

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.

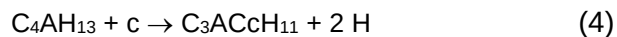
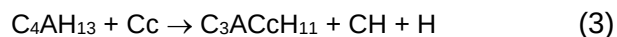
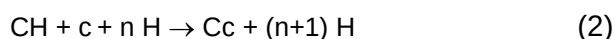
El método más utilizado para cuantificar la captación de CO_2 es el análisis térmico diferencial y termo-gravimétrico (ATD-TG), tanto en pastas de cal como de cemento. En estos trabajos se informa la captación de CO_2 a partir de la cantidad de fases carbonatadas formadas, pero no el valor de CO_2 captado [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 CuK α (λ = 0,154 nm), monocromador de grafito operando a 35 kV y 15 mA, en un rango de escaneo de 10° a 40° 2 θ (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.

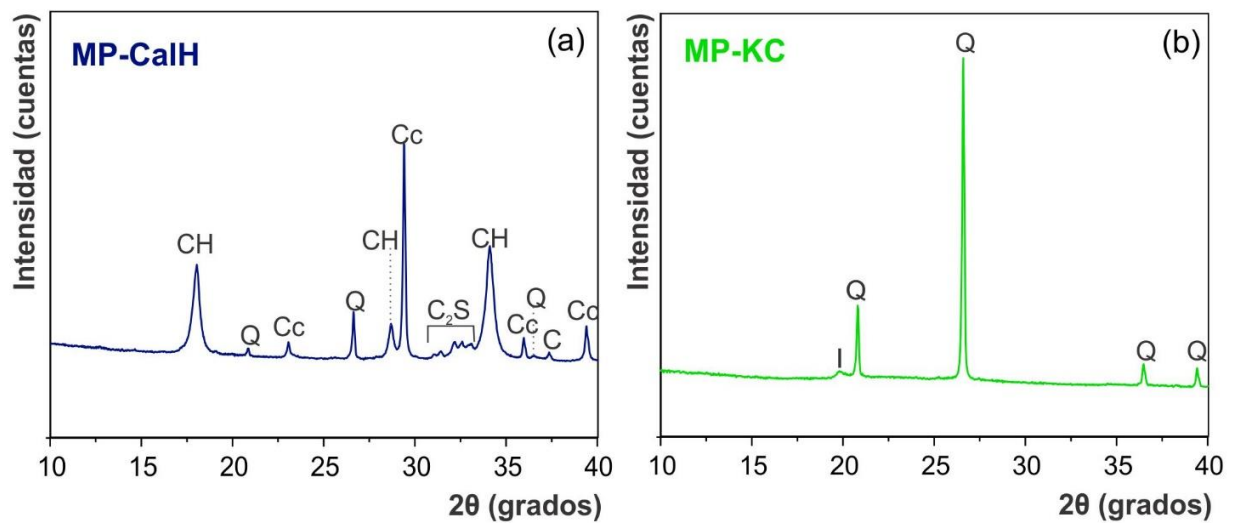


Figura 1. Difractogramas de las materias primas: (a) cal hidráulica (MP-CalH) y (b) arcilla caolínica calcinada (MP-KC). CH: portlandita; Q: cuarzo; Cc: calcita; C₂S: silicato di cálcico; CaO: óxido de calcio; I: illita.

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 capacitación 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, $\%WMP_{550-950}$ 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 Sartorius 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

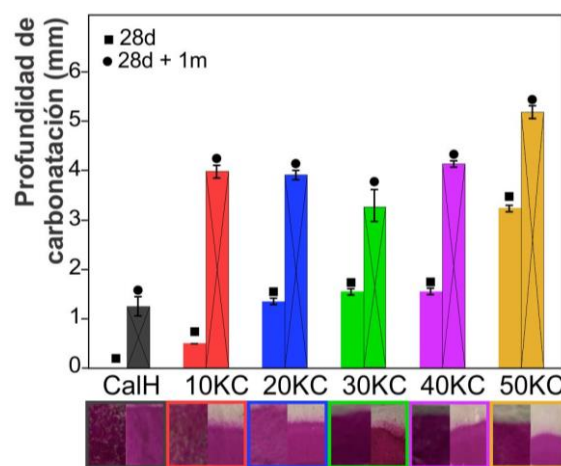


Figura 2. Perfiles y profundidades de carbonatación (mm).

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.

