

H70

Revista HORMIGÓN



ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE TECNOLOGÍA DEL
HORMIGÓN

Editorial

Estimados socios de la AATH y lectores de la revista Hormigón,

Llegar al número 70 constituye, sin duda, un motivo de celebración. Cada nueva edición representa la continuidad de un espacio destinado a la difusión del conocimiento, al intercambio de ideas y al encuentro entre investigadores, docentes y profesionales. Pero alcanzar este número adquiere, en esta oportunidad, un significado particularmente especial, porque hemos querido dedicarlo a la memoria del Dr Raúl Zerbino cuya trayectoria dejó una huella profunda en nuestra comunidad.

A lo largo de sus años de actividad, Raúl Zerbino realizó contribuciones de gran relevancia en el campo de la tecnología del hormigón, su trabajo contribuyó a consolidar líneas de estudio, formar grupos de trabajo y establecer vínculos que continúan dando frutos en la actualidad. Quienes tuvieron la oportunidad de conocerlo seguramente recuerdan no solo su profundo conocimiento y su compromiso con el trabajo, sino también su generosidad para transmitir aquello que sabía y por sobre todas las cosas la excelente persona que fue, su compromiso y calidad humana. Por ello, este número 70 pretende ser mucho más que un homenaje. Queremos que estas páginas sean una expresión de reconocimiento y afecto, pero también una invitación a mantener vivo aquello que mejor representa su legado: el rigor, el compromiso con el conocimiento y la voluntad de compartirlo. A continuación de este editorial compartimos también una semblanza que realizó su colega y amiga la Ing. Graciela Giaccio.

En este número encontrarán tres artículos. El primero es un trabajo de revisión sobre las características y particularidades de los agregados y polvo reciclados de hormigón, en el cual también se analiza la situación normativa de dichos materiales en Latinoamérica. En el segundo trabajo se comparan distintos métodos para la medición de la captación de CO₂ en revestimientos a base de cal. Finalmente, el tercer trabajo evalúa el comportamiento de un hormigón liviano elaborado con agregados livianos experimentales producidos a partir del destape de canteras de caliza de Buenos Aires y aceite industrial residual, y se lo compara con dos agregados livianos comerciales internacionales.

A quienes hicieron posible estos 70 números, a los autores, evaluadores, lectores, integrantes de la AATH y colaboradores que acompañaron la trayectoria de la revista, nuestro agradecimiento.

Aprovechamos la oportunidad para recordarles que durante todo el año se encuentra abierta la recepción de artículos. Los mismos deberán ajustarse a las normas para autores que obran en la página web de la revista y, una vez recibidos, serán sometidos a evaluación por pares.

Podrán encontrar novedades de la revista en nuestra cuenta en Instagram <https://www.instagram.com/revistahormigon/>.

Esperamos contar con sus contribuciones.

Celeste Torrijos
Directora de la Revista Hormigón
(CONICET-LEMIT-UNLP)

Francisco Locati
Director asociado de la Revista Hormigón
(CONICET-CICTERRA-UCC)

SUMARIO

- I-II **Semblanza – Dr. Ing. Raúl Luis Zerbino, gran compañero y amigo**
G. Giaccio
- 5 **Agregados y polvo reciclados de hormigón: propiedades y marco normativo en América Latina**
C. J. Zega, B. E. Manrique y M. E. Sosa
- 26 **Comparación de métodos para cuantificar la captación de CO₂ en revestimientos a base de cal**
L. Aristarán, A. Mocciaro, C. Paulo y A. Tironi
- 43 **Estudio de hormigones con agregados livianos producidos localmente para aislamiento térmico**
C. Martinefsky, F. Daoud, S. Zito, M. Stipcich, A. Mocciaro, F. Irassar y A. Tironi

Dirección de la Revista

Corrientes 2438 - 4º Piso - Oficina 4 (C1046AAP).

Ciudad Autónoma de Buenos Aires – República Argentina.

www.aath.org.ar

Entidad con personería jurídica
Nº 05005/81

Contacto:

revistahormigon@gmail.com

Foto de portada: Planta de trituración de hormigón para la generación de agregados reciclados (Gentileza María Eva Sosa).

Los artículos son publicados con la sola responsabilidad de los autores. La Dirección no se solidariza con las opiniones vertidas en los mismos. Los artículos pueden reproducirse total o parcialmente citando la fuente. Registro Nacional de la Propiedad Intelectual Nº 5.344.085. Propietario: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.

La revista solicita a los autores la obligatoriedad de requerir los datos respaldatorios de las investigaciones y su depósito de acuerdo a la Ley Nº 26899, Repositorios Digitales Institucionales de Acceso Abierto.

Equipo Editorial revista Hormigón

Directora

TORRIJOS, María Celeste

Director Asociado

LOCATI, Francisco

Secretaría General

MARTÍNEZ, Graciela Armenia

Comité Editorial

CORALLO, Patricio

CUENCA ASENSIO, Estefanía

GIACCIO, Graciela

MARFIL, Silvina

MILANESI, Carlos

RAGGIOTTI, Belén

RAHHAL, Viviana

VILLAGRÁN, Yury

Comisión Directiva AATH

Presidente

MARFIL, Silvina (Período 2025-2027)

Vicepresidente

STUMPF, Pablo (Período 2024-2026)

Secretario

BÁLZAMO, Humberto (Período 2024-2026)

Secretario de Actas

ESPELET, Alejandra (Período 2025-2027)

Tesorero

FESTA, Daiana (Período 2025-2027)

Protesorero

ROSSETTI, Agustín (Período 2024-2026)

Vocal Titular 1°

SOSA, María Eva (Período 2025-2027)

Vocal Titular 2°

ORLANDO, Sebastián (Período 2024-2026)

Vocal Titular 3°

DONZA, Horacio (Período 2025-2027)

Vocal Titular 4°

RAUTENBERG, Dayana (Período 2024-2026)

Vocal Suplente 1°

FERNANDEZ, Lelis René (período 2024-2026)

Vocal Suplente 2°

GEBERT, Fabio (Período 2025-2027)

Revisor de cuentas 1°

ZEGA, Claudio (Período 2025-2026)

Revisor de cuentas 2°

BENITEZ, Graciela Alejandra (Período 2025-2026)

COMISIONES INTERNAS AATH

BOLETÍN DE NOVEDADES

Equipo Editorial

BOURNOD, Constanza Naimé (Coordinadora)
BENITEZ, Alejandra Graciela
CIANCIO, Daniela
DEL BIANCO, Natalia
FLORES, Alejandro
MARÍN, Gabriel
MILANESI, Carlos
PERALTA RING, Rocío
TEJEDA, José

CURSOS y SEMINARIOS

La Comisión está integrada por:

POSITIERI, María Josefina (Coordinadora)
FESTA, Daiana
BALTAR, Ariel Muñoz
SOSA, María Eva
PRIANO, Carla
ROSSETTI, Agustín

COMUNICACIÓN

La Comisión está integrada por:

CABRERA, Oscar
STUMPF, Pablo
MANRIQUE, Braian

LIBROS

La Comisión está integrada por:

ZEGA, Claudio (Coordinador)
BASCOY, Daniel
ESPELET, Alejandra
SOSA, María Eva

Semblanza

Dr. Ing. Raúl Luis Zerbino, gran compañero y amigo

G. Giaccio^a

^aComisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires – Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, CP 1900, La Plata, Argentina. ggiaccio@ing.unlp.edu.ar

Nació y estudió en la ciudad de La Plata. Se recibió de ingeniero hidráulico y civil en la FI UNLP (1980, 1983) y posteriormente obtuvo el título de Doctor en Ingeniería en la misma facultad (1998). También realizó una formación postdoctoral en la Universidad Politécnica de Catalunya (2005-6, Barcelona, España). Pero su formación continuó a lo largo de toda su vida, siendo una persona sumamente estudiosa, siempre leyendo los últimos artículos y documentos sobre su especialidad.

Su actividad en la Facultad empezó siendo alumno, incorporándose a las actividades de investigación, indicando claramente cuál sería su vocación, llegando a ser profesor asociado.

Desde que se recibió se dedicó a la investigación, iniciándose como becario del CONICET, alcanzando el nivel de Investigador Principal.

Autor de más de 300 artículos en revistas y congresos, varios de ellos premiados, de dos libros y numerosos capítulos de libros; también realizó gran cantidad de trabajos de transferencia, asesoramiento y servicios a la industria. Conferencista en distintos eventos en Argentina, Brasil, Uruguay, India, Italia, España y Alemania. Ha dictado más de 50 cursos de posgrado y dirigió tesis doctorales y de magíster, coma así también a numerosos becarios.

Era Especialista en Tecnología del hormigón, desarrolló sus tareas en el LEMIT de La Plata y en la Facultad de Ingeniería de UNLP, siendo sus principales intereses el estudio de la estructura del hormigón y los procesos de fisuración y rotura y el desarrollo de hormigones especiales, en particular hormigones reforzados con fibras.

Fue el referente sobre Hormigones Reforzados con Fibras, reconocido a nivel internacional, trabajando con los especialistas más jerarquizados en el tema. Fue respetado, admirado y estimado por quienes tuvieron la posibilidad de conocerlo.

Raúl fue una persona muy comprometida en todos los ámbitos en los que se desenvolvió. Fue Miembro de la Comisión Asesora de Ingeniería Civil, Eléctrica, Mecánica de CONICET. Presidente de la Asociación Argentina de Tecnología de Hormigón, integrante de la Comisión Redactora CIRSOC 200-2024, Secretario y Miembro Académico de la Academia de la Ingeniería de la provincia de Buenos Aires y muchas actividades más en el ámbito universitario y científico.

Era una persona multifacética, no solo se dedicó a las actividades científicas y académicas, también se destacó su inclinación por lo artístico desde muy joven. Estudió guitarra, llegó a ser profesor de

guitarra del Conservatorio de Música “Gilardo Gilardi”, brindó conciertos tanto en el país como en el exterior. Cada viaje de estudio/trabajo que hacía iba acompañado por su guitarra.

Pero la característica más destacable fue el gran ser humano que era, con un fuerte compromiso social demostrado en su participación en numerosas obras como la del Padre Cajade, comedores, etc., siempre dispuesto a ayudar a quien lo necesitara.

Fue un muy buen compañero, con un destacado sentido de pertenencia.

Raúl Zerbino fue una persona con un nivel intelectual destacado y con una capacidad de trabajo insuperable, que brilló en todo lo que hizo en todos los ámbitos de su vida. Pero por sobre todo una persona de bien, honesta con sus convicciones, íntegra y con un profundo respeto y empatía hacia los demás.



Dr. Ing. Raúl Luis Zerbino
(1957-2026)

Agregados y polvo reciclados de hormigón: propiedades y marco normativo en América Latina

C. J. Zega^{a,b*}, B. E. Manrique^b y M. E. Sosa^{a,b,c}

^aConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), CP 1425, CABA, Argentina, cj.zega@conicet.gov.ar

^bLaboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CICpBA), CP 1900, La Plata, Argentina, braianmanriquefsa@gmail.com

^cInstituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), CP 1650, San Martín, Argentina, ingmesosa@gmail.com

Recibido: 28 de abril de 2026

Aceptado: 12 de junio de 2026

RESUMEN

La industria de la construcción se encuentra entre las cinco más contaminantes para el medioambiente, afectando al aire, agua y suelo. Además de la gran cantidad de residuos que genera, el mayor impacto se debe al elevado consumo de recursos naturales. Las acciones llevadas adelante por dicha industria tienen por objetivo lograr la neutralidad de carbono para el año 2050. Entre ellas, el empleo de materiales reciclados de hormigón como sustitutos, parcial o total, de los materiales convencionales usualmente empleados, constituye una práctica con un mayor grado de avance a nivel mundial y más cercana a la realidad de países en vía de desarrollo. Este trabajo presenta una revisión sobre las características y particularidades de los agregados y polvo reciclados de hormigón obtenidos del reciclado de hormigones, así como también alternativas contempladas para mejorar sus propiedades. Además, se analiza la situación normativa actual de dichos materiales en los países de Latinoamérica.

PALABRAS CLAVE: Residuos de hormigón, agregado reciclado, polvo reciclado, hormigón sustentable, economía circular

ABSTRACT

The construction industry ranks among the five most polluting sectors, exerting significant impacts on air, water, and soil. In addition to generating large volumes of waste, its greatest environmental burden arises from the intensive consumption of natural resources. In response, the industry has committed to achieving carbon neutrality by 2050. One of the key strategies toward this goal is the use of recycled concrete materials as partial or total substitutes for conventional construction materials—a practice with a higher degree of advancement worldwide and closer to the reality of developing countries. This paper presents a review of the characteristics and properties of recycled concrete aggregates and powder, as well as alternative approaches to enhancing their performance. It also examines the current regulatory framework governing these materials in Latin American countries.

KEYWORDS: Concrete wastes, recycled aggregate, recycled powder, sustainable concrete, circular economy

*Autor de correspondencia

1. Introducción

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Zega, C., Manrique, B. E., y Sosa, M. E. (2026). Agregados y polvo reciclados de hormigón: propiedades y marco normativo en América Latina. *Revista Hormigón*, 70, 5–25. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/51n0est6o>

La crisis climática es uno de los desafíos más grandes que enfrenta la sociedad. Si bien desde años previos los cambios ocurridos en los patrones climáticos ocupaban espacio en las discusiones políticas de la época, es en 1972 con el informe “Los Límites del Crecimiento” [1] que se pone de manifiesto que los hábitos de consumo humano, la explotación de recursos para satisfacerlo y el exponencial crecimiento poblacional no resultaban sostenibles para el planeta.

Desde entonces y hasta la actualidad, las investigaciones han demostrado la imperiosa necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero para garantizar la viabilidad de la vida humana tal como la conocemos [2]. Tal necesidad resulta de alcanzar la meta al año 2050 de no superar un aumento de la temperatura media del planeta de más de 2 °C (preferentemente 1,5 °C), respecto de la era preindustrial (1850-1900), para que los efectos asociados al cambio climático no alcancen un punto de no retorno [3]. A pesar de la firma de acuerdos de compromiso para alcanzar dicho objetivo por parte de una gran cantidad de países, en el periodo 2011-2020 el incremento en la temperatura media ha sido de 1,1 °C [4].

En este contexto, toda acción tendiente a reducir el impacto ambiental resulta imprescindible. En particular, el sector de la construcción es uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero, con alrededor del 37 % del total de los gases emitidos [5]. Éste es señalado como uno de los sectores en los que las medidas potencialmente adoptables para disminuir la huella ambiental generarían un mayor impacto positivo [2].

Dentro de la industria de la construcción, el sector del cemento y el hormigón es, a nivel mundial, responsable de más del 50 % de la extracción de recursos naturales, del 30 % del consumo de recursos hídricos y genera aproximadamente 30 % de la producción de residuos [6]. La asociación global de cemento y hormigón, que nuclea al 80 % de la industria por fuera de China, ha establecido su propia hoja de ruta para alcanzar la neutralidad de emisiones en el sector para el año 2050 [7]. Para ello, ha trazado una serie de acciones que tomadas en conjunto permitirían alcanzar el objetivo planteado. En la Figura 1 se presenta un esquema adaptado de las diferentes acciones y la reducción en emisiones que conllevarían.

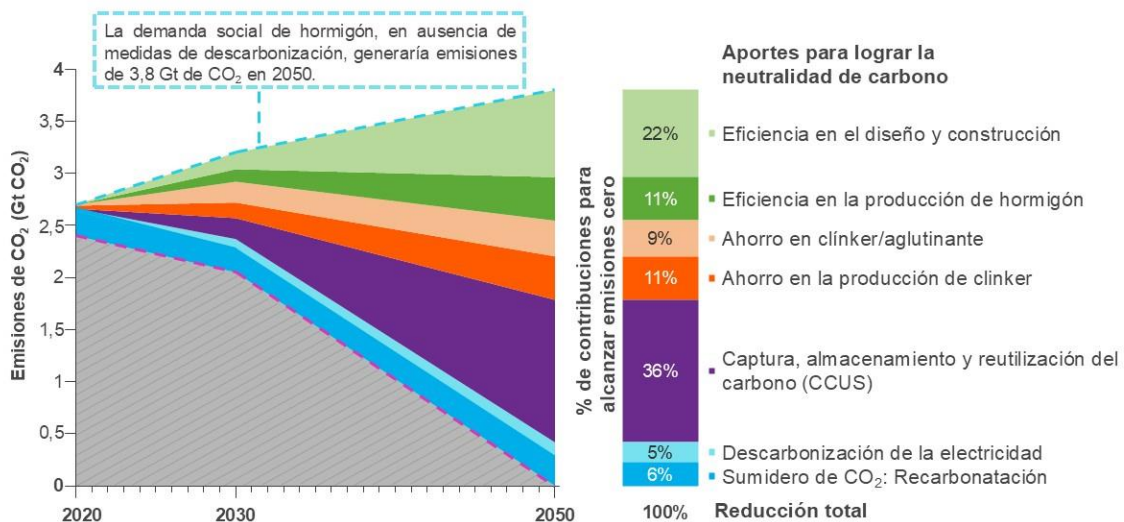


Figura 1. Acciones a implementar para alcanzar la carbono-neutralidad al año 2050. (Adaptado de [7])

Dentro de las distintas estrategias, la reutilización de residuos es hoy en día una práctica que cuenta con un mayor grado de avance y una realidad incluso en países en vías de desarrollo como Argentina. El aporte de dicha práctica dentro de las estrategias trazadas se encuentra en el ahorro de emisiones en la producción de clínker y en la eficiencia en la producción de hormigón. Con respecto al primero, el uso de materias primas descarbonatadas para sustituir parte de la piedra caliza en el horno, utilizando los finos del hormigón reciclado, entre otros subproductos, podría contribuir en una reducción de emisiones de hasta 2 % para el año 2050 [7]. Por otra parte, en la mencionada hoja de ruta no se informa sobre el ahorro de emisiones esperable producto de la reutilización de agregado reciclado de hormigón como reemplazo parcial de los agregados naturales.

En este trabajo se presenta una síntesis del estado actual de la práctica de valorización de hormigones de desecho en la industria del cemento y del hormigón, resaltando la situación normativa en Latinoamérica.

1.1 Reciclado de hormigones: background

Diversos estudios de investigación han demostrado la potencialidad de utilizar restos de hormigones como material alternativo sustituto de los agregados naturales (AN) en la producción de nuevos hormigones [8-13]. Para ello, es fundamental una correcta gestión y procesamiento del residuo a fin de dar lugar a agregados reciclados de hormigón (AR) de calidad adecuada. Existe consenso generalizado en que el uso de AR es técnicamente viable, ambientalmente amigable y económicamente rentable. La viabilidad técnica se manifiesta en la posibilidad de producir hormigones con resistencias de nivel estructural y con requerimientos de durabilidad. Asimismo, se considera que es amigable con el ambiente por cuanto se hace uso de un material que de otro

modo solo es descartado, en algunos países de manera inapropiada, propiciando con ello una mayor contaminación de suelo, agua y aire; también hay una reducción en el consumo de recursos naturales no renovables. Por otra parte, la rentabilidad económica dependerá de las condiciones y características de la obra, tales como ubicación, magnitud, importancia, etc., así como de las condiciones de producción del AR, distancias de transporte y competencia con los materiales naturales, ya sea en cuanto a sus propiedades como al impacto ambiental.

En la recuperación de hormigones, sea cual fuere la fuente, ocurre primeramente un proceso de demolición de la estructura seguido de la trituración, la cual puede incluir diferentes sistemas y trituradoras [14], de manera similar a lo que sucede en el caso de la producción de AN de trituración. En una primera instancia, y sin ningún tipo de control y clasificación, el material granular obtenido de la recuperación de hormigones resulta apto para su aplicación en rellenos y mejoramiento de vías de circulación. La ejecución de estabilizados granulares y hormigones no estructurales para bases y sub-bases de caminos, o para estructuras temporarias, implica considerar ciertas características del material, aunque sin mayores requerimientos [15]. Si, en cambio, a ese material se le realiza una preclasificación, escarificado, separación y clasificación por tamaños, se obtienen AR de distintas fracciones, pudiendo contemplar agregados gruesos reciclados (AGR) de distintos tamaños máximos, agregado fino reciclado (AFR) (material que pasa el tamiz de 4,75 mm de abertura de malla) y polvo reciclado (PR), este último conformado por las fracciones más finas que surgen del procesamiento del material. Aun proviniendo de un mismo material origen, cada una de dichas fracciones presentarán características particulares y diferenciales entre sí, las cuales estarán influenciadas además por su composición.

Las características y propiedades del AR han sido ampliamente estudiadas a nivel

internacional, y su utilización está, en mayor o menor medida, difundida en todo el mundo.

Sin embargo, no sucede lo mismo con el PR, cuyo estudio recién ha sido abordado de manera sistematizada durante los últimos años. El conocimiento adquirido sobre los AR ha permitido incluirlo en diferentes normas de agregados para hormigón, como es el caso de la American Society for Testing and Materials [16] y el Instituto Argentino de Normalización [17,18], entre otros, y que muchos países y organismos dispongan de reglamentos, guías o recomendaciones para su empleo en hormigones [19-21], por citar algunos ejemplos.

En la Tabla 1 se presentan los contenidos de AR permitidos en algunos países europeos, indicándose la fracción de AR admitido, la calidad del mismo y las limitaciones en cuanto a su aplicación o uso. Se evidencian diferentes criterios en la admisión del uso del AR. Mientras que algunos permiten solamente la fracción gruesa, otros incluyen también al AFR.

Además, refieren a dos calidades diferentes para los AR, evaluada a partir de su capacidad de absorción. En función de dicha calidad y de la fracción de AR admitida se establecen las clases resistentes máximas de los hormigones y los contenidos máximos de cada una de dichas fracciones. También se observan diferencias en estos últimos aspectos, donde algunos países admiten su uso hasta en hormigones de clase C40/C50, mientras que otros lo limitan a hormigones de clase C20/C25. De igual modo, en algunos casos se admite hasta un 60 % del AGR cuando otros lo restringen al 5 %; similar observación puede hacerse en el caso del AFR.

En contraste con lo mencionado sobre los agregados reciclados, el polvo reciclado (PR) ha recibido atención sistemática recién en los últimos años. Este subproducto, generado durante las etapas de trituración y tamizado del hormigón de desecho para la obtención de los agregados reciclados [23,24], representa aproximadamente entre el 10 y el 30 % de la masa total del residuo procesado [25-27].

Tabla 1. Contenido máximo y limitaciones del empleo de agregados reciclados en países europeos.
(Adaptado de [22])

País	Tamaño	Calidad del AR	Incorporación máxima y limitaciones
Bélgica	AGR	Alta	H ^A : 30 % ($\leq$ C30/37), H ^S : 50 %
Dinamarca	AGR y AFR	Alta Moderada	30 % AFR ($\leq$ C30/37), 100 % AGR ($\leq$ C40/50) 20 % AFR, 100 % AGR ($\leq$ C20/25)
Francia	AGR y AFR	Alta Moderada	5 % AFR, 30 % AGR ($\leq$ C25/30) 5 % AGR ($\leq$ C25/30)
Alemania	AGR	Alta	45 % del agregado total (AG+AF), baja exposición 35 % del agregado total (AG+AF), ambiente con cloruros
Italia	AGR	Alta moderada	30 % ($\leq$ C30/37) moderada exposición 60 % ($\leq$ C20/25) baja exposición
Países Bajos	AGR y AFR	Alta Moderada	50 % ($\leq$ C35/45) baja a moderada exposición 20 % ($\leq$ C35/45) baja a moderada exposición
Noruega	AGR y AFR	Alta Moderada	10 % AFR, 30 % AGR ($\leq$ C20/25), 20 % AGR ($\leq$ C45/55) 5 % AFR, 10 % AGR ($\leq$ C20/25)
Portugal	AGR	Alta	25 % del agregado total (AG+AF) ($\leq$ C40/50) 20 % del agregado total (AG+AF) ($\leq$ C35/45)
España	AGR	Alta	20 % ($\leq$ C40/50)
Suecia	AGR	Alta Moderada	50 % ($\leq$ C30/37), 30 % ($\leq$ C35/45) 50 % ($\leq$ C30/37), 20 % ($\leq$ C35/45)

Aunque tradicionalmente fue considerado un material inerte o de bajo valor, estudios recientes destacan su potencial como material cementicio suplementario debido al efecto filler, a la posible presencia de clínker residual y, en ciertos casos, al desarrollo de actividad hidráulica, dependiendo de su composición y del tratamiento aplicado [23,26,28,29].

Esto ha llevado a su incorporación en marcos regulatorios en Europa, como la UNE-EN 197-6:2023 [30], lo que pone de manifiesto la necesidad de profundizar su estudio y de analizar su situación normativa en Latinoamérica. Asimismo, este material también ha sido considerado en estrategias internacionales de descarbonización del sector, como la hoja de ruta de la GCCA [7] hacia las emisiones netas cero, en la que el polvo reciclado se incluye entre las vías para reducir el contenido de clínker y ampliar el uso de materiales cementicios suplementarios. En este sentido, resulta pertinente examinar el marco normativo que ha comenzado a consolidarse en Europa para la valorización del polvo reciclado en la fabricación de cemento.

La entrada en vigor de la norma UNE-EN 197-6:2023 [30] constituye un hito regulatorio, ya que establece por primera vez un marco formal para el uso de finos de hormigón reciclado como componente principal en la fabricación de cemento. Este avance representa un cambio sustancial en la valorización del polvo reciclado, al permitir su transición desde la condición de subproducto industrial hacia la de material mineral regulado, en consonancia con los principios de economía circular aplicados al sector de la construcción.

