

4

Influencia De La Carbonatacion Acelerada Al Árido Fino Reciclado En Las Propiedades Del Hormigón.

*Influence Of Accelerated Carbonation Of Recycled Fine
Aggregate On The Properties Of Concrete.*

Autora

Giselle Limonte Morales

Ing. Civil, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Carretera Camajuaní km 5

gisellelimonte880@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5694-3516>

4

Influencia De La Carbonatacion Acelerada Al Árido Fino Reciclado En Las Propiedades Del Hormigón.

Influence Of Accelerated Carbonation Of Recycled Fine Aggregate On The Properties Of Concrete.

RESUMEN

En las últimas décadas el uso de materiales reciclados ha ido en aumento, principalmente con el propósito de un desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente. El proceso de carbonatación es capaz de mineralizar carbono de forma permanente en forma de áridos para satisfacer el creciente mercado de productos ecológicos como un material sin carbono. La reducción de las emisiones de CO₂ en la industria se puede integrar con el tratamiento de residuos, pudiendo ser utilizados en la industria de la construcción en la formulación de un cemento verde y como árido en nuevos hormigones. En este artículo se evalúa el impacto del uso de un árido fino reciclado carbonatado en las propiedades de hormigones que sustituyen el 100% de áridos naturales por áridos reciclados. A la fracción fina de árido reciclado (0-4 mm) se le aplica un tratamiento de carbonatación acelerada en ambiente controlado de: (i) Humedad Relativa = 75%, (ii) concentración de CO₂ = 20 % y (iii) tiempo de residencia de 24 horas. Logrando un incremento del 8,42% en la formación de CaCO₃ con respecto a la fracción fina sin carbonatar y una disminución del 40% en la absorción de agua con respecto al árido fino sin carbonatar. Los hormigones producidos superan los 35 MPa de resistencia a compresión a los 28 días de curado, la porosidad efectiva no supera el 5% lo que indica un hormigón de buena calidad y durabilidad.

Palabras clave: áridos reciclados finos, carbonatación acelerada por método estático, hormigón reciclado.

ABSTRACT

In recent decades, the use of recycled materials has been on the rise, primarily for the purpose of sustainable development and environmental protection. The carbonation process is capable of permanently mineralizing carbon in the form of aggregates to meet the growing market for eco-friendly products as a carbon-free material. The reduction of CO₂ emissions in the industry can be integrated with waste treatment, which can be used in the construction industry in the formulation of green cement and as aggregate in new concretes. This article evaluates the impact of using a carbonated recycled fine aggregate on the properties of concretes that replace 100% of natural aggregates with recycled aggregates. An accelerated carbonation treatment is applied to the fine fraction of recycled aggregate (0-4 mm) in a controlled environment of: (i) Relative Humidity = 75%, (ii) CO₂ concentration = 20%, and (iii) residence time of 24 hours. This results in an 8.42% increase in the formation of CaCO₃ compared to the uncarbonated fine fraction and a 40% decrease in water absorption compared to the uncarbonated fine aggregate. The produced concretes exceed 35 MPa of compressive strength at 28 days of curing, and the effective porosity does not exceed 5%, indicating a concrete of good quality and durability.

Keywords: fine recycled aggregates, accelerated carbonation by static method, recycled concrete.

Nota Editorial: Recibido: 26 de Junio 2025 Aceptado: 16 de Septiembre 2025

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 100 años, el hormigón ha revolucionado la forma de construcción en todo el mundo, convirtiéndose en el material de construcción más empleado y el cual ha dado forma al mundo moderno. La industria del hormigón, unida a la industria cementera, desempeñan un papel primordial en la construcción de un futuro sostenible para la sociedad actual. El objetivo principal es encontrar la manera más adecuada de construir comunidades resistentes, prosperas y sostenibles tomando en cuenta los constantes cambios climáticos y apoyando a su vez la transición a un hormigón con energía baja en carbono. Las empresas miembros del Global Cement and Concrete Association (GCCA) asumen hace ya varios años una estrategia de mercado para la descarbonización del hormigón basada en una revolución de la economía circular, que involucra todas las etapas de la vida útil del producto desde la fabricación del cemento con energías renovables hasta una reutilización y reciclaje más eficiente del hormigón [1].

De acuerdo con el Foro Económico Mundial, 100 mil millones de toneladas de materiales ingresan a la economía global cada año, una cifra que va en aumento y de la cual, cerca de la mitad de estos recursos se utilizan en ingeniería y construcción. Junto con esto, el desarrollo en economías emergentes, el crecimiento poblacional y la urbanización requieren de recursos para edificios e infraestructuras, al igual que la intensificación y renovación en economías desarrolladas. Ante esta realidad, un enfoque basado en la economía circular es esencial para reducir la intensa demanda de recursos, mejorando la eficiencia en la fabricación y el diseño, maximizando la vida útil de proyectos y elementos, minimizando los residuos y reutilizándolos [2].

El hormigón es el elemento más empleado en la construcción debido a su resistencia y durabilidad, su composición tiene un impacto significativo en sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido. Los componentes principales del hormigón incluyen el cemento, los áridos (finos y gruesos), el agua y los aditivos [3]. Por otro lado, la producción de hormigón requiere la extracción de grandes cantidades de arena y grava. La minería de estos materiales puede causar la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad y la contaminación de cuerpos de agua. La extracción de arena ha provocado serios problemas ambientales en varias regiones del mundo, incluyendo la erosión de costas y ríos [4]. De igual manera la generación de residuos en la producción de hormigón resulta un aspecto a tener en cuenta en la evaluación ambiental de dicho producto. Los residuos si no se gestionan adecuadamente, pueden contaminar el suelo y el agua.

Para mitigar este impacto ambiental, se han desarrollado tecnologías más sostenibles en la producción de hormigón. Entendiendo que su huella ecológica está asociada al proceso productivo y obtención de sus materias primas principales, por lo que las medidas de mitigación deben incidir directamente en estos procesos. La investigación futura deberá enfocarse en el desarrollo de hormigones más sostenibles y la implementación de tecnologías de captura de carbono [3]. Según [5] el reciclaje de hormigón puede mitigar parte de este impacto, pero todavía hay desafíos en su implementación a gran escala.

Los áridos reciclados (AR) ofrecen una alternativa prometedora para mitigar el impacto medioambiental de la producción de hormigón. Los estudios han demostrado que la incorporación de materiales reciclados como residuos de construcción y demolición (RCD), puede reducir la huella de carbono y el consumo de energía asociados a la fabricación de hormigón [6], [7]. Aunque el hormigón de áridos reciclados (RCA) puede presentar propiedades mecánicas ligeramente reducidas en comparación con el hormigón convencional, estas diferencias suelen ser insignificantes cuando los niveles de sustitución se mantienen hasta el 30% [8]. Las investigaciones indican que el RCA puede alcanzar un rendimiento comparable al del hormigón tradicional, al tiempo que reduce significativamente el impacto medioambiental [6]. Sin embargo, sigue habiendo problemas para mejorar la eficiencia del procesamiento de los áridos reciclados y establecer normas internacionales. A pesar de estos retos, el uso de áridos alternativos en la producción de hormigón presenta una solución viable para las prácticas de construcción sostenible y justifica una mayor investigación [9]; [10]. Esto abre un abanico de posibilidades para su uso en estructuras de menor carga.

