

Evaluación de la capacidad de autocurado de hormigones con cenizas de biomasa forestal y áridos porosos de cenizas de carbón

Evaluation of the self-healing capacity of concretes with forest biomass ash and porous aggregates from coal ash

Blas Cantero ^a, Belén González-Fonteboa ^b, Sindy Seara-Paz ^c, David O. Nduka ^d; André Garrido-Iglesias ^e

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña (UDC), Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC). Investigador Postdoctoral Juan de la Cierva b.cantero@udc.es

^b Dr. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña (UDC), Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC). Catedrática de Universidad. bfonteboa@udc.es

^c Dr. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña (UDC), Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC). Titular de Universidad. gumersinda.spaz@udc.es

^d Dr. Civil Engineering. Universidade da Coruña (UDC), Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC), Covenant University. Associate Professor. david.nduka@covenantuniversity.edu.ng

^e Arquitecto Técnico. Universidade da Coruña (UDC), Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC). Estudiante de Doctorado. andre.giglesias@udc.es

RESUMEN

Este estudio analiza el comportamiento de autosanado de dos mezclas de hormigón: una convencional (100C-AN), fabricada con cemento Portland y áridos naturales, y una sostenible (25BA15M-30AP), que incorpora un 25% de cenizas de biomasa, un 15% de metacaolín y un 30% de áridos porosos de cenizas de carbón. Los resultados muestran que los mecanismos autógenos promovidos por la BA y los AP permiten una liberación gradual de agua, favoreciendo el autosanado en condiciones de humedad variable. La mezcla 25BA15M-30AP mostró un rendimiento superior en ciclos de inmersión-secado, alcanzando mayores índices de sellado superficial e impermeabilidad en fisuras grandes (90-110 μm) respecto a la mezcla 100C-AN.

ABSTRACT

This study analyses the self-healing behaviour of two concrete mixes: a conventional mix (100C-AN), made with Portland cement and natural aggregates, and a sustainable mix (25BA15M-30AP), incorporating 25% biomass ash, 15% metakaolin, and 30% porous aggregates from coal ash. The results show that the autogenous mechanisms promoted by BA and AP enable gradual water release, enhancing self-healing under variable humidity conditions. The 25BA15M-30AP mix demonstrated superior performance in wet-dry cycles, achieving higher indices of surface sealing and impermeability in large cracks (90–110 μm) compared to the 100C-AN mix.

PALABRAS CLAVE: hormigón sostenible, autosanado, cenizas de biomasa forestal, áridos porosos, recuperación de la impermeabilidad.

KEYWORDS: sustainable concrete, self-healing, forest biomass ash, porous aggregates, impermeability recovery

1. Introducción

El desarrollo de hormigones sostenibles representa un desafío fundamental en el ámbito de la ingeniería estructural, debido a la creciente necesidad de reducir el impacto ambiental asociado al uso intensivo de cemento Portland y áridos naturales. La incorporación de subproductos industriales, como cenizas de biomasa forestal y de carbón, permite diseñar materiales más respetuosos con el medio ambiente, contribuyendo a la creación de estructuras más resilientes y sostenibles [1].

Paralelamente, los procesos de autosanado en hormigones ofrecen una solución innovadora para extender la vida útil de las estructuras y disminuir los costes de mantenimiento. Estos procesos combinan la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) en la superficie de las fisuras con la formación de productos hidratados como C-S-H, C-A-S-H y etringita, que actúan como barreras internas para el flujo de agua, mejorando la durabilidad [2].

Este estudio evalúa el comportamiento de autosanado de dos mezclas de hormigón: una convencional, fabricada con cemento Portland y áridos naturales, y una mezcla sostenible que incorpora un 25% de cenizas de biomasa forestal, un 15% de metacaolín y un 30% de áridos porosos procedentes de cenizas de carbón. Para ello, se realizaron ensayos que incluyeron la apertura controlada de fisuras y la exposición de las probetas a dos condiciones de autosanado: inmersión continua en agua y ciclos de inmersión-secado. Posteriormente, se evaluaron parámetros clave como el Índice de Sellado Superficial (ISS) y el Índice de Recuperación de la Impermeabilidad (IRI) para analizar la capacidad de estas mezclas de sellar y recuperar la impermeabilidad en diferentes rangos de fisuras y condiciones de autosanado.