La norma establece que estos finos deben ser materiales minerales especialmente seleccionados y preparados, procedentes de plantas o unidades de producción de agregados gruesos, agregados “todo uno” o finos de hormigón reciclado, de operaciones directas de producción de hormigón, o bien de agregados de machaqueo recuperados, de acuerdo con la norma UNE-EN 206:2013+A2-2021 [31]. Asimismo, la aptitud del material

queda vinculada a la calidad del agregado reciclado de origen, exigiéndose que los agregados gruesos cumplan con determinadas clases de componentes definidos en la UNE-EN 12620:2002+A1-2008 [32], con el fin de limitar la presencia de impurezas. En particular, se requiere un contenido mínimo del 90 % en masa de hormigón, productos de hormigón, mortero o piedra natural, mientras que la presencia de unidades de albañilería y hormigón celular debe ser ≤ 10 %, la de materiales bituminosos ≤ 1 %, la de vidrio y otros materiales extraños ≤ 1 % y el volumen de partículas ligeras ≤ 2 cm³/kg. A ello se suman exigencias químicas complementarias, tales como límites para el carbono orgánico total, los sulfatos y el contenido de arcilla, con el objetivo de asegurar un comportamiento compatible con su empleo en cementos.

Una vez verificados estos requisitos, los finos reciclados pueden incorporarse como componente principal (F) en distintas familias de cemento. La norma contempla su uso en los cementos CEM II/A-F y CEM II/B-F, con sustituciones de entre 6–20 % y 21–35 %, respectivamente. También se admite su incorporación en cementos Portland compuestos CEM II/M, combinados con otros constituyentes principales, con proporciones variables según el subtipo, así como en la nueva categoría de cementos compuestos CEM VI, donde pueden emplearse en combinación con escoria granulada de alto horno. La norma agrega, además, una restricción específica para los casos en que los finos reciclados se utilicen conjuntamente con caliza (L o LL), estableciendo que la suma total de L + LL + F no debe superar el 35 % en masa del cemento final.

En conjunto, este marco normativo constituye una referencia de gran relevancia, ya que demuestra que el uso del polvo reciclado de hormigón ya no se limita al ámbito experimental, sino que comienza a consolidarse como una alternativa técnicamente regulada dentro de la industria cementera. Este antecedente europeo resulta especialmente significativo al contrastarlo con

la todavía escasa incorporación normativa de este material en Latinoamérica.

2. Agregados reciclados

2.1 Propiedades

El alcance de las normas, reglamentos y otros documentos referidos al empleo de los AR tiene su fundamento en los conocimientos adquiridos sobre las propiedades de dicho material, a partir de estudios de investigación y aplicaciones en obra. Es sabido que las principales diferencias entre un AR y un AN radican en el mortero residual o pasta de cemento adherida a las partículas del AR. Esto genera un material más heterogéneo y de mayor porosidad comparado con un AN. Asimismo, las propiedades de los AR dependen de las características del hormigón de origen, principalmente la resistencia y el tipo de agregado grueso natural (AGN) del mismo, las cuales, a su vez, afectan el contenido de mortero residual (MR) en el AR. En otras palabras, las características del hormigón de origen tendrán influencia en el contenido de MR del AR, el cual, por ser el componente débil del mismo, afectará inevitablemente sus propiedades.

Debido a ello, se ha cuantificado el contenido de MR en el AR con el fin de vincularlo a sus propiedades físicas. En este sentido, AR con contenidos de MR por debajo del 44 % presentarían propiedades que cumplirían con los requisitos de la norma española [33]. Sin embargo, a pesar de haber observado cierta relación entre algunas propiedades del AR y su contenido de mortero residual, el hecho de no existir un método normalizado o confiable y validado a nivel internacional para su determinación hace que los resultados obtenidos en los distintos estudios no puedan ser directamente comparados (Figura 2).

Entre las diferentes técnicas de cuantificación del MR que se encuentran en la literatura, pueden diferenciarse entre aquellas que

utilizan métodos visuales de las que aplican algún procedimiento químico o físico-mecánico [34]. Mientras que las primeras cuantifican volúmenes relativos de mortero (de espesor infinitesimal) sobre las partículas de AR, las últimas determinan el contenido de mortero por diferencia de pesos resultantes de la aplicación del tratamiento. Cada una de ellas tiene sus ventajas y limitaciones, como pueden ser precisión, celeridad, representatividad, aplicabilidad, entre otras.

Más allá de las diferencias que pudieran existir en el contenido del MR según sea la técnica aplicada, los resultados muestran cierta consistencia en cuanto a los efectos que tiene la clase de hormigón y el tamaño máximo del AGR sobre el contenido de MR, e incluso el efecto del tipo de AGN del hormigón de origen sobre el mismo. El tamaño máximo del AR se manifiesta con una relación inversa con el contenido de MR (Figura 3).

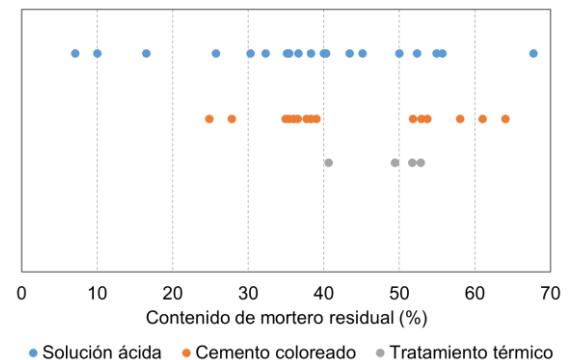


Figura 2. Contenido de mortero en función del método de procesamiento. (Adaptado de [33])

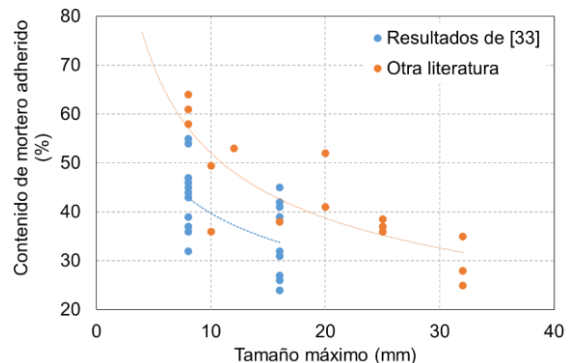


Figura 3. Variación del contenido de mortero residual con el tamaño máximo del agregado. (Adaptado de [33])

Cabe mencionar que, en dicha figura, “Resultados de [33]” refiere a resultados propios de los autores, mientras que “Otra literatura” hace referencia a literatura citada como tal en la figura original.

Por otra parte, el efecto del tipo de AGN parece depender de la dureza y textura superficial de la roca, variando considerablemente cómo permanece el mortero en el conjunto de los AR. En este último sentido, en la Figura 4 se observa que AR provenientes de hormigones elaborados con piedra cuarcita Mar del Plata presentaron mayores contenidos de morteros que el resto de los AR estudiados (provenientes de hormigones con otros tipos de agregados gruesos naturales).

Este hecho debe ser atribuido a la menor dureza relativa y mayor rugosidad superficial del agregado de cuarcita, facilitando, por un lado, su fractura durante la tritución del hormigón y, por otro lado, menor desprendimiento del mortero. El canto rodado silíceo representa un caso opuesto al anterior, con una roca de mayor dureza relativa y menor rugosidad superficial. En este caso, el agregado natural se fracturó en menor medida durante la tritución de los hormigones,

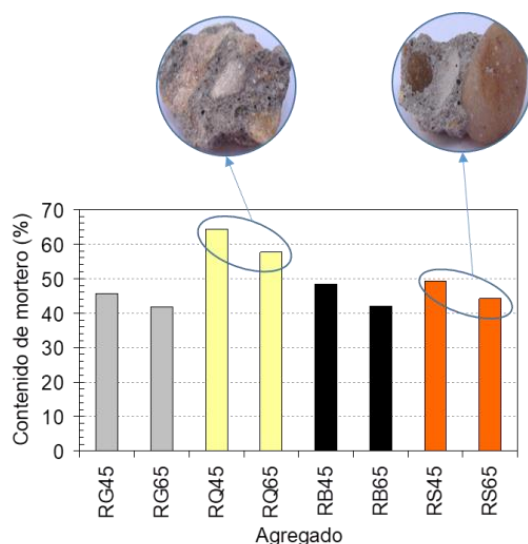


Figura 4. Contenido de mortero residual en AGR con diferentes AGN.

mientras que la adherencia con el mortero también fue menor, formándose mayor cantidad de partículas enteramente de mortero o de AGN; no se observaron cambios en el contenido de mortero, respecto a otros tipos de agregados naturales. En el caso de la resistencia del hormigón de origen, AGR provenientes de hormigones menos resistentes arrojan menores contenidos de mortero, aunque eso no necesariamente se traduce luego en menores valores de desgaste “Los Ángeles”, es decir que no implica mejor calidad del AR (Figuras 4 y 5).

Además de los cambios en la resistencia de las partículas, la presencia del MR genera que el AR adquiera menor densidad y mayor capacidad de absorber agua en comparación al AN. El cambio en la densidad es de relativa menor importancia (del orden del 5 % o menos), mientras que la modificación en la absorción es de un orden de magnitud superior al compararla con la de los AN usualmente empleados. Este último hecho hace que la misma no pueda despreciarse al momento de emplear los AR en la elaboración de mezclas de hormigón [35].

Debido a las modificaciones que introduce el mortero residual en las propiedades de los AR, se ha estudiado la aplicación de diferentes métodos para su mejora, con el fin de que se asemejen a las del AN.

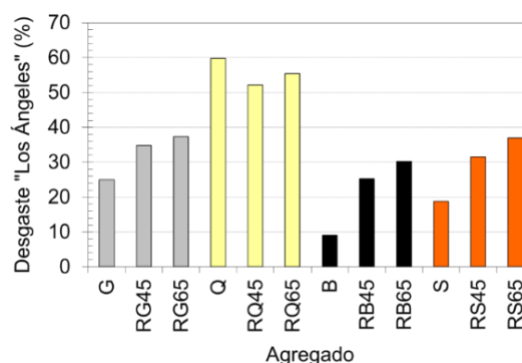


Figura 5. Desgaste “Los Ángeles” en AGR con diferentes AGN.

G: granito, **Q:** cuarcita, **B:** basalto, **S:** canto rodado silíceo, **RG:** reciclado de granito, **RQ:** reciclado de cuarcita, **RB:** reciclado de basalto, **RS:** reciclado de canto rodado silíceo.

Los tratamientos de mejora de los AR son abordados en el punto 2.2, y se diferencian básicamente en remover el mortero residual o en reducir su porosidad. En el caso de los primeros, los cuales se aplican en general a AGR, se debe tener en cuenta que el mortero removido no se pierde, sino que pasa a formar parte de la fracción fina, es decir, del AFR. Hasta hace algunos años, este hecho no era relevante debido a que el AFR no era considerado para su empleo en hormigones. Actualmente, debido a una mayor escasez de arenas naturales y a la acumulación de este material reciclado, se ha acrecentado el interés por el empleo del AFR. Por lo tanto, tener ese mortero residual en forma disgregada en el AFR resultará más perjudicial que tenerlo en forma de partículas o adherido en los AGR. Además de incrementar la porosidad del AFR (que ya de por sí es mayor a la del AGR), la presencia del mortero disgregado aporta mayor finura, resultando en un AFR más heterogéneo. Este hecho ha dado lugar al procesamiento de las fracciones más finas de los AR a fin de obtener el polvo reciclado (PR), el cual ha demostrado cierta potencialidad para su empleo como sustituto parcial del cemento (ver punto 3). No obstante, y pese a los avances logrados durante los últimos años en este aspecto, aún se requiere de mayores estudios que aporten al conocimiento de las posibilidades que brinda este nuevo material.

2.2 Tratamientos de mejoras aplicados

El creciente interés y necesidad del empleo de los AR, debido a motivos como los mencionados anteriormente, ha conducido al estudio de distintas alternativas que permitan reducir su porosidad y con ello mejorar tanto su calidad como la de los hormigones con ellos elaborados [36]. Entre las diferentes alternativas que han sido contempladas se encuentran la remoción del mortero residual o pasta de cemento adherida y la reducción de la porosidad del mortero (Figura 6).

Los tratamientos para remoción del MR incluyen el empleo de diferentes tipos de ácidos, así como también tratamientos térmico-mecánicos [38-47], los cuales producen la separación del mortero dejando las partículas del AN mayormente limpias y, en la mayoría de los casos, sin alteraciones. También se han empleado ácidos que presentan un menor riesgo ambiental, como el acético o el cítrico [48,49], aunque requieren mayor tiempo de ataque y presentan menor eficiencia que los ácidos más fuertes. Sin embargo, no todas las técnicas o métodos pueden ser aplicados a cualquier AR, dependiendo fundamentalmente de su constitución, como por ejemplo la limitación de emplear métodos por ataque con ácido en AR provenientes de hormigones que contengan agregados de tipo calizo.

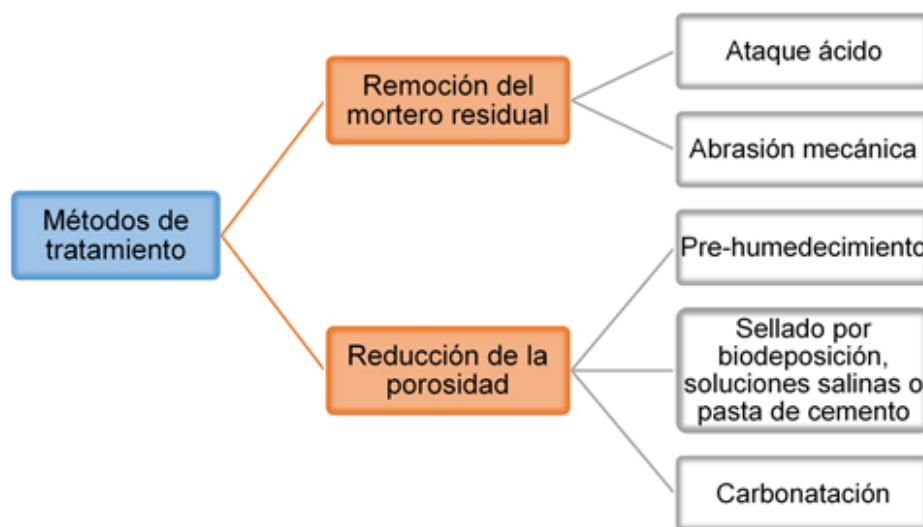


Figura 6. Tratamientos de mejora de propiedades de los agregados reciclados. (Adaptado de [37])

Se debe considerar, además, que el empleo de estas técnicas de remoción del mortero conlleva la incorporación de otra etapa al procesamiento del material reciclado, a la vez que se genera un nuevo residuo o subproducto resultante de dicho tratamiento. En este sentido, la aplicación de los métodos químicos resultaría poco viable a escala industrial, mientras que la separación del MR por métodos térmicos y térmico-mecánicos permitiría que el residuo del mortero se encuentre sin contaminar, incrementando las oportunidades de empleo en otra aplicación, con una logística compleja pero factible.

En cuanto a la reducción de la porosidad del mortero residual presente en el AR, diferentes ideas y procedimientos han sido estudiados y aplicados en la literatura [50]. Entre los distintos métodos evaluados se pueden mencionar el mezclado en dos etapas, en el cual se divide proporcionalmente el agua de mezclado en dos partes agregándola en dos momentos diferentes del mezclado, permitiendo así una reducción de la porosidad [51,52,53], el sellado previo de la porosidad del AR mediante su saturación con diferentes soluciones salinas [54] o con diferentes tipos de pastas [55], el tratamiento con bacterias que precipitan en los poros formando carbonato de calcio [56,57], y la aplicación de procesos de carbonatación acelerada [58,59]. Estos métodos presentan la ventaja que permiten un aprovechamiento integral de los AR, y en el caso del proceso de carbonatación permitiría, además, fijar CO_2 generado en algún proceso industrial.

Como fue mencionado anteriormente, algunos de estos procedimientos de reducción de la porosidad del AR pueden ser también empleados en la mejora de la matriz del hormigón con agregados reciclados. Entre ellos se pueden mencionar el empleo de bacterias y la aplicación de procesos de carbonatación acelerada, aportando las mismas ventajas antes señaladas. El empleo de bacterias en el nuevo hormigón permite, además de reducir su porosidad, actuar sobre las microfisuras que se van produciendo durante la etapa de servicio del hormigón, hecho que permitiría aún extender la vida útil del mismo [60,61]. En cuanto al curado con concentraciones elevadas de CO_2 , la

modificación de su porosidad estará asociada también a la disponibilidad de material alcalino [62,63]. Otra variante o alternativa para mejorar la calidad de la matriz cementicia consiste en aplicar un proceso de inyección de CO_2 en estado fresco, durante la elaboración del hormigón. Si bien se ha demostrado la mejora en el desempeño mecánico de hormigones con agregados naturales al aplicar este proceso [64], no hay información concluyente en cuanto a sus efectos sobre el aspecto durable de los mismos, como así tampoco sobre su aplicación en hormigones con agregados reciclados.

Además de los procedimientos mencionados, el empleo de materiales cementicios suplementarios (MCS) [65] y aditivos impermeabilizantes [66] para reducir la porosidad del hormigón, en general, han demostrado efectividad al aplicarse en hormigones con agregados reciclados.

3. Polvo reciclado

El PR puede obtenerse a partir del tamizado del AR [67,28], por molienda de las fracciones finas del AR [68] o por separación del AR por corrientes de aire [69,70]. Este material puede presentar finuras similares a las de un filler calizo o incluso mayores dependiendo del método por el que se obtuvo, presentando el PR obtenido por corriente de aire mayor finura.

3.1. Propiedades

Se define como el material con un tamaño de partícula inferior a 0,075 mm [25,71]. Sus partículas poseen formas no uniformes, bordes irregulares y una textura superficial rugosa con presencia de microgrietas [24,28,72,73]. Se caracteriza por una alta porosidad y gran capacidad de absorción de agua, con una densidad menor que la del cemento [74]. Químicamente, su distribución de óxidos se sitúa entre el cemento y las cenizas volantes [23,72]. Se estima que contiene entre un 6 % y un 36 % de cemento residual no hidratado, lo que justifica su potencial para ser reactivado [75,76].

3.2. Tratamientos de activación y mejora

Debido a su baja reactividad inicial, se aplican diversos métodos de activación para mejorar su desempeño como MCS, como son la activación mecánica (molienda), activación térmica, carbonatación y activación química. La activación mecánica consiste en prolongar la molienda con el fin de aumentar el área superficial específica, liberando núcleos de cemento no hidratado y favoreciendo el efecto filler [28,75,77]. La activación térmica consiste en exponer el PR a temperaturas de entre 600 °C y 800 °C buscando descomponer los productos de hidratación (gel C-S-H y portlandita) para regenerar fases reactivas similares a la belita del clínker [26,77,78]. El proceso de carbonatación acelerada consiste en exponer el PR a altas concentraciones de CO₂ para densificar su estructura y reducir su absorción [79,80]. En el caso de la activación química, se emplean activadores alcalinos (NaOH, Na₂SiO₃ o Ca(OH)₂) para elevar el pH y estimular la formación de nuevos geles cementantes [25,28].

3.3. Usos y aplicaciones

El polvo reciclado puede valorizarse en distintas etapas de la cadena del cemento y el hormigón, cumpliendo funciones diferentes según el rol que se le asigne. En términos generales, su empleo puede clasificarse como: materia prima para la producción de clínker, componente reactivo del sistema ligante, material de relleno con función predominantemente física o reemplazo parcial de la fracción fina en morteros u hormigones.

3.3.1. Como materia prima para la producción de clínker

Zhang et al. (2023) [81] exploraron la factibilidad de producir un cemento sustentable a baja temperatura (1200 °C) a partir del sinterizado de cenizas de fondo y PR. En la Figura 7 se puede observar la evolución de la resistencia con la edad para la pasta de referencia (OPC) con curado normalizado (H) y con curado con CO₂ (C), y para la pasta con el cemento sustentable (GC), también con

ambos curados. Observaron que el desempeño de la mezcla de referencia mejoró al aplicar el curado con CO₂ (OPC-C). La mezcla GC bajo curado normalizado (GC-H) no registró resistencia a la edad de 1 día, y solo exhibió ganancias de resistencia latentes a edades posteriores, alcanzando 21 MPa a la edad de 60 días. Sin embargo, al aplicar el proceso de curado con CO₂, tanto la pasta de referencia como la elaborada con el cemento GC mejoraron notablemente su desempeño. El cambio en el desempeño de la mezcla GC fue extremadamente notorio; no solo que la resistencia evolucionó con respecto a la de la mezcla con curado normalizado, sino que incluso los valores alcanzados superaron a los obtenidos con la mezcla de referencia a las mismas edades. Los autores atribuyen este comportamiento a la reactividad de las fases de clínker del nuevo cemento con el tratamiento con CO₂, particularmente al de la Belita (C₂S) y Rankinita (C₃S₂).

3.3.2. Como material cementicio suplementario (reemplazo de cemento)

El PR constituye una alternativa promisorio como reemplazo parcial del cemento, debido a que puede contener partículas de clínker residual no hidratado, productos de hidratación y fracciones finas con cierto grado de reactividad. Su desempeño depende principalmente de la procedencia del material, su composición mineralógica y, especialmente, de su finura.

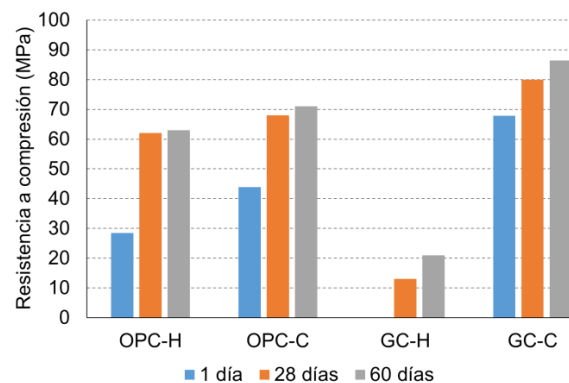


Figura 7. Resistencia a compresión de pastas con curado normalizado y con secuestro de CO₂. (Adaptado de [81])

En este sentido, se ha señalado que, para su utilización como MCS, resulta conveniente que el PR presente tamaños de partícula comparables o inferiores a las del cemento, ya que ello favorece tanto el efecto filler como la generación de sitios de nucleación para los productos de hidratación. Asimismo, el incremento de la superficie específica mediante molienda mejora su reactividad potencial. Si bien la actividad del PR no es uniforme y puede verse limitada cuando proviene de hormigones envejecidos o con elevada proporción de fases ya hidratadas, diversos estudios reportan que, en general, puede alcanzar índices de actividad compatibles con su empleo como sustituto parcial del cemento [23,77]. En consecuencia, su utilización representa una vía técnicamente viable para disminuir el consumo de clínker, aunque requiere una adecuada caracterización previa y, en muchos casos, tratamientos de activación que optimicen su desempeño [23].

3.3.3. Como material de relleno (filler)

En cuanto al uso de PR como material de relleno, prácticamente no se han encontrado antecedentes en la literatura. Los autores de [68] emplearon PR proveniente de la trituración de un agregado fino reciclado (AFR) para la elaboración de hormigón autocompactante (HAC). En este caso el PR se empleó como reemplazo del filler calizo, en un 50 % y 100 %. En estado fresco observaron una mayor fluidez de las mezclas con PR, dado por menores tiempos de extendido y de pasaje en el embudo en V, aunque el diámetro final alcanzado en el extendido resultó menor (Figura 8). La Figura 9 muestra el aspecto de las mezclas en estado fresco luego del ensayo de extendido, pudiéndose observar que no se produjo segregación en ninguna de las mezclas estudiadas. El nivel resistente a compresión resultó similar para todas las mezclas, sin cambios significativos en la absorción de agua por inmersión y succión capilar. Los autores tampoco observaron una tendencia definida con respecto al contenido de PR empleado.

3.3.4. Otros usos

En menor medida, se ha evaluado su empleo como reemplazo parcial del agregado fino natural en morteros, aunque esta aplicación suele ser menos eficiente que su uso como filler o material reactivo debido a su alta absorción de agua [82,83].

4. Propiedades del hormigón con agregado reciclado

La influencia del AGR sobre las propiedades mecánicas del hormigón ha sido ampliamente estudiada, contemplando diferentes aspectos como calidad del hormigón de origen, tipo de AGN en el hormigón de origen, porcentajes de sustitución, niveles resistentes del hormigón a producir, entre otras.

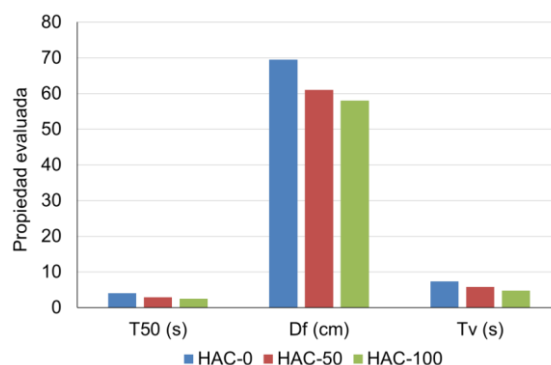


Figura 8. Propiedades en estado fresco de hormigones autocompactantes con PR.

T50 (s): tiempo de extendido a 50 cm;

Df (cm): diámetro final; Tv (s): tiempo de

pasaje en el embudo en V. (Adaptado de [68]).