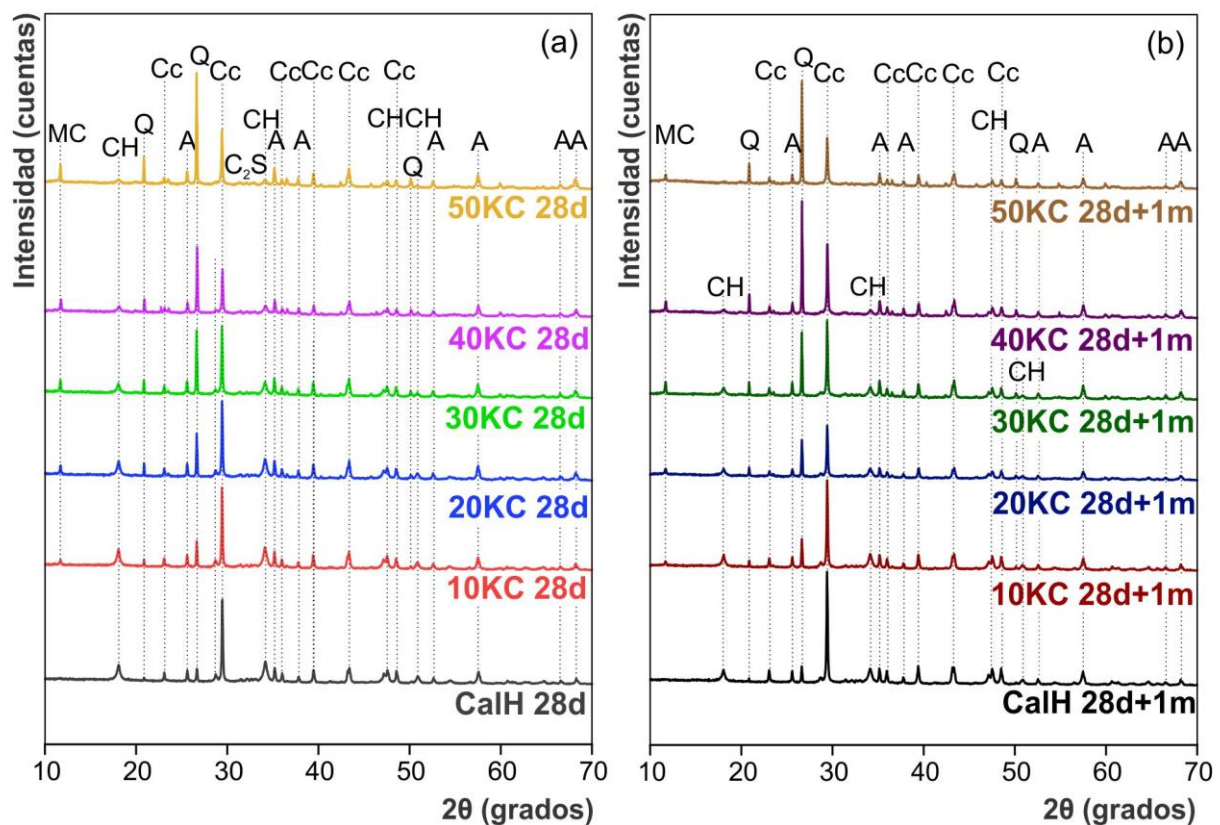


Figura 3. Difractogramas de las pastas hidratadas y carbonatadas: (a) 28 días y (b) 28 días y un mes carbonatación. MC: monocarboaluminato cálcico, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$; CH: portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$; Q: cuarzo, SiO_2 ; Cc: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