2. Materiales y métodos

2.1. Componentes en polvo

En este estudio se han empleado tres componentes principales en polvo: i) cemento Portland (C_{SR}) CEM I 52,5 N-SR5, ii) metacaolín comercial (M) y iii) cenizas de biomasa forestal (BA). Estas últimas fueron obtenidas de una instalación de combustión de biomasa ubicada en Galicia (España), donde la biomasa es quemada a aproximadamente de 700 °C. Las cenizas volantes se recogieron tras procedimientos de limpieza periódica en los separadores ciclónicos a una temperatura cercana a 70 °C.

En la Tabla 1 se presentan las propiedades físicas y la distribución de partículas de los tres componentes en polvo, utilizados como ligantes en las mezclas diseñadas.

Tabla 1. Propiedades físicas de los componentes en polvo.

Propiedad	C_{SR}	M	BA
ρ_r (g/cm ³)	3.04	2.55	2.68
A_{BET} (m ² /g)	1.36	4.25	0.63
D_{10} (μm)	4.91	4.18	36.87
D_{50} (μm)	23.69	20.96	90.07
D_{90} (μm)	49.77	112.17	186.27

Nota: ρ_r : densidad real, A_{BET} : área específica, D_{10} , D_{50} , D_{90} : distribución de tamaño de partículas.

Las BA presentan una composición química variada (Tabla 2), con un contenido significativo de SiO_2 (40%) y Al_2O_3 (16.6%), y limitado en CaO (10.2%). También contiene cantidades significativas de Fe_2O_3 (5.5%) y MgO (2.8%).

Tabla 2. Composición química de la cenizas de biomasa (BA) y áridos porosos de carbón (AP)

Óxidos (%)	BA	AP
CaO	10.2	7.4
SiO ₂	40	35.9
Al ₂ O ₃	16.6	11.3
Fe ₂ O ₃	5.5	12.3
K ₂ O	6.9	0.8
Na ₂ O	1.6	0.7
MgO	2.8	2.5
SO ₃	2.4	0.9
LOI*	2.7	27.1

Las BA destacan por su morfología irregular, como se observa en la Figura 1, caracterizada por partículas fracturadas, bordes angulares y una distribución heterogénea de microporos (1-5 μ m). Esta combinación de características sugiere que las partículas de BA pueden actuar como reservorios de agua, lo que resulta favorable para los procesos de curado interno, ya que permite una liberación gradual de agua durante la hidratación autógena.

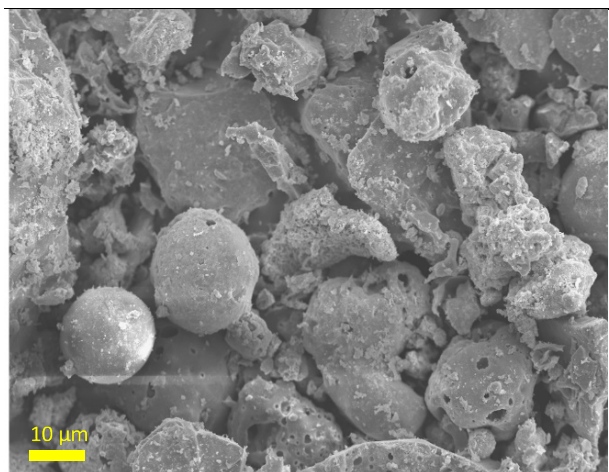


Figura 1. Micrografía SEM de las cenizas de biomasa forestal

2.2. Áridos utilizados

2.2.1. Áridos naturales

Los áridos naturales de machaqueo utilizados son de origen calizo y se dividieron en dos

fracciones granulométricas: arena natural (NS), con un tamaño de partícula de 0-4 mm, y grava natural (NG), con un tamaño de partícula de 6-12 mm.

Estos áridos presentan una baja capacidad de absorción de agua como se muestra en la Tabla 3. La arena natural, con su mayor contenido de finos (<0.063 mm), es adecuada para hormigones autocompactantes debido a su capacidad para mejorar la cohesión y reducir el riesgo de segregación (Figura 2)

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas de los áridos naturales y porosos.

Propiedad	AN	GN	AP
ρ_s (kg/m ³)	2.47	2.52	1.19
W _{24h} (%)	1.05	0.65	36.7
IL (wt%)	-	17	-
LA (wt%)	-	18	-

Nota: ρ_s : densidad específica, W_{24h}: absorción de agua en 24 horas, IL: índice de las; LA: coeficiente de Los Angeles.

2.2.2. Áridos porosos de cenizas de carbón

Los áridos porosos (AP) provienen de cenizas de fondo de carbón subproducto de la combustión de carbón en la central térmica de As Pontes (España). Se caracterizan por su baja densidad y alta capacidad de absorción de agua significativamente mayor respecto a la arena natural (36.7% frente a 2.4%, respectivamente). (Tabla 3) lo que los hace adecuados como reservorios de agua en mezclas de hormigón.