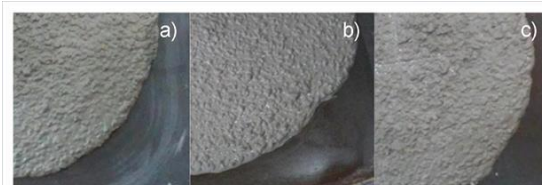


Figura 9. Aspecto de las mezclas luego del ensayo de extendido. a) HAC con 0% PR, b) HAC con 50% PR, c) HAC con 100% PR.

(Fuente: [68]). (Adaptado de [68])

En tal sentido, tenores de sustitución de hasta 30 % del AGN por AGR conduce a hormigones de similar desempeño mecánico [9-13]. Asimismo, estudios a nivel nacional evidenciaron que sustituciones de hasta 75 % tuvieron un efecto despreciable en la resistencia de los hormigones con AR [84-86].

En términos de durabilidad, la incorporación del AR incrementa la porosidad del nuevo hormigón, y con ello la susceptibilidad al ingreso de sustancias agresivas que pueden degradar su comportamiento. No obstante, diferentes estudios han demostrado que el empleo de MCS puede ayudar a mejorar el desempeño del HR [65], al igual que sucede con los hormigones convencionales.

También se ha observado que el incremento en la porosidad no implica necesariamente una merma en el desempeño durable del HR, por lo que el ambiente de exposición no sería un limitante si el HR satisface los requerimientos para el tipo de exposición considerada [87,88]. Muchas veces los ensayos de laboratorio, y sobre todo los ensayos acelerados, pueden subvalorar el desempeño de los hormigones, siendo este hecho más evidente en el caso de los HR [89,90]. Independientemente de ello, en general, se acepta que los mayores cambios en las propiedades de los HR se dan para reemplazos del AN por el AR superiores al 30 %, esto es, disminución de la resistencia y la durabilidad, y aumento de la contracción por secado (Figura 10). Debido en parte a ello, es que se han implementado diferentes técnicas y procedimientos en pos de mejorar las propiedades de los AR con miras a que no produzcan alteraciones de consideración en el desempeño de los HR. Incluso se han estudiado procedimientos de mejora del HR que permitían mejorar la nueva matriz y, de ese modo, ‘aislar’ las partículas del AR evitando que su porosidad intervenga en los procesos de transporte de sustancia en el HR.

Las diferencias que presentan los AR en comparación con un AN no deberían significar un desafío para su empleo, dado que discrepancias semejantes pueden ocurrir al variar el tipo de AGN, en mayor o menor medida [92]. Por tal motivo, más allá de las discrepancias en sus propiedades, y a fin de

propiciar una industria de la construcción sustentable, al emplear AR en la producción de hormigones hay que cambiar el modo en que habitualmente se lo piensa. Si bien en los estudios de investigación se suele analizar el desempeño del hormigón con AR comparándolo con uno de iguales proporciones elaborado en su totalidad con AN, en la práctica no debería suceder lo mismo. Es decir, se debe pensar y diseñar al HR con base en los conocimientos y criterios de la tecnología del hormigón para producirlo con adecuadas propiedades y prestaciones, tanto en estado fresco como endurecido. Esto requerirá considerar posibles modificaciones en el contenido de agua total de la mezcla pensando en la relación a/c, lo cual estará en función de la condición de humedad de los AR y su capacidad real de absorción, el porcentaje de sustitución a emplear (más reemplazo, mayores diferencias), así como también modificaciones en el orden de mezclado de los materiales. La apreciación de estos factores, entre otros, permitirá obtener HR con adecuados niveles de consistencia en estado fresco y de resistencia en estado endurecido. En todo esto se conjugan las características de los AR y sus propiedades, los requerimientos especificados para el HR y los porcentajes máximos de empleo del AR para lograr un diseño óptimo del HR (Figura 11).

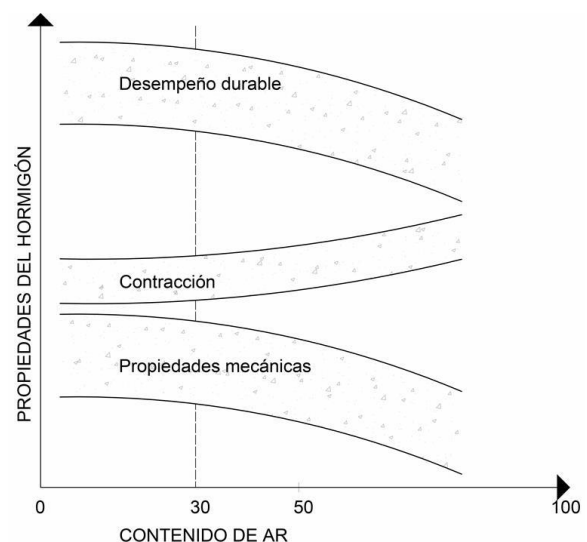


Figura 10. Variación en las propiedades del hormigón en función del contenido de agregado reciclado (AR). (Fuente: [91])



Figura 11. Factores a compatibilizar en el diseño del hormigón con agregado reciclado. AR: agregado reciclado; HR: hormigón con agregado reciclado.

5. Propiedades del hormigón con polvo reciclado

La incorporación de PR afecta tanto el estado fresco como el endurecido del hormigón: La adición de PR provoca una disminución de la trabajabilidad (fluidez) y un aumento de la demanda de agua debido a la porosidad de las partículas y su gran superficie específica [29,78,93]. El tiempo de fraguado varía según el tratamiento previo del material: mientras que la activación química y térmica suelen acortar los tiempos iniciales y finales, la activación por carbonatación tiende a prolongar el fraguado debido a la alteración de las fases reactivas [23].

Existe una tendencia general a la disminución de las resistencias a compresión y flexión conforme aumenta la tasa de reemplazo de cemento por PR. Sin embargo, niveles de sustitución de entre el 10 % y 30 % suelen ser óptimos, logrando resistencias similares al hormigón de referencia gracias al efecto de “microrelleno” y la hidratación del clínker residual [23,76,80,94].

Aunque la porosidad total puede aumentar con altos contenidos de PR sin tratar, el material muestra una alta capacidad para fijar iones cloruro, lo que puede mejorar la resistencia frente a la corrosión de armaduras [95-97].

6. Situación normativa en Latinoamérica

Como se expuso anteriormente, la mayoría de los países europeos tienen en consideración el empleo de los AR entre sus normativas, aunque con ciertas diferencias entre ellos con respecto a la fracción admitida, calidad de los AR, contenidos máximos de sustitución, clase resistente del hormigón a producir con AR y condiciones de exposición.

A nivel latinoamericano la situación es, por un lado, muy diferente a la de los países de Europa en cuanto a que sólo cuatro países poseen normativa para el empleo de AR en hormigones estructurales: Colombia, Brasil, Chile y Argentina. En el resto de Latinoamérica no se han encontrado países que consideren el uso de este material desde el aspecto normativo. Ciudad de México, por ejemplo, cuenta con una norma ambiental (NACDMX-007-RNAT-2019) orientada a regular las acciones en materia de RCD, incluye una clasificación de los RCD de manera general (hormigón, mampostería, metal, etc.) e indica posibles usos para el aprovechamiento de dichos materiales en elementos no estructurales. Por lo tanto, dicha norma no será considerada en este estudio. Por otro lado, y de igual modo que sucede entre los países del viejo continente, aquí también se observan diferencias en las consideraciones que realiza cada uno de los países sobre las posibilidades de uso del AR.

En el caso de Colombia, la NTC 174-2018 [98] establece las especificaciones de los agregados para concreto, y en ella se incluye el uso de los agregados reciclados. Sin embargo, no incluye limitaciones para dicho uso, aunque reconoce que pueden existir ciertas alteraciones en las propiedades de los hormigones producidos con agregados reciclados, principalmente debido a su menor resistencia, mayor rugosidad y variabilidad en sus propiedades. A partir de la mencionada norma derivan otras más específicas, como la NTC 6421-2021 [99] referida a los requisitos de calidad y orientaciones de uso de los agregados gruesos reciclados para concreto hidráulico, y la NTC 6422-2021 [100] sobre ensayos de clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados.

En relación a la NTC 6421-2021 [99], la misma establece distintas categorías para el AGR en función de su composición (solo hormigón, con restos de mampostería, con asfalto, etc.). En lo que hace al uso estructural del AR, se admite hasta un máximo del 20 % del AGR y en hormigones de resistencia menor o igual a 35 MPa. Para uso no estructural, el porcentaje máximo de empleo se eleva hasta el 100 % en hormigones de hasta 21 MPa [101].

Brasil, por su parte, posee la norma NBR 15116-2021 [102] para agregados reciclados para uso en morteros y hormigones. Así, considera exclusivamente los AR procedentes de hormigones, adoptando solamente la fracción gruesa (AGR) y limitando su absorción al 7 %, debiendo dichos AGR cumplir con los requerimientos de la norma de agregados para hormigón (NBR 7211-2022) [103]. El contenido de AGR está restringido en un máximo del 20 % y en hormigones de resistencia a compresión de hasta 20 MPa. Además, contempla las posibilidades de aplicación del AR al admitir su uso para ambientes con clases de agresividad I e II (riesgo de deterioro insignificante o bajo). A diferencia de la NTC 6421-2021 [99], la NBR 15116-2021 [102] impone una limitación a la calidad del AGR en base a su capacidad de absorción, hecho que está en línea con otras normas internacionales [20,104], pero resulta mucho más conservadora debido a una mayor restricción en la resistencia máxima del hormigón a producir (muy por debajo de la especificada en la norma colombiana), manteniendo el mismo porcentaje máximo de sustitución.

En el caso de Chile, la norma NCh 163-2024 [105] establece los requisitos generales de los agregados para morteros y hormigones, en la que se incluye a los AGR. Al igual que la norma brasilera, establece un límite a la calidad del AGR fijando una absorción máxima del 7%, pero se diferencia de las normas antes mencionadas [99,102] en que el contenido máximo admitido de AGR es del 10 %. Asimismo, este país ha aprobado recientemente dos normas exclusivas sobre agregados reciclados, una de ellas sobre clasificación y requisitos de AR de hormigón endurecido y materiales de construcción sin clasificar [106], y otra sobre trazabilidad

y requisitos de los AR para bases y subbases de pavimentos [107].

Se puede considerar que Argentina fue precursora en Latinoamérica en considerar el empleo de AR en hormigones estructurales. Por un lado, la Norma IRAM 1531-2016 [17] de agregado grueso para hormigón incorpora la evaluación de un agregado grueso mixto que incluye hasta el 20 % de AGR proveniente de restos de hormigón, es decir, un agregado grueso constituido por un mínimo de 80 % de AN y un máximo de 20 % de AR. Esta limitación en el contenido de AGR estaba en línea con lo indicado en algunas normas y recomendaciones internacionales (por ej., la EHE-08, 2011 [108]) al momento de su incorporación. Actualmente se trabaja en la modificación de esta norma, que propone incrementar el límite máximo de empleo del AGR hasta el 30 %. Por otro lado, la versión actual de la Norma IRAM 1512 de agregado fino para hormigón incorpora la posibilidad de uso del AFR. En ella, el contenido máximo de AFR está indicado en 30 % del total del agregado fino, tomándose como base para ello el contenido máximo de arenas de trituración establecido en la propia norma [18]. Ambas normas establecen las propiedades que deben reunir los AR, de manera individual o el conjunto granular conteniendo a los mismos, informando sobre los porcentajes máximos de empleo. En cuanto a las limitaciones de uso, se fija una clase resistente máxima del hormigón de 30 MPa, con exposición en ambientes con agresividad nula, baja y moderada, según el Reglamento CIRSOC 200-2024 [21].

Desde el punto de vista reglamentario, el uso de AR en Argentina también ha sido incorporado en el nuevo Reglamento CIRSOC 200-2024 [21]. En línea con lo estipulado en las mencionadas normas IRAM, este nuevo reglamento fija los valores máximos permitidos de uso de los AR, para ambas fracciones, la clase resistente máxima del hormigón y los ambientes de exposición. Cabe mencionar que el anterior reglamento de estructuras de hormigón, CIRSOC 201-2005 [109], vigente aún en muchas provincias, no contempla el uso de AR. Si bien el nuevo reglamento admite el empleo de ambas fracciones, restringe el empleo conjunto de las mismas: es una u otra.

La razón de esta particular especificación radica en el hecho que prácticamente no se tiene experiencia local en el uso conjunto de ambas fracciones (AGR y AFR), sumado a que la información dada en la literatura internacional muestra disparidad en los efectos del uso conjunto de ambas fracciones sobre las propiedades del hormigón [6,110-112].

7. Consideraciones finales

El impacto sobre el medioambiente generado por la industria de la construcción, así como la contribución a su remediación a partir de la implementación de prácticas sostenibles, son hechos contrastados y probados. Entre los RCD, los residuos de hormigón han mostrado una gran competitividad para su empleo en la producción de nuevos hormigones, como sustituto de los agregados naturales. Diversos estudios de investigación dan cuenta de estas aptitudes, al punto que se han aceptado reemplazos máximos de hasta un 30 % en hormigones de nivel estructural, sin que ello afecte de manera considerable sus propiedades, tanto en el aspecto mecánico como durable.

En este contexto, y considerando que el empleo de las fracciones gruesas y finas del agregado reciclado dispone de un marco normativo más consolidado, el polvo reciclado (PR) emerge como una alternativa de creciente interés para la descarbonización de la industria. Su potencial como material cementicio suplementario, respaldado por avances recientes en tratamientos de activación y por su incorporación en la normativa europea, abre el camino hacia una economía circular más integral, en la que la totalidad del residuo de hormigón pueda reincorporarse al ciclo productivo.

A pesar de los conocimientos alcanzados a nivel internacional sobre las características de los agregados reciclados (AR), su implementación no se ha generalizado en Latinoamérica. Países como Colombia, Chile, Brasil y Argentina disponen de normas para su evaluación, y en algún caso reglamentos que regulan su aplicación en hormigones estructurales, aunque con porcentajes de

sustitución por debajo de los valores promedio a nivel global. En este sentido, destaca Argentina por considerar porcentajes más cercanos a los valores globales. Como contrapartida, los restantes tres países disponen de clasificaciones definidas en función de la composición del AR.

Con miras a fomentar el empleo de los AR sin detrimento de las propiedades de los nuevos hormigones, y con ello la sostenibilidad de la industria de la construcción, sería necesaria la implementación de sistemas de trazabilidad del AR, contemplando aspectos como procedencia (obra, estructura), datos del hormigón de origen, presencia de contaminantes, distancias de transporte, etc. A partir de ello se podría considerar la implementación de fichas técnicas del AR que definan su calidad y posibles usos en función de determinadas propiedades o características.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (AGENCIA I+D+i), a través de los proyectos PICT-2021-00087 y PICT-2021-00069 del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCyT). También agradecen al LEMIT y al INTI.

Contribución de autoría

C.J. Zega: conceptualización, investigación, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición, visualización.

B.E. Manrique: investigación, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición, visualización.

M.E. Sosa: investigación, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición, visualización.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

Referencias

- [1] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. y Behrens III, W. W. (1972). *The limits to growth* (1ra ed.). Universe Books. <https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>
- [2] The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Global Warming of 1.5°C*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf
- [3] Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- [4] The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *AR6 Synthesis report: Climate change 2023*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- [5] UNEP. (2023). *Building materials and the climate: Constructing a new future*. Nairobi. United Nations Environment Program.
- [6] Younes, A., Elbeltagi, E., Diab, A., Tarsi, G., Saeed, F. y Sangiorgi, C. (2024). Incorporating coarse and fine recycled aggregates into concrete mixes: mechanical characterization and environmental impact. *Journal of Materials Cycles and Waste Management*, 26, 654–668. <https://doi.org/gvvdzt>
- [7] Global Cement and Concrete Association. (2021). *Getting to Net Zero*. <https://gccassociation.org/concretetofuture/getting-to-net-zero/>
- [8] Hansen, T. C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and Structures*, 19, 201–246. <https://doi.org/dgsp7c>
- [9] Limbachiya, M. C., Leelawat, T. y Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33(9), 574–580. <https://doi.org/cbq849>
- [10] Gómez, J. M., Agulló, L. y Vázquez, E. (2001). Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto. *Construcción y Tecnología*, 34(5), 799–806.
- [11] Padmini, A. K., Ramamurthy, K. y Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 829–836. <https://doi.org/cs9p23>
- [12] Tabsh, S. W. y Abdelfatah A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1163–1167. <https://doi.org/bkmzfs>
- [13] Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J. y Sulieman, M. Z. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565–573. <https://doi.org/cxjvkm>
- [14] American Concrete Institute. (2001). *Removal and reuse of hardened concrete* (ACI 555R-01).
- [15] Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires. (2019). *Pliego Único de Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección de Vialidad de la Prov. de Buenos Aires*. <https://www.vialidad.gba.gob.ar/datos/licitaciones/Pliego%20C3%9Anico%20de%20Especificaciones%20T%C3%A9cnicas%202019.pdf>
- [16] American Society for Testing and Materials. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates* (C33/C33M).
- [17] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2016). *Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo* (IRAM 1531).
- [18] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2024). *Agregado fino para mortero y hormigón de cemento. Requisitos* (IRAM 1512).
- [19] American Concrete Institute (2019). *Guideline development for use of recycled concrete aggregates in new concrete* (CRC 18.517).
- [20] Gobierno de España - Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). *Código Estructural*.
- [21] INTI-CIRSOC. (2024). *CIRSOC 200-2024: Reglamento Argentino de Tecnología del Hormigón*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

- [22] Pacheco, J. N., de Brito, J. y Lamperti Tornaghi, M. (2023). *Use of recycled aggregates in concrete. Opportunities for upscaling in Europe (JRC131294)*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/rfss>
- [23] Kaptan, K., Cunha, S. y Aguiar, J. (2024). A review of the utilization of recycled powder from concrete waste as a cement partial replacement in cement-based materials: fundamental properties and activation methods. *Applied Sciences*, 14(21), Artículo 9775. <https://doi.org/rfst>
- [24] Yang, Y., Chen, B., Su, Y., Chen, Q., Li, Z., Guo, W. y Wang, H. (2020). Concrete mix design for completely recycled fine aggregate by modified packing density method. *Materials*, 13(16), Artículo 3535. <https://doi.org/gpwc58>
- [25] Hou, Y., Yu, Z., Zhang, J., Yang, H. y Song, W. (2023). Gray model study of strength and pore structure of recycled concrete powder (RCP) concrete based on low-field NMR technology. *Materials*, 16(17), Artículo 6058. <https://doi.org/rfsz>
- [26] Sui, Y., Ou, C., Liu, S., Zhang, J. y Tian, Q. (2020). Study on properties of waste concrete powder by thermal treatment and application in mortar. *Applied Sciences*, 10(3), Artículo 998. <https://doi.org/10.3390/app10030998>
- [27] Pasquier, L. C., Kemache, N., Mocellin, J., Blais, J. F. y Mercier, G. (2018). Waste concrete valorization: aggregates and mineral carbonation feedstock production. *Geosciences*, 8(9), Artículo 342. <https://doi.org/rfs2>
- [28] Wan, X., Li, H., Che, X., Xu, P., Li, C. y Yu, Q. (2023). A study on the application of recycled concrete powder in an alkali-activated cementitious system. *Processes*, 11(1), Artículo 203. <https://doi.org/rfs3>
- [29] Chen, X., Li, Y., Bai, H. y Ma, L. (2021). Utilization of recycled concrete powder in cement composite: strength, microstructure and hydration characteristics. *Journal of Renewable Materials*, 9(12), 2190–2209. <https://doi.org/rfs4>
- [30] UNE-EN 197-6:2023. *Cemento. Parte 6: Cemento con materiales de construcción reciclados*. Asociación Española de Normalización. 28004 Madrid, España.
- [31] UNE-EN 206:2013+A2:2021. *Hormigón. Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad*. Asociación Española de Normalización. 28004 Madrid, España.
- [32] UNE-EN 12620:2003+A1:2009. *Áridos para hormigón*. Asociación Española de Normalización. 28004 Madrid, España.
- [33] Sánchez de Juan, M. y Alaejos Gutierrez, P. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23, 872–877. <https://doi.org/d66rjf>
- [34] Locati, F., Zega, C., Coelho dos Santos, G., Marfil, S. y Falcone, D. (2021). Petrographic method to semi-quantify the content of particles with reactive components and residual mortar in ASR-affected fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 119, Artículo 104003. <https://doi.org/rfs5>
- [35] Mefteh, H., Kebaïli, O., Oucief, H., Berredjem, L. y Arabi, N. (2013). Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 54, 282–288. <https://doi.org/f46qrn>
- [36] Liu, C., Wang, Y., Gao, X., Zhang, G., Liu, H., Ma, C., Sun, J. y Lai, J. (2022). Review of the strengthening methods and mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC). *Crystals*, 12, Artículo 1321. <https://doi.org/rfs6>
- [37] Han, S., Zhao, S., Lu, D. y Wang, D. (2023). Performance improvement of recycled concrete aggregates and their potential applications in infrastructure: A review. *Buildings*, 13(6), Artículo 1411. <https://doi.org/rfs7>
- [38] Abbas, A., Fathifazl, G., Burkan Isgor, O., Razaqpur, A. G., Fournier, B. y Foo, S. (2007). Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of ASTM International*, 5(1), 1–12. <https://doi.org/czph3c>
- [39] Tam, V. W. Y., Tam, C. M. y Le, K. N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 82–101. <https://doi.org/c94jyb>
- [40] Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., Zhang, M. H. y Tam, C. T. (2013). Acid treatment technique for determining the mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of Testing and*

- Evaluation*, 41(3), 441–450, <https://doi.org/rfs8>
- [41] Jiménez, C., Aponte, D., Vázquez, E., Barra, M. y Valls, S. (2013). Equivalent mortar volumen (EMV) method for proportioning recycled aggregate concrete: validation under the Spanish context and its adaptation to Bolomey methodology for concrete proportioning, *Materiales de Construcción*, 63(311), 341–360, <https://doi.org/g7v7md>
- [42] Braymand, S., Roux, S., Fares, H., Déodonne, K. y Feugeas, F. (2017). Separation and quantification of attached mortar in recycled concrete aggregates. *Waste Biomass Valor*, 8, 1393–1407. <https://doi.org/gbr2qs>
- [43] Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y. y Guo, J. (2017). An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 432–441. <https://doi.org/ghdf33>
- [44] Saravanakumar, P., Abhiram, K. y Manoj, B. (2016). Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*, 111, 611–617. <https://doi.org/rfs9>
- [45] Ismail, S. y Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44, 464–476. <https://doi.org/gpmnvs>
- [46] Gupta, P.K., Rajhans, P., Panda, S.K., Nayak, S. y Das, S. K. (2019). Mix design method for self-compacting recycled aggregate concrete and its microstructural investigation by considering adhered mortar in aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(3). <https://doi.org/gpgsvt>
- [47] Tang, W., Khavarian, M., Yousefi, A., Landenberger, B. y Cui, H. (2023). Influence of Mechanical Screened Recycled Coarse Aggregates on Properties of Self-Compacting Concrete. *Materials*, 16, Artículo 1483. <https://doi.org/rftb>
- [48] Naveen Kumar, N., Parthiban, K., Murali, G. y Saravana Raja, M. K. (2018). Strength properties of recycled aggregate concrete treated with low concentration acetic acid. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(3.12), 403–406. <https://doi.org/rftc>
- [49] Jaskulski, R., Kubissa, W. y Yakymchko, Y. (2023). Influence of citric acid-assisted impregnation of recycled aggregate on the properties of the resultant concrete. *Materials*, 16, Artículo 2986. <https://doi.org/rftd>
- [50] Mistri, A., Bhattacharyya, S. K., Dhami, N., Mukherjee, A. y Barai, S. V. (2020). A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. *Construction and Building Materials*, 233, Artículo 117894. <https://doi.org/rftf>
- [51] Tam, V. W. Y., Gao, X. F. y Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35, 1195–1203. <https://doi.org/d5vp95>
- [52] Tam, V. W. Y. y Tam, C. M. (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMa) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. *Construction and Building Materials*, 22, 2068–2077. <https://doi.org/bq3p5g>
- [53] Verma, A., Sarath Babu, V. y Arunachalam, S. (2020). Influence of mixing approaches on strength and durability properties of treated recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 22(1), E121–E142. <https://doi.org/gqbj6v>
- [54] Bui, N. K., Satomi, T. y Takahashi, H. (2018). Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 163, 496–507. <https://doi.org/gfpjmm>
- [55] Zhihui, Z., Shoude, W., Lingchao, L., Chenchen, G. (2013). Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar. *Construction and Building Materials*, 43, 191–196. <https://doi.org/rftj>
- [56] Qiu, J., Qin Sheng Tng, D. y Yang, E. H. (2014). Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation. *Construction and Building Materials*, 57, 144–150. <https://doi.org/qt8fjp>
- [57] Zhang, R., Wu, K., Xie, D. y Wang, J. (2023). Using sodium alginate aided bio-treatment for improving the uniformity of precipitates on recycled aggregates. *Applied Microbiology Biotechnology*, 107, 1525–1536. <https://doi.org/rftk>