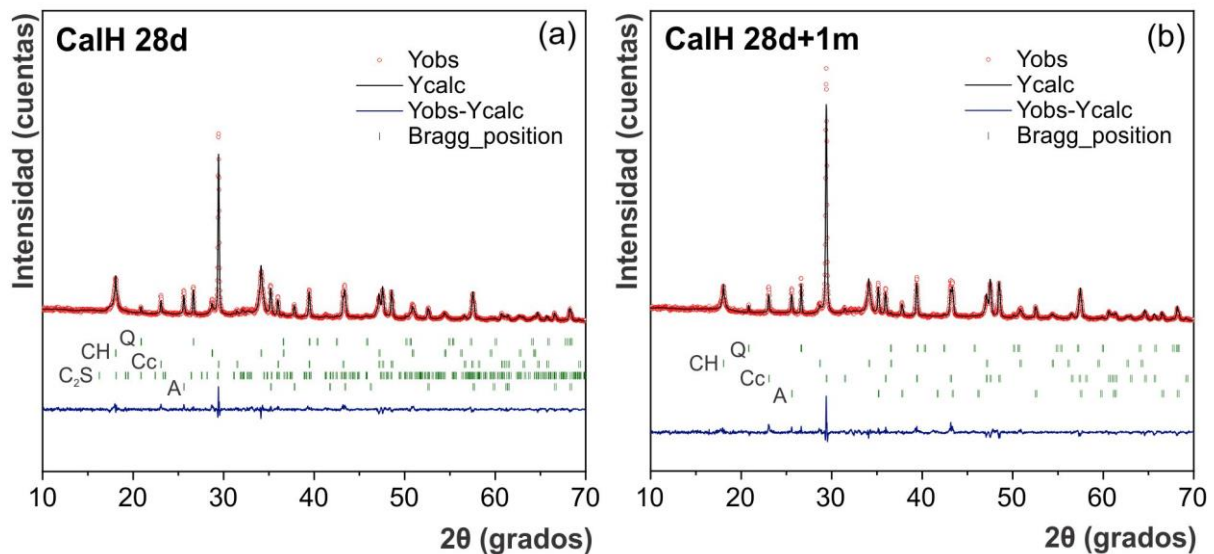


Figura 4. Difractograma refinado de las pastas de CalH: (a) 28 días y (b) 28 días y un mes carbonatación.

