

## Pastas elaboradas con cal hidráulica y arcillas calcinadas: análisis de la captación de CO<sub>2</sub> ambiental

Luisina Aristarán<sup>1</sup>, Cecilia Paulo<sup>1</sup> & Alejandra Tironi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA-CICPBA-CONICET), Argentina. [luisina.aristaran@fio.unicen.edu.ar](mailto:luisina.aristaran@fio.unicen.edu.ar), [cpaulo@fio.unicen.edu.ar](mailto:cpaulo@fio.unicen.edu.ar), [atironi@fio.unicen.edu.ar](mailto:atironi@fio.unicen.edu.ar)

**RESUMEN.** Durante el proceso de producción de cal hidráulica se liberan emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por otro lado, en el uso de dicho material como materia prima en pastas y morteros, a partir del contacto de portlandita (CH) y CO<sub>2</sub> difundido a través de la estructura, ocurre la reacción de carbonatación bajo la acción del agua. El objetivo de este trabajo es evaluar cómo el reemplazo parcial de cal hidráulica (CaH) por arcillas calcinadas, de diferente reactividad puzolánica en pastas, afecta a la captación de CO<sub>2</sub> ambiental. Como materias primas se utilizó CaH y dos tipos de arcillas calcinadas, caolinita calcinada (KC) con mayor actividad puzolánica e illita calcinada (IC) con actividad puzolánica más lenta. Las pastas se elaboraron por triplicado, incorporando de manera individual ambos tipos de arcillas calcinadas en diferentes porcentajes de reemplazo (0 - 50%). Para realizar un análisis comparativo, se prepararon dos grupos de muestras denominadas (i) e (ii), ambos grupos fueron almacenados en cámara húmeda por 28 días y luego de ese período, al grupo (i) se le frenó la hidratación con isopropanol y el grupo (ii) fue expuesto a carbonatación natural durante 1 mes. El seguimiento de la carbonatación en todos los casos fue realizado utilizando distintas técnicas: difracción de rayos X (DRX), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), ensayo termogravimétrico y perfil de carbonatación por fenolftaleína. Se concluye que el agregado de arcilla calcinada como reemplazo parcial de la cal hidráulica en pastas, afecta la captación de CO<sub>2</sub> ambiental: si se utiliza IC aumenta la captación; mientras que cuando se utiliza KC, con mayor actividad puzolánica, esta afecta en forma negativa la captación de CO<sub>2</sub> ambiental.

**Palabras clave:** *Cal Hidráulica; Arcilla Caolínica Calcinada; Arcilla Illítica Calcinada; Hidratación; Carbonatación; Dióxido de Carbono*

**ABSTRACT.** Pastes elaborated using hydraulic lime and calcined clays: analysis of capture of environmental CO<sub>2</sub>. During production of hydraulic lime, CO<sub>2</sub> emissions are released into the atmosphere. On the other hand, the use of hydraulic lime as raw material for pastes and mortars allows a carbonation reaction to occur due to water action, owing to the contact of portlandite (CH) and CO<sub>2</sub> diffused through the structure. This work aims to evaluate how the partial replacement of hydraulic lime by calcined clays of different pozzolanic reactivity in pastes affects the capture of environmental CO<sub>2</sub>. Hydraulic lime and two types of calcined clays, calcined kaolinite (KC) with more pozzolanic activity and calcined illite (IC) with slower pozzolanic activity, were used as raw materials. The pastes were made in triplicate, individually incorporating both types of calcined clays in different replacement percentages (0 - 50%). In order to perform a comparative analysis, two groups of samples were made, denominated (i) and (ii); both groups were stored in a humid room for 28 days and

subsequently stored in isopropanol to stop the hydration process for the group (i) and the group (ii) was exposed to natural carbonation for one month. Carbonation was monitored using different techniques: X-ray diffraction analysis (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis, and phenolphthalein carbonation profile. It can be concluded that the addition of calcined clays as a partial replacement of hydraulic lime in pastes, affects the environmental CO<sub>2</sub> capture: the use of IC increases the capture; meanwhile, the use of KC, with more pozzolanic activity, negatively affects the environmental CO<sub>2</sub> capture.

**Keywords:** *Hydraulic Lime; Kaolinite Calcined Clay; Illite Calcined Clay; Hidratation; Carbonation; Carbon Dioxide*

**RESUMO. Pastas elaboradas com cal hidráulica e argilas calcinadas: análise da captura de CO<sub>2</sub> ambiental.** Durante o processo de produção de cal hidráulica são liberadas emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Por outro lado, ao utilizar esse material como matéria-prima em pastas e argamassas, a partir do contato da portlandita (CH) e do CO<sub>2</sub> difundido pela estrutura, ocorre a reação de carbonatação sob a ação da água. O objetivo deste trabalho é avaliar como a substituição parcial da cal hidráulica (CalH) por argilas calcinadas, de diferentes reatividades pozolânicas em pastas, afeta a captura de CO<sub>2</sub> ambiental. Foram utilizados como matéria-prima CalH e dois tipos de argilas calcinadas, caulinita calcinada (KC) com maior atividade pozolânica e illita calcinada (IC) com atividade pozolânica mais lenta. As pastas foram preparadas em triplicata, incorporando individualmente os dois tipos de argilas calcinadas em diferentes percentuais de substituição (0 - 50%). Para realização de uma análise comparativa, foram preparados dois grupos de amostras denominados (i) e (ii), ambos os grupos foram armazenados em câmara úmida por 28 dias e após esse período o grupo (i) teve a hidratação impedida com isopropanol e o grupo (ii) foi exposto à carbonatação natural por 1 mês. O monitoramento da carbonatação em todos os casos foi realizado utilizando diferentes técnicas: difração de raios X (XRD), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), ensaio termogravimétrico e perfil de carbonatação por fenolftaleína. Conclui-se que a adição de argila calcinada como substituto parcial da cal hidráulica em pastas afeta a captura de CO<sub>2</sub> ambiental: se for utilizado IC, a captura aumenta, enquanto quando KC é utilizada, com maior atividade pozolânica, afeta negativamente a captura de CO<sub>2</sub> ambiental.

**Palavras-chave:** *Cal Hidráulica; Argila Caulínica Calcificada; Argila Ilítica Calcificada; Hidratação; Carbonatação; Dióxido de carbono*

## Introducción

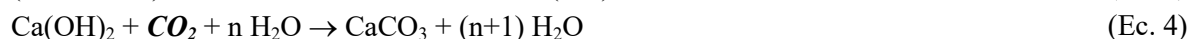
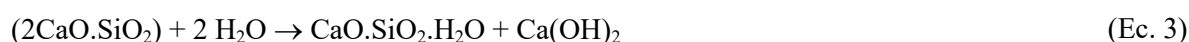
Para la construcción de edificios en la antigua Roma se hacía uso de cal hidráulica y materiales puzolánicos en morteros. En la actualidad, este tipo de morteros se encuentran presentes en estructuras históricas y en edificios que datan del siglo XIX y de principios del siglo XX (Lanas *et al.*, 2004). Con el desarrollo de la tecnología del cemento el uso de la cal en la industria de la construcción disminuyó, debido a que el cemento posee propiedades de fraguado y endurecimiento rápido, buena resistencia al agua y alta resistencia mecánica. Sin embargo, desde la década de 1980, con el aumento de la necesidad de protección y reparación de obras