- [58] Zhan, B., Poon, C. S., Liu, Q., Kou, S. y Shi, C. (2014). Experimental study on CO² curing for enhancement of recycled aggregate properties. *Construction and Building Materials*, 67, 3–7. <https://doi.org/gnvqp6>
- [59] Zhan, B. J., Xuan, D. X. y Poon, C. S. (2018). Enhancement of recycled aggregate properties by accelerated CO² curing coupled with limewater soaking process. *Cement and Concrete Composites*, 89, 230–237. <https://doi.org/ghdf8n>
- [60] Zhang, W., Zheng, Q., Ashour, A. y Han, B. (2020). Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review. *Composites Part B: Engineering*, 189, Artículo 107892. <https://doi.org/gg9x3w>
- [61] Rupp, S., Cerutti, C., Baqué, A., Gonzalez, D., Guillarducci, A., Ferreras, M. E., y Puga, R. E. (2024). Estudio de hormigones con incorporación de solución urea-bacterias. *Revista Hormigón*, 66, 18–28. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/u7eehd7pd>
- [62] Šavija, B. y Luković, M. (2016). Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. *Construction and Building Materials*, 117, 285–301. <https://doi.org/ghdfzz>
- [63] Rao, N. V. y Meena, T. (2017). A review on carbonation study in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3), Artículo 032011. <https://doi.org/rftm>
- [64] Monkman, S. y MacDonald, M. (2017). On carbon dioxide utilization as a means to improve the sustainability of ready-mixed concrete. *Journal of Cleaner Production*, 167, 365–375. <https://doi.org/gcgzq9>
- [65] Wang, J., Fan, Y., Che, Z., Zhang, K. y Niu, D. (2023). Study on the durability of eco-friendly recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials: The combined action of compound salt solution of MgSO₄, Na₂SO₄, and NaCl and dry-wet cycles. *Construction and Building Materials*, 377, Artículo 131149. <https://doi.org/rftn>
- [66] Matar, P. y Barhoun, J. (2020). Effects of waterproofing admixture on the compressive strength and permeability of recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, Artículo 101521. <https://doi.org/gnmd7v>
- [67] Rocha, J. H. A., Tinoco, M. P. y Toledo Filho, R. D. (2023). The effect of recycled concrete powder (RCP) from precast concrete plant on fresh and mechanical properties of cementitious pastes. *Materiales de Construcción*, 73(352), Artículo e325. <https://doi.org/rftp>
- [68] Laurente, R. D., Zega, C. J., Villagrán Zaccardi, Y. A. (2016). Agregado fino reciclado molido como fino para la elaboración de hormigones autocompactantes. En: *VIII Congreso Internacional - 21ª Reunión Técnica de la AATH "Ing. Nélida del Valle Castría"*, Salta, Argentina, pp. 1-8.
- [69] Lotfi, S. y Rem, P. (2016). Recycling of End of Life concrete fines into hardened cement and clean sand. *Journal of Environmental Protection*, 7, 934–950. <https://doi.org/rftq>
- [70] Moreno-Juez, J., Vegas, I. J., Gebremariam, A. T., García-Cortés, V. y Di Maio, F. (2020). Treatment of end-of-life concrete in an innovative heating-air classification system for circular cement-based products. *Journal of Cleaner Production*, 263, Artículo 121515. <https://doi.org/gwkkr7>
- [71] Silva, A., Nogueira, R., Bogas, A., Wawrzyńczak, D., Sciubidło, A. y Majchrzak-Kucęba, I. (2022). Parametric study towards optimization of a short duration carbonation process of recycled cement paste. *Materials*, 15(19), Artículo 6513. <https://doi.org/g62bkb>
- [72] Ma, X., Li, H., Wang, D., Li, C. y Wei, Y. (2022). Simulation and experimental substantiation of the thermal properties of non-autoclaved aerated concrete with recycled concrete powder. *Materials*, 15(23), Artículo 8341. <https://doi.org/gstkts>
- [73] Zhang, D., Hao, W. y Yang, Q. (2023). Experimental study on the application of recycled concrete waste powder in alkali-activated foamed concrete. *Materials*, 16(17), Artículo 5728. <https://doi.org/rfwk>
- [74] Topič, J. y Prošek, Z. (2017). Hydration process and mechanical properties of cement paste with recycled concrete powder and silica sand powder. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 13, 125–129. <https://doi.org/rfwfm>

- [75] Salahuddin, H., Qureshi, L. A., Nawaz, A., Abid, M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Aslam, F., Khan, S. F. y Tufail, R. F. (2020). Elevated temperature performance of reactive powder concrete containing recycled fine aggregates. *Materials*, 13(17), Artículo 3748. <https://doi.org/rfwn>
- [76] Kulisch, D., Katz, A. y Zhutovsky, S. (2023). Quantification of residual unhydrated cement content in cement pastes as a potential for recovery. *Sustainability*, 15(1), Artículo 263. <https://doi.org/gzv2rk>
- [77] Topič, J. y Prošek, Z. (2017). Properties and microstructure of cement paste including recycled concrete powder. *Acta Polytechnica*, 57(1), 49–57. <https://doi.org/rfwp>
- [78] Li, S., Li, Q., Zhao, X., Luo, J., Gao, S., Yue, G. y Su, D. (2019). Experimental study on the preparation of recycled admixtures by using construction and demolition waste. *Materials*, 12(10), Artículo 1678. <https://doi.org/rfwq>
- [79] Bergmans, J., Kazemi Kamyab, H., Ghosh, D., Van Mierloo, P., Carens, H. y Nielsen, P. (2024). Carbonation of recycled concrete aggregates for new concrete and concrete fines to make cement-free hollow blocks. *Sustainability*, 16(8), Artículo 3494. <https://doi.org/rfwr>
- [80] Kim, Y. J. y Choi, Y. W. (2012). Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. *Construction and Building Materials*, 30, 500–504. <https://doi.org/fx9778>
- [81] Zhang, S., Lyu, H., Shen, P., Zhu, L. y Poon, C. S. (2023). Development of green cement from solid wastes. *HKIE Transactions*, 30(4), 22–32. <https://doi.org/rfws>
- [82] Irshidat, M. R., y Kailani, H. Y. (2025). Sustainable utilization of recycled concrete powder as sand replacement in cement mortar production: impact of sand-cement ratio. *Civil Engineering Journal*, 11(8), 3375–3394. <https://doi.org/rfwt>
- [83] Jiang, Y., Li, B., Liu, S., He, J. y García Hernández, A. (2022). Role of recycled concrete powder as sand replacement in the properties of cement mortar. *Journal of Cleaner Production*, 371, Artículo 133424. <https://doi.org/gv5vnk>
- [84] Di Maio, A. A., Giaccio, G. y Zerbino, R. (2002). Hormigones con agregados reciclados. *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, 9, 5–10.
- [85] Di Maio, A. A., Zega, C. J. y Traversa L.P. (2005). Estimation of compressive strength of recycled concretes with the ultrasonic method. *Journal of ASTM International*, 2(5), 1–8. <https://doi.org/cp3q28>
- [86] Zega, C. J. y Di Maio, A. A. (2007). Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón. *Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME)*, 45(2), 1–11.
- [87] Zega, C. J., Taus, V. L. y Di Maio, A. A. (2006). Effect of Entrained Air on Recycled Concrete Properties. *Journal of ASTM International*, 3(10), Artículo JAI100289. <https://doi.org/c8dnsn>
- [88] Santillán, L. R. (2020). *Durabilidad de hormigones reciclados frente al ataque por sulfatos*. [Disertación Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio de la UNLP. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/189567>
- [89] Di Maio, A. A., Zega, C. J., Taus, V. L. y Traversa, L. P. (2004). Durability of recycled concretes. En *Proceedings National Conference In Situ Behaviour of Constructions*, Bucharest, Romania, pp. 31–37.
- [90] Villagrán-Zaccardi, Y. A., Zega, C. J. y Di Maio, A. A. (2008). Chloride Penetration and Binding in Recycled Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(6), 449–455. <https://doi.org/fsw5g3>
- [91] Limbachiya, M., Meddah, M. S. y Ouchagour, S. (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*, 27, 439–449. <https://doi.org/fhn7tz>
- [92] Zega, C. J., Villagrán-Zaccardi, Y. A. y Di Maio, A. A. (2010). Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures*, 43, 195–202. <https://doi.org/fvp4m7>
- [93] Li, H., Zhang, L., Liu, J., Chu, F. y Tian, Y. (2023). Study on the Characteristics of Composite Recycled Aggregate Concrete Based on Box–Behnken Design Response Surface Model. *Fractal and Fractional*, 7, 648. <https://doi.org/rfww>
- [94] Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, A. y Duan, Z. (2018). Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder

- produced from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, 188, 720–731. <https://doi.org/gdkgm8>
- [95] Dong, Y., Ma, Y., Peng, N. y Qiu, J. (2022). Study on $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ erosion resistance and mechanism of recycled concrete containing municipal solid waste incineration (MSWI) powder. *Materials*, 15(15), Artículo 5352. <https://doi.org/rfww>
- [96] Ma, Z., Li, W., Wu, H. y Cao, C. (2019). Chloride permeability of concrete mixed with activity recycled powder obtained from C&D waste. *Construction and Building Materials*, 199, 652–663. <https://doi.org/gt76tm>
- [97] Chen, L., Zhao, G. y Li, Y. (2025). Research on the influence of recycled fine powder on chloride ion erosion of concrete in different chloride salt environments. *Materials*, 18(9), Artículo 2018. <https://doi.org/rfwx>
- [98] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). *Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto (NTC 174)*.
- [99] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021). *Agregados gruesos reciclados para uso en el concreto hidráulico (NTC 6421)*.
- [100] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021). *Ensayo de clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados (NTC 6422)*.
- [101] Ulloa, V. (2024). Uso de agregados reciclados en concreto: qué es permitido y qué no. Seminario Procemco Ciclo de conferencias virtuales, Agregados Reciclados: Verdades y mitos. <https://www.youtube.com/watch?v=BxZkW5abCng>
- [102] Asociación Brasileña de Normas Técnicas. (2021). *Agregados reciclados para uso em argamasas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios (NBR 15116)*.
- [103] Asociación Brasileña de Normas Técnicas. (2022). *Agregados para concreto — Especificação (NBR 7211)*.
- [104] Grabiec, A. M., Kim, J., Ubysz, A. y Bilbao, P. (2021). Some remarks towards a better understanding of the use of concrete recycled aggregate: a review. *Sustainability*, 13, Artículo 13336. <https://doi.org/gv5gs6>
- [105] Instituto Nacional de Normalización. (2024). *Áridos para morteros y hormigones – Requisitos (NCh 163)*. Chile.
- [106] Instituto Nacional de Normalización. (2024). *Áridos - Áridos reciclados en base a residuos de construcción y demolición (RCD) inertes no peligrosos - Clasificación, caracterización y directrices para la trazabilidad y valorización de RCD inerte no peligroso (NCh3849)*. Chile.
- [107] Instituto Nacional de Normalización. (2025). *Pavimentos - Áridos reciclados en base a residuos de construcción y demolición (RCD) inertes no peligrosos - Trazabilidad y requisitos para incorporar en bases y subbases de pavimentos (NCh3848)*. Chile.
- [108] Gobierno de España - Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2011). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*.
- [109] INTI-CIRSOC. (2005). *CIRSOC 201-2005: Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial*
- [110] Señas, L., Priano, C. y Marfil, S. (2016). Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes. *Construction and Building Materials*, 113, 498–505. <https://doi.org/rfwz>
- [111] Tang, Y., Xiao, J., Zhang, H., Duan, Z. y Xia, B. (2022). Mechanical properties and uniaxial compressive stress-strain behavior of fully recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 323, Artículo 126546. <https://doi.org/gphx38>
- [112] Vintimilla, C. y Etxeberria, M. (2023). Limiting the maximum fine and coarse recycled aggregates - Type A used in structural concrete. *Construction and Building Materials*, 380, Artículo 131273. <https://doi.org/rfw2>

Comparación de métodos para cuantificar la captación de CO₂ en revestimientos a base de cal

L. Aristarán^{a*}, A. Mocciaro^b, C. Paulo^a y A. Tironi^a

^aFacultad de Ingeniería, Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN, CONICET-CICPBA-UNCPBA), CP B7400, Olavarría, Argentina. luisina.aristaran@fio.unicen.edu.ar, cpaulo@fio.unicen.edu.ar, atironi@fio.unicen.edu.ar

^bCentro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica (CETMIC, CONICET-CICPBA-UNLP), CP B1897, Manuel B. Gonnert, Argentina. anamocciaro@cetmic.unlp.edu.ar

Recibido: 19 de mayo de 2026

Aceptado: 14 de julio de 2026

RESUMEN

La mitigación de las emisiones antropogénicas de CO₂, es una problemática en la cual los países en todo el mundo están haciendo foco. Una de las acciones a tomar es utilizar materiales que además de tener una menor emisión asociada de CO₂, favorezcan la captación del CO₂ ambiental. Hasta el momento no existe una metodología que sea mundialmente adoptada y estandarizada para cuantificar la captura de CO₂. Por este motivo, resulta necesario establecer un procedimiento de medición para cuantificar la captación de CO₂ ambiental en materiales de construcción. El objetivo de este trabajo es comparar 3 métodos para la medición de la captación de CO₂ en revestimientos a base de cal, tomando como referencia pastas elaboradas con cal hidráulica y arcilla calcinada. De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda el uso de los métodos DRX-Rietveld y ATD-TG, y no se recomienda la utilización del método de pérdida por calcinación en mufla debido a la sobreestimación de los resultados.

PALABRAS CLAVE: Captación de CO₂, cal hidráulica, ATD-TG, DRX-Rietveld, pérdida por calcinación

ABSTRACT

Reducing anthropogenic CO₂ emissions is an issue that countries around the world are focusing on. One of the actions to be taken is to use materials that will help to capture CO₂ from the atmosphere, as well as having lower associated CO₂ emissions. Thus far, there has not been recognized yet a globally adopted and standardized methodology for quantifying CO₂ capture. Consequently, it is imperative to establish a reliable measurement and calculation procedure to quantify the uptake of atmospheric CO₂ by building materials. The aim of this study is to compare three methods for measuring CO₂ uptake in lime-based coatings, using mixtures made from hydraulic lime and calcined clay as a reference. According to the findings, the utilization of DRX-Rietveld and ATD-TG methods is advised, while the application of loss on ignition method is not recommended due to its tendency to overestimate results.

KEYWORDS: CO₂ capture, hydraulic lime, DTA-TG, XRD-Rietveld, loss on ignition

*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Aristarán, L., Mocciaro, A., Paulo, C., y Tironi, A. (2026). Comparación de métodos para cuantificar la captación de CO₂ en revestimientos a base de cal. *Revista Hormigón*, 70, 26–42. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/vbxw1hk5r>

1. Introducción

La problemática del cambio climático debido al aumento de las emisiones antropogénicas de los gases de efecto invernadero (GEIs) a lo largo de años conlleva a los países a poner foco en cuantificar, minimizar y mitigar dichas emisiones. El dióxido de carbono (CO_2) es el principal GEI antropogénico que afecta el equilibrio radiativo de la tierra. Las emisiones de este gas generalmente provienen de los procesos de combustión de combustibles fósiles o biomasa, uso de la tierra y procesos industriales. Siendo el más relevante, el CO_2 es el gas de referencia con respecto al cual se miden otros GEI y, por lo tanto, tiene un potencial de calentamiento global (GWP) de 1 [1]. La República Argentina, se comprometió a una meta no condicionada, aplicable a todos los sectores de la economía, de no exceder las 349 Mt CO_2e en el año 2030 [2]. Las principales fuentes de emisiones son energía (51%), agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (39%), procesos industriales (6%) y residuos (4%). En el sector de procesos industriales, las emisiones GEIs son generadas como resultado de la reacción entre materias primas empleadas en diferentes procesos. Según el inventario nacional de GEIs 2024, este valor es de 24 Mt CO_2e , correspondiendo el 25% a producción de cemento y el 10% a la producción de cal [3].

Numerosos trabajos se focalizan en el uso de materiales cementicios alternativos, sustituir en forma parcial el cemento portland y la cal en la formulación de materiales de construcción como una forma de disminuir las emisiones de CO_2 [4–8]. Por otro lado, debe considerarse también la posibilidad de captación de CO_2 ambiental debido a la recarbonatación de estos materiales en obra [9,10]. Resulta necesario entonces establecer un procedimiento de medición que permita cuantificar la captación de CO_2 ambiental en materiales de construcción, especialmente en revestimientos debido a su gran área superficial en contacto con el aire.

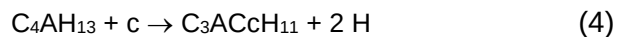
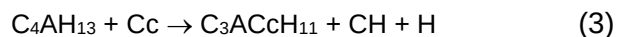
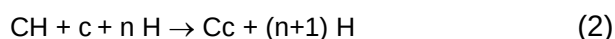
El método más utilizado para cuantificar la captación de CO_2 es el análisis térmico diferencial y termo-gravimétrico (ATD-TG), tanto en pastas de cal como de cemento. En estos trabajos se informa la captación de CO_2 a partir de la cantidad de fases carbonatadas formadas, pero no el valor de CO_2 captado [11–14]. Otra metodología muy utilizada es el seguimiento del avance de la profundidad de carbonatación mediante indicador de fenolftaleína [15–17].

En este trabajo se selecciona como referencia revestimientos a base de cal hidráulica y arcilla caolinítica calcinada, para comparar las ventajas y desventajas de diferentes métodos de medición y cuantificación de CO_2 captado. Los revestimientos a base de cal y arcillas calcinadas son utilizados actualmente en la restauración y protección de edificios históricos por su alta compatibilidad con los materiales de la época [18–22]. Por otro lado, también se aplican en edificios modernos debido a las propiedades de respirabilidad y flexibilidad, medidas a partir del aumento del transporte del vapor de agua a través del revestimiento en el primer caso, y por la disminución de formación de grietas en el segundo [12].

La producción de cal hidráulica comienza con la calcinación de la piedra caliza junto con minerales arcillosos en menor proporción [23]. Luego, la cal viva (CaO) se hidrata para obtener portlandita (CH : $\text{Ca}(\text{OH})_2$) y se procede a la molienda. Durante el proceso de calcinación ocurre la descarbonatación de la calcita (Cc : CaCO_3), principal mineral constituyente de la caliza, se produce óxido de calcio (C : CaO), silicato di cálcico (C_2S : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), junto con aluminatos y ferroaluminatos de calcio como componentes minoritarios. Además, se emiten el 70% de las emisiones de CO_2 asociadas a la producción, el resto de las emisiones corresponden al consumo energético de combustible y a la molienda [24].

Las arcillas calcinadas son materiales silicoaluminosos que actúan como puzolanas al combinarse con CH a temperatura ambiente y en presencia de agua dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos [25]. Se obtienen a partir de la activación térmica de las arcillas y la temperatura depende del mineral arcilloso presente [26]. La deshidroxilación y formación de fase amorfa reactiva para la arcilla caolinítica ocurre a temperaturas inferiores (500 – 800 °C) a la de calcinación de la calcita (1000 – 1250 °C), lo que implica un menor consumo de energía. Además, no se libera CO₂ durante el proceso de activación térmica, sino que se libera H₂O debido a la deshidroxilación.

El reemplazo parcial de cal hidráulica por arcillas caoliníticas calcinadas disminuye la emisión de CO₂ y mejora sus propiedades mecánicas [27–29]. Por otro lado, el uso de cal hidráulica como materia prima en revestimientos favorece la captura de CO₂ ambiental, al reaccionar el CH con el CO₂ bajo la acción del agua (H: H₂O), produciendo Cc (reacción de carbonatación). Esta competencia por el uso de portlandita como reactivo en la reacción puzolánica (Ecuación 1), para arcilla caolinítica calcinada: AS₂) [6,25] y en la reacción de carbonatación (Ecuación 2) [14], hace que la incorporación de arcillas caoliníticas calcinadas como reemplazo de la cal hidráulica modifique la velocidad y capacidad de captación de CO₂. Durante la reacción puzolánica cuando se utiliza arcilla caolinítica calcinada se obtienen como productos de reacción gel de tobermorita (C-S-H), que podría contener aluminio (C-(A)-S-H), y fases aluminicas hidratadas que reaccionan con Cc presente en MP-CalH o con el CO₂ ambiental (c: CO₂), formando monocarboaluminato cálcico hidratado (MC: C₃ACcH₁₁) (Ecuación 3 y 4) [30].



El objetivo de este trabajo es comparar 3 métodos para la medición de la captación de CO₂ en revestimientos a base de cal, tomando como referencia pastas elaboradas con cal hidráulica y arcilla calcinada, analizando cómo se modifica la captación de CO₂ en las pastas de cal cuando se agrega arcilla caolinítica calcinada en diferentes porcentajes y en distintos períodos de carbonatación. Se compararán los resultados obtenidos por los 3 métodos de cuantificación y se seleccionará el más eficiente y representativo. Los métodos de cuantificación estudiados fueron: un método indirecto (1), donde se determinó la captación de CO₂ considerando la cantidad de calcita formada y estimada mediante el método Rietveld con patrón interno a partir de medidas de difracción de rayos X; y dos métodos directos donde se calculó la cantidad de CO₂ captado a partir de la pérdida de masa de calcita. Para el método (2) se utilizó un equipo de análisis térmico diferencial y termogravimétrico (ATD-TG), mientras que para el método (3), pérdida por calcinación, la determinación se realizó utilizando una mufla y balanza analítica.

2. Materiales y métodos

Como materias primas para la elaboración de pastas se utilizó cal hidráulica (MP-CalH), proveniente de una industria local, y arcilla caolinítica calcinada (MP-KC). Las fases mineralógicas presentes en los materiales se identificaron mediante difracción de rayos X (DRX) en un equipo Rigaku D-Max III-C con radiación CuKα (λ = 0,154 nm), monocromador de grafito operando a 35 kV y 15 mA, en un rango de escaneo de 10° a 40° 2θ (Figura 1). La composición química de los materiales obtenida por fluorescencia de rayos X (FRX) en un equipo Zetium Malvern Panalytical y la pérdida de masa por calcinación (PxC), se muestran en la Tabla 1.

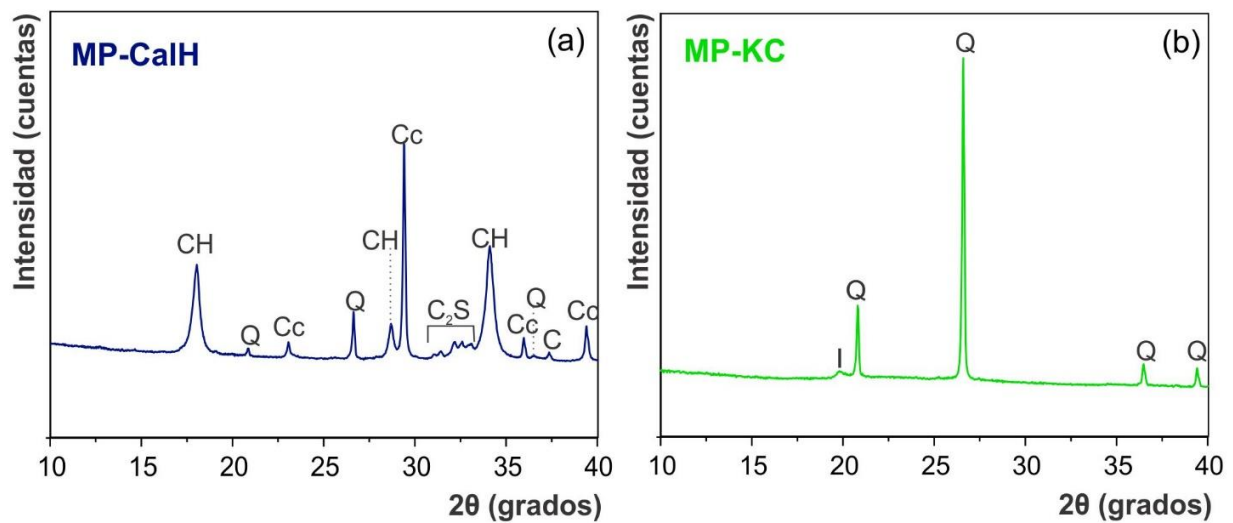


Figura 1. Difractogramas de las materias primas: (a) cal hidráulica (MP-CalH) y (b) arcilla caolínica calcinada (MP-KC). CH: portlandita; Q: cuarzo; Cc: calcita; C₂S: silicato di cálcico; CaO: óxido de calcio; I: illita.

Tabla 1. Composición química de las materias primas en porcentaje en masa y pérdida de masa por calcinación (PxC).

Muestras	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	TiO ₂	PxC
MP-CalH	59,86	11,69	0,74	1,56	2,11	0,39	0,40	1,08	-	22,17
MP-KC	0,30	71,70	1,00	23,90	0,30	0,70	-	0,10	0,50	0,00

Se elaboraron por duplicado pastas de cal hidráulica y arcilla caolínica calcinada, variando el porcentaje de reemplazo de 0 a 50% en peso (CalH, 10KC, 20KC, 30KC, 40KC, 50KC) y una relación en peso constante de 0,62 agua/aglomerante, valor que asegura la fluidez para el mortero de cal hidráulica de referencia, según norma IRAM 1695 [31]. Se realizó la mezcla en forma manual y se moldearon 6 probetas cilíndricas por cada formulación de 28 mm de diámetro y 10 mm de alto. Las probetas fueron aisladas en la base y superficie lateral de manera tal que la carbonatación se produjo en una sola dirección. Las probetas fueron almacenadas sin cubrir por 28 días en cámara húmeda (20 °C y 80% humedad). Luego de ese período se frenó la hidratación de la mitad de las probetas con isopropanol (28d), exponiendo las restantes a carbonatación natural en ambiente rural protegido de la lluvia durante

1 mes. Finalizado este período, se detuvo la hidratación de las probetas utilizando isopropanol (28d+1m).