Los AR, en particular los áridos de hormigón reciclado, afectan las propiedades del hormigón tanto en estado fresco como endurecido [11]; [12]. El RCA suele tener una mayor porosidad y absorción de agua en comparación con el hormigón de áridos naturales, lo que conduce a una menor densidad y resistencia del hormigón. La resistencia a la compresión puede disminuir hasta un 10% a medida que aumenta el porcentaje de AR [13]. Las propiedades a largo plazo del RCA son generalmente inferiores a las del hormigón de áridos naturales, incluyendo aspectos de retracción, fluencia y durabilidad [14]. Sin embargo, estas propiedades pueden mejorarse mediante un mejor control de factores como el porcentaje de sustitución del AR, la relación agua-cemento y los aditivos minerales [14]; [12]. El reciclaje de RCD no solo prolonga el ciclo de vida de los materiales, sino que también reduce la huella de carbono asociada con la producción de nuevos áridos. [15].

Por lo general los áridos finos reciclados (AFR) son un subproducto de la trituración de RCD, con alto contenido de contaminantes razón por la cual es la fracción menos empleada en la formulación de nuevos productos. Su uso es recomendable siempre que estos contaminantes se examinen en la producción de hormigones. El origen del RCD y su proceso de trituración afectan significativamente a la composición del AFR, un principio básico para mejorar sus propiedades es realizar un proceso de trituración similar al utilizado para los áridos naturales triturados [16]. El proceso de trituración tiene un efecto positivo en la calidad del AFR producido y, posteriormente, en el hormigón que lo incluirá. Los RCD sometidos a un procedimiento de trituración secundaria normalmente dan como resultado un AFR con menos mortero adherido que aquellos que siguen solo un procedimiento de trituración primaria [17].

Existen diferentes técnicas o métodos de tratamiento para mejorar las propiedades de los áridos finos reciclados, entre ellos las tecnologías que incluyen captura y curado con CO_2 han sido estudiadas a profundidad. Por sus propiedades alcalinas, los áridos reciclados de hormigón pueden constituir una forma efectiva de captura del CO_2 industrial, y, al mismo tiempo, pueden ser mejoradas sus propiedades físico-químicas y mecánicas mediante la reducción de fases que inducen a expansividad, CaO y MgO libres, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Además de promover un incremento en sus propiedades puzolánicas, lo que resulta beneficioso para aumentar las prestaciones mecánicas y durabilidad de los productos base cemento de baja huella elaborados con los residuos carbonatados [18]. Los productos de cemento hidratados en la pasta de cemento adherida pueden reaccionar con CO_2 para generar carbonato de calcio, mejorando así la fuerza del mortero unido a la superficie. La dureza del carbonato de calcio es mayor que los productos de hidratación de hidratos de calcio (CH) e hidratos de silicato de calcio (CSH). Además, el carbonato de calcio generado puede mejorar la sólida continuidad entre el mortero antiguo y la zona de transición (ITZ), que es beneficiosa para las propiedades físicas, mecánicas y la durabilidad del árido reciclado de hormigón [19].

La primera persona que propuso la carbonatación acelerada fue Seif Ritz en 1990, quien expuso un método en el cual se utiliza una alta concentración de CO_2 en una cámara cerrada que reaccionaría con los silicatos pulverizados con fines de atrapar el gas y permitir una segura disposición de este [20]. Este método no ha cambiado mucho desde que fue planteado, puesto que aún se utilizan materiales alcalinos que se disponen para reaccionar con gas de CO_2 en una alta concentración y pureza. Entre las variables ambientales que regulan el proceso se encuentran: la concentración de CO_2 , la temperatura y la humedad relativa [21]. Los investigadores interesados en modificar el árido reciclado de hormigón a través de un proceso de carbonatación acelerada, deben seleccionar con base a su experiencia los valores de las tres últimas variables. [18] Comprobaron la influencia de áridos finos reciclados carbonatados en probetas de mortero de cemento; para el estudio utilizaron una cámara ambiental a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, humedad relativa de $60 \pm 5\%$ y una concentración de CO_2 del $20 \pm 2\%$.

Los niveles elevados de CO_2 aceleran el consumo de hidrato de silicato de calcio de alta densidad, lo que a veces extiende la carbonatación a clínker sin reaccionar [22]. En las mezclas de cemento Portland ordinarias, la carbonatación se manifiesta convirtiendo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en CaCO_3 y alterando la estructura de los poros; en los sistemas que contienen escoria, la carbonatación de CS-H conduce a cambios de fase avanzados, como la formación de gel de sílice. La carbonatación acelerada, muestra mejoras en la resistencia a la compresión de aproximadamente el 12 al 20 % y mejoran la durabilidad al reducir la absorción de agua y la penetración de iones de cloruro [23]. Por ejemplo, un estudio logró un aumento del 19,8 % en la resistencia a la compresión (46,8 frente a 38,45 MPa) con una reducción del 50,4 % en la penetración de cloruro en condiciones controladas de CO_2 ($20 \pm 2\%$ de CO_2 , 25°C , $55 \pm 5\%$ de humedad relativa, 0,5 MPa durante 4-7 días) [24].

El presente artículo tiene como objetivo evaluar el impacto de la carbonatación como técnica de tratamiento aplicada a la fracción fina de árido reciclado en las propiedades físico-mecánicas de dicha fracción y posteriormente el aporte de la fracción carbonatada en las propiedades de un hormigón elaborado con 100% de áridos reciclados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Se utiliza un material reciclados tipo mixto procedente de una Planta de tratamiento en Madrid, España, con una granulometría de 0-20mm. Se desconoce el hormigón de origen del cual se obtuvo el material reciclado, pero es evidente su composición heterogénea. Tanto la fracción gruesa (granito) como la arena fueron utilizadas en diferentes diseños de mezcla para hormigones. A la fracción fina de árido reciclado (AFR) se le aplicó un tratamiento de carbonatación acelerada bajo condiciones controladas. El protocolo de ensayo asumido para la carbonatación del AFR fue diseñado teniendo en cuenta el posible uso de esta fracción en la producción de hormigones.

Caracterización granulométrica

Se obtienen tres fracciones de árido reciclado: (i) fracción fina 5-0,15 mm; (ii) fracción intermedia 10-5 mm y fracción gruesa 20-10 mm. La distribución granulométrica (PSD) de cada fracción está representada en la figura 1. De manera general la distribución granulométrica del árido reciclado es aceptable, siendo la fracción fina la que mejor distribución presenta según lo establecido en la *NC 251: 2021 (Sustituye la 2da edición. de la NC 251:2019) "Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos"*.