Su composición química incluye óxidos principales como SiO₂ (35.9%), Fe₂O₃ (12.3%), y Al₂O₃ (11.3%), junto con cantidades menores de CaO (7.4%) y MgO (2.5%). Además, su alto contenido de LOI (27.1%) refleja la presencia de compuestos volátiles y carbonatos residuales, asociados con las condiciones de combustión del carbón.

La distribución granulométrica de los AP cumple con los límites normativos establecidos en el Código Estructural [3] para su uso en hormigones estructurales, como se muestra en la Figura 2. En comparación con la AN, los AP

presentan una curva granulométrica más uniforme y un menor contenido de finos (<0.063 mm).

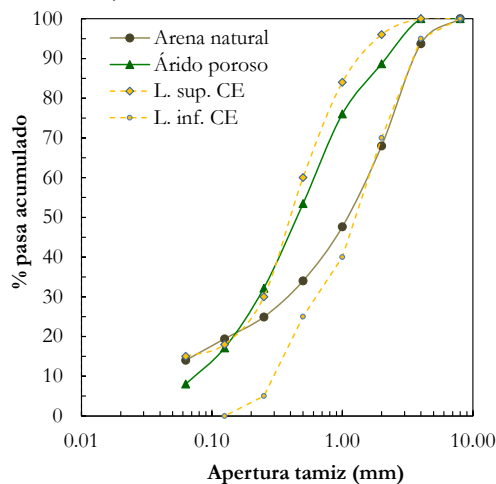


Figura 2. Distribución granulométrica de la arena natural y áridos porosos comparada con los límites normativos establecidos por el Código Estructural (CE) para su uso en hormigones estructurales.

La Figura 3 muestra una micrografía SEM de los AP, donde se observa su morfología heterogénea, caracterizada por una mezcla de partículas esféricas y fragmentadas. Esta estructura, junto con su elevada porosidad, contribuye significativamente a su capacidad de absorción de agua.

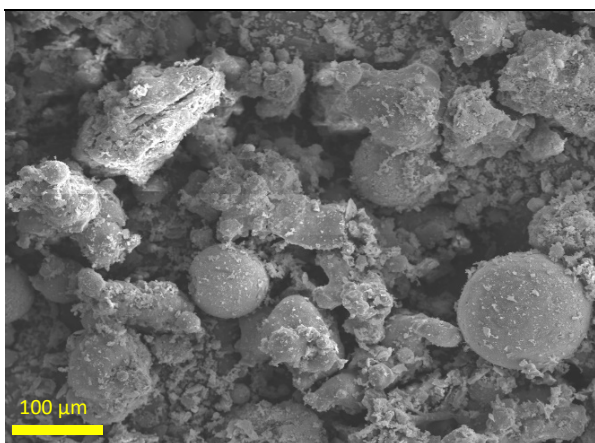


Figura 3. Micrografía SEM de los áridos porosos de cenizas de carbón.

2.2.3. Superplastificante

Se utilizó superplastificante MasterEase 3850 basado en la tecnología de polímeros PAE que

permite una fabricación de mezclas de elevada fluidez y de alta resistencia.

2.4. Diseño de las mezclas

La Tabla 4 muestra el diseño de las dos mezclas de hormigón. Los parámetros de dosificación se establecieron en volumen y se mantuvieron constantes en las dos mezclas diseñadas. Se fijó en 1.1 la relación entre el volumen de agua y el total de material cementante activo (cemento y metacaolín) ($V_a/V_c = 1.1$). Además, la relación entre el volumen de áridos finos (AN y AP) y áridos gruesos (AG) se estableció en 1.0 ($A_f/A_g = 1.0$). Finalmente, la dosificación de superplastificante fue de un 0.6% sobre los materiales cementantes activos.