La profundidad de carbonatación se midió utilizando un calibre y como indicador fenolftaleína [13, 16, 32]. Este indicador es incoloro en medio ácido o cercano al neutro, el color rosado comienza a ser visible a pH cercano a 8,2 y obtiene el color rosa definitivo a pH 9,8. Por lo que, al rociar con fenolftaleína un corte transversal recién hecho de la pasta, se puede observar una región no carbonatada de color rosa, lo que indica presencia de CH, mientras que en las áreas incoloras se indica que el CH fue carbonatado a Cc manteniendo el color de la pasta (región de la pasta en contacto con el CO₂ ambiental). La altura de esta zona se informa como profundidad de carbonatación. Sin embargo, la profundidad de carbonatación determinada utilizando

fenolftaleína no necesariamente indica mayor carbonatación, sino que corresponde al consumo de CH, el cual puede consumirse por carbonatación o por la reacción puzolánica cuando las pastas contienen material puzolánico como las arcillas calcinadas.

La cuantificación de la captación de CO₂ por los tres métodos propuestos se realizó en muestras de las pastas molidas obtenidas de las probetas enteras, no solo de la parte carbonatada, con el objetivo de establecer una base de cálculo, ya que se espera cuantificar la cantidad de CO₂ captado por tonelada de pasta, no por tonelada de pasta carbonatada.

Para el método indirecto (1) de cuantificación de la carbonatación de CO₂, en primer lugar, se obtuvieron los difractogramas de las pastas a las dos edades de estudio, utilizando un equipo Bruker D8 Advance con radiación Cu-K α ($\lambda = 0,154$ nm) a 40 kV y 30 mA. Antes de realizar las medidas, se mezclaron y molieron en forma manual con mortero de ágata las pastas y el corindón (A: Al₂O₃) utilizado como patrón interno, obteniendo una mezcla homogénea con un 20% p/p de A para cada pasta. Se identificaron las fases cristalinas obtenidas durante los procesos de hidratación y carbonatación, las fases cristalinas sin reaccionar y las correspondientes al patrón interno A; utilizando las fichas de la Crystallography Open Database (COD) [33]. Luego, se realizó el refinamiento estructural basado en la difracción de rayos X de polvos utilizando el método de Rietveld [34] y el software libre FullProf Suite [35], determinando los parámetros cristalinos y la composición de cada muestra [36]. Este método se basa en un refinamiento de cuadrados mínimos hasta que se obtiene el mejor ajuste entre el perfil de difracción de polvo observado completo (Yobs) y el perfil de difracción calculado (Ycalc). Ycalc es obtenido a partir de la estructura cristalina de cada fase presente, información del *background* y parámetros que definen la forma y el ancho de las líneas de difracción, entre otras características de las muestras, ajustando las intensidades relativas de cada fase hasta alcanzar los valores experimentales

con un factor de escala [37]. A partir del factor de escala obtenido para cada fase es posible cuantificar el % en masa de dicha fase en la mezcla y luego considerando el % de patrón interno A, estimar el porcentaje de la fase no difractante [38]. Una vez cuantificadas todas las fases cristalinas y la fase no difractante, se calculó la captación de CO₂ para cada pasta. La ecuación (5) considera la formación de MC a partir del Cc presente en la materia prima (Ecuación 3), mientras que la Ecuación 6 considera la formación de MC a partir del CO₂ obtenido mediante el proceso de carbonatación (Ecuación 4).

$$\text{CO}_2 \text{ captado [kg CO}_2 \text{ / t pasta]} = \left[\% \text{Cc} - [\% \text{Cc}_{\text{CalH}} * ((100 - \% \text{R})/100) - \% \text{Cc}_{\text{MC}}] \right] * k * 1000/100 \quad (5)$$

$$\text{CO}_2 \text{ captado [kg CO}_2 \text{ / t pasta]} = \left[\% \text{Cc} - [\% \text{Cc}_{\text{CalH}} * ((100 - \% \text{R})/100)] + \% \text{Cc}_{\text{MC}} \right] * k * 1000/100 \quad (6)$$

Donde %Cc es el porcentaje de CaCO₃ determinado por el método Rietveld en las pastas a cada edad, %Cc_{CalH} es el contenido de Cc en la cal hidráulica determinado mediante el método Rietveld (%Cc_{CalH} = 22,04 $\pm$ 0,70 %), %R el porcentaje de reemplazo de cal hidráulica por MP-KC, %Cc_{MC} la calcita contenida en la cal hidráulica que fue consumida en la formación de MC o el contenido de carbonato de calcio en el MC formado por carbonatación, considerando el % de MC determinado mediante el método Rietveld para cada pasta, y finalmente *k* es la relación de los pesos moleculares de CO₂ y CaCO₃, respectivamente (*k* = 44/100).

En el caso de los métodos directos (2) y (3), se cuantifica la cantidad de CO₂ captado a partir de la pérdida de masa correspondiente a la descomposición del Cc total y MC entre 550 °C y 900 °C. La cantidad de CO₂ cuantificada corresponde, además del MC cuando se forma esta fase, al Cc obtenido luego del proceso de carbonatación y al presente en la materia prima (Cc total), por lo que debe restarse el valor de CO₂ correspondiente a la descomposición del Cc de la materia prima (Ecuación 7).

$$\text{CO}_2 \text{ captado [kg CO}_2 \text{ / t pasta]} = \frac{[\%W_{550-900} - \%WMP_{550-900}] * 1000}{100} \quad (7)$$

Donde $\%W_{550-900}$ es el porcentaje de pérdida de masa de CO_2 entre 550 – 900 °C correspondiente a la descarbonatación de Cc y MC en las pastas para cada edad, $\%WMP_{550-900}$ es el porcentaje de pérdida de masa de CO_2 entre 550 – 900 °C debido a la descarbonatación de Cc en la materia prima (para ATD-TG: $\%WMP_{550-900} = 12,34 \%$; para pérdida por calcinación en mufla: $\%WMP_{550-900} = 12,51 \%$) y $\%R$ el porcentaje de reemplazo de cal hidráulica por MP-KC.

La diferencia entre los dos métodos directos, ATD-TG (2) y pérdida por calcinación en mufla (3), está en el equipamiento utilizado para cuantificar la pérdida de masa. En el método (2) se utilizó un equipo de análisis térmico diferencial y termo-gravimétrico (ATD-TG), Shimadzu DTG-60/6, con atmósfera de nitrógeno, desde temperatura ambiente hasta 950°C con una rampa de calentamiento de 20°C/min. Para el último método propuesto (3), se utilizó una Mufla ORL-II calentando la muestra desde temperatura ambiente hasta 550 °C y luego hasta 900°C con una rampa de calentamiento de 15°C/min. La muestra permaneció una hora en la mufla a cada temperatura, pasado el tiempo se colocó en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente y se pesó utilizando una balanza analítica Sartotius BP 211D.

3. Resultados

3.1 Profundidad de carbonatación

La Figura 2 muestra las profundidades de carbonatación medidas en mm para todas las pastas por duplicado a las dos edades de estudio. Para pastas a 28 días hay un salto inicial de la profundidad de carbonatación de 0-20 % de reemplazo, luego se mantiene invariante entre 20-40 % de reemplazo y finalmente vuelve a subir entre 40-50 % de reemplazo. Para las pastas a 28d+1m el

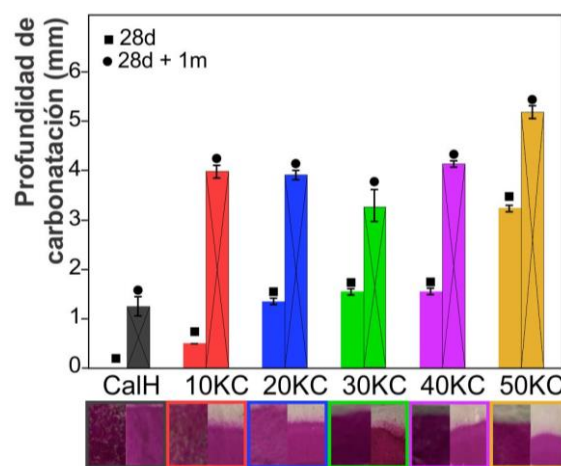


Figura 2. Perfiles y profundidades de carbonatación (mm).

comportamiento es similar, solo que el salto inicial se da entre 0-10% de reemplazo. Cuando se comparan las pastas 28d y 28d+1m se observa que la profundidad de carbonatación aumenta debido al mayor tiempo de contacto con el CO_2 ambiental. Para todas las pastas se observa un aumento en la profundidad de carbonatación cuando se incorpora arcilla caolinítica calcinada, la cual incrementa con el aumento del % de reemplazo.

3.2 Identificación de fases cristalinas en pastas

En los difractogramas obtenidos a 28d y 28d+1m para las pastas (Figura 3), se asignaron los picos correspondientes a las diferentes fases cristalinas, identificando para todas las pastas: calcita (Cc, COD 96-900-9669) obtenida como producto de la reacción de carbonatación y presente en la materia prima; monocarboaluminato cálcico hidratado (MC, COD 96-100-0460) obtenido como producto de la reacción puzolánica y por acción del CO_2 (Ecuación 4); belita con picos de baja intensidad (C_2S , COD 96-901-2795), cuarzo (Q, COD 96-900-9667) y portlandita (CH, COD 96-100-1788) presentes en la materia prima, y corindón (A, COD 96-900-7635) utilizado como patrón interno.

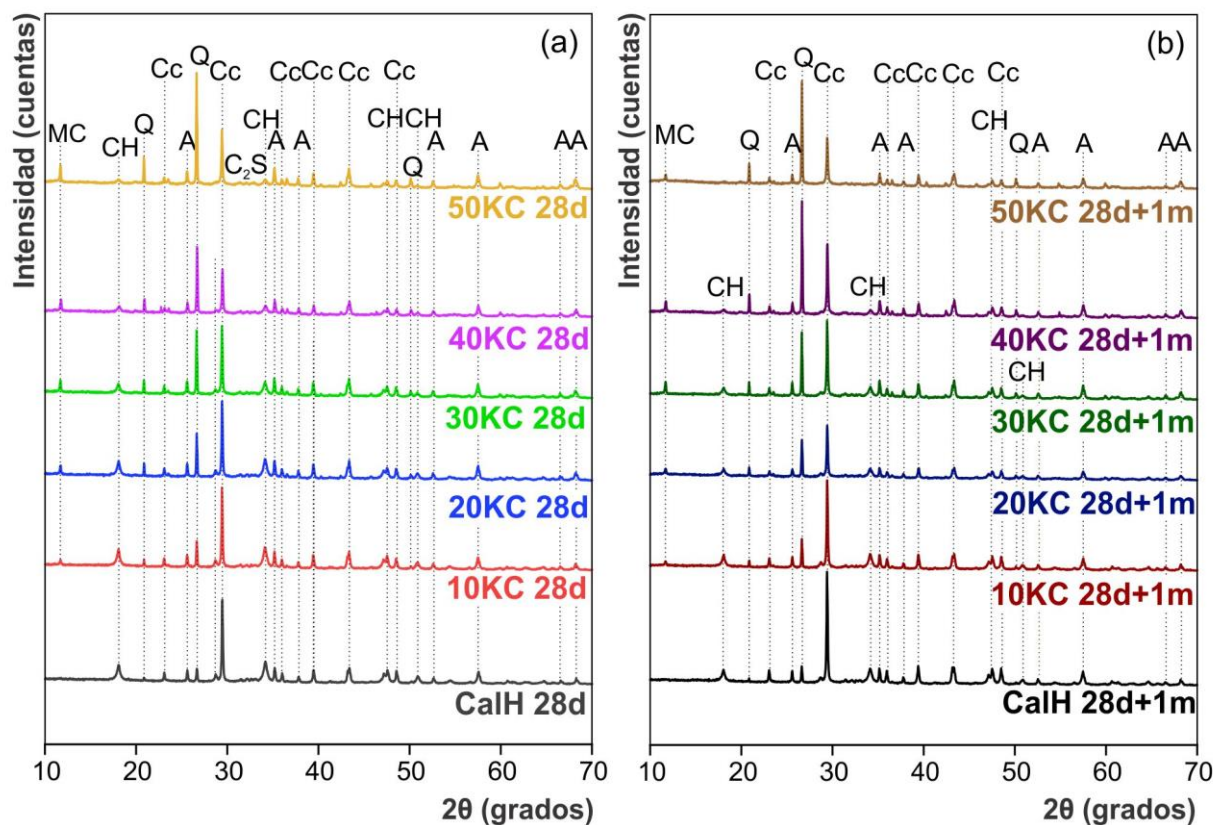


Figura 3. Difractogramas de las pastas hidratadas y carbonatadas: (a) 28 días y (b) 28 días y un mes carbonatación. MC: monocarboaluminato cálcico, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$; CH: portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$; Q: cuarzo, SiO_2 ; Cc: calcita, CaCO_3 ; A: corindón, Al_2O_3 ; C_2S : silicato di cálcico, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$.

No se identifica gel C-S-H, producto de la reacción de hidratación del C_2S y de la reacción puzolánica, debido a que es una fase no difractante (amorfa). Se observa con el avance de las reacciones de hidratación y carbonatación a lo largo del tiempo, la disminución de la intensidad de los picos asignados a CH y el aumento de la intensidad de los picos asignados a Cc. Para ambas edades de estudio, la intensidad de los picos asignados al CH y al Cc disminuye cuando aumenta el porcentaje de reemplazo. También aumenta la intensidad de los picos asignados al Q, principal impureza de KC. Los picos asignados al patrón interno A no se superponen con los picos asignados tanto a las fases obtenidas luego de los procesos de hidratación - carbonatación, como a los asignados a las fases de las materias primas sin reaccionar, lo que permite concluir que el corindón es un patrón interno adecuado para este sistema.

3.3 Cuantificación de la captación de CO_2 mediante método indirecto (1)

En este trabajo, se utilizó la versión 5.20 del software libre FullProf Suite [35] en el modo 'profile-matching' con datos de difracción de rayos X obtenidos con radiación de $\text{CuK}\alpha$, para cuantificar la cantidad presente de cada fase identificada en el punto 3.2. Las intensidades de los picos de difracción se encuentran relacionadas con el porcentaje en masa de cada fase en la mezcla. Se consideró orientación preferencial para las fases: portlandita (plano 001) y calcita (plano 104). La Figura 4 presenta el ajuste con el método de Rietveld para las pastas de CalH 28d y CalH 28d+1m a modo de ejemplo, donde los valores experimentales se muestran con un círculo rojo (Yobs) y el patrón calculado con una línea continua (Ycalc). Las líneas verdes verticales corresponden a las posiciones de Bragg de las distintas fases mineralógicas que componen

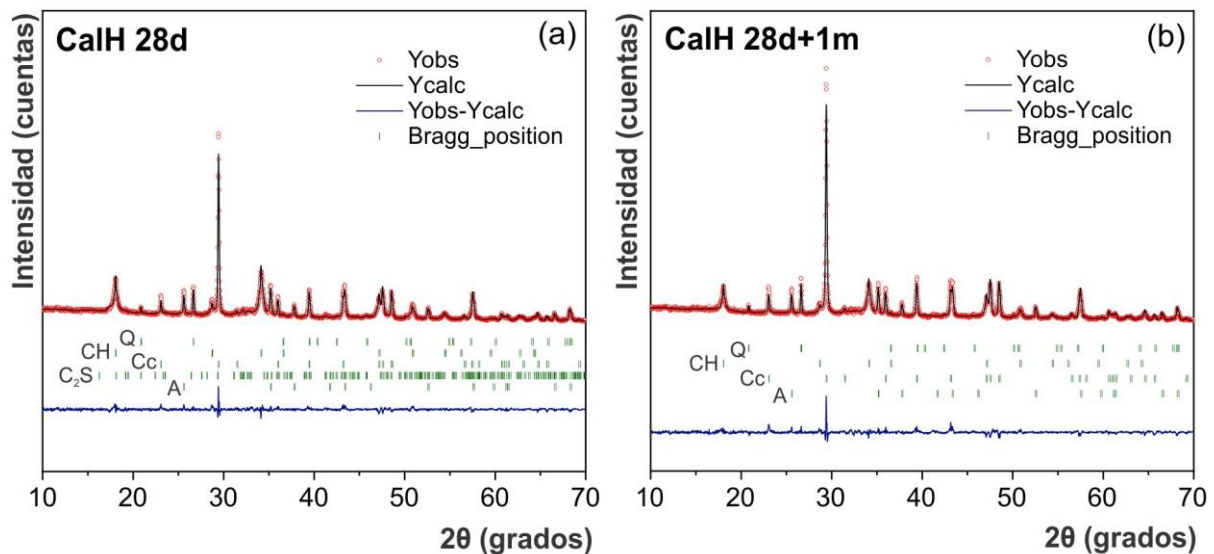


Figura 4. Difractograma refinado de las pastas de CalH: (a) 28 días y (b) 28 días y un mes carbonatación.

las muestras (desde arriba hacia abajo: Q, CH, Cc, C₂S, A). En estas muestras no se considera la fase MC, ya que no fue identificada (Figura 3). Para evaluar la calidad del ajuste se grafica la diferencia entre el Yobs-Ycalc (línea azul) y se determina el valor de chi-cuadrado (χ^2): cuanto más cercano a 1 es este valor, mejor es el ajuste. En todas las muestras se obtuvo un valor de χ^2 menor o igual a 3, conforme a lo reportado en la literatura en sistemas similares [39,40].

Los resultados obtenidos a partir del refinamiento de los difractogramas utilizando el método de Rietveld con patrón interno se muestran en la Tabla 2 con su correspondiente desvío. Se obtuvo el porcentaje en masa de todas las fases identificadas y de la fase no difractante, con un coeficiente de variación menor al 11%. Se puede observar que el contenido de CH disminuye debido a la dilución por reemplazo de CalH por MK, y al consumo en las reacciones puzolánica y de carbonatación. El consumo de CH no aumenta en forma directa con el aumento de Cc. Esto se debe a que existe una competencia entre el consumo de CH entre las reacciones puzolánica (ecuación 1) y de carbonatación (ecuación 2), lo que se ve reflejado en el porcentaje de calcita. Cuando se comparan

pastas de igual formulación, se observa un aumento en la cantidad de Cc obtenido por carbonatación entre 28d y 28d+1mes; mientras que el contenido de MC disminuye ligeramente para elevados porcentajes de reemplazo, posiblemente por una descarbonatación de esta fase. Los kg de CO₂ captados por tonelada de pasta fueron calculados con la ecuación 5 y se presentan en la Tabla 2. Según el método (1), el agregado de arcilla caolinítica calcinada disminuye la captación de CO₂ ambiental obteniendo un mínimo valor para un 40% de reemplazo de MP-CalH por MP-KC a 28d y para un 30% a 28d+1m.

3.4 Cuantificación de la captación de CO₂ mediante método directo (2) y (3)

Las Figuras 5 y 6 muestran el análisis termogravimétrico (ATD-TG) siguiendo el método (2) de las muestras de referencia: CalH 28d y CalH 28d+1m. En la curva ATD se pueden observar tres picos endotérmicos a diferentes rangos de temperatura y representan las diferentes transformaciones: hasta 380 °C ocurre la deshidratación de las fases C-(A)-S-H y MC; entre 450 – 550 °C ocurre la deshidroxilación del CH y entre 550 – 900 °C

Tabla 2. Porcentaje en masa obtenido a partir de método de Rietveld con patrón interno y CO₂ captado (método 1).

Muestra	Curado 28d en cámara húmeda				Curado 28d + 1 mes carbonatación			
	%CH	%Cc	%CcMC	CO ₂ captado [kg CO ₂ /t pasta]	%CH	%Cc	%CcMC	CO ₂ captado [kg CO ₂ /t pasta]
CalH	24,4 ± 0,8	30,1 ± 0,9		35,6	17,6 ± 0,5	45,2 ± 0,7		101,8
10KC	26,3 ± 0,7	24,8 ± 0,5	0,7 ± 0,1	24,7	17,1 ± 0,4	36,0 ± 0,6	0,7 ± 0,1	74,0
20KC	20,3 ± 0,6	21,6 ± 0,4	0,9 ± 0,1	21,2	15,2 ± 0,5	31,9 ± 0,6	1,1 ± 0,1	67,7
30KC	15,4 ± 0,6	20,4 ± 0,4	1,1 ± 0,1	26,6	12,1 ± 0,7	24,8 ± 0,6	0,9 ± 0,1	45,4
40KC	9,5 ± 0,5	16,2 ± 0,7	1,2 ± 0,1	18,5	5,2 ± 0,4	25,7 ± 0,7	1,0 ± 0,1	59,1
50KC	4,1 ± 0,3	15,6 ± 0,5	1,3 ± 0,1	26,0	1,5 ± 0,5	24,7 ± 0,5	0,7 ± 0,1	63,4

ocurre la descarbonatación de Cc. La curva TG muestra las pérdidas de masa producidas en cada una de estas etapas, debido a los procesos de deshidratación, deshidroxilación y descarbonatación. A partir de los resultados ATD se establece el rango de temperaturas adecuado para considerar la pérdida de masa a utilizar en el cálculo del CO₂ captado.

Los valores de pérdida de masa debido a la descomposición del carbonato de calcio para las pastas a 28d y 28d+1m obtenidos mediante ATD-TG método (2) y pérdida por calcinación en mufla método (3) se muestran en la Tabla 3 y 4, con su correspondiente desvío, respectivamente. Los kg de CO₂ captados por tonelada de pasta fueron calculados con la Ecuación 6. Considerando el método (2), se determinó que el agregado de arcilla caolinítica calcinada no disminuye la captación de CO₂ ambiental en todos los casos como lo observado con el método indirecto (1) (Tabla 2), y se obtuvo un mínimo valor para un 20% de reemplazo de MP-CalH por MP-KC a 28d y para un 40% de reemplazo a 28d+1m. Cuando se utiliza el método directo (3), pérdida por calcinación en mufla, se obtuvo un mínimo valor para un 50% de reemplazo de MP-CalH por MP-KC a 28d y a 28d+1m. El comportamiento de las pastas frente a la carbonatación es el mismo, independientemente del método de medición que se utilice, los resultados difieren debido a los errores propios de cada método.

4. Discusión

El análisis del avance de carbonatación siguiendo el cambio de color en el corte transversal de la pasta con fenolftaleína es indicativo de la zona que tiene CH presente en la muestra, pero no brinda información sobre cuánto Cc se produjo por carbonatación, ni de cuánto CO₂ ambiental se captó (Ecuaciones 2 y 4). Por este motivo, es importante utilizar otros métodos para cuantificar la captación de CO₂ ambiental. En la Tabla 5 se comparan los tres métodos considerando diferentes factores de impacto e indicando con color verde cuando el impacto es favorable, amarillo moderado y rojo desfavorable.