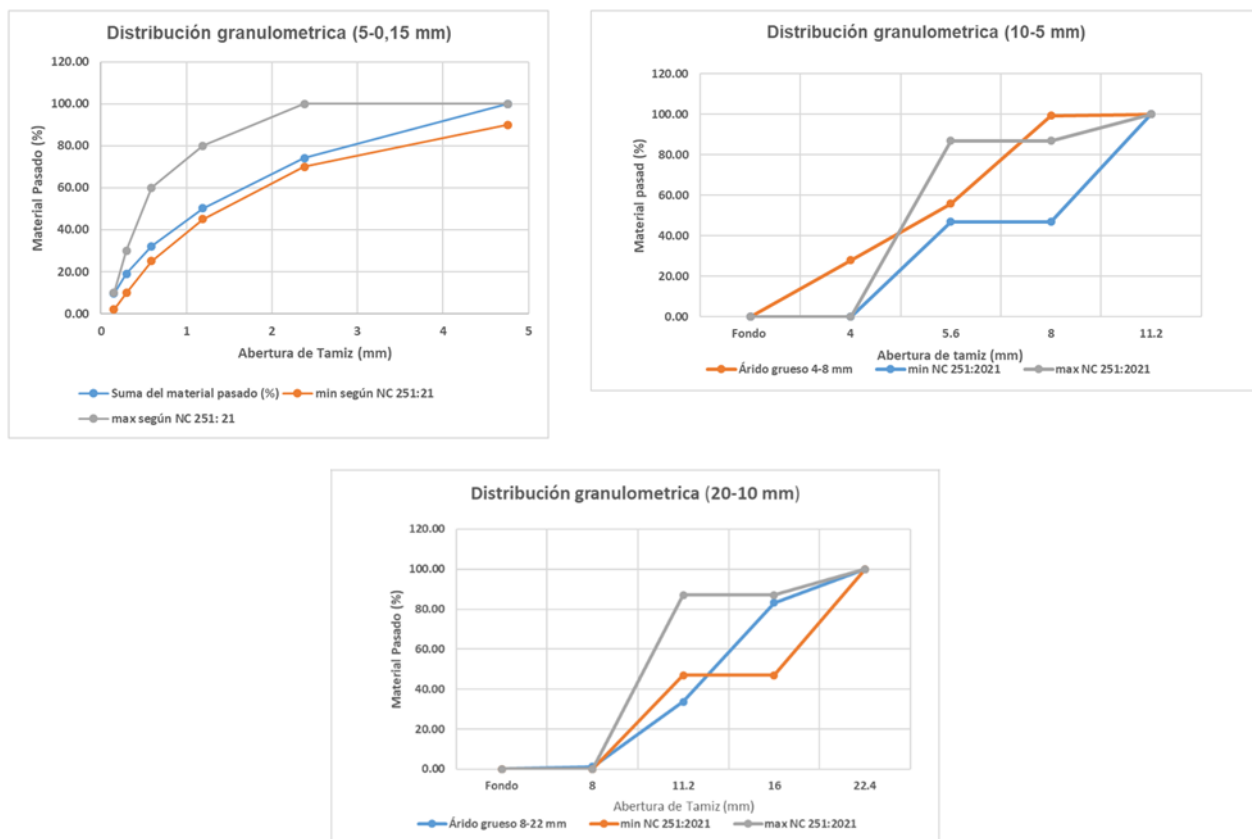


Fig. 1- Resultado del ensayo de granulometría en las diferentes fracciones de árido reciclado

Ensayo Tamiz 200

Para la realización de este ensayo se siguen las indicaciones establecidas en la *NC 182: 2002 "Áridos determinación del material más fino que el tamiz de 0,074 mm (No. 200). Método de ensayo"*. Se obtuvo un valor de 10,94% pasado por el tamiz 200. Según lo establecido en la *NC 657:2008 "Áridos para morteros de albañilería. Especificaciones"*, el porcentaje de material más fino que el tamiz 200 para áridos triturados en morteros debe ser inferior o igual al 10%. En el caso de árido fino para hormigones hidráulicos el valor del material más fino que el Tamiz 200 es inferior o igual al 5% según lo establece la *NC 251:2021 "Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos"*. El árido reciclado no cumple con las especificaciones, pero se destaca que el material más fino no contempla impurezas por lo que no resulta dañino en las mezclas de hormigón.

Peso específico y absorción de agua

Mediante este ensayo se obtienen los pesos específicos o gravedad específica (aparente, seco y saturado y seco superficialmente) y la absorción de agua a partir del pesaje en estado seco y saturado en agua. Para realizar este ensayo a la fracción fina el procedimiento de cómo se realiza se encuentra en la *NC 186:2002 "Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo"*. Mientras que para realizarlo a la fracción gruesa se utiliza la *NC 187:2002 "Árido grueso. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo"*. Los resultados obtenidos de densidad y absorción de agua para cada fracción de árido reciclado se recogen en la tabla 1.

Tabla 1- Resultados de peso específico y absorción de agua para las 3 fracciones de árido reciclado.

Peso específico	Valores			UM
	5-0,15 mm	10-5 mm	20-10 mm	
Aparente (PEA)	2,58	2,55	2,56	g/cm ³
Corriente (PEC)	2,26	2,29	2,33	g/cm ³
Saturado (PES)	2,38	2,39	2,42	g/cm ³
absorción de agua	5,50	4,56	3,81	%

Ensayo de impurezas orgánicas

Para determinar la presencia de impurezas orgánicas en los áridos se realiza este ensayo conforme al procedimiento establecido en la norma NC 185:2002 “*Arena. Determinación de Impurezas Orgánicas. Método de Ensayo*”. Se basa en la comparación colorimétrica de la solución obtenida en el ensayo que contiene las materias orgánicas presentes en el árido con una solución patrón. La NC 251: 2021 “*Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos*” establece como máximo la placa No3 para los áridos que se empleen para hormigones. La muestra de material analizada no presentó cambios de coloración lo cual indica que se trata de un material limpio de impurezas y apto para su uso en morteros y hormigones.

Determinación de partículas planas y alargadas (PPA)

La NC 189: 2002 “*Áridos gruesos. Determinación de partículas planas y alargadas. Método de ensayo*”, plantea que se obtienen las partículas planas y alargadas contenidas en los áridos por medio de la separación de la muestra en fracciones, separación de las partículas planas y alargadas y determinación del porcentaje que representan del peso del árido. Los resultados obtenidos para este ensayo se muestran en la tabla 2.

Tabla 2- Resultados obtenidos en el ensayo de PPA para el árido reciclado

Fracción	Peso total (g)	PPA (g)	PPA (%)
10-5 mm	314,4	6,38	2,03
20-10 mm	1038,12	60,84	5,86

Según lo establecido en la NC 251: 2021 el porcentaje de PPA cuando el árido proviene de rocas ígneas es inferior o igual al 20% y cuando proviene de roca sedimentaria inferior o igual al 10%. Aunque se desconoce la procedencia del árido original, el árido reciclado cumple ambas especificaciones presentando en todas sus fracciones porcentajes de PPA inferiores a 10.

2.1.2 Cemento

Se utiliza un cemento CEM I 32,5 de origen alemán cuya composición química cumple con lo establecido en las normativas internacionales. La resistencia media a la compresión fue evaluada a nivel de laboratorio obteniéndose un valor de 39,85 MPa a los 28 días.

2.2 Métodos

El árido fino reciclado de tipo mixto es sometido a un proceso de carbonatación acelerada. Dicho proceso se evalúa por método estático utilizando una cámara de carbonatación completamente hermética acoplada a un balón de CO₂ (ver figura 2). Los parámetros bajo los cuales se realiza la carbonatación, son (i) concentración de CO₂, (ii) humedad relativa (HR) y (iii) tiempo de exposición.

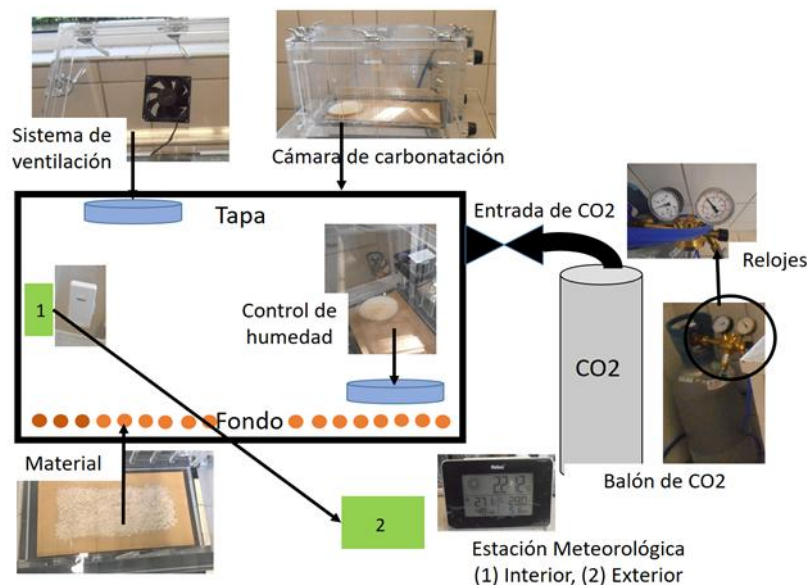


Fig. 2- Esquema funcional de la Cámara de carbonatación hermética, carbonatación estática

2.2.1 Diseño De Experimento

El objetivo general de la investigación es evaluar el impacto de la carbonatación acelerada sobre las propiedades de áridos reciclados finos, y su impacto sobre hormigones producidos con 100% de áridos reciclados. Es por eso que el diseño experimental se divide en dos etapas principales, una primera etapa dedicada a la carbonatación del árido fino reciclado y una segunda etapa dedicada a la formulación y evaluación de hormigones que emplean el árido fino reciclado carbonatado.