Tabla 4. Diseño de las mezclas (l/m³)

Componentes	100C-AN	25BA15M-30AP
Cemento (C)	189.93	114.04
Metacaolín (M)	-	28.51
Biomasa (BA)	-	47.52
Agua	208.93	208.93
Arena natural	300.00	210.00
Áridos porosos	-	90.00
Gravilla natural	300.00	300.00
Superplastificante	1.14	0.86

2.5. Preparación de los discos hormigón para la creación de fisuras

Para cada mezcla, se fabricaron seis probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. La fabricación y el curado de las probetas se realizó siguiendo la norma europea EN 12390-2 [4]. Tras 14 días de curado, las probetas cilíndricas se cortaron en discos de 40 mm de espesor utilizando una cortadora de disco diamantado con refrigeración por agua para minimizar daños mecánicos o térmicos. Los discos obtenidos continuaron su curado en agua a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un día antes de los ensayos de apertura de fisura, los discos se prepararon envolviendo una capa de fibra de vidrio

alrededor de su perímetro para controlar la apertura de las fisuras durante el ensayo de tracción indirecta. Además, se aplicó una capa de resina impermeable sobre la fibra de vidrio para garantizar un flujo unidireccional durante el ensayo de permeabilidad. Los discos preparados para el ensayo de fisuración se muestran en la Figura 4.



Figura 4. Discos de hormigón preparados para el ensayo de fisuración.

3. Programa experimental

3.1. Proceso de apertura de fisura

A los 28 días de curado, los discos de 100 mm de diámetro y 40 mm de espesor se sometieron al ensayo brasileño de tracción indirecta, controlado mediante un sistema servo-hidráulico. La apertura de las fisuras en ambos lados del disco se midió, y el promedio de estas mediciones se utilizó para controlar el ensayo. Se colocaron dos transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT), uno en cada lado del disco a la mitad de su altura. La apertura de la fisura se incrementó de manera controlada a una velocidad de $0.2 \mu\text{m/s}$ hasta alcanzar una apertura objetivo de $300 \pm 50 \mu\text{m}$. Finalmente, los discos se descargaron, lo que resultó en una apertura residual de fisura de $100 \pm 50 \mu\text{m}$.

3.2. Condiciones de curado para promover el autosanado

Los discos se sometieron a dos condiciones de exposición para promover el autosanado: i) inmersión H_2O : inmersión continua en agua de grifo y ii) ciclos H_2O : inmersión cíclica en agua de grifo durante 4 días, seguida de almacenamiento en condiciones climáticas estándar (CC) a 20°C y 60% de humedad relativa (HR) durante 3 días. Los períodos de exposición se prolongaron durante 28 y 90 días tras la apertura de fisuras.

4. Análisis de la eficiencia del autosanado

4.1. Análisis superficial de la fisura.

Se realizaron mediciones superficiales de la fisura utilizando un microscopio digital DinoLite equipado con el software DinoCapture para el procesamiento de imágenes. La Figura 5 muestra el montaje utilizado para la medición de las fisuras.

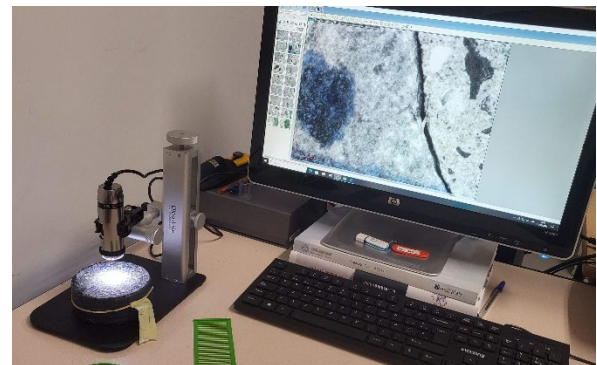


Figura 5. Montaje para la medición de las fisuras en discos.

Se establecieron ubicaciones específicas para permitir el análisis de la misma área, tanto tras la fisuración como después del proceso de autosanado. Para marcar las ubicaciones de medición de las fisuras, se emplearon plantillas impresas en 3D con puntos de referencia lo que permitió remarcar los puntos en caso de que se borraran durante el periodo de curación. Se

identificaron diecisiete ubicaciones de la fisura tanto en la cara superior como en la inferior de los discos.

El Índice de Sellado Superficial (ISS) se calculó utilizando la ecuación (1):

$$ISS = 1 - \frac{W_s}{W_i} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde, W representa el ancho promedio de la fisura por espécimen inmediatamente después de la creación de la fisura (i), y (s) es el valor medido después del período de autosanado.

4.2. Ensayo de permeabilidad al agua

Se realizó el ensayo de permeabilidad utilizando el método de flujo de agua constante con una carga hidráulica de 450 mm. La Figura 6 muestra el esquema del montaje utilizado para desarrollar este método de ensayo. Como se muestra en la misma, el agua que atravesaba las fisura a través de los discos se recogía en recipientes colocados sobre balanzas electrónicas conectadas a un ordenador. El sistema registraba el peso del agua filtrada a intervalos de 5 minutos. La permeabilidad se midió inmediatamente después de la fisuración y nuevamente tras el proceso de autosanado.