En primer lugar, se debe considerar la disponibilidad de equipamiento específico para la realización de la medida y el costo del mismo. El método directo de pérdida por calcinación en mufla (3) tiene como ventaja (favorable, color verde) que la mayoría de los laboratorios están equipados con muflas que operan en el rango de temperaturas establecido (hasta 900°C); en cambio, tanto para el método indirecto DRX-Rietveld (1) como para el directo ATD-TG (2) se necesita equipamiento específico, siendo de mayor costo el difractómetro necesario en el método (1) (desfavorable, color rojo). Respecto a la necesidad de otros reactivos, únicamente el método (1) requiere el uso de corindón como patrón interno, sin embargo, este reactivo es

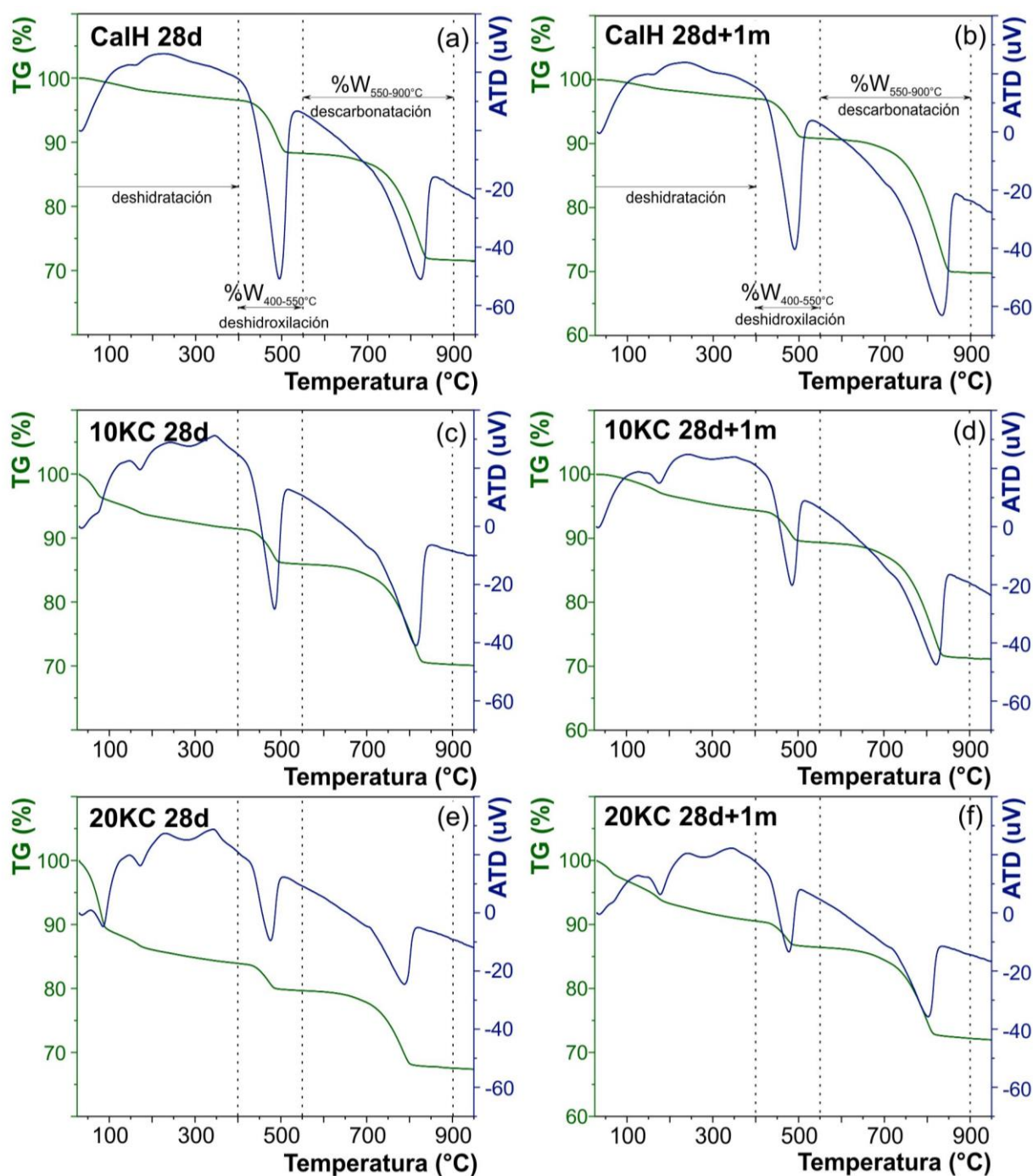


Figura 5. Curva ATD-TG para pastas: (a) CalH 28d, (b) CalH 28d+1m, (c) 10KC 28d, (d) 10KC 28d+1m, (e) 20KC 28d y (f) 20KC 28d+1m.

de bajo costo, por eso se considera de impacto moderado (color amarillo). La preparación de las muestras implica secado en estufa y molienda para los tres métodos, y luego en el caso del método (1) requiere una etapa adicional que implica el pesado exacto en balanza analítica de la muestra y del patrón

interno, una adecuada homogenización de la mezcla y colocación en el portamuestra evitando la orientación preferencial. Por este motivo, el factor tiempo de preparación de las muestras se consideran de impacto moderado (color amarillo). El tiempo de ensayo es un factor desfavorable (color rojo) para el método

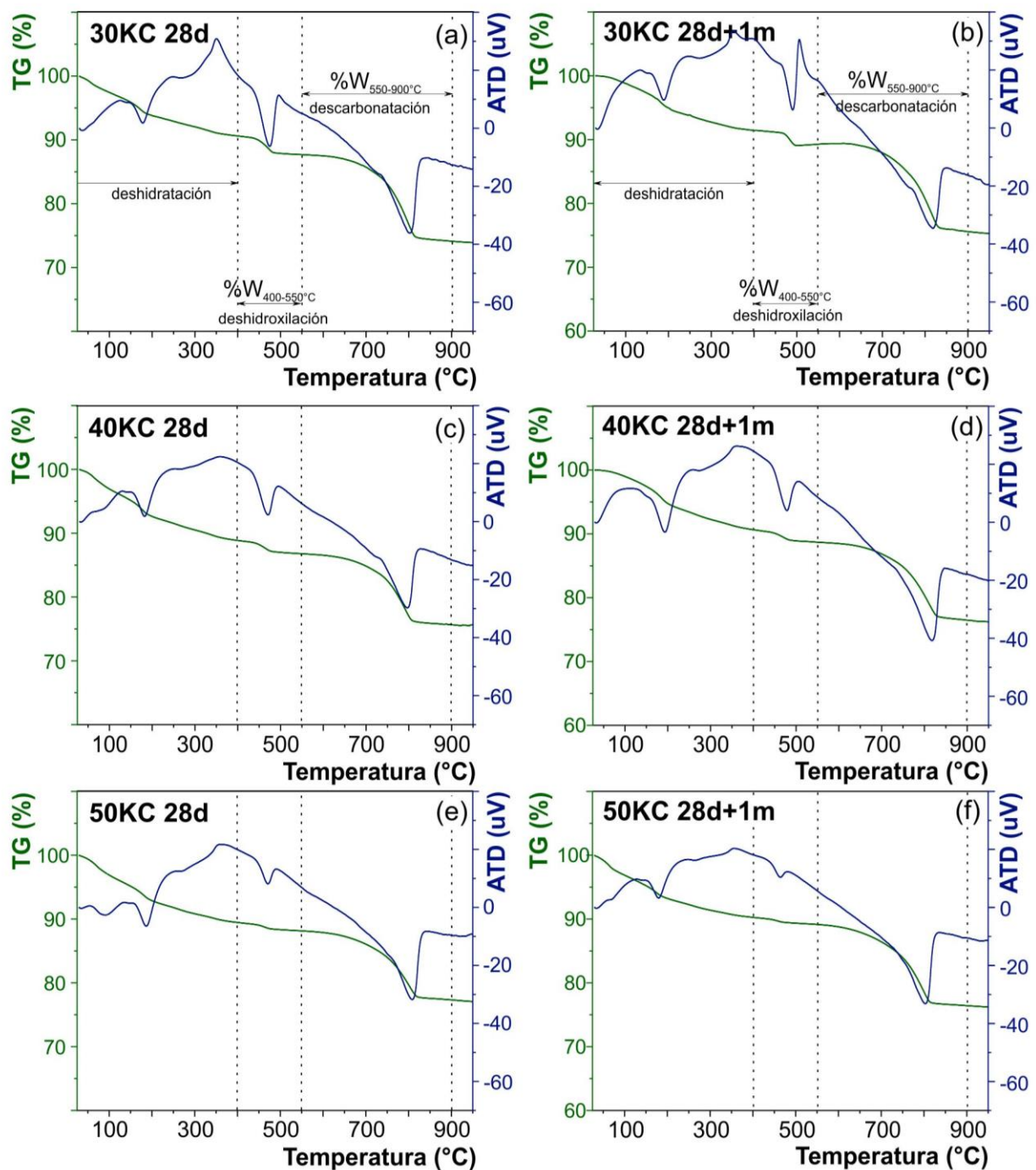


Figura 6. Curva ATD-TG para pastas: (a) 30KC 28d, (b) 30KC 28d+1m, (c) 40KC 28d, (d) 40KC 28d+1m, (e) 50KC 28d y (f) 50KC 28d+1m.

(3) ya que las medidas en los otros dos métodos implican como máximo una hora, y el procedimiento en mufla necesita de cuatro pesadas en balanza analítica, tiempos de calentamiento/enfriamiento y residencia en la misma. El método (1) requiere por parte del analista conocimientos sobre cristalografía,

cálculos estequiométricos y el uso de software específico, con lo cual el análisis de datos implica gran cantidad de tiempo en comparación con los métodos directos (color rojo). Para el método directo ATD-TG estos factores son de moderado impacto (color amarillo), ya que si bien requieren las mismas

Tabla 3. Pérdida de masa y CO₂ capado obtenidos mediante ATD-TG (método 2).

Muestra	Curado 28d en cámara húmeda		Curado 28d + 1 mes carbonatación	
	%W _{550-900 °C} (CO ₂)	CO ₂ captado [kg CO ₂ /t pasta]	%W _{550-900 °C} (CO ₂)	CO ₂ captado [kg CO ₂ /t pasta]
CalH	16,9 ± 1,3	44,4	21,1 ± 1,6	87,4
10KC	16,4 ± 1,2	52,7	18,2 ± 1,4	71,2
20KC	13,6 ± 1,0	37,4	15,0 ± 1,1	50,8
30KC	13,9 ± 1,0	52,9	13,9 ± 1,0	52,3
40KC	11,5 ± 0,9	40,6	12,3 ± 0,9	49,4
50KC	11,2 ± 0,8	50,0	13,1 ± 1,0	69,7

Tabla 4. Pérdida de masa CO₂ captado obtenidos mediante pérdida por calcinación en mufla (método 3).

Muestra	Curado 28d en cámara húmeda		Curado 28d + 1 mes carbonatación	
	%W _{550-900 °C} (CO ₂)	CO ₂ captado [kg CO ₂ /t pasta]	%W _{550-900 °C} (CO ₂)	CO ₂ captado [kg CO ₂ /t pasta]
CalH	20,05 ± 0,05	75,2	24,72 ± 0,08	121,9
10KC	20,54 ± 0,06	92,7	24,52 ± 1,63	132,5
20KC	19,24 ± 0,04	92,2	21,94 ± 0,04	119,2
30KC	16,50 ± 0,04	77,3	18,94 ± 0,10	101,7
40KC	14,27 ± 0,07	67,5	16,91 ± 0,03	94,0
50KC	12,74 ± 0,03	64,8	14,86 ± 0,03	85,9

Tabla 5. Matriz de impacto para la comparación entre métodos.

Factores de análisis para cuantificación de CO ₂ captado	Método Indirecto	Métodos Directos	
	DRX-Rietveld (1)	ATD-TG (2)	Pérdida por calcinación en Mufla (3)
Disponibilidad de equipamiento			
Costo de equipamiento			
Necesidad de otros reactivos			
Tiempo de preparación de muestras			
Tiempo de ensayo			
Tiempo de procesamiento de datos			
Necesidad de uso de software para el análisis de datos y conocimientos específicos			
Información adicional suministrada			
Resultados obtenidos			

herramientas, estas son de menor dificultad. Para el método directo por mufla no se necesita software ni conocimientos específicos de nivel avanzado, solamente se realizan

cálculos estequiométricos sencillos. Por otra parte, el método indirecto (1) tiene como ventaja que brinda información adicional, permite cuantificar el porcentaje en masa de

todas las fases cristalinas identificadas (MC, CH, Q, Cc, A, C₂S) y de la fase no difractante. Mientras que, con el método directo (2) solamente se logra identificar y cuantificar los compuestos que sufren descomposición con pérdida de masa dentro del rango de temperatura en estudio, CH y Cc. Finalmente, el método (3) no proporciona información adicional y sólo puede utilizarse si se ha estudiado el sistema por otros métodos previamente, asegurando que sólo ocurran los procesos de deshidroxilación y descarbonatación mencionados (color rojo).

Si bien los tres métodos permitieron estimar la captación de CO₂, sólo los métodos (1) y (2) dan resultados similares (Figura 7), por lo que se llevó a cabo una prueba t-student para comprobar si existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos métodos para poder asignar el factor de impacto sobre los resultados obtenidos. El contenido final de CO₂ captado determinado por el método (3), es superior al valor obtenido por los otros métodos, sobreestimando la captación de CO₂ en un 110% (color rojo). Esto se atribuye a que la muestra calcinada a 550 °C contiene CaO proveniente de la deshidroxilación del CH y se encuentra en contacto con el aire ambiente, que contiene CO₂, pudiendo producirse una ligera

carbonatación del CaO a Cc. En cambio, utilizando el equipo ATD-TG se trabaja a una atmósfera de nitrógeno controlada a determinadas condiciones de temperatura y presión.

Para comprobar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los métodos DRX (1) y ATD-TG (2), se realizó una prueba t-student de comparación por pares [41]. En primer lugar, se calcularon las diferencias entre los valores obtenidos por los métodos (1) y (2) para cada muestra (d_i) y se comprobó la normalidad de los datos mediante un gráfico normal Q-Q Plot (Figura 8). Luego, se calculó la media de todas las diferencias ($\bar{d}$, Ecuación 8) y se analizó la desviación estándar muestral de las diferencias (S_d , Ecuación 9), donde n es igual a 12 (cantidad de medidas realizadas por cada método). La hipótesis H_0 se rechaza si $|t_0| > t_{\alpha/2, n-1}$, donde t_0 se determina utilizando la Ecuación 10. Cuando la hipótesis no se rechaza, se puede concluir que no existe evidencia que indique que los dos métodos dan resultados diferentes. Para una confiabilidad del 95% ($\alpha = 0,05$), el valor obtenido de $t_{\alpha/2, n-1}$ fue de 2,201 [41], y como el valor calculado de t_0 es de $1,713 < 2,201$, no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que no existe evidencia que haya diferencias

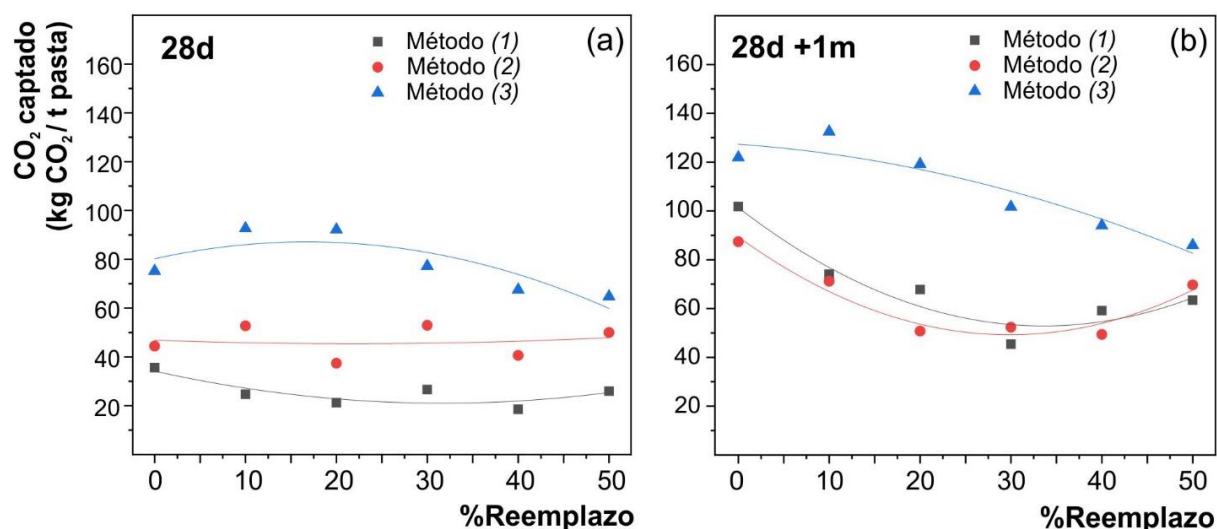


Figura 7. CO₂ captado para cada método en función del porcentaje de arcilla de reemplazo en las pastas hidratadas y carbonatadas: (a) 28 días y (b) 28 días y un mes carbonatación.

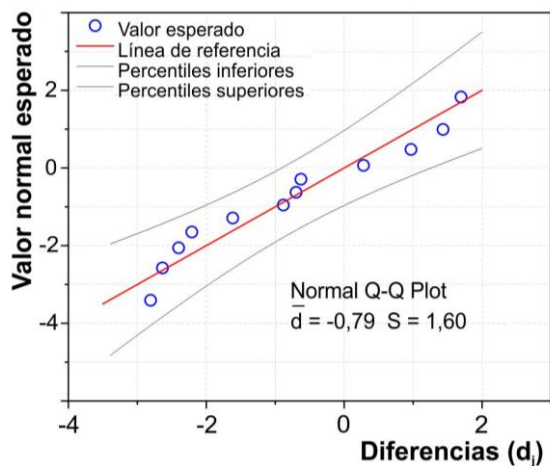


Figura 8. Gráfico Q-Q normal de las diferencias.

estadísticamente significativas entre ambos métodos, por lo que el factor resultados obtenidos se considera favorable para ambos métodos (color verde).

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j \quad (8)$$

$$S_d = \left[\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$t_0 = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} \quad (10)$$

7. Conclusiones

Luego de los estudios realizados se concluye que los métodos DRX-Rietveld con patrón interno (método indirecto) y ATD-TG (método directo) proporcionan resultados estadísticamente equivalentes (prueba t-student). El método de pérdida por calcinación en mufla no se recomienda para este tipo de sistemas, ya que sobreestima sistemáticamente la captación de CO₂, hasta un 110% en algunos casos. Esta desviación se atribuye a la carbonatación espuria del CaO generado in situ durante la calcinación a 550 °C, un efecto que no ocurre en el método ATD-TG al trabajar con atmósfera inerte controlada.

El método DRX-Rietveld ofrece la ventaja de cuantificar todas las fases cristalinas y la fracción de fase no difractante, lo que permite un entendimiento composicional del sistema. En contraste, el método ATD-TG, si bien más sencillo en el procesamiento de datos, solo aporta información sobre las fases que sufren transformaciones con pérdida de masa (deshidratación, deshidroxilación y descarbonatación). La selección del método más apropiado dependerá de la ponderación de los factores analizados: disponibilidad de equipamiento, costo, necesidad de otros reactivos, tiempo de preparación de muestras y ensayo, necesidad de software especializado y profundidad de la información requerida.

Este trabajo sienta las bases para el desarrollo de protocolos estandarizados que permitan la comparación de resultados entre distintos laboratorios. Investigaciones futuras deberán centrarse en optimizar procedimientos específicos según el método y su correspondiente metodología y análisis de resultados.

Fuentes de financiamiento

Este trabajo fue financiado por el CONICET y FIO-UNCPBA. Luisina Aristarán es becaria doctoral del CONICET, Anabella Mocciaro, Cecilia Paulo y Alejandra Tironi son miembros de la Carrera del Investigador Científico de CONICET. Los autores agradecen a la Ing. María Beatriz Silverii (CPA, CONICET) y a la Dra. Antonela Disalvo (CPA, CONICET) por su colaboración en las medidas de ATD-TG y a la Lic. Camila Garayzabal (CPA, CONICET) por su colaboración en las medidas DRX.

Contribución de autoría

L. Aristarán: metodología, análisis formal, investigación, redacción original, revisión y edición, visualización.

A. Mocciaro: metodología, investigación, recursos, revisión y edición.

C. Paulo: revisión y edición, adquisición de fondos.

A. Tironi: conceptualización, metodología, redacción y revisión, supervisión, adquisición de fondos.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

Referencias

- [1] IPCC. (2018). *Special Report: Global warming of 1.5°C*. (<https://www.ipcc.ch/sr15/>).
- [2] Asociación de Fabricantes de Cemento Portland (AFCP), Federación Interamericana del Cemento (FICEM), y Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). (2025). *Net Zero 2050 Argentina Cemento y Hormigón*. (https://decarbonization.unido.org/wp-content/uploads/2025/12/hr-net-zero-argentina-resumen-ejecutivo_low-compressed-1.pdf).
- [3] Subsecretaría de Ambiente de la Secretaría de Ambiente, Turismo y Deportes de la Vicejefatura del Interior. (2024). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del Primer Informe Bienal de Transparencia: Argentina*. (https://inventariogeai.ambiente.gob.ar/files/Booklet_INGEI_2024.pdf).
- [4] Thapa, V. B., y Waldmann, D. (2020). Performance of lime-metakaolin pastes using gravel wash mud (GWM). *Cement and Concrete Composites*, 114, 103772. <https://doi.org/rhgn>
- [5] Torres, I., Matias, G., y Faria, P. (2020). Natural hydraulic lime mortars-The effect of ceramic residues on physical and mechanical behaviour. *Journal of Building Engineering*, 32, 101747. <https://doi.org/q683bv>
- [6] Zhang, D., Wang, D., Zhao, J., Wang, Y., Liu, Z., y Ma, X. (2020). Assessment of the thermal and microstructural properties of metakaolin-air lime based materials at an early age. *Applied Clay Science*, 191, 105619. <https://doi.org/gg899g>
- [7] Juenger, M. C., y Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71–80. <https://doi.org/f7w7qv>
- [8] Avet, F., y Scrivener, K. (2018). Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, 124–135. <https://doi.org/gdq285>
- [9] Campo, F. P., y Grosso, M. (2022). Lime based construction materials as a carbon sink. *Key Engineering Materials*, 922, 139–145. <https://doi.org/rhgp>
- [10] De Belie, N., y Bernal, S. (2025). Closing Letter of RILEM TC 281-CCC: Carbonation of Concrete with Supplementary Cementitious Materials. *RILEM Technical Letters*, 10, 22–32. <https://doi.org/rhqr>
- [11] Briceño, C., Azenha, M., Vasconcelos, G., Rodríguez-Navarro, C., y Lourenço, P. B. (2025). Influence of lime on the evolution of cement mortars carbonation and hydration processes. *Construction and Building Materials*, 491, 142729. <https://doi.org/rhgs>
- [12] Kang, S. H., Kwon, Y. H., y Moon, J. (2020). Controlling the hydration and carbonation in lime-based materials: Advantage of slow carbonation in CO₂ curable construction materials. *Construction and Building Materials*, 249, 118749. <https://doi.org/ghdgn4>
- [13] Shi, Z., Lothenbach, B., Geiker, M. R., Kaufmann, J., Leemann, A., Ferreira, S., y Skibsted, J. (2016). Experimental studies and thermodynamic modeling of the carbonation of Portland cement, metakaolin and limestone mortars. *Cement and Concrete Research*, 88, 60–72. <https://doi.org/f82zkt>
- [14] Zhang, D., Zhao, J., Wang, D., Wang, Y., y Ma, X. (2020). Influence of pozzolanic materials on the properties of natural hydraulic lime based mortars. *Construction and Building Materials*, 244, 118360. <https://doi.org/rhgv>
- [15] Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., y Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114, 49–56. <https://doi.org/ghdf7f>

- [16] Cordoba, G., Montani, L., Castellano, C., Donza, H., Irassar, E. F., y Bonavetti, V. (2025). Evaluación integral de la durabilidad y sostenibilidad de hormigones con arcilla illítica calcinada y material calcáreo. *Revista Hormigón*, 67, 17–34. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/w2cnubfkm>
- [17] Grist, E. R., Paine, K. A., Heath, A., Norman, J., y Pinder, H. (2015). Structural and durability properties of hydraulic lime–pozzolan concretes. *Cement and Concrete Composites*, 62, 212–223. <https://doi.org/g9ss8d>
- [18] Apostolopoulou, M., Asteris, P. G., Armaghani, D. J., Douvika, M. G., Lourenço, P. B., Cavaleri, L., Bakolas, A., y Moropoulou, A. (2020). Mapping and holistic design of natural hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 136, 106167. <https://doi.org/rhgw>
- [19] Garijo, L., De La Rosa, A., Ruiz, G., y Ortega, J. J. (2023). Autogenous self-healing induced by compressive fatigue in carbonated hydraulic lime mortars. *Journal of Building Engineering*, 80, 108035. <https://doi.org/rhgx>
- [20] Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., y Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1577–1586. <https://doi.org/fhmxxv>
- [21] Shang, H., Xiao, Z., Wang, X., Lu, Z., Xu, S., y Dong, P. (2024). Study on modification of natural hydraulic lime historical building repair mortar. *Journal of Building Engineering*, 97, 110583. <https://doi.org/rhgz>
- [22] Su-Cadirci, T. B., Calabria-Holley, J., Ince, C., y Ball, R. J. (2023). Freeze-thaw resistance of pozzolanic hydrated lime mortars. *Construction and Building Materials*, 394, 131993. <https://doi.org/rhg2>
- [23] Lanás, J., Bernal, J. P., Bello, M. A., y Galindo, J. A. (2004). Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2191–2201. <https://doi.org/fnv4mb>
- [24] The European Lime Association. (2017). *Innovation in the lime sector*. (<https://www.eula.eu/wp-content/uploads/2019/07/Innovation-in-the-Lime-Sector-.pdf>).
- [25] Murat, M. (1983). Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite. *Cement and Concrete Research*, 13(2), 259–266. <https://doi.org/cgk3ts>
- [26] Yanguatin, H., Ramírez, J. H., Tironi, A., y Tobón, J. I. (2019). Effect of thermal treatment on pozzolanic activity of excavated waste clays. *Construction and Building Materials*, 211, 814–823. <https://doi.org/gg7j7r>
- [27] Aristarán, L., Paulo, C., y Tironi, A. (2023). Pastas elaboradas con cal hidráulica y arcillas calcinadas: análisis de la captación de CO₂ ambiental. *Revista del Museo de La Plata*, 8. <https://doi.org/rhg3>
- [28] Grilo, J., Silva, A. S., Faria, P., Gameiro, A., Veiga, R., y Velosa, A. (2014). Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 51, 287–294. <https://doi.org/gpb74f>
- [29] Nežerka, V., Slížková, Z., Tesárek, P., Plachý, T., Frankeová, D., y Petráňová, V. (2014). Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust. *Cement and Concrete Research*, 64, 17–29. <https://doi.org/f6cn5c>
- [30] Matschei, T., Lothenbach, B., y Glasser, F. P. (2007). The AFm phase in Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 118–130. <https://doi.org/dxh5jn>
- [31] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1984). *IRAM 1695. Cales: método de ensayos físicos*.
- [32] Despotou, E., Shtiza, A., Schlegel, T., y Verhelst, F. (2016). Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars/Literaturstudie über Mechanismus und Grad der Karbonatisierung von Kalkhydrat im Mörtel. *Mauerwerk*, 20(2), 124–137. <https://doi.org/f3mk3j>
- [33] Gražulis, S., Chateigner, D., Downs, R. T., Yokochi, A. F., Quirós, M., Lutterotti, L., ... y Le Bail, A. (2009). Crystallography Open Database—an open-access collection of crystal structures. *Applied Crystallography*, 42(4), 726–729. <https://doi.org/bh5xwd>

- [34] Rietveld, H. M. (1969). A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Applied Crystallography*, 2(2), 65–71. <https://doi.org/cn4zw7>
- [35] Rodríguez-Carvajal, J., González-Platas, J., y Katcho, N. A. (2025). Magnetic structure determination and refinement using FullProf. *Structural Science*, 81(3), 302–317. <https://doi.org/rhg4>
- [36] Bonetto, R. D., Zalba, P. E., Conconi, M. S., y Manassero, M. (2003). The Rietveld method applied to quantitative phase analysis of minerals containing disordered structures. *Revista Geológica de Chile*, 30(1), 103–115. <https://doi.org/cpjd7r>
- [37] Hill, R. J., y Howard, C. J. (1987). Quantitative phase analysis from neutron powder diffraction data using the Rietveld method. *Applied Crystallography*, 20(6), 467–474. <https://doi.org/fqj5sr>
- [38] De Matos, P. R., Neto, J. A., Sakata, R. D., Kirchheim, A. P., Rodríguez, E. D., y Campos, C. E. M. (2022). Strategies for XRD quantitative phase analysis of ordinary and blended Portland cements. *Cement and Concrete Composites*, 131, 104571. <https://doi.org/rhg5>
- [39] Hökfors, B., Boström, D., Vigg, E., y Backman, R. (2015). On the phase chemistry of Portland cement clinker. *Advances in Cement Research*, 27(1), 50–60. <https://doi.org/f23pm6>
- [40] Lei, J., Shi, J., Peng, L., Xuan, D., Lu, J. X., Du, H., Moon, J., y Poon, C. S. (2025). Recycling of aluminosilicate solid wastes in a novel glass calcined clay cement (GC3). *Journal of the American Ceramic Society*, 108(9), e20666. <https://doi.org/rhg6>
- [41] Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. (2da. Ed.) México DF Limusa Wiley.