Primera etapa

El objetivo específico de esta primera etapa del diseño experimental es obtener los parámetros de estado idóneos para aplicar con éxito el tratamiento de carbonatación acelerada en el árido fino reciclado y a su vez evaluar el impacto de dicha técnica en las propiedades del árido fino reciclado carbonatado.

Los investigadores interesados en modificar el árido reciclado de hormigón a través de un proceso de carbonatación acelerada, deben seleccionar con base a su experiencia previa en el estudio de la carbonatación o apoyados en bibliografía consultada los valores de las variables. En la investigación que se presenta se toman como criterios de selección las experiencias abordadas en las diferentes bibliografías consultada por la autora respecto al tema. En esta investigación se mantiene la temperatura de 27 °C a 30 °C en todos los ensayos, no se asume como una variable del proceso, por lo que su efecto en la carbonatación del árido fino reciclado no se evalúa.

Tomando en cuenta las referencias bibliográficas estudiadas los niveles de variación para las variables independientes serán:

- Concentración de CO₂: 10, 15 y 20 %
- Humedad relativa (HR): 55, 65 y 75 %
- Tiempo de residencia: 1 h y 2h. Con los mejores resultados (obtenidos en términos de formación de CaCO₃) en un tiempo de 1 y 2h se fijan los valores para los parámetros de (HR) y concentración de CO₂. Con estos valores posteriormente se repite el proceso de carbonatación al árido fino reciclado por un periodo de tiempo de 24h.

Mientras que el grado de carbonatación alcanzado (medido por el ensayo de fenolftaleína y la formación de CaCO₃), la absorción de agua y la densidad del AFR carbonatado son variables dependientes que ayudan a evaluar la veracidad del protocolo diseñado y las técnicas empleadas.

Segunda etapa

En la segunda etapa del diseño experimental se tiene como objetivo específico evaluar el impacto del uso del árido fino reciclado carbonatado en las propiedades de un hormigón producido con 100% de áridos reciclados.

Las variables que intervienen en el proceso están vinculadas a las diferentes mezclas de hormigón a evaluar. Es válido destacar que la relación agua/cemento (a/c) y el contenido de cemento se mantienen constantes, por lo que no se toma en cuenta dentro de las variables del diseño de experimento. Se presenta entonces como variable independiente:

- El tipo de árido fino reciclado a emplear: árido fino reciclado sin carbonatar y árido fino reciclado carbonatado utilizando los parámetros de estado idóneos fijados en la primera etapa de esta investigación

Como variables dependientes se establecen:

- Las propiedades del hormigón en estado fresco (consistencia) evaluada mediante la medición de la huella de asentamiento siguiendo el método establecido del cono de Abrams
- Las propiedades del hormigón en estado endurecido (resistencia a compresión) evaluada a las edades de 7 y 28 días con un total de 3 probetas por edades.
- Porosidad del hormigón evaluada por el método de absorción de agua capilar para el cual se modifica la forma de la sección de las probetas, empleando una sección cuadrada de 20 mm de espesor.

Tomando en cuenta el diseño de experimento descrito anteriormente se trabajan las siguientes nomenclaturas para las distintas combinaciones de mezclas de hormigón a evaluar:

- H1: Hormigón con 100% de áridos reciclados, fracción fina sin carbonatar y Cemento Portland
- H3: Hormigón con 100% de áridos reciclados, fracción fina carbonatada óptima y Cemento Portland

Para cada dosificación se realizan 6 especímenes (probetas) en correspondencia con las edades a evaluar resistencia a compresión, 7 y 28 días.

Descripción del procedimiento para la carbonatación

Comienza con la preparación del árido fino reciclado (0-5 mm) al cual se le realiza el ensayo de absorción de agua según lo establece la NC 251: 2021 y un estudio termo gravimétrico (diseñado para esta investigación) que tiene como objetivo cuantificar el contenido de CaCO_3 en el árido reciclado antes de ser sometido a carbonatación. El árido reciclado se somete a un proceso de saturación parcial utilizando entre el 20-30% de su absorción de agua previamente calculada, una vez realizada la saturación el árido reciclado se deja reposar por un periodo de 20 -30 min. Pasado los 30 min de reposo, el árido fino reciclado es colocado dentro de la cámara de carbonatación.

La humedad relativa y la temperatura dentro de la cámara de carbonatación se controlan utilizando sales y se miden utilizando una estación meteorológica (ver figura 2). El CO_2 es regulado por los manómetros del balón de CO_2 que se utiliza y para el cálculo de la cantidad de CO_2 a inyectar se utiliza la ecuación 1 de gases ideales:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1)$$

Donde

- P: presión ejercida por un gas (atm)
- V: volumen ocupado por un gas (L)
- N: número de moles
- R: constante universal de los gases
- T: temperatura (K)

Terminadas las 18 muestras de árido fino reciclado carbonatado (total de muestras calculado según el diseño experimental de la primera etapa) con un máximo de 2 h de tiempo de exposición, si el material reacciona con la fenolftaleína al 1% se realiza un ensayo termogravimétrico para medir el grado de carbonatación cuantificando la formación en % de CaCO_3 y de ser superior al contenido presente en el AFR sin carbonatar se fijan los parámetros de estado a trabajar (% de CO_2 y % de HR). Con los valores de concentración de CO_2 y HR establecidos el árido fino reciclado se somete a 24 horas de carbonatación, este criterio es asumido según la bibliografía consultada, con el objetivo de verificar si existe un aumento en el grado de carbonatación. Pasadas las 24 horas el árido fino reciclado carbonatado es sometido nuevamente al ensayo de densidad y absorción de agua, según lo establece la NC 251: 2011, para evaluar el impacto de la técnica en las propiedades del árido fino reciclado carbonatado.

2.2.2 Métodos De Ensayos Para Evaluar El Grado De Carbonatación

Aplicando el principio teórico del análisis termogravimétrico (TGA) y utilizando una mufla se diseñó un protocolo para medir el consumo de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 como indicador de que existe una reacción de los productos de hidratación presentes en el mortero adherido al AFR con el CO_2 y la formación de calcita (CaCO_3) para comprobar el grado de carbonatación alcanzado. A continuación, se describe la formulación teórica para dicho protocolo.

En el caso de la piedra caliza, se conoce que su descomposición ocurre en un rango de temperatura entre los 550 y los 950 °C y se rige por la ecuación:



Donde, para una piedra caliza 100% pura, el CO_2 que se pierde representa aproximadamente el 43,97% de la masa de la piedra caliza. Esta pérdida de masa se usa para calcular el % de CaCO_3 en un material usando una regla de proporción:

$$(X\% / 100\%) = \text{PPI (550 -950}^\circ\text{C)} / 44 \quad (3)$$

Por otro lado, se conoce que la descomposición de los productos de hidratación del cemento ocurre en temperaturas entre los 50 y 400°C. La descomposición de portlandita Ca(OH)_2 , específicamente, ocurre en un rango (400 - 550°C) y las pérdidas de masa representan el 24.31% de la masa de la portlandita, por lo que la regla de proporción sería:

$$(X\% / 100\%) = \text{PPI (400 -550}^\circ\text{C)} / 24.3. \quad (4)$$

2.2.3 Métodos De Ensayos Al AFR Carbonatado Para Evaluar Impacto Del Tratamiento En Sus Propiedades Físicas

Cuando se examina la aptitud física de los áridos, es conveniente conocer y valorar las características propias de cada material, entre las cuales se pueden nombrar la densidad, el peso específico y la absorción. Los ensayos para medir peso específico y absorción de agua del AFR carbonatado se realizan según lo establecido en la NC 186: 2002 "Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo".