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

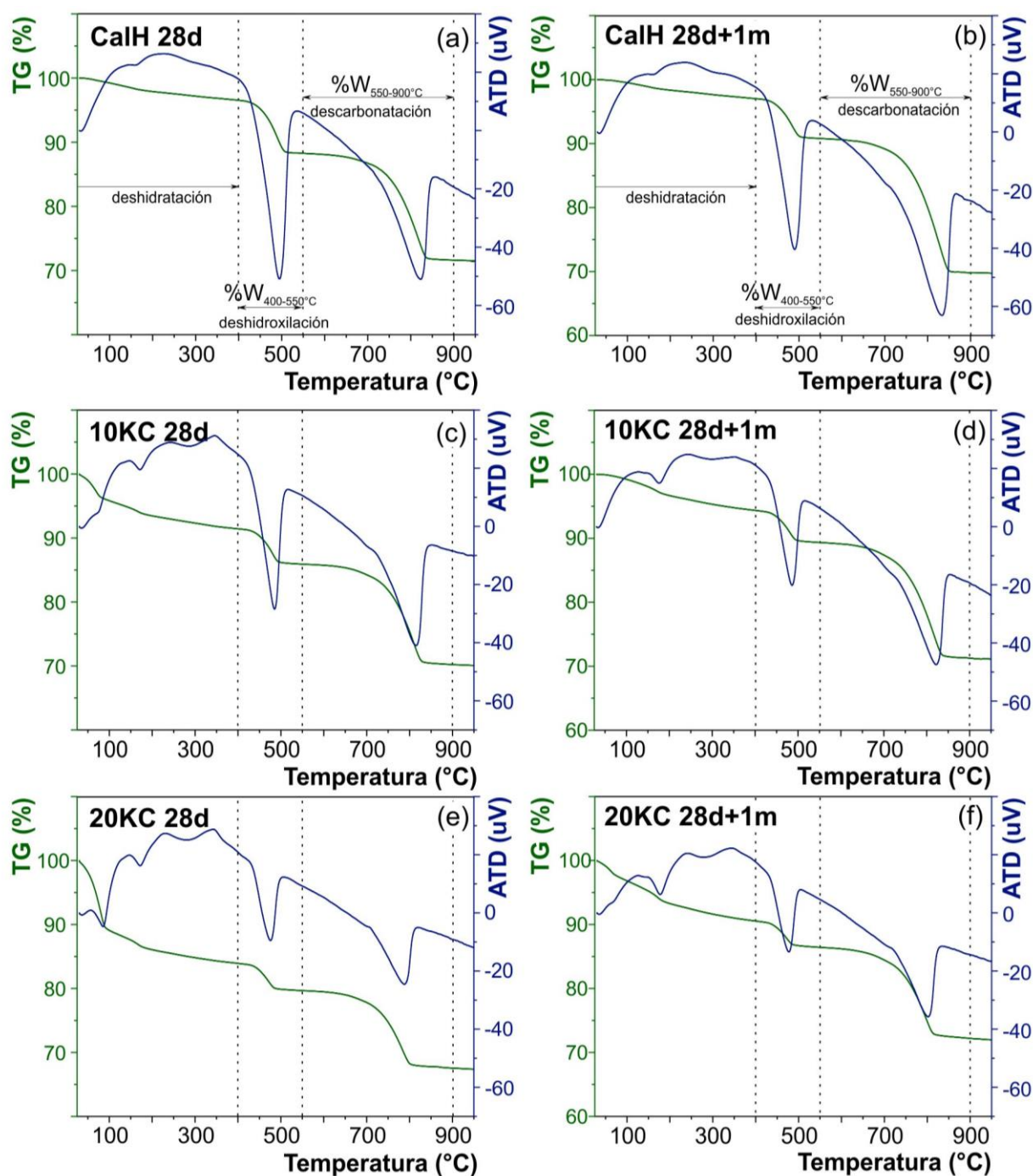


Figura 5. Curva ATD-TG para pastas: (a) CalH 28d, (b) CalH 28d+1m, (c) 10KC 28d, (d) 10KC 28d+1m, (e) 20KC 28d y (f) 20KC 28d+1m.

