMW), mientras que los áridos bi-reciclados proceden de la trituración de hormigón (Construction Demolition Waste, CDW) en los que se ha sustituido parcialmente arena y grava por CMW (Figura 3).



Figura 3. Residuos de las minas de carbón

El trabajo se realizó a diferentes escalas evaluando la sustitución en volumen solo de la fracción fina en el mortero (mezcla FO), mientras que en los hormigones también se sustituyó la fracción fina y gruesa (mezcla FC) y solo de la fracción gruesa (mezcla CO).

En los morteros se sustituyó la arena con la fracción fina de CMW al 25%, 50% y 100%, mientras que para el hormigón se consideraron los siguientes niveles de sustitución: (a) muestra de referencia; (b) sustitución del 25% de la fracción gruesa por CMW; (c) sustitución del 13% de la fracción fina y del 13% de la fracción gruesa por CMW; (d) sustitución del 30% de la fracción gruesa por áridos bi-reciclados; e) dos mezclas de sustitución del 15% de la fracción fina y del 15% gruesa con áridos bi-reciclados de distintos orígenes. Las tablas 3 y 4 muestran las dosificaciones del mortero y hormigón de referencia respectivamente.

3.2 Programa experimental

Para los morteros los ensayos realizados fueron: ensayos de flexión y compresión sobre probetas prismáticas de 40x40x160 mm según la norma

EN 12390-5 a los 1, 7, 28 y 70 días después del amasado. Además, se realizaron pruebas de hielo-deshielo. Tres probetas para cada tipo de amasada fueron sometidas a ciclos de hielo-deshielo dentro de una cámara climática en la que se llevan a cabo ciclos de temperatura. Las muestras se someten a una humedad relativa no inferior al 90% y una temperatura de $38 \pm 2^\circ\text{C}$ durante una semana y posteriormente a 20 ciclos de hielo-deshielo.

Cada ciclo consta de al menos 4 horas a $-18 \pm 1^\circ\text{C}$, seguidas de 12 horas en una cámara húmeda (humedad relativa no inferior al 90%, temperatura $38 \pm 2^\circ\text{C}$).

Una vez finalizados los 20 ciclos de hielo-deshielo, las muestras se revisaron visualmente para detectar cualquier alteración en la superficie, como erosión, descamación o agrietamiento.

Después de 21 días, las muestras se retiraron de la cámara y posteriormente se ensayaron a flexión y compresión. Las muestras fueron revisadas visualmente y no se encontraron alteraciones superficiales.

Al mismo tiempo, los ensayos también se llevaron a cabo en probetas que habían permanecido en cámara húmeda durante 70 días, sin haber sido sometidas por lo tanto a ciclos hielo-deshielo. Como era de esperar, hubo variaciones de resistencia entre las probetas que estuvieron siempre en cámara húmeda y las que fueron sometidas a ciclos de temperatura de hielo-deshielo.

En cuanto al hormigón, en la Tabla 5 se muestran los ensayos realizados para cada uno de los tres tipos de hormigón ensayados.

Tabla 3. Dosificación del mortero de referencia

Materiales	kg/m ³
Cemento	330
Arena	964
Filler	77
Agua	158
Superfluidificante	1.98

Tabla 4. Dosificación del hormigón de referencia

Materiales	kg/m ³
Cemento	330
Arena	964
Árido grueso	896
Filler	77
Agua	158
Superfluidificante	1.98

Tabla 5. Programa experimental mix CO y FC

Ensayo	Tipo de probeta	Num.	Edad
Resistencia a compresión*	Probeta cúbica 100x100x100mm	15	1, 3, 7, 28, 60 días
Carbonatación	Probeta cúbica 100x100x100mm	15	1, 3, 6, 9, 12 meses
Penetración de cloruros	Probeta cilíndrica (d100x100mm)	15	1, 3, 6, 9, 12 meses
Reómetro	-		

*Estos ensayos también fueron realizados para el hormigón de referencia

3.3 Resultados experimentales

3.3.1 Morteros

La Figura 4 muestra los valores de resistencia a compresión de los morteros de referencia y de los morteros con diferentes porcentajes de sustitución. Se puede observar que la resistencia a compresión de las muestras es inversamente proporcional al porcentaje de sustitución, con una disminución máxima respecto a la referencia REF del 23% para FO_50% a los 28 y 70 días de curación y del 47% para FO_100% a 1 y 3 días.