2.2.4 Método Para El Diseño De Mezcla Para Hormigones

Para el diseño de mezcla de los hormigones se emplea el Método de Toufar es un método canadiense que se basa en la disminución del contenido de cemento mediante el cálculo de la proporción de áridos que garantice el menor volumen de vacíos. La hormigonera utilizada para la elaboración del hormigón tiene una capacidad de 10L, la tabla 3 muestra la dosificación de cada materia prima para este volumen.

Tabla 3- Dosificación de la mezcla de hormigón para un volumen de 10L

Volumen de 10 L	Cantidad	UM	
Cemento	3,8	kg	a/c
0-5 mm	7,75	kg	0,45
5-10 mm	2,7	kg	
10-16 mm	5,3	kg	
Agua	1,71	kg	
Aditivo	0,076	kg	2 % de cemento
Agua para pre saturar	0,816	kg	

Propiedades en estado fresco. Asentamiento

El asentamiento de cada lote de hormigón se comprobó mediante el ensayo de asentamiento por Cono de Abrams, según el procedimiento establecido en la NC ISO 1920-2:2010.

Propiedades en estado endurecido.

Resistencia a compresión

Una vez evaluado el asentamiento de la mezcla de hormigón se procede al llenado, compactación y curado de las probetas, siguiendo lo establecido en la NC 221: 2002 *"Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos"*, estas probetas serán utilizadas posteriormente en el ensayo de resistencia a compresión.

Para la determinación de la resistencia a compresión se sigue el procedimiento establecido en la NC: 724:2009 *"Ensayos del hormigón. Resistencia del hormigón en estado endurecido"*. Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la tabla 5.

Tabla 5- Resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión para los diferentes hormigones evaluados a las edades de 7 y 28 días

Dosificaciones	Peso de probeta (g)	Densidad de probeta 7d (kg/m ³)	Resistencia compresión 7d (MPa)	Peso de probeta (g)	Densidad de probeta 28d (kg/m ³)	Resistencia compresión 28d (MPa)
H1	2202.6	2190	30	2205,50	2183,33	38,5
H3	2174	2130	35,7	2165,67	2163,33	41,5

Porosidad

La porosidad efectiva de los hormigones se observó por el método de ensayo de absorción de agua por capilaridad, según lo establecido en la NC 345:2011: *"Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad"*.

Se cortaron cubos de hormigón de unos 30 mm, se secaron a 60°C hasta peso constante y se sellaron por el lado del manto con resina. Después de tomado el peso inicial, en determinados momentos (1/12; 1/6; 1/4; 1/2; 1; 2; 3; 4; 6; 24; 48; 72; 96 y cada 24 horas hasta peso constante) se pesan las muestras en estado de superficie seca y se introducen de nuevo en el agua.

Según lo establecido en la NC 345:2011 *"Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad"*, con los pesos obtenidos a las diferentes edades indicadas se grafica el peso en kg contra la raíz cuadrada del tiempo y se obtienen las curvas de absorción presentadas en la figura 3. De dichas curvas se obtiene el punto crítico de saturación Qn que posteriormente serán empleaos en la determinación matemática de la porosidad efectiva.

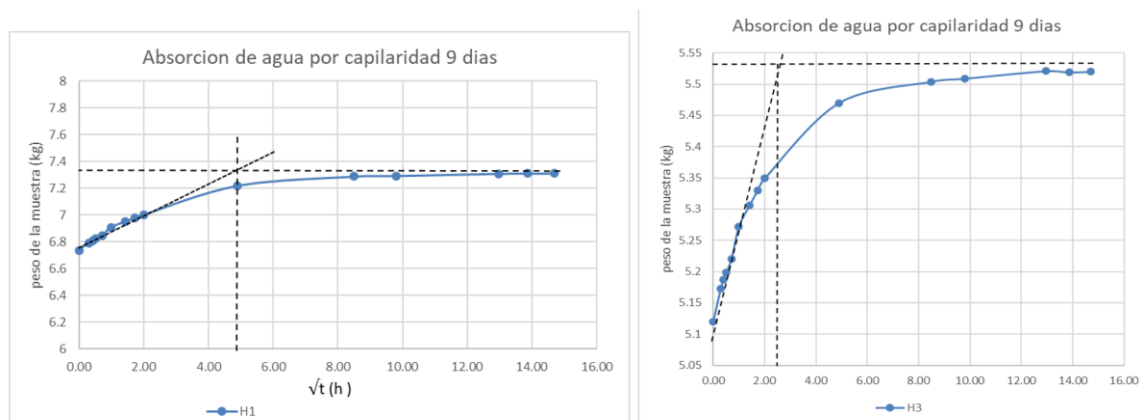


Fig. 3- Curvas de absorción de agua por capilaridad obtenidas para las diferentes dosificaciones de hormigón evaluadas

3. RESULTADOS

3.1 Evaluación del grado de carbonatación

A continuación, se discuten los resultados obtenidos en el ensayo termo gravimétrico, evaluado según el protocolo antes explicado, para la carbonatación del AFR de tipo mixto en la fracción 5-0,15 mm. Las temperaturas trabajadas (400^o, 550^o y 950^o) son asumidas tomando en cuenta la descomposición del Ca(OH)₂ y la CaCO₃ como se explicó anteriormente.

De manera general para la carbonatación del AFR mixto las mejores series, en función de la formación de CaCO₃ para un tiempo de exposición de 1 hora resultaron ser las series 2, 4 y 8, siendo la serie 2 con 10% de concentración de CO₂ y 65% de humedad relativa la que mayor por ciento de CaCO₃ alcanza con un 14,55%. Para un tiempo de 2 horas de exposición las mejores series resultaron 11, 14 y 18, esta última con 20% de concentración de CO₂ y 75% de humedad relativa alcanzando un 14,48% de formación de CaCO₃. Si se hace una comparación de las dos mejores series, 2 y 18 con la muestra de ARF sin carbonatar (serie de control) se puede ver que el aumento en el contenido de calcita es muy bajo siendo de 0,91% y 0,84% respectivamente, lo que demuestra que, a pesar de existir una carbonatación del material, evaluada también en la pérdida significativa de Ca(OH)₂ que presentan ambas muestras, todavía los niveles son muy bajos y esto se atribuye al poco tiempo de exposición de las muestras dentro de la cámara de carbonatación.

Influencia del tiempo de exposición

Una de las desventajas del método estático radica en que el material se encuentra distribuido en una fina capa sobre el fondo de la cámara de carbonatación y el CO₂ inyectado, aun cuando se utiliza en esta investigación un sistema de ventilación permanente dentro de la cámara, no entra en contacto con el material de manera uniforme. El CO₂ es más denso que el aire que circula dentro de la cámara de carbonatación, por lo que el material a carbonatar necesita mayor tiempo de exposición para asegurar que el gas se asiente en el fondo y reaccione de manera más eficiente. Tomando en cuenta la influencia del tiempo de exposición y como se presentó en el diseño de experimento, se realiza una carbonatación a 24 horas con los parámetros establecidos previamente en las mejores series de 1 y 2 horas. En la figura 4 se puede comparar el grado de carbonatación en los diferentes tiempos de exposición. Pasada 24 horas el AFR carbonatado, S19, presenta un incremento del 8,42% de CaCO₃ con respecto a la serie control, un valor significativo tomando en cuenta la desventaja antes mencionada.