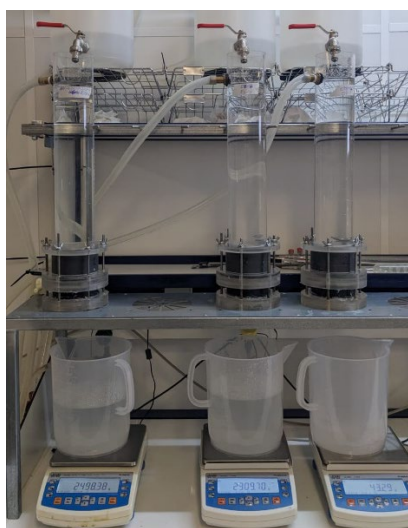


Figura 6. Montaje para el ensayo de permeabilidad de carga constante en discos fisurados.

El valor del flujo de agua se calculó a partir del volumen de agua acumulado durante un período de 60 minutos, y se expresó en milímetros cúbicos por minuto (mm^3/min). El Índice de Recuperación de Impermeabilidad (IRI) se calculó utilizando la ecuación (2):

$$IRI = 1 - \frac{Q_s}{Q_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde (Q_s) es caudal de agua medido tras el periodo de autocurado y (Q_i), el caudal de agua medido inmediatamente después de la fisuración

5. Resultados y discusión

5.1. Índice sellado superficial

La precipitación de CaCO_3 en la superficie de las fisuras es el mecanismo principal de sellado superficial en ambas mezclas. Sin embargo, las propiedades específicas de cada mezcla influyen significativamente en su rendimiento, dependiendo del rango fisura, las condiciones de autocurado y el tiempo de exposición. La Figura 7 y Figura 8 muestran los valores de ISS en función del rango de fisura, las condiciones de autosanado (inmersión H_2O y ciclos H_2O) y los tiempos de exposición (28 y 90 días) para las mezclas 100C-AN y la mezcla 25BA15M-30AP. Según estos datos, en fisuras pequeñas ($<70 \mu\text{m}$), la proximidad de las paredes facilita la saturación local de iones Ca^{2+} y CO_3^{2-} , lo que favorece una precipitación eficiente de CaCO_3 [5]. Como resultado, en ambas mezclas alcanzan ISS cercanos al 100% tras 90 días de exposición, independientemente de las condiciones de autocurado evaluadas (inmersión H_2O o ciclos H_2O).

En fisuras medianas ($70\text{-}90 \mu\text{m}$), la mezcla 100C-AN mantiene un ISS del 96% a 90 días inmersión H_2O , pero en condiciones de ciclos H_2O su rendimiento se reduce a un 86.1%, evidenciando la dependencia de esta mezcla al agua externa.

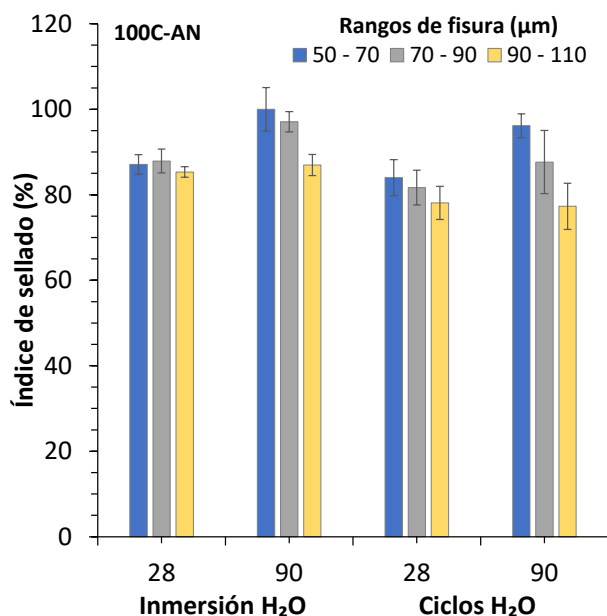


Figura 7. Índice de sellado superficial según rango de fisuras y condiciones de autosanado (inmersión H₂O y ciclos H₂O) durante 28 y 90 días de exposición para la mezcla 100C-AN.