Estudio de hormigones con agregados livianos producidos localmente para aislamiento térmico

C. Martinefsky^{a*}, F. Daoud^b, S. Zito^a, M. Stipcich^b, A. Mocciaro^c, F. Irassar^a y A. Tironi^a

^aFacultad de Ingeniería - Investigación en Materiales (INMAT), Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN, CONICET-CICPBA-UNCPBA), CP B7400, Olavarría, Argentina. cmartinefsky@fio.unicen.edu.ar, irassar@fio.unicen.edu.ar, atironi@fio.unicen.edu.ar

^bFacultad de Ciencias Exactas - Instituto de Física de Materiales Tandil (IFIMAT), Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN, CONICET-CICPBA-UNCPBA), CP 7000, Tandil, Argentina. frandaoud@gmail.com, mstipci@exa.unicen.edu.ar

^cCentro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica (CETMIC, CONICET-CICPBA-UNLP), CP B1897, Manuel B. Gonnert, Argentina. anamocciaro@cetmic.unlp.edu.ar

Recibido: 8 de julio de 2026

Aceptado: 14 de agosto de 2026

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el comportamiento de un hormigón liviano elaborado con agregados livianos experimentales producidos a partir del destape de canteras de caliza de Buenos Aires y aceite industrial residual, y se comparó con dos agregados livianos comerciales internacionales. Se analizaron sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas con una dosificación volumétrica constante. Los hormigones livianos presentaron densidades aparentes entre 1510 y 1880 kg/m³ y conductividades térmicas entre 0,36 y 0,45 W/m.K. El hormigón con agregados experimentales presentó la menor densidad y la mayor capacidad de aislamiento térmico, aunque registró la menor resistencia a la compresión, debido a la menor resistencia del agregado liviano experimental. Estos resultados demuestran la viabilidad técnica de fabricar hormigones livianos con materias primas y pasivos ambientales locales, que ofrecen una alternativa para elementos destinados al aislamiento térmico y contribuyen a la eficiencia energética de las construcciones.

PALABRAS CLAVE: Hormigón liviano, agregados livianos, conductividad térmica

ABSTRACT

This study evaluated the performance of a lightweight concrete made using experimental lightweight aggregates produced from waste shales of limestone quarries in Buenos Aires and waste industrial oil. It was compared with two commercial lightweight aggregates from abroad. The physical, mechanical, and thermal properties of the concrete were analyzed using a constant volumetric mix design. The lightweight concrete had a bulk density ranging from 1510 to 1880 kg/m³ and a thermal conductivity ranging from 0.36 to 0.45 W/m.K. The concrete made with the experimental aggregates had the lowest density and the highest thermal insulation capacity, although its compressive strength was lower due to the lower strength of the experimental lightweight aggregate. These results demonstrate the technical feasibility of manufacturing lightweight concrete using locally sourced materials and environmental liabilities, offering an alternative solution for thermal insulation components and contributing to the energy efficiency of buildings.

KEYWORDS: Lightweight concrete, lightweight aggregates, thermal conductivity

*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Martinefsky, C., Daoud, F., Zito, S., Stipcich, M., Mocciaro, A., Irassar, F., y Tironi, A. (2026). Estudio de hormigones con agregados livianos producidos localmente para aislamiento térmico. *Revista Hormigón*, 70, 43–55. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/q2zbdkqfs>

1. Introducción

La reducción del consumo energético en edificios constituye uno de los principales desafíos para el sector de la construcción. En este contexto, los materiales con capacidad de aislamiento térmico adquieren especial relevancia debido a su contribución a la eficiencia energética. Entre ellos, los hormigones de baja densidad representan una alternativa atractiva con una menor conductividad térmica respecto de los hormigones convencionales. Los hormigones livianos presentan densidades secas comprendidas entre 400 y 2000 kg/m³, significativamente inferiores a las del hormigón tradicional (aproximadamente 2400 kg/m³). Esta reducción de peso permite disminuir las cargas permanentes de las estructuras, mejorar su comportamiento frente a sismos y reducir los costos de transporte. Dependiendo de su densidad y resistencia, pueden emplearse tanto en aplicaciones estructurales como en elementos destinados principalmente al aislamiento térmico [1–3].

El componente clave que influye en las propiedades del hormigón liviano es el tipo de agregado, donde los agregados livianos de arcilla expandida son los más utilizados a nivel mundial. Estos agregados se obtienen por expansión térmica de materias primas arcillosas y se caracterizan por presentar una estructura interna porosa que contribuye a reducir la densidad y la transferencia de calor. La densidad, absorción de agua, resistencia mecánica y morfología de estas partículas influyen directamente sobre el desempeño del hormigón resultante. En general, las normas de hormigón y mortero definen el agregado liviano como un material granular con una densidad de partículas que no supere los 2,0 g/cm³ o una densidad aparente suelta inferior a 1,2 g/cm³ [4–6], mientras que la norma IRAM 1567 limita este valor a 0,88 g/cm³ [7]. El agregado liviano ideal para usar en hormigón debería ser redondeado, con un diámetro de entre 4 mm y 14 mm, con un núcleo poroso y una corteza resistente, rugosa e impermeable que mejore la interfase entre la

pasta de cemento y el agregado [8]. Los agregados livianos de arcilla expandida presentan muchas ventajas como materiales componentes del hormigón: no son nocivos, tienen un pH cercano a 7, no se deterioran en contacto con el agua, no son biodegradables, resisten al fuego, pueden presentar actividad puzolánica en su superficie y, principalmente, ofrecen un excelente aislamiento térmico y acústico [1].

A pesar de la disponibilidad comercial de este tipo de materiales en numerosos países, como Leca, Liapor, Argex, Arcosa Lightweight y Lytag, actualmente no existe producción industrial de agregados livianos en Argentina. La mayoría de los agregados livianos comerciales se obtienen a partir de materias primas que contienen minerales arcillosos, mediante un proceso de granulación en un disco giratorio o por extrusión y sinterización en hornos rotativos a temperaturas máximas entre 1000 °C y 1300 °C [9,10]. Considerando que el destape de las canteras de caliza para la producción de cemento contiene minerales arcillosos, la producción de agregados livianos podría ser una alternativa para los hornos rotativos que actualmente no están operativos en las industrias cementeras. El aprovechamiento de un pasivo ambiental de gran volumen, como es el destape de canteras de caliza, es una alternativa que proporcionaría beneficios económicos, tecnológicos y medioambientales no solo a la industria regional, sino también a la investigación y el desarrollo de un tipo especial de hormigón para aislamiento térmico.

La pérdida de calor a través de paredes exteriores tiene un efecto directo sobre el consumo energético de las construcciones. El aire presente en los poros de los agregados livianos reduce la velocidad de transferencia de calor y mejora la capacidad de aislamiento térmico del hormigón. El contenido de humedad, la temperatura, el tipo de agregado, el tipo de material cementicio y la densidad del hormigón son factores que influyen en la conductividad térmica y, por lo tanto, en la capacidad de aislamiento térmico del hormigón

liviano [11]. En general, la conductividad térmica del hormigón liviano es aproximadamente la mitad que la del hormigón convencional, aunque esta mejora suele estar acompañada por una reducción de la resistencia mecánica [2,12].

En este trabajo se evalúa el comportamiento de un hormigón elaborado con agregados livianos producidos a partir del destape de cantera de caliza y se compara con hormigones elaborados utilizando dos agregados comerciales internacionales de diferente densidad. Se analizaron las propiedades físicas, mecánica y térmica de los hormigones, manteniendo una misma dosificación volumétrica, con el objetivo de determinar el potencial de los agregados livianos desarrollados localmente para aplicaciones de aislamiento térmico.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Los agregados livianos (AL) se elaboraron en el laboratorio a partir del destape de una cantera de caliza de la región de Olavarría (Buenos Aires) y un aceite residual como agente formador de poros. El aceite residual fue utilizado para la lubricación y refrigeración del reductor de un molino de cemento y descartado luego de los mantenimientos periódicos. Se elaboró una pasta de destape de cantera molido hasta pasante tamiz 150 μm , con 3,4 % p/p de aceite residual y 27 % de agua, que se agregó gradualmente hasta formar una pasta moldeable. Se moldearon manualmente esferas entre 4 mm y 6 mm de diámetro, se secaron a temperatura ambiente y luego en estufa a 105 °C. Las esferas fueron sinterizadas en mufla a 1185 °C, con un tiempo de permanencia de 10 minutos y posterior enfriamiento a temperatura ambiente [13–16]. Este tratamiento térmico permitió la expansión de los agregados y formación de poros. Para la comparación, se consideraron dos agregados livianos comerciales internacio-

nales de diferente densidad, denominados C4,5 y C6,5 en referencia a sus densidades aparentes sueltas, 0,45 y 0,65 g/cm^3 respectivamente. Los agregados livianos AL obtenidos en laboratorio se tamizaron y mezclaron en las proporciones necesarias para lograr una curva granulométrica en volumen similar al agregado comercial C4,5, con diámetros entre 4 mm y 8 mm. La curva granulométrica en peso se calculó considerando la densidad saturada y superficie seca (D_{SSS}) de cada fracción (Tabla 1). En los agregados de peso normal, los porcentajes retenidos en cada tamiz, indicados en peso o en volumen, son igualmente representativos, ya que la densidad no depende del tamaño de las partículas. En el caso de los agregados livianos, la densidad aumenta cuando disminuye el tamaño de las partículas (Tabla 1), ya que disminuye sensiblemente el volumen de poros en relación con el volumen de las esferas de agregado. Por este motivo, es el volumen y no el peso de cada fracción granulométrica el que determina el contenido de vacíos y, en consecuencia, el volumen de la pasta necesario para llenar dichos vacíos.

Se tomaron muestras representativas de los tres agregados livianos para su caracterización física y mecánica (Figura 1 y Tabla 1). La densidad aparente (D) y la absorción de agua a 24 horas (W) se determinaron mediante el método de picnometría con rejilla (EN-UNE 1097-6 [17]). El peso de los agregados livianos en estado suelto por unidad de volumen (PUV) se determinó mediante norma ASTM C29/C29M [18], donde no se considera en estado compactado para evitar la rotura de los agregados livianos. La resistencia a la compresión uniaxial (S) se midió en 30 agregados de cada muestra (10 agregados por fracción), en una máquina de ensayos universal INSTRON 5985, con una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min. La resistencia a compresión se calculó mediante la ecuación (1) [19,20] y se informa el promedio ponderado.

$$S = \frac{q}{\pi (d/2)^2} \quad (1)$$

donde q es la carga aplicada de rotura y d es el diámetro del agregado liviano.

El cemento utilizado para la elaboración de los hormigones livianos correspondió a un CPN40 (Tabla 2). La composición química y mineralógica se determinó mediante fluorescencia de rayos X (FRX) en un equipo Axios FAST PANalytical, con el cálculo de fases mineralógicas mediante las fórmulas de

Bogue [21]. Se determinó la densidad por norma IRAM 1624 [22] y la superficie específica BET por norma DIN ISO 9277 [23]. La distribución del tamaño de las partículas se midió con un granulómetro láser Malvern Mastersizer 2000 con una unidad de dispersión en seco. El cemento portland contiene clinker, un 5 % de yeso como modificador de fraguado y 4 % de caliza como filler. La pérdida por calcinación fue del 2,9 %.



Figura 1. Agregados livianos de laboratorio AL y comerciales C4,5, C6,5.

Tabla 1. Granulometría, propiedades físicas y mecánica de los agregados livianos (D = densidad aparente, D_{SSS} = densidad saturada y superficie seca, PUV = peso por unidad de volumen, W = absorción de agua, S = resistencia a compresión).

Agregado liviano		AL	C4,5	C6,5
		Densidad por fracción		
D (g/cm ³) en retenido sobre tamiz IRAM	6,3 mm (1/4")	0,46	0,69	1,09
	4,75 mm (#4)	0,59	0,79	1,11
	4,0 mm (#5)	0,81	0,98	1,16
D_{SSS} (g/cm ³) en retenido sobre tamiz IRAM	6,3 mm (1/4")	0,49	0,86	1,30
	4,75 mm (#4)	0,61	0,97	1,32
	4,0 mm (#5)	0,85	1,14	1,36
		Granulometría		
% retenido en volumen	6,3 mm (1/4")	0,46	0,69	1,09
	4,75 mm (#4)	0,59	0,79	1,11
	4,0 mm (#5)	0,81	0,98	1,16
% retenido en peso	6,3 mm (1/4")	0,49	0,86	1,30
	4,75 mm (#4)	0,61	0,97	1,32
	4,0 mm (#5)	0,85	1,14	1,36
		Propiedades físicas y mecánica		
D (g/cm ³)		0,56 ± 0,17	0,75 ± 0,14	1,10 ± 0,04
W (%)		5,0 ± 0,8	20,1 ± 3,8	18,6 ± 0,8
PUV (kg/m ³)		334	441	664
S (MPa)		0,9 ± 0,3	3,0 ± 1,2	7,4 ± 1,9

Tabla 2. Composición y propiedades del cemento portland.

Composición química, %		Composición mineralógica, %		Caracterización física	
SiO ₂	21,1	C ₃ S	60	Densidad, g/cm ³	3,14
Al ₂ O ₃	3,6	C ₂ S	15	Sup. BET, m ² /g	0,9
Fe ₂ O ₃	3,9	C ₃ A	3	d ₁₀ , µm	2,5
CaO	63,3	C ₄ AF	12	d ₅₀ , µm	24,3
MgO	0,8	Yeso	5	d ₉₀ , µm	71,3
SO ₃	3,0	Caliza	4		
K ₂ O	1,0				
Na ₂ O	0,1				
PxC	2,9				

El agregado fino utilizado fue una arena natural silíceea de río. El análisis granulométrico se realizó por tamizado según la norma IRAM 1505 [24] y se calculó el módulo de finura sumando los porcentajes retenidos acumulados. La curva granulométrica se analizó de acuerdo a los límites de la norma IRAM 1627 [25], quedando dentro del límite de la curva granulométrica continua C. La fracción dominante es la retenida en el tamiz N°50 (60 % entre 0,300 mm y 0,600 mm), con un módulo de finura de 1,76. Se determinó la densidad de la arena a través del método volumétrico de la norma IRAM 1520 [26], obteniendo un valor de 2,55 g/cm³.

2.2 Hormigones livianos

Para la dosificación de los hormigones livianos (HAL, HC4,5 y HC6,5), se utilizaron los tres tipos diferentes de agregados livianos (AL, C4,5 y C6,5). Se consideró el mismo volumen de agregados livianos como criterio para las tres mezclas (Tabla 3). Los hormigones se elaboraron con un contenido de cemento de 380 kg/m³ y una relación agua/cemento de 0,45. Los agregados livianos se prehumedecieron por inmersión en agua durante 24 horas antes de la preparación de las mezclas, con el objetivo de evitar modificaciones en la consistencia debidas a la absorción de agua de los agregados livianos. Antes del mezclado, se retiró el excedente de agua con un paño húmedo para lograr el

estado saturado superficie seca. El contenido de agregado liviano fue de 506 litros/m³ para todos los hormigones. A partir de los resultados de densidad aparente y absorción de agua de cada agregado liviano (Tabla 1), se calculó su dosificación en peso para las mezclas, resultando en 298 kg/m³ de AL, 456 kg/m³ de C4,5 y 660 kg/m³ de C6,5. El contenido de agregado fino fue de 515 kg/m³ y no se utilizaron aditivos. El mezclado se realizó manualmente para evitar la excesiva rotura de los agregados livianos por las paletas de la mezcladora y por el bajo volumen total de mezcla.

En estado fresco, se determinó la consistencia mediante el ensayo de asentamiento con el cono de Abrams siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1536 [27]. Debido al bajo volumen de mezcla disponible, se adaptaron las dimensiones del cono de Abrams, manteniendo las proporciones, a un cono de base inferior de 10 cm de diámetro, base superior de 5 cm de diámetro y altura de 15 cm. Se elaboraron probetas de 4 cm x 4 cm x 16 cm, llenando el molde en dos capas y apisonando la mezcla con varilla de acero

Tabla 3. Dosificación de los hormigones livianos.

Materiales	En volumen (litros/m ³)	En peso (kg/m ³)
Agregado liviano	506	(según agregado)
Agua	171	171
Cemento	121	380
Arena	202	515

luego de cada capa. Se curaron durante 24 horas en el molde en cámara húmeda a 20 °C. Después de desmoldarlas, se sumergieron en agua y se conservaron en la cámara hasta la edad de ensayo.

2.3 Propiedades de los hormigones livianos

Los hormigones elaborados fueron caracterizados mediante ensayos físicos y mecánico. Para determinar la densidad seca bruta, la densidad aparente, la absorción de agua y el volumen de poros permeables se siguió la norma ASTM C642 [28]. Las muestras de hormigón liviano, que habían sido curadas durante 28 días, se secaron a 110 °C por 24 horas, luego se sumergieron en agua durante 7 días y, por último, se hirvieron en agua durante 5 horas. En cada etapa, se pesaron las muestras para obtener las masas: seca, saturada superficie seca después de la inmersión, saturada superficie seca después de la ebullición y la masa sumergida aparente. El ensayo se realizó por triplicado para cada mezcla de hormigón liviano. La resistencia a compresión a los 28 días se midió según la norma IRAM 1622 [29], en cubos de 4 cm cortados a partir de los prismas curados en agua. Los resultados que se informan corresponden al promedio de tres determinaciones para cada hormigón liviano.

Se tomaron imágenes de un corte de los hormigones livianos con una lupa Leica S6D y una cámara Leica DMC4500.

2.4 Medición de la conductividad térmica

La conductividad térmica se midió mediante el ensayo de placa caliente [30]. El dispositivo utilizado determina la conductividad en un sistema tipo sándwich sobre dos muestras simultáneamente, como se observa en la Figura 2. Dos placas frías recubren a las muestras en estudio, que a su vez recubren una placa caliente. Las placas frías se mantienen refrigeradas con el paso de agua por su interior y la placa caliente consiste en una resistencia calefactora de potencia controlada desde el exterior. De este modo, una de las caras de la muestra se mantiene a una temperatura baja, regulada por la circulación de agua corriente, mientras que la otra cara de la muestra se mantiene a una temperatura mayor, establecida por la resistencia calefactora. Las temperaturas de las caras frías y calientes de las muestras se monitorean con 4 termocuplas tipo K. El dispositivo se colocó dentro de una caja de poliestireno expandido con las paredes, la base y la tapa recubiertas con una manta de alúmina de 1,5 cm de espesor para minimizar las pérdidas de calor. Una vez que el

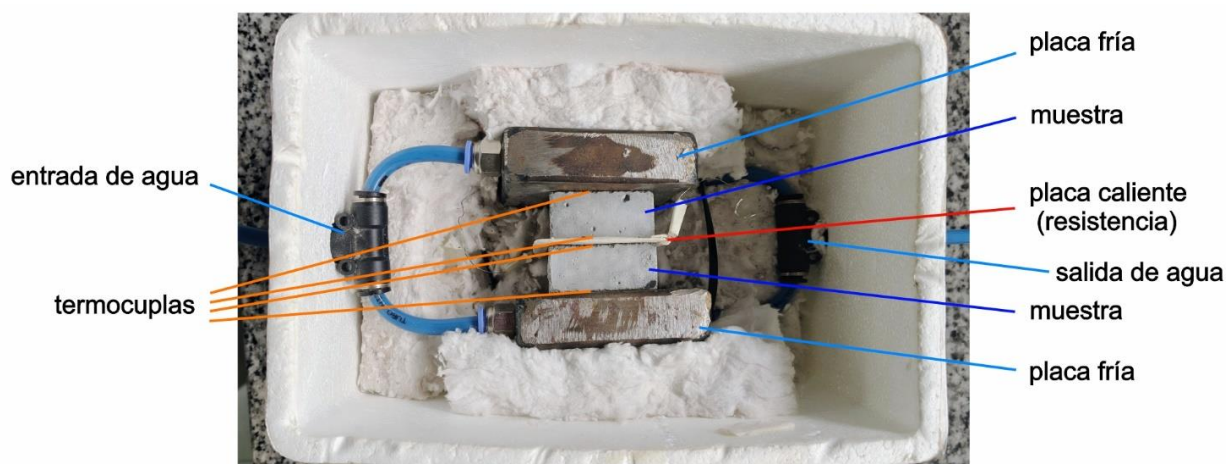


Figura 2. Dispositivo de medición de la conductividad térmica por el método de placa caliente.

dispositivo está en marcha, a través de cada muestra se genera un gradiente térmico que evoluciona hasta alcanzar un valor estacionario. El gradiente se monitorea a tiempo real mediante las termocuplas ubicadas en las caras de cada muestra, que están conectadas a un sistema tipo Arduino. El estado estacionario se alcanza luego de entre 1 y 3 horas de medida, en el que las temperaturas se estabilizan sin variaciones significativas, permitiendo asumir al gradiente térmico como uniforme y constante a lo largo del espesor de la muestra. Se analizaron muestras de 2 cm de espesor obtenidas mediante cortes de las probetas curadas durante 28 días, con un total de 6 muestras por tipo de hormigón liviano. Se realizaron al menos 3 ensayos por muestra variando la temperatura de la placa caliente mediante la variación de la potencia de la resistencia calefactora.

El coeficiente de conductividad térmica (λ , en W/m.K) se calcula a partir de la Ecuación (2):

$$\lambda = \frac{L \cdot P}{a \cdot \Delta T} \quad (2)$$

donde L es el espesor de la muestra (en m), P es la potencia térmica aplicada mediante una resistencia calefactora conectada a una diferencia de potencial conocida (en W), a es el área transversal de la muestra (en m²) y ΔT es la diferencia de temperatura entre las caras de la muestra (en K).

3. Resultados y discusión

3.1 Propiedades de los hormigones livianos

En estado fresco, todos los hormigones presentaron un bajo asentamiento: 0 cm para HAL, 1,5 cm para HC4,5 y 0,8 cm para HC6,5. En la Tabla 4 se resumen las propiedades determinadas para los hormigones livianos en estado endurecido. Tanto la densidad seca bruta como la densidad aparente del hormigón HAL son menores que las de los hormigones con agregados comerciales HC4,5 y HC6,5, lo cual es consistente con el menor valor de densidad aparente determinada para los agregados AL (Tabla 1). Una menor densidad del hormigón liviano implica una disminución de las cargas permanentes sobre la estructura, lo que resulta en un beneficio económico y también permite construir sobre terrenos menos resistentes sin recurrir a cimentaciones complejas y costosas [31]. Si bien la absorción de agua es similar, el volumen de poros permeables es menor en el hormigón HAL, en comparación con los hormigones con agregados comerciales, lo que podría indicar una contribución de los agregados en esta propiedad.

La resistencia a compresión del hormigón HAL es menor que la de los hormigones HC4,5 y HC6,5, siguiendo la misma tendencia que la resistencia a compresión de los agregados livianos (Tabla 1). La Figura 3 muestra las probetas al finalizar el ensayo de resistencia a

Tabla 4. Propiedades de las mezclas de hormigón liviano.