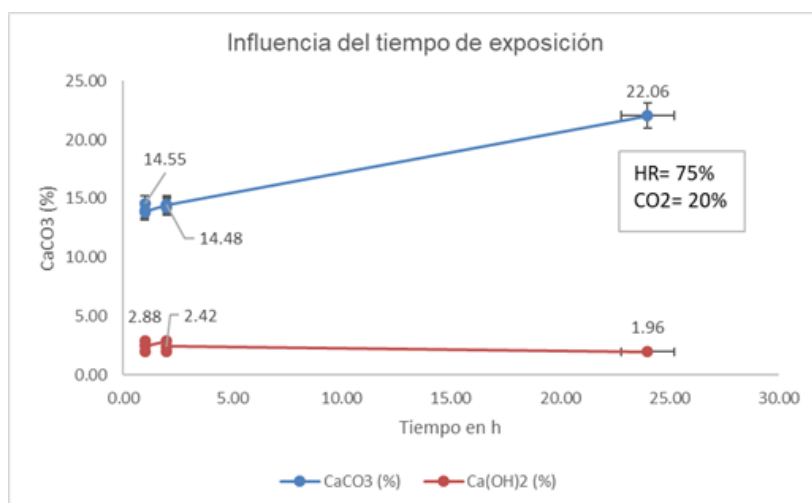


Fig. 4- Evaluación del grado de carbonatación del AFR en función del tiempo de exposición

Influencia de la humedad relativa y la concentración de CO₂

De la figura 5 se hace un análisis que ayuda a definir los parámetros de estado más pertinentes para la carbonatación del AFR mixto que se estudia. A medida que aumenta la HR en el sistema, incluso en las primeras horas, se evidencia un aumento en la formación de CaCO₃. Al mismo tiempo existe una relación entre la HR y la concentración de CO₂, para un valor máximo de HR del 75% la concentración de CO₂ con mejores resultados resulta del 20%.

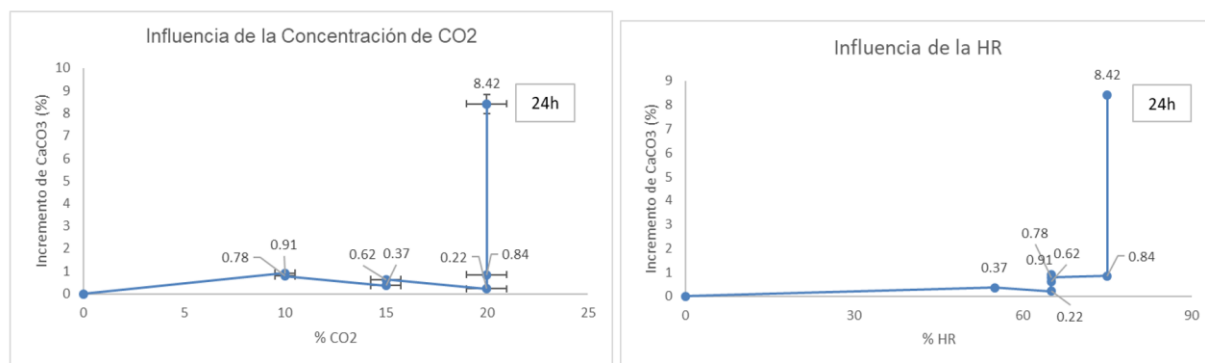


Fig. 5- Evaluación del grado de carbonatación del AFR en función de la concentración de CO2 y de la Humedad Relativa

3.2 Evaluación Del Impacto Del Tratamiento De Carbonatación Acelerada En Las Propiedades Físico-mecánicas Del AFR Carbonatado

El objetivo de implementar la técnica de carbonatación acelerada en el AFR es mejorar las propiedades de dicho material, especialmente la absorción de agua y la densidad a valores semejantes al árido natural. La tabla 8 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de densidad y absorción de agua aplicado al AFR carbonatado con un tiempo de exposición de 24 horas.

Tabla 8- Resultados obtenidos en el ensayo de peso específico y absorción de agua al AFR carbonatado con un tiempo de exposición de 24 horas.

Densidad	Valores	UM
PEA	2,55	g/cm ³
PEC	2,35	g/cm ³
PES	2,43	g/cm ³
Absorción de agua	3,30	%

Como se observa en la figura 6, existe una disminución del 40% del valor de absorción de agua del ARF carbonatado con respecto al ARF sin carbonatar, lo que confirma un efecto positivo de la técnica aplicada sobre las propiedades del árido. Pese a las mejoras obtenidas, los valores de absorción del ARF carbonatado aún son superiores a lo establecido en la NC 251:2021 “Áridos para hormigones hidráulicos-requisitos”

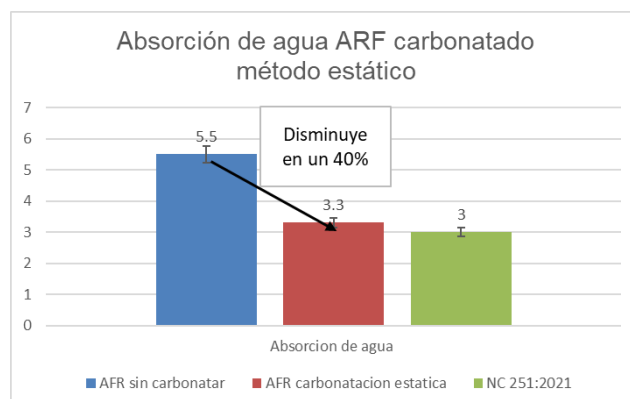


Fig. 6- Grafico comparativo entre los valores de absorción de agua del ARF sin carbonatar, carbonatado por método estático y lo establecido en la NC 251:2021

La densidad del árido reciclado suele oscilar entre 2,1 y 2,4 g/cm³, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2,3 y 2,5 g/cm³, según lo que establece la norma NC: 251-2021: “Áridos para hormigones hidráulicos-requisitos” son considerados ligeros ya que no superan los 2,5 g/cm³. Los áridos naturales tienen una densidad superficial saturada-seca entre 2,6 g/cm³ y 2,7 g/cm³. En la figura 7 se observa que la densidad corriente y saturada del ARF carbonatado es superior a la obtenida para el ARF sin carbonatar, siendo las dos inferiores a 2.5 g/cm³. Es de destacar que, aunque mínima, se aprecia una mejoría en las propiedades del ARF una vez carbonatado, esto permite confirmar una vez más la efectividad del método aplicado.

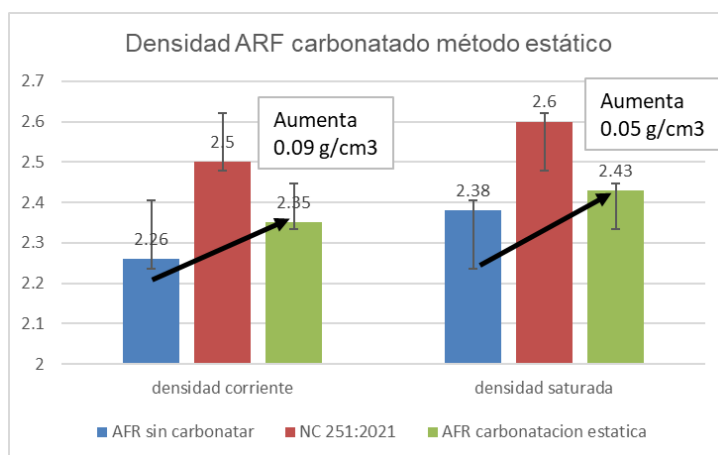


Fig. 7- Grafico comparativo entre los valores de absorción de agua del ARF sin carbonatar, carbonatado por método estático y lo establecido en la NC 251:2021

3.3 Influencia de la técnica de carbonatación acelerada aplicada al AFR en las propiedades del hormigón

Para la elaboración de los hormigones se emplea el árido fino carbonatado en un tiempo de 24 h, cuyas propiedades fueron expuestas anteriormente y utilizando los parámetros de estado establecidos de HR= 75% y concentración de CO₂ = 20%.