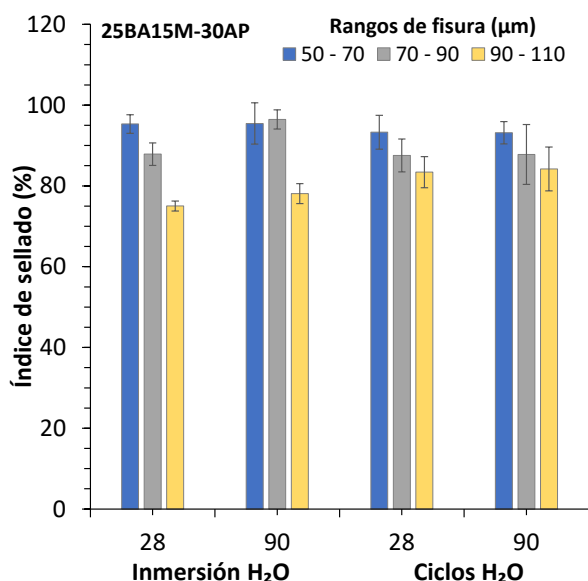


Figura 8. Índice de sellado superficial según rango de fisuras y condiciones de autosanado (inmersión H₂O y ciclos H₂O) durante 28 y 90 días de exposición para la mezcla 25BA15M-30AP.

En contraste, la mezcla 25BA15M-30AP presenta un rendimiento más consistente, con valores de ISS del 96.5% en inmersión continua y 90.5% en ciclos, lo que refleja la contribución del curado autógeno promovido por los AP y las BA, que actúan como reservorios de agua, liberándola gradualmente para mantener la

hidratación y el suministro de iones necesarios. Este mecanismo favorece el sellado superficial incluso en periodos de escasez de agua.

En fisuras grandes (90-110 μm), la mezcla 25BA15M-30AP nuevamente vuelve a superar a la mezcla de referencia 100C-AN en condiciones de ciclos H₂O (86.6% vs 77.3% a los 90 días). A diferencia de las fisuras medianas, en este rango las mayores demandas de agua y transporte iónico requieren un suministro más sostenido. La capacidad de los AP y BA de actuar como fuentes internas de curado resulta crucial. Estos materiales no solo aseguran la disponibilidad de agua durante periodos secos, sino que también mantienen un flujo constante de Ca²⁺ hacia la superficie de las fisuras, promoviendo la precipitación de CaCO₃.

5.2. Índice de recuperación de la impermeabilidad

El Índice de Recuperación de la Impermeabilidad (IRI) está influenciado por dos factores principales: i) el sellado superficial, asociado a la precipitación de carbonato de calcio (CaCO₃), y ii) el sellado interno, que se debe a la formación de depósitos de CaCO₃ y geles hidratados, como los silicatos de calcio hidratados (C-S-H), los silicatos de calcio y aluminio hidratados (C-A-S-H) y, potencialmente, la etringita [6]. La Figura 9 y Figura 10 muestran la evolución del IRI en función del rango de fisuras, las condiciones de autosanado (inmersión H₂O y ciclos H₂O) y los tiempos de exposición (28 y 90 días) para las mezclas 25BA15M-30AP y 100C-AN.

Según estos datos, el IRI varía según el tamaño de las fisuras, destacando diferencias en el rendimiento entre ambas mezclas bajo distintas condiciones de autosanado. En fisuras pequeñas (50-70 μm), el IRI de la mezcla 25BA15M-30AP es significativamente superior al de la mezcla 100C-AN en condiciones de ciclos H₂O (99.1% vs 82.7% a los 28 días). Este comportamiento subraya la eficiencia del curado

autógeno en presencia de AP y BA. A los 90 días, la mezcla 25BA15M-30AP mantiene un IRI de 90.1% en ciclos H₂O, mientras que 100C-AN disminuye a 80.8%. En condiciones de inmersión continua, ambas mezclas presentan valores elevados tras 90 días, superando el 97%, estos resultados son semejantes a los observados en el ISS para esta condición de autosanado.