Propiedad	HAL	HC4,5	HC6,5
Densidad seca bruta (kg/m ³)	1270 ± 20	1350 ± 10	1530 ± 20
Densidad aparente (kg/m ³)	1510 ± 30	1700 ± 20	1880 ± 10
Absorción de agua después de inmersión (%)	10,1 ± 0,2	11,6 ± 0,9	10,5 ± 0,4
Volumen de poros permeables (%)	15,9 ± 0,2	20,5 ± 0,2	19,0 ± 0,8
Resistencia a compresión (MPa)	11,2 ± 1,1	16,6 ± 1,3	23,8 ± 1,0

compresión, corroborando que la rotura se produjo por los agregados, siendo estos los determinantes de la resistencia a compresión alcanzada en el hormigón liviano. Thienel et al. [6] informaron la relación entre la

resistencia a compresión y la densidad seca para hormigones livianos (HL) realizados con arena normal y agregados livianos, arena liviana y agregados livianos y hormigones livianos de alta performance. En la Figura 4, se

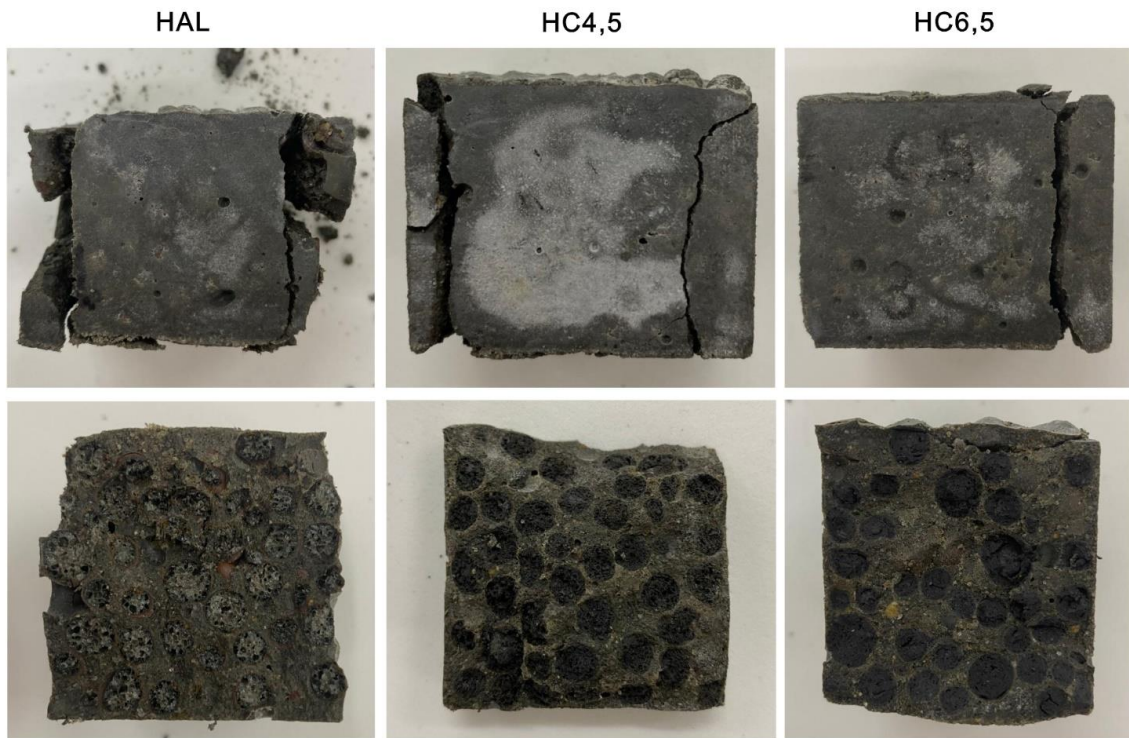


Figura 3. Rotura de los hormigones livianos por resistencia a compresión.

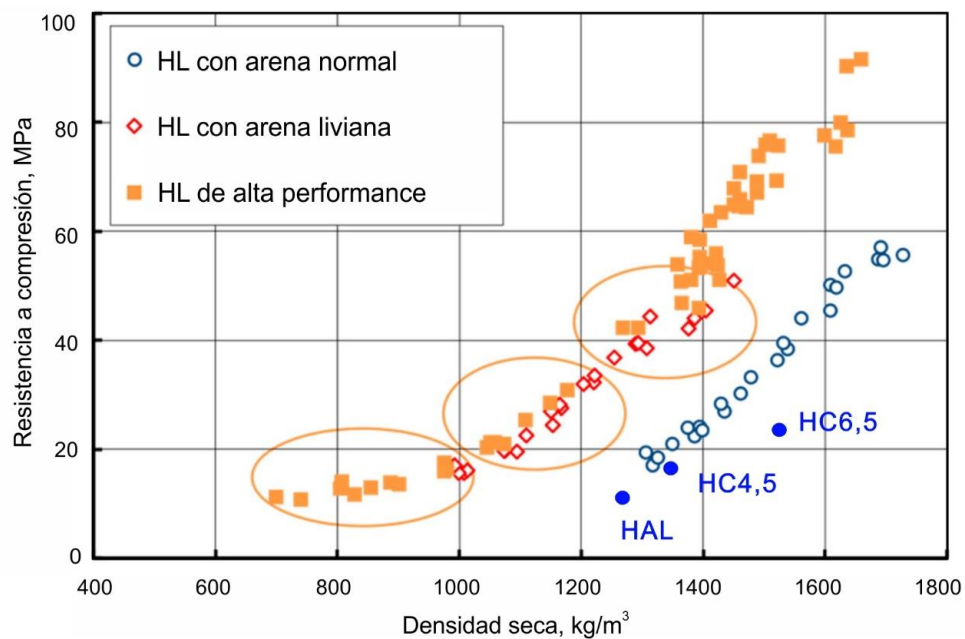


Figura 4. Correlaciones de resistencia a compresión a 28 días en función de la densidad seca. Adaptado de Thienel et al. [6].

observa que los hormigones livianos estudiados siguen la misma tendencia de los informados para hormigones livianos con arena normal. El hormigón HAL presenta una resistencia menor a 17,0 MPa, recomendada para hormigón estructural, pero su valor es superior al rango entre 4,0 y 7,0 MPa correspondiente a la clasificación de hormigones livianos con resistencia moderada [32]. Si bien el hormigón HC6,5 cumple con la resistencia requerida para hormigón liviano estructural, presenta una resistencia un poco menor a la esperada para su densidad.

En la Figura 5 se observa un corte transversal de los hormigones livianos y sus imágenes en lupa, pudiendo distinguir claramente el agregado de la matriz debido a la diferencia en la coloración. Se observa una distribución uniforme de los agregados livianos lo que indica una buena cohesión de la matriz. Para los tres hormigones se identifica la presencia de pasta hidratada en los poros abiertos de la corteza del agregado, lo que indicaría una buena unión física, corroborando que la rotura durante el ensayo de resistencia a compresión se produjo por el agregado.

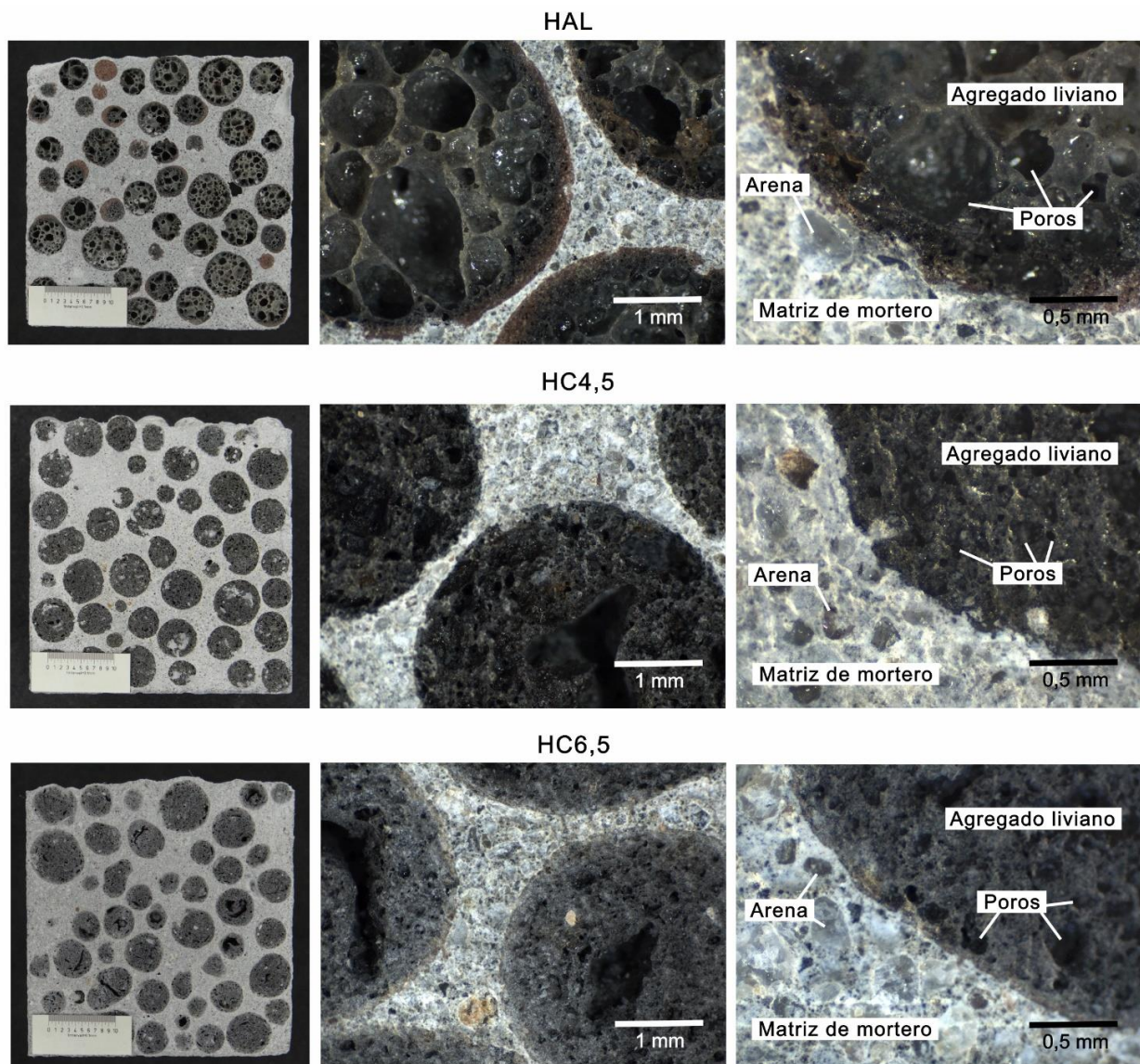


Figura 5. Corte transversal e imágenes en lupa de los hormigones livianos.

3.2 Conductividad térmica

La conductividad térmica determinada en los hormigones livianos se encuentra en el rango de 0,3 a 0,5 W/m.K, obteniendo el menor valor para el hormigón HAL ($0,36 \pm 0,06$ W/m.K), seguido de HC4,5 ($0,42 \pm 0,06$ W/m.K) y HC6,5 ($0,45 \pm 0,07$ W/m.K). Es posible relacionar la conductividad térmica con la densidad seca: a mayor densidad seca, la conductividad térmica se incrementa, por lo tanto, disminuye la capacidad de aislamiento térmico. En la Figura 6 se muestran los valores de conductividad térmica de los hormigones livianos recopilados y estudiados por Asadi et al. [11] y la línea de tendencia propuesta para la relación de estas propiedades. Se observa que, para igual densidad seca, se obtuvieron menores valores de conductividad térmica en los hormigones livianos estudiados. Un menor valor de conductividad térmica es favorable para el uso del hormigón liviano como material aislante térmico [33]. Un aumento de la resistencia a compresión del hormigón HAL para su uso con fines estructurales, implicaría un aumento de la

densidad, lo que conllevaría a una disminución de su capacidad de aislamiento térmico (mayor conductividad térmica).

A partir de la medición de la conductividad térmica de los hormigones livianos, se puede determinar la transmitancia térmica de muros y cerramientos en función del espesor de los diferentes materiales de la envolvente, lo que define el acondicionamiento térmico de las edificaciones. Cavalline et al. [34] estudiaron hormigones livianos similares y, mediante la simulación en un modelo sencillo de estructura, obtuvieron un ahorro energético del 15-17 % en calefacción y del 10 % en refrigeración en un hormigón estructural con agregados livianos y arena normal, con una densidad de 1981 kg/m^3 . Por su parte, el hormigón con agregados y arena liviana, con una densidad de 1709 kg/m^3 , permite un ahorro energético de aproximadamente el 35-40 % en calefacción y del 30 % en refrigeración. La densidad aparente obtenida en el hormigón liviano HAL de este trabajo es inferior, por lo que el ahorro energético podría ser mayor.

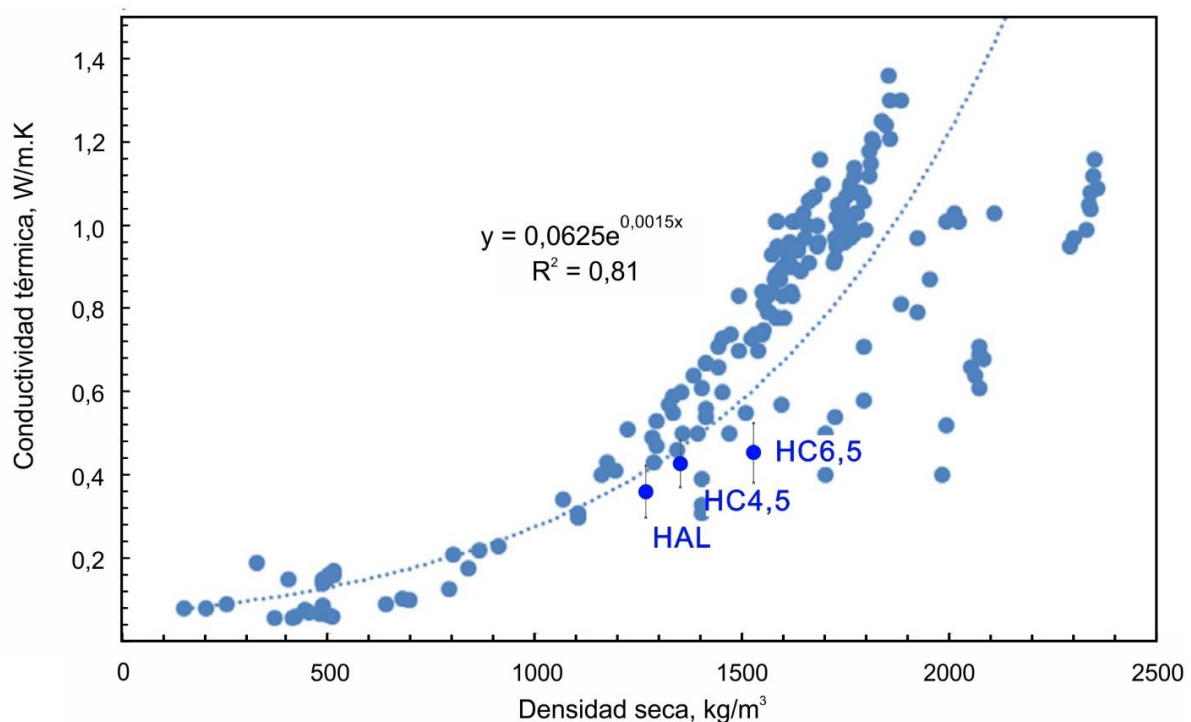


Figura 6. Conductividad térmica en función de la densidad seca. Adaptado de Asadi et al. [10].

4. Conclusiones

Fue posible producir, a escala de laboratorio, agregados livianos a partir del destape de cantera de caliza de la provincia de Buenos Aires y aceite industrial residual, con características técnicas comparables a los agregados livianos comerciales internacionales. A partir de los agregados livianos obtenidos, se elaboró un hormigón liviano y se comparó con otros dos hormigones livianos con igual formulación en volumen y dos tipos diferentes de agregados livianos comerciales. Los resultados obtenidos permitieron relacionar la densidad aparente de los agregados livianos con la conductividad térmica del hormigón liviano, determinando que una disminución en la densidad favorece al aumento en la capacidad de aislamiento térmico. El hormigón liviano con los agregados experimentales presentó la menor densidad y mayor capacidad de aislamiento térmico. Otra característica técnica favorable desde el punto de vista durable es el menor volumen de poros permeables, sin embargo, presentó el menor valor de resistencia a compresión. Debido a que la rotura de los hormigones livianos ocurrió por el agregado liviano, un aumento de la resistencia a compresión implicaría un aumento de la densidad de los agregados, lo que conllevaría a una disminución de su capacidad de aislamiento térmico.

Los resultados obtenidos en estos primeros ensayos muestran que es posible producir hormigón liviano con capacidad de aislamiento térmico, utilizando un pasivo ambiental como materia prima. Como consideración a futuro, se espera poder evaluar la capacidad de aislamiento acústico de los hormigones livianos y evaluar la relación de ambas propiedades con la estructura porosa y densidad de los agregados livianos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Ing. María Beatriz Silverii (CPA, CONICET) por su colaboración en las imágenes en lupa.

Fuentes de financiamiento

Este trabajo fue posible gracias al apoyo recibido por el CONICET (PIP 2021-2023, 11220200102895CO).

Contribución de autoría

C. Martinefsky: conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, redacción-original-borrador, visualización. F. Daoud: investigación, análisis formal, redacción-revisión-edición. S. Zito: investigación, metodología, redacción-revisión-edición. M. Stipcich: metodología, recursos, redacción-revisión-edición. A. Mocciaro: investigación, redacción-revisión-edición. F. Irassar: metodología, redacción-revisión-edición, adquisición de fondos. A. Tironi: conceptualización, redacción-original-borrador, supervisión, adquisición de fondos.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

Referencias

- [1] Rashad, A. M. (2018). Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Construction and Building Materials*, 170, 757–775. <https://doi.org/gg85f2>
- [2] Omran, Ş. (2024). A Review of Lightweight Concrete in Civil Engineering. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 14(4), 378–404. <https://doi.org/rmnb>
- [3] Behera, D., Liu, K. Y., Rachman, F., y Worku, A. M. (2025). Innovations and Applications in Lightweight Concrete: Review of Current Practices and Future Directions. *Buildings*, 15(12), 2113. <https://doi.org/rmnc>
- [4] Asociación Española de Normalización y Certificación (2004). UNE-EN 13055-1. *Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado*.

- [5] González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., y Rodas, M. (2014). Effect of prefiring and firing dwell times on the properties of artificial lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 53, 91–101. <https://doi.org/rmnd>
- [6] Thienel, K. C., Haller, T., y Beuntner, N. (2020). Lightweight Concrete—From Basics to Innovations. *Materials*, 13(5), 1120. <https://doi.org/mb2j>
- [7] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2008). *IRAM 1567. Agregados livianos para hormigón estructural*.
- [8] Cheeseman, C. R., y Viridi, G. S. (2005). Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 45(1), 18–30. <https://doi.org/drv9zx>
- [9] Dondi, M., Cappelletti, P., D'Amore, M., De Gennaro, R., Graziano, S. F., Langella, A., Raimondo, M., y Zanelli, C. (2016). Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating. *Construction and Building Materials*, 127, 394–409. <https://doi.org/rmng>
- [10] Ren, P., Ling, T. C., y Mo, K. H. (2021). Recent advances in artificial aggregate production. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125215. <https://doi.org/gnvqxw>
- [11] Asadi, I., Shafigh, P., Abu Hassan, Z. F. B., y Mahyuddin, N. B. (2018). Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering*, 20, 81–93. <https://doi.org/ghtxh8>
- [12] Zhang, P., Wang, L., Wei, H., y Wang, J. (2021). A Critical Review on Effect of Nanomaterials on Workability and Mechanical Properties of High-Performance Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 8827124. <https://doi.org/rmnh>
- [13] Ozguven, A., y Gunduz, L. (2012). Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 34(6), 781–787. <https://doi.org/mb2d>
- [14] Moreno-Maroto, J. M., González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., Rodríguez, L., y Acosta, A. (2017). Manufacturing of lightweight aggregates with carbon fiber and mineral wastes. *Cement and Concrete Composites*, 83, 335–348. <https://doi.org/gfvqnn>
- [15] Lee, K. H., Lee, J. H., Wie, Y. M., y Lee, K. G. (2019). Bloating Mechanism of Lightweight Aggregates due to Ramping Rate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 1–12. <https://doi.org/rmni>
- [16] Cobo-Ceacero, C. J., Moreno-Maroto, J. M., Guerrero-Martínez, M., Uceda-Rodríguez, M., López, A. B., Martínez García, C., y Cotes-Palomino, T. (2023). Effect of the addition of organic wastes (cork powder, nut shell, coffee grounds and paper sludge) in clays to obtain expanded lightweight aggregates. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 62(1), 88–105. <https://doi.org/rmnk>
- [17] Asociación Española de Normalización y Certificación (2003). *EN-UNE 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*.
- [18] ASTM International (2023). *ASTM C29/C29M. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.
- [19] Sooksaen, P., y Karawatthanaworrakul, S. (2015). The properties of Southern Thailand clay-based porous ceramics fabricated from different pore size templates. *Applied Clay Science*, 104, 295–302. <https://doi.org/f6zq92>
- [20] Anaya, R., Martínez, J. M., Hernández, M. F., Herrea, M. S., y Rendtorff, N. M. (2022). Individual diametral compression behavior of a ceramic proppant. *Ceramics International*, 48(21), 32357–32365. <https://doi.org/mb2h>
- [21] Neville, A. M. (1988). *Tecnología del concreto: Tomo 1*. Editorial Limusa S.A.
- [22] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2005). *IRAM 1624. Cemento Portland. Método de ensayo para la determinación de la densidad*.
- [23] German Institute for Standardization. (2014). *DIN ISO 9277. Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method*.
- [24] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2003). *IRAM 1505. Agregados. Análisis granulométrico*.
- [25] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1997). *IRAM 1627. Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones*.

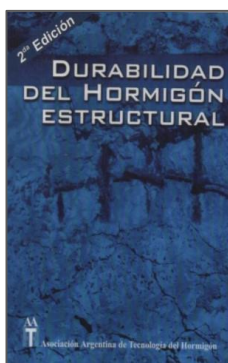
- [26] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002). *IRAM 1520. Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.*
- [27] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002). *IRAM 1536. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono.*
- [28] ASTM International (1997). *ASTM C642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.*
- [29] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002). *IRAM 1622. Cemento Pórtland. Determinación de resistencias mecánicas.*
- [30] Daoud, F. (2025). *Análisis de la mejora del aislamiento térmico en viviendas, utilizando placas de cemento alivianadas con Poliestireno Expandido recuperado.* [Disertación Trabajo Final, Licenciatura en Tecnología Ambiental, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25721.17768>
- [31] Farina, I., Moccia, I., Salzano, C., Singh, N., Sadrolodabae, P., y Colangelo, F. (2022). Compressive and Thermal Properties of Non-Structural Lightweight Concrete Containing Industrial Byproduct Aggregates. *Materials*, 15(11), 4029. <https://doi.org/rmnn>
- [32] Traversa, L. P. (2004). Hormigones estructurales con agregados livianos. En E. F. Irassar (Ed.), *Hormigones especiales* (pp. 253–278). Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- [33] Shafigh, P., Asadi, I., Akhiani, A. R., Mahyuddin, N. B., y Hashemi, M. (2020). Thermal properties of cement mortar with different mix proportions. *Materiales de Construcción*, 70(339), e224. <https://doi.org/rmnp>
- [34] Cavalline, T. L., Gallegos, J., Castrodale, R. W., Freeman, C., Liner, J., y Wall, J. (2021). Influence of Lightweight Aggregate Concrete Materials on Building Energy Performance. *Buildings*, 11(3), 94. <https://doi.org/g52txt>

LIBROS A LA VENTA



Ese material llamado HORMIGÓN

Editoras, Noemí Graciela Maldonado y María Fernanda Carrasco



DURABILIDAD DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL (2da Ed.)

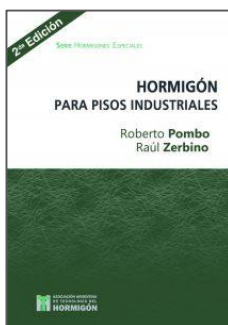
Editor, Edgardo F. Irassar



HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (2da Ed.)

Serie Hormigones Especiales

Editor, Raúl Zerbino



HORMIGÓN PARA PISOS INDUSTRIALES (2da Ed. ampliada)

Serie Hormigones Especiales

Editores, Roberto Pombo y Raúl Zerbino

Los libros pueden adquirirse individualmente y también, se ofrecen diferentes combos.
Para consultar los precios puede acceder al link: <https://www.aath.org.ar/publicaciones/>

Para adquirir los libros comunicarse con la dirección de e-mail: aath@aath.org.ar

ESTAMOS EN CADA ETAPA DE TU OBRA



WWW.
CEMENTOS
AVELLANEDA.
COM.AR





INSTITUTO DEL CEMENTO
PORTLAND ARGENTINO

INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO

LÍDERES EN INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA



CAPACITACIONES



CERTIFICACIÓN ACI
LABORATORISTA
DE HORMIGÓN



MANUALES Y
GUÍAS TÉCNICAS



INTERLABORATORIO
DE CEMENTOS



TODO PROYECTO COMIENZA CON UNA BASE.

**EN LOMAX SABEMOS CÓMO
CONSTRUIRLAS PARA SIEMPRE.**

LOMAX, EL HORMIGÓN DE LOMA NEGRA.

 Loma Negra

 Loma Negra

 lomanegra_oficial

www.lomanegra.com



PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

La revista Hormigón publica artículos originales que abordan temas de interés y trascendencia en el campo de la Tecnología del Hormigón entre los que se encuentran: desarrollo científicos-tecnológicos, ejecución de obras de hormigón, evaluación de estructuras de hormigón, uso de materiales regionales o alternativos, nuevas técnicas de ensayo, control de calidad.

Posee periodicidad semestral, publicándose un número en el mes de marzo (cubriendo el período marzo-agosto) y otro en el mes de septiembre (cubriendo el período septiembre-febrero). Los números, se publican de forma periódica el día 10 (hábil) del mes de marzo y septiembre.

Desde el 2021 se puede acceder a los artículos de forma online y con acceso abierto a través de la página web de la revista (www.revistahormigon.org). En el mismo enlace podrá encontrar las instrucciones para autores.

Los artículos deberán enviarse a la dirección de e-mail: revistahormigon@gmail.com