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

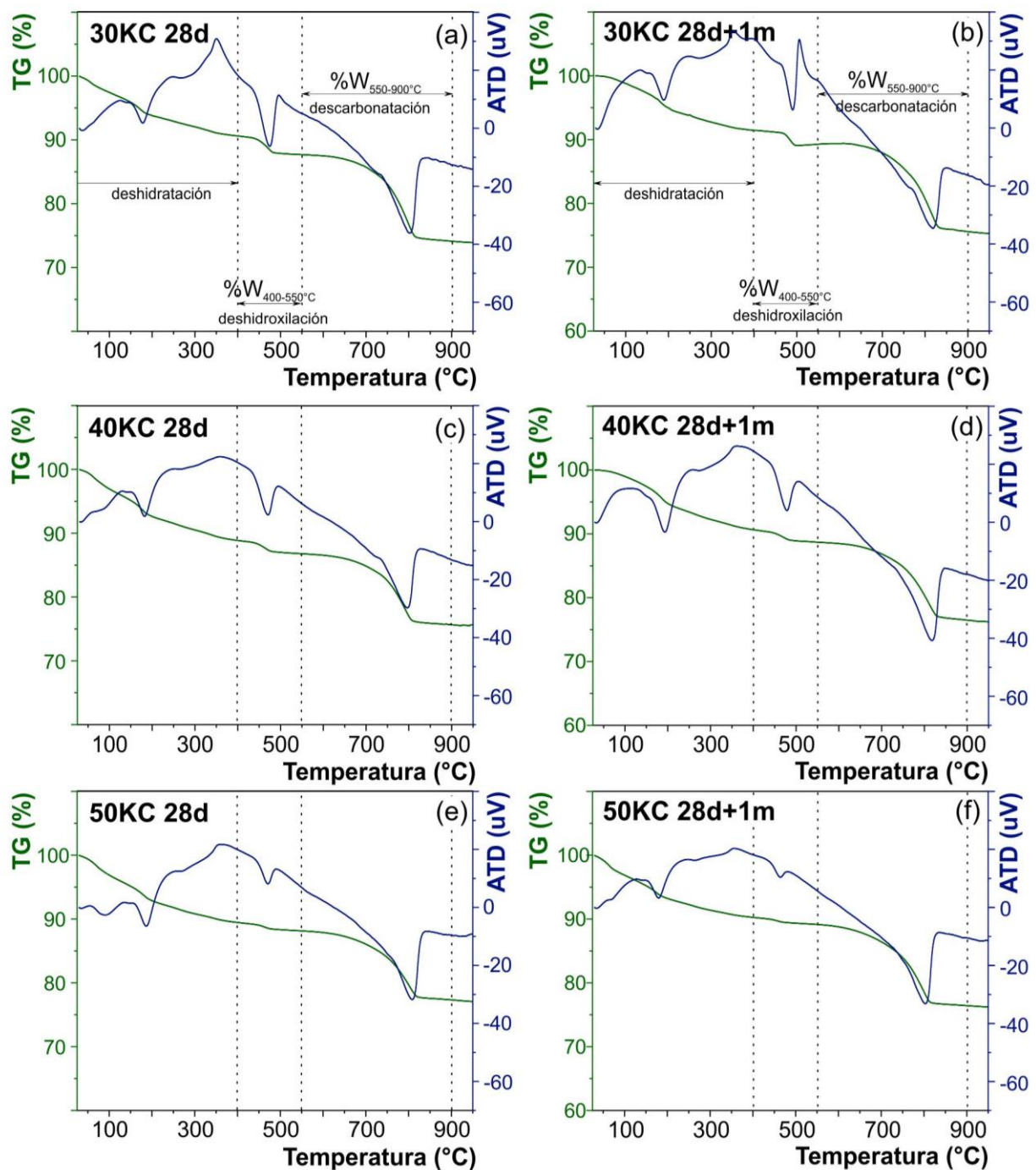


Figura 6. Curva ATD-TG para pastas: (a) 30KC 28d, (b) 30KC 28d+1m, (c) 40KC 28d, (d) 40KC 28d+1m, (e) 50KC 28d y (f) 50KC 28d+1m.

(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

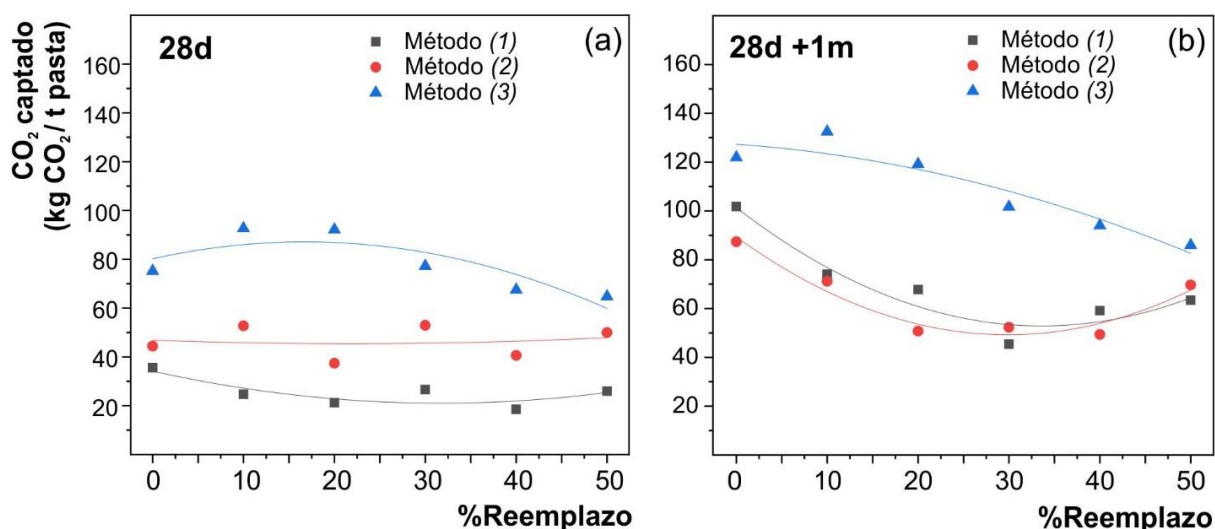


Figura 7. CO₂ captado para cada método en función del porcentaje de arcilla de reemplazo en las pastas hidratadas y carbonatadas: (a) 28 días y (b) 28 días y un mes carbonatación.

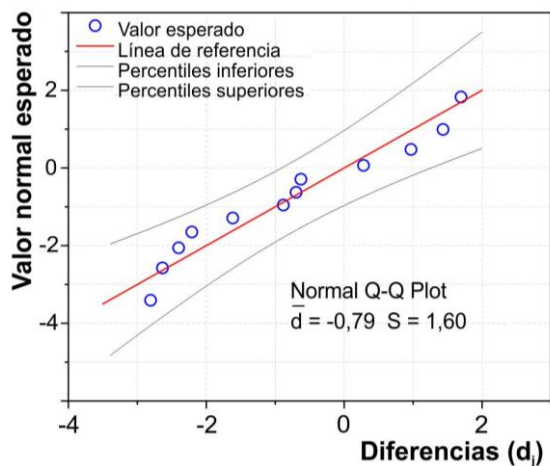


Figura 8. Gráfico Q-Q normal de las diferencias.

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/rhgq>
- [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/rhgq>
- [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/cqk3ts>
- [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.