La Figura 5 muestra los valores de resistencia a flexión. Comparando los resultados para los distintos niveles de sustitución se puede observar cómo la resistencia a flexión es inversamente proporcional a la cantidad de CMW presente, con una disminución máxima de la resistencia respecto a la referencia REF del 13% para FO_25% a los 70 días. de maduración, 25% para FO_50% a los 7 y 70 días de maduración y 49% para FO_100% a los 7 días. Tras los ciclos de hielo y deshielo, se observó una disminución en la resistencia a flexión para todos los morteros, máxima para FO_25%, mientras que para el ensayo de compresión se observó un

aumento en el valor de resistencia, a excepción de FO_100% (Tabla 6).

El aumento de la resistencia a la compresión tras los ciclos de temperatura también fue observado por García-Giménez et al. [8] e indica que, a pesar de las condiciones adversas, el cemento continúa hidratándose. Además, la mayor porosidad del árido CMW respecto al natural pudo haber determinado la formación de microcámaras de aire, mitigando así el efecto de los ciclos de temperatura y los consecuentes fenómenos expansivos sobre la matriz del cemento.

La sustitución óptima en cuanto a resistencia a los ciclos de temperatura resultó ser la del 50%, para la que se obtuvo el mayor aumento de compresión y la menor pérdida de resistencia a flexión excluyendo el mortero FO_100%. Este último, de hecho, partía de valores de resistencia más bajos y, por tanto, se vió menos afectado por los ciclos de temperatura.

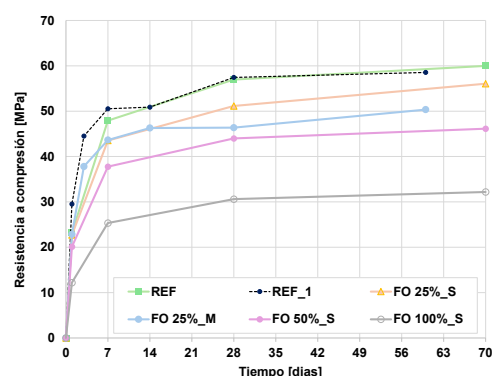


Figura 4. Resistencia a compresión de los morteros

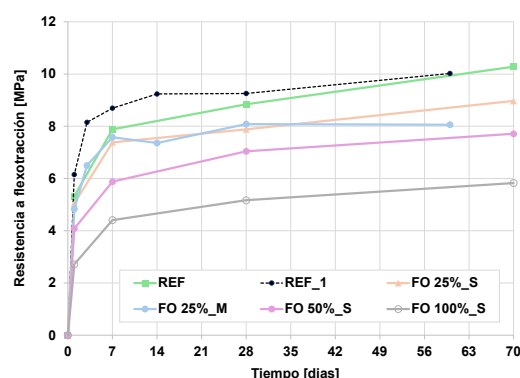


Figura 5. Resistencia a flexión de los morteros

Tabla 6. Propiedades mecánicas de los morteros tras los ciclos de hielo-deshielo

Ensayo	Ciclos	REF	25%	50%	100%
f_c	No	59.98	56.05	46.14	32.19
[MPa]	Sí	62.64	56.66	48.69	31.83
Δ (%)		+4.4%	+1.1%	+5.5%	-
					1.1%
f_R	No	10.28	8.97	7.71	5.83
[MPa]	Sí	9.07	7.52	7.05	5.42
Δ (%)		-	-16.2	-8.6%	-
		11.8%			6.9%

f_c =Resistencia a compresión; f_R =Resistencia a flexión; Ciclos: se refiere a ciclos hielo-deshielo

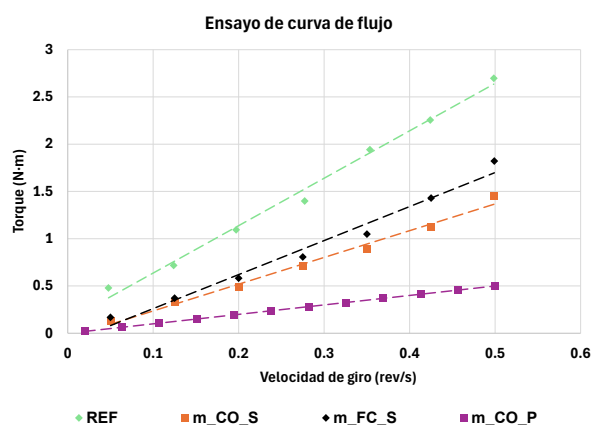


Figura 6. Ensayo de curva de flujo

3.3.2 Hormigones

Las pruebas reométricas se realizaron únicamente para las mezclas con áridos monoreciclados (FC y CO).

La Figura 6 muestra la curva de flujo, es decir, la serie de puntos correspondientes al torque con respecto a la velocidad de giro para los hormigones FC, CO y REF. Las líneas rectas se obtienen trazando una línea de tendencia para cada sucesión de puntos.

La viscosidad plástica μ está representada por la pendiente de las líneas de tendencia, mientras que el límite elástico τ_0 se obtiene de la intersección de las líneas rectas con el eje de ordenadas.