En fisuras medianas (70-90 μm), las mezclas presentan un comportamiento diferencial. En condiciones de inmersión H₂O, la mezcla 100C-AN alcanza un IRI de 99.9% a los 28 días, mientras que 25BA15M-30AP logra un valor ligeramente inferior (93.6%). Sin embargo, en ciclos H₂O, 25BA15M-30AP mantiene un mejor rendimiento (90.5% frente a 82.1% a los 90 días), destacando la contribución de los mecanismos autógenos, como la liberación gradual de agua por los AP y BA, que permiten la formación continua de productos como C-S-H y etringita, que cosen la fisura internamente incluso en condiciones de baja disponibilidad de agua [7]. Finalmente, en fisuras grandes (90-110 μm), donde las demandas de agua y transporte iónico son mayores, la mezcla 25BA15M-30AP muestra una ventaja en ciclos H₂O, con valores de IRI de 84.0% a los 28 días y 90.5% a los 90 días, mientras que 100C-AN presenta valores significativamente menores (79.8% y 79.1%, respectivamente). Estos resultados resaltan la importancia de los mecanismos internos de curado, donde la formación de productos hidratados dentro de la fisura, como C-A-S-H y etringita, actúan como barreras internas para el flujo de agua. Sin embargo, en condiciones de inmersión H₂O, la mezcla 100C-AN sigue siendo superior, probablemente debido a su mayor contenido en portlandita, lo que le permite formar una mayor cantidad de geles hidratados y etringita, promoviendo un cosido interno más eficiente [8]. Esta mezcla alcanza valores de 97.9% frente a 87.6% para 25BA15M-30AP.

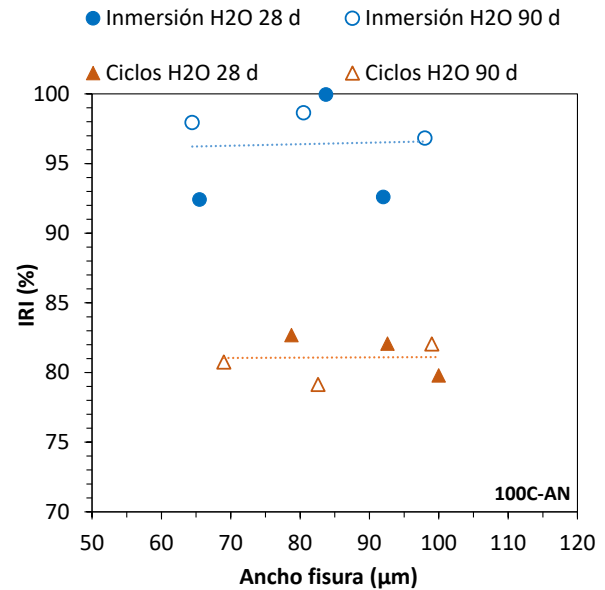


Figura 9. Índice de Recuperación de la Impermeabilidad (IRI) en función del ancho de fisura y las condiciones de autosanado (inmersión H₂O y ciclos H₂O) para mezcla 100C-AN.

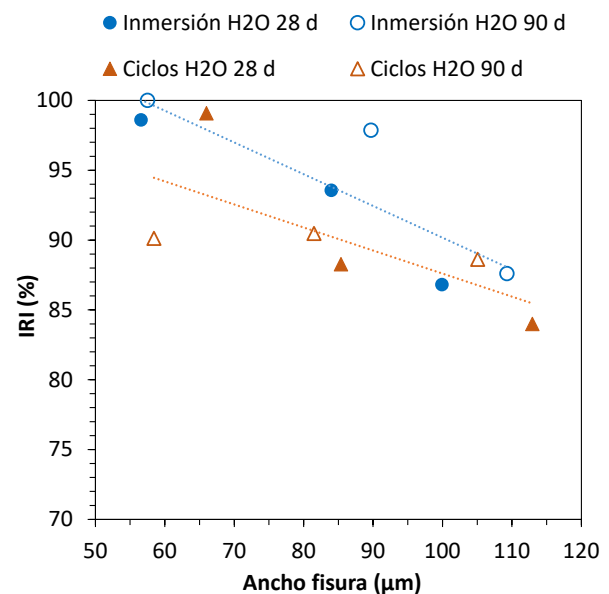


Figura 10. Índice de Recuperación de la Impermeabilidad (IRI) en función del ancho de fisura y las condiciones de autosanado (inmersión H₂O y ciclos H₂O) para mezcla 25BA15M-30AP.

6. Conclusiones

Esta investigación evaluó el rendimiento de autosanado de dos mezclas de hormigón: una mezcla convencional fabricada con cemento Portland y áridos naturales (100C-AN) y una

mezcla sostenible (25BA15M-30AP), que incorpora un 25% de cenizas de biomasa forestal (BA), un 15% de metacaolín (M) y un 30% de áridos porosos (AP) procedentes de cenizas de carbón. Discos cilíndricos se sometieron a un proceso controlado de apertura de fisuras. Para promover el autosanado en estos discos, se expusieron a dos condiciones de curado autónomo: inmersión continua en agua (inmersión H₂O) y ciclos de inmersión-secado en agua (ciclos H₂O). Tras este proceso, se evaluó el sellado superficial (ISS) y la impermeabilización (IRI) de estas fisuras. Los principales resultados son:

- *Eficiencia según la condición de autocurado:* En general, la mezcla 25BA15M-30AP mostró una mayor eficiencia en condiciones de ciclos H₂O gracias a los mecanismos de curado autógeno proporcionados por los AP y las BA. Estos materiales actúan como reservorios de agua, liberándola de manera gradual para mantener la hidratación y favorecer el transporte iónico en condiciones de escasez de agua. Por otro lado, la mezcla 100C-AN presentó un rendimiento superior bajo inmersión H₂O, particularmente en fisuras medianas y grandes, debido a su mayor contenido de portlandita, que favorece la formación de carbonato de calcio (CaCO₃) y el sellado eficiente de las fisuras.
- *Índice de Sellado superficial (ISS):* En fisuras pequeñas (<70 μm), ambas mezclas alcanzaron valores cercanos al 100% en inmersión H₂O a 90 días. Sin embargo, en ciclos H₂O, la mezcla 25BA15M-30AP presentó un rendimiento superior, con un ISS promedio del 99%, frente al 82% de la mezcla 100C-AN. En fisuras grandes (90-110 μm), la mezcla 100C-AN alcanzó un ISS promedio del 98% en inmersión H₂O, superando al 88% de la mezcla 25BA15M-30AP.
- *Índice de Recuperación de la Impermeabilización (IRI):* En fisuras pequeñas, ambas mezclas lograron buenos niveles de impermeabilización, pero

la mezcla 25BA15M-30AP destacó en ciclos H₂O, alcanzando un IRI promedio del 90%, frente al 79% de la mezcla 100C-AN. En fisuras grandes (90-110 μm), la mezcla 25BA15M-30AP superó significativamente a la mezcla 100C-AN en ciclos H₂O, con un IRI promedio del 90% frente al 81% de la mezcla 100C-AN. Esto resalta la capacidad de las BA y los AP para sostener procesos internos de autosanado al proporcionar hidratación adicional. Estos mecanismos promueven la formación de productos como geles de C-S-H, C-A-S-H y etringita. Que cosen internamente las fisuras y contribuyen a una mejora significativa de la impermeabilidad incluso en condiciones de menor disponibilidad de agua.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación y a la Agencia Estatal de Investigación por el apoyo recibido en el marco de diversos programas de financiación. En particular, el primer autor agradece el apoyo de las ayudas Juan de la Cierva-Formación (FJC2021-047024-I), que han financiado su participación en este trabajo. Además, este estudio ha contado con la financiación de los proyectos: NanoBioCell: Nanoingeniería de Materiales Cementantes Sostenibles y de Alto Rendimiento mediante el Uso de Nanocelulosa Derivada de Biomasa [PDC2023-151636B-I00] y PREHEALING: Diseño de prefabricados de hormigón empleando estrategias sostenibles de auto reparación para el incremento de su vida útil [PDC2021-121660-I00]. Asimismo, se reconoce el soporte técnico proporcionado por el Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC).

Referencias

- [1] C. Yao, A. Shen, W. Wang, Y. Guo, X. Dai, G. Ren, Review on autogenous self-healing technologies and multi-dimension mechanisms for cement concrete, *Archiv.Civ.Mech.Eng* 24 (2023) 15.

<https://doi.org/10.1007/s43452-023-00821-5>.

- [2] C. Xue, Performance and mechanisms of stimulated self-healing in cement-based composites exposed to saline environments, *Cement and Concrete Composites* 129 (2022) 104470. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104470>.
- [3] Ministerio de la Presidencia, Real Decreto 470/2021. Código Estructural, Madrid, Spain, 2021.
- [4] European Committee for Standardization, EN-12390. Testing hardened concrete. Part 2: Making and curing specimens for strength tests, 2009.
- [5] S. Fan, M. Li, X-ray computed microtomography of three-dimensional microcracks and self-healing in engineered cementitious composites, *Smart Mater. Struct.* 24 (2014) 015021. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/1/015021>.
- [6] P. Chindasiriphan, H. Yokota, P. Pimpakan, Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability, *Construction and Building Materials* 233 (2020) 116975. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116975>.
- [7] J. Sun, K.H. Kong, C.Q. Lye, S.T. Quek, Effect of ground granulated blast furnace slag on cement hydration and autogenous healing of concrete, *Construction and Building Materials* 315 (2022) 125365. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125365>.
- [8] S. Gwon, Y.C. Choi, M. Shin, Internal curing of cement composites using kenaf cellulose microfibers, *Journal of Building Engineering* 47 (2022) 103867. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103867>.