Consistencia

Como se muestra en la figura 8 la incorporación de AFR carbonatado mejora la consistencia del hormigón. La consistencia del hormigón, que determina su trabajabilidad y facilidad de distribución en la obra, está influenciada por múltiples factores, entre ellos la naturaleza y propiedades de los áridos utilizados. En particular, la porosidad de los áridos juega un papel fundamental en la modificación de sus propiedades físicas y, por consecuencia, en la calidad del hormigón fresco. La presencia de porosidad aumenta la capacidad de absorción de agua de los áridos, disminuyendo la cantidad de agua disponible en la mezcla para la lubricación y la fluidez.

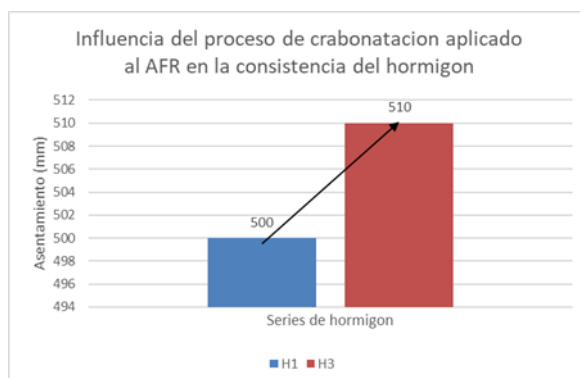


Fig. 8- Influencia del proceso de carbonatación aplicado al AFR en la consistencia del hormigón

Resistencia a compresión

Analizando la figura 9 se puede concluir que el proceso de carbonatación acelerada aplicada al AFR presenta un impacto positivo en la resistencia de los hormigones producidos. La serie H3 con AFR carbonatado y CP a los 28 días de curado presenta un incremento del 6.57% de resistencia con respecto a la Serie H1 con AFR sin carbonatar y CP.

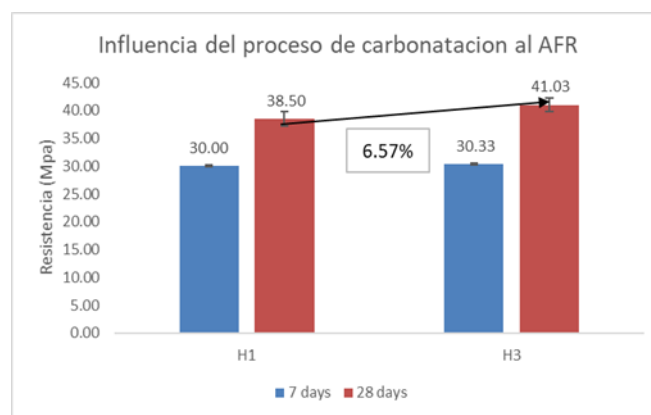


Fig. 9- Análisis de la influencia de la carbonatación acelerada en la resistencia compresión de los hormigones estudiados

3.4 Porosidad efectiva

[25<<z<xx] en su estudio emplea los criterios de evaluación establecidos por la Red Iberoamericana DURAR (Durabilidad de la armadura) del Programa CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), los criterios definen la calidad del hormigón según su porcentaje de porosidad efectiva:

- menor o igual al 10% se considera de buena calidad y compacidad
- entre el 10% y el 15% se considera de moderada calidad
- porcentaje >15%, indica un hormigón de durabilidad inadecuada

La NC 120: 2014 “*Hormigones Hidráulicos. Especificaciones*” establece como máxima porosidad efectiva en hormigones armados y pretensados valores entre 10 y 15 %, esta norma asocia los valores de porosidad efectiva al tipo de agresividad ambiente al que estarán expuestos los hormigones. Para la evaluación de la calidad de los hormigones estudiados en cuanto a su porosidad efectiva se tomará en cuenta los criterios de evaluación antes mencionados.

Con los datos obtenidos en el ensayo de absorción por capilaridad se pueden calcular la resistencia a la penetración del agua: $m (s/m^2)$, el coeficiente de absorción capilar k y la porosidad efectiva del hormigón ξ (%). La tabla 9 muestra los valores obtenidos en el ensayo de absorción por capilaridad para las dosificaciones de hormigón evaluadas, ambas superan el 15% de porosidad efectiva, lo que las clasifica como un hormigón de durabilidad inadecuada.

Tabla 9- Cálculo de factores obtenidos en el ensayo de absorción por capilaridad para las diferentes series de hormigón

	UM	H1	H3
Peso inicial (Q0)	kg	0,6735	0,512
Peso critico (Qn)	kg	0,7219	0,54
Tiempo critico (tn)	s	37,95	12,4
espesor (h)	m	0,05	0,05
Resistencia a la penetración de agua (m)	s/m ²	15180	4960
Superficie de contacto de la probeta (A)	m ²	0,0225	0,0225
Coeficiente de absorción capilar (k)		0,57	1,00
Porosidad efectiva (ξ)	%	4,30	2,49

Las mezclas de hormigones estudiadas presentan una sustitución del 100% de áridos naturales por áridos reciclados, una sustitución muy por encima de los máximos establecidos en las normas y en la mayoría de la literatura consultada, sin embargo, se destaca que los áridos reciclados empleados son de buena calidad, con valores de absorción de agua inferiores al 6% y buena distribución granulométrica, además el tratamiento de carbonatación acelerada aplicado al AFR disminuye la absorción de dicha fracción y mejora la red de poros del hormigón. Los hormigones estudiados presentan valores de porosidad efectiva inferiores al 5%, lo que los clasifica de muy buena calidad y compacidad, resultando la mezcla H3 la más densa con menor valor de porosidad.

Como se muestra en la figura 10 la mezcla H3 que incorporan AFR carbonatado presenta un menor tiempo para alcanzar el punto crítico, lo que se traduce en una menor porosidad en comparación con las mezclas H1 que presenta el AFR sin carbonatar. Esto evidencia un impacto positivo del tratamiento de carbonatación aplicado al AFR en la porosidad de los hormigones producidos. Dado que el árido representa tres cuartas partes del volumen de hormigón, la calidad del mismo será un factor importante en la porosidad. El empleo de áridos reciclados carbonatados en el hormigón reduce el tamaño de los poros del árido y la conectividad entre ellos. Además, se observa como la mezcla H3 tiene mayor velocidad de absorción alcanzando más rápido la saturación, debido a la menor conectividad de los poros por el efecto de la carbonatación del AFR. Esta serie resulta entonces la de menor porosidad.

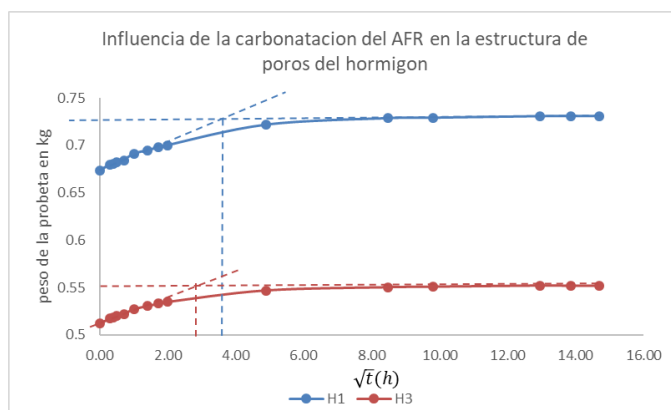


Fig. 10- Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad. Análisis de la influencia de la carbonatación del AFR en la porosidad efectiva del hormigón.