Las curvas relativas a los hormigones FC y REF_1 tienen una pendiente similar y es razonable concluir que los dos hormigones se caracterizan por una viscosidad plástica comparable. La menor pendiente de las curvas

de flujo de CO y CO_1 indica, sin embargo, una mejor capacidad de las mezclas para fluir y deformarse bajo tensión.

El límite elástico τ_0 para el hormigón FC es menor que la obtenida para el caso de los hormigones únicamente con árido reciclado grueso (CO y CO_1).

La Figura 7 muestra los valores de resistencia a compresión. Los hormigones con árido monoreciclado se identifican con la letra (m), mientras que los de árido bi-reciclado se identifican con la letra (b).

Se compararon las resistencias a compresión de los hormigones con áridos monoreciclados parcialmente sustituidos por CMW (hormigones m_FC y m_CO) con las de las muestras m_FC_1, m_CO_1, m_CO_P1, m_CO_P2 con el mismo tipo y sustitución del árido reciclado y con las b_FC_SUB, b_FC_POL y b_CO_SUB con áridos bi-reciclados obtenidos de la tritución del hormigón con áridos CMW (Fig. 7). Los hormigones de referencia se indican con las siglas REF y REF_1. En la Fig. 7 parece haber una correlación entre el origen de los áridos (tanto mono-reciclados como bi-reciclados) y el tamaño del árido de sustitución.

En general, las probetas con áridos bi-reciclados tienen resistencias similares y muestran comportamientos mecánicos intermedios en comparación con las mezclas con áridos mono-reciclados de Subterra (límite superior) y Poltegor (límite inferior).

En lo que se refiere a los resultados de los ensayos de carbonatación (Figura 8) según EN 13295, los mejores resultados se obtienen para los hormigones con áridos bi-reciclados obtenidos de la tritución de hormigones con áridos CMW de Subterra.

En cuanto a la penetración de cloruros (Figura 9) según EN 9944, se observa una mejora en la resistencia (difusión) a los cloruros para hormigones en los que los áridos naturales han sido sustituidos por áridos procedentes de residuos de minas de carbón (CMW). Los áridos procedentes de Subterra, en comparación con

los procedentes de Poltegor, parecen tener una influencia positiva tanto en la resistencia frente a cloruros como en los valores de resistencia a compresión. Esto podría deberse a un mayor desarrollo de productos de hidratación y por tanto a la formación de una porosidad más fina o una mayor densidad de los áridos.

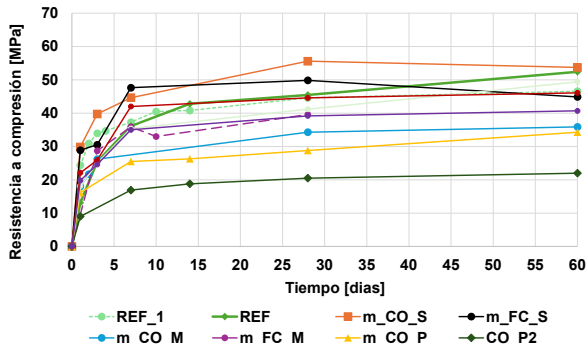


Figura 7. Resistencia a compresión de los hormigones

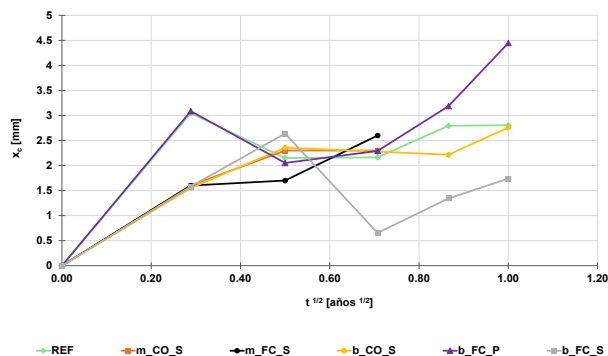


Figura 8. Resultados de las pruebas de carbonatación en hormigones

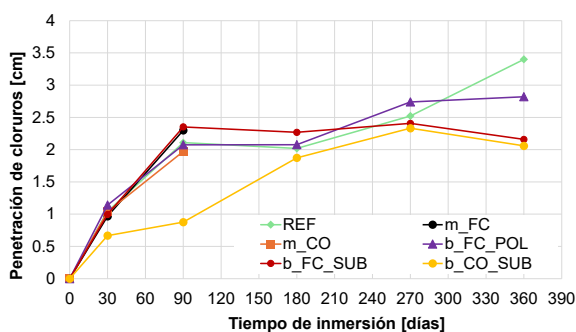


Figura 9. Pruebas de penetración de cloruros

Además, la inmersión a los 25 días de curación del b_CO_SUB influyó positivamente en la resistencia a la difusión de cloruros (como era de

esperar) aunque parece tener una influencia menor después de 6 meses de inmersión. De hecho, tras 6 meses de inmersión, las superficies atacadas por los cloruros son similares para todas las probetas, incluida la mezcla b_FC_SUB sumergida a los 4 días de curación, a excepción del REF.