4. CONCLUSIONES

Para la carbonatación del AFR mixto las mejores series, en función de la formación de CaCO_3 resulto ser S2 para un tiempo de exposición de 1 hora y S18 para un tiempo de 2 horas de exposición. Si se hace una comparación de estas dos series, con la muestra de ARF sin carbonatar podemos ver que el aumento en el contenido de calcita es muy bajo siendo de 0.91% y 0.84% respectivamente, lo que demuestra que, a pesar de existir una carbonatación del material, evaluada también en la pérdida significativa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que presentan ambas muestras, todavía los niveles son muy bajos y esto se atribuye al poco tiempo de exposición de las muestras dentro de la cámara de carbonatación.

Los parámetros de estado quedan definidos tomando en cuenta los mejores resultados de carbonatación obtenidos en los tiempos de 1 y 2 horas de exposición. Se estable como valor de humedad relativa 75% y la concentración de CO_2 del 20%.

Aumentar el tiempo de exposición a 24 horas serie (S19), produce un incremento del 8.42% de CaCO_3 con respecto a la serie control (sin carbonatar). Mejor valor obtenido por lo que esta combinación es la establecida para la producción de hormigones. Obteniéndose una disminución del 40% de absorción de agua en el árido fino reciclado carbonatado con respecto al árido fino reciclado sin carbonatar. Los valores de densidad corriente y saturada presentan un discreto aumento, 0,09 y 0,05 g/cm^3 respectivamente, en comparación con el árido fino reciclado sin carbonatar.

El proceso de carbonatación acelerada presenta un impacto positivo en las propiedades del hormigón. Según su asentamiento los hormigones son calificados de consistencia muy fluida según lo establecido en NC 251: 2021. La resistencia a compresión de los hormigones producidos también evidencia un impacto positivo la dosificación H3 con árido fino reciclado carbonatado a los 28 días de curado presenta un incremento del 6.57% de resistencia con respecto a la dosificación H1 con árido fino reciclado sin carbonatar.

En cuanto a la porosidad los hormigones estudiados presentan valores de porosidad efectiva inferiores al 15% por lo que son considerados hormigones de buena durabilidad para usos estructurales según las especificaciones de la NC 120: 2014. La mezcla H3 que incorpora AFR carbonatado es menos porosa en comparación con H1 que presenta el AFR sin carbonatar. Esto evidencia un impacto positivo del tratamiento de carbonatación aplicado al AFR en la porosidad de los hormigones producidos.

1. Zhang, L., et al., «Recent advancements in sustainable concrete materials: A review.», *Journal of Cleaner Production*, vol. 316, n.o 128138., 2023.
2. Thompson, J., et al., «Future directions in sustainable concrete research.», *Construction and Building Materials*, vol. 333, 2023.
3. Soroushian, P., & Zuo, J., «Sustainable Concrete: A Comprehensive Approach to Low-Carbon Cement Production», *Construction and Building Materials*, vol. 269, pp. 121-130, 2021.
4. Lal, R., et al., «Environmental impacts of sand mining.», *Environmental Science and Policy*, vol. 90, pp. 24-33, 2018.
5. Malhotra, V. M., & Ramezani, A., «Sustainable concrete: A review on recycling and reuse.», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 152, 2020.
6. A. Jindal, «Sustainable Construction Materials: Evaluating the Performance and Environmental Impact of Recycled Aggregates in Concrete», *DIRA*, vol. 12, n.o 4, pp. 25-32, dic. 2024, doi: [10.36676/dira.v12.i4.157](https://doi.org/10.36676/dira.v12.i4.157).
7. J. Kočí, J. Fořt, V. Kočí, y I. Hager, «Assessment of environmental impact of coarse aggregates substitution by crushed pavements in concrete mixtures», *MATEC Web Conf.*, vol. 322, p. 01036, 2020, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032201036>
8. M. Marvila, P. De Matos, E. Rodríguez, S. Monteiro, y A. De Azevedo, «Recycled Aggregate: A Viable Solution for Sustainable Concrete Production», *Materials*, vol. 15, n.o 15, p. 5276, jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15155276>
9. S. Dias, J. Almeida, A. Tadeu, y J. De Brito, «Alternative concrete aggregates - Review of physical and mechanical properties and successful applications», *Cement and Concrete Composites*, vol. 152, p. 105663, sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105663>
10. F. de Andrade Salgado y F. de Andrade Silva, «Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review», *Journal of Building Engineering*, vol. 52, p. 104452, jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>
11. M. Seddik Meddah, «Recycled aggregates in concrete production: engineering properties and environmental impact», *MATEC Web Conf.*, vol. 101, p. 05021, 2017, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710105021>
12. G. Kaplan, «Investigation of Properties of Concrete Produced with Recycled Aggregates», *CEBACOM*, vol. 1, n.o 2, pp. 26-34, ene. 2021, doi: <https://doi.org/10.36937/cebacom.2020.002.005>
13. M. Rakshvir y S. V. Barai, «Studies on recycled aggregates-based concrete», *Waste Manag Res*, vol. 24, n.o 3, pp. 225-233, jun. 2006, doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X06064820>
14. J. Xiao, L. Li, V. W. Y. Tam, y H. Li, «The state of the art regarding the long-term properties of recycled aggregate concrete», *Structural Concrete*, vol. 15, n.o 1, pp. 3-12, mar. 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/suco.201300024>
15. A. Sharif., «Influence mechanism between green finance and green innovation: Exploring regional policy intervention effects in China.», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 182, septiembre de 2022.
16. L. Evangelista y J. de Brito, «Concrete with fine recycled aggregates: a review», *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 18, n.o 2, pp. 129-172, feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.851038>
17. H. Hafez, R. Kurda, R. Kurda, B. Al-Hadad, R. Mustafa, y B. Ali, «A Critical Review on the Influence of Fine Recycled Aggregates on Technical Performance, Environmental Impact and Cost of Concrete», *Applied Sciences*, vol. 10, n.o 3, p. 1018, feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/app10031018>
18. B. J. Zhan, D. X. Xuan, W. Zeng, y C. S. Poon, «Carbonation treatment of recycled concrete aggregate: Effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate concrete», *Cement and Concrete Composites*, vol. 104, p. 103360, nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103360>
19. Z. Lu, Q. Tan, J. Lin, y D. Wang, «Properties investigation of recycled aggregates and concrete modified by accelerated carbonation through increased temperature», *Construction and Building Materials*, vol. 341, p. 127813, jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127813>

20. P. Gunning, «Accelerated Carbonation of Hazardous Wastes», 2011.
21. L. J. Parrott, «Carbonation, moisture and empty pores.», *Advances in Cement Research*, vol. 4, n.o 15, p. 111-118, 1991.
22. L. Zhiyuan et al., «Carbonation of blast furnace slag concrete at different CO₂ concentrations: Carbonation rate, phase assemblage, microstructure and thermodynamic modelling», *Cement and Concrete Research*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107161>
23. C. Gombosuren, L. Myung-Kwan, Y. Myoung-Youl, L. Hyuk-Se, E. Odontuya, y C. Dong-Uk, «Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO₂ treated recycled fine aggregate», 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106062>
24. J. Birori, L. Hui, Z. Xudong, W. Xinjie, Y. Xiancui, y M. Tianyu, «Enhancing the Mechanical and Durability Properties of Fully Recycled Aggregate Concrete Using Carbonated Recycled Fine Aggregates», *Materials*, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17081715>
25. V. J. Parrales-Espinales, B. Chiliquinga-Lago, y J. C. Guerra-Mera, «Composition of coarse and fine aggregate mixtures on the compressive strength and porosity of concrete», vol. 8, n.o 11, 2023.