4. Conclusiones

4.1 UHPC reciclado

- La absorción de agua que aumentaba significativamente después de la prefisuración se redujo efectivamente a valores cercanos a los de referencia a tiempo cero gracias al proceso de autosanado en la solución rica en cloruros.

- Las prestaciones mecánicas se recuperaron completamente tras seis meses de exposición continua para ambas mezclas. Sin embargo, el único caso en el que se alcanzó una completa recuperación después de repetidos ciclos healing-fisuración fue la mezcla con agregados gruesos reciclados, independientemente del tiempo de exposición.

- El proceso de autorreparación proporcionó rigidez adicional a ambas mezclas.

4.2 Uso de geomateriales residuos de minas de carbón

Para hormigones que utilizan CMW se puede confirmar que:

- la presencia del árido monoreciclado aumentó la resistencia a compresión con respecto al hormigón de referencia;
- la sustitución de áridos finos y gruesos por mono y bi-reciclados aumenta la resistencia frente a la carbonatación, permitiendo obtener mejores resultados que el hormigón de referencia;
- la sustitución del árido grueso por árido mono y bi-reciclado aumenta la resistencia a la

difusión de cloruros, permitiendo obtener mejores resultados que el hormigón de referencia.

Agradecimientos

La actividad de investigación relatada en este trabajo se llevó a cabo dentro de los siguientes proyectos de investigación: ReSHEALience (Rethinking Coastal Defense and Green-energy Service infra-structures Through enHancEd-durAbiLity high- performance cement-based materials, GA 760824) finalizado en 2022. El trabajo ha continuado tramite el proyecto SINCERE (The second life of modern period architecture: Resilient and adaptive renovation towards net-zero carbon heritage buildings, GA 101123293). Agradecemos también al proyecto MINRESCUE (From Mining Waste to Valuable Resource: New Concepts for a Circular Economy, GA 899518). Los proyectos arriba mencionados han recibido financiación del programa de investigación e innovación del Fondo Europeo Horizonte 2020 de la Unión Europea. En particular, la continuación de las actividades sobre el "doble reciclado" de hormigón con CMWG se ha realizado y es posible gracias al proyecto NORMA: Naturally Occurring Radioactive Materials Activity. Actividades para el desarrollo de estrategias técnico-científicas y socioeconómicas para una implementación efectiva de la legislación de protección radiológica, financiadas por el INAIL (convocatoria BRiC, 2022). Agradecemos también al Sr. Paolo Broglia y al arquitecto Giuseppe Pappadà del Laboratorio Prove su Materiali, Costruzioni e Strutture (LPMSC) del Politecnico di Milano por el apoyo brindado durante la ejecución de los experimentos.

Referencias

- [1] Schaefer, C.E., Kupwade-Patil, K., Ortega, M., Soriano, C., Büyük"oztürk, O., White, A.E., Short, M.P., 2018. Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint. *Waste Manag.* 71, 426–439.
- [2] United Nations, 2021. "2021 Global Status Report for Buildings and Construction", UN Environ. Program.
- [3] J. Lehne and F. Preston, "Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete," Chatham House, 2018.
- [4] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Xu, Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars, *Constr Build Mater* 81 (2015) 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>.
- [5] N.P. Kannikachalam, D. di Summa, R.P. Borg, E. Cuenca, M. Parpanesi, N. De Belie, L. Ferrara, Assessment of Sustainability and Self-Healing Performances of Recycled Ultra-High-Performance Concrete, *ACI Struct J* 120 (2023) 117–132. <https://doi.org/10.14359/51737336>.
- [6] M. Davolio, S. Al-Obaidi, M.Y. Altomare, F. Lo Monte, L. Ferrara, A methodology to assess the evolution of mechanical performance of UHPC as affected by autogenous healing under sustained loadings and aggressive exposure conditions, *Cem Concr Compos* Submitted 30/12/2022 (2023).
- [7] J. Xiao, Y. Tang, H. Chen, H. Zhang, B. Xia, Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete, *J Clean Prod* 366 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132895>.
- [8] R. García-Giménez, M. Frías, I. Arribas, I. Vegas, R. V. de la Villa, e V. Rubio, «Freeze-thaw effect on the durability of binary cements containing activated coal-mining waste», *Construction and Building Materials*, vol. 190, pp. 140–149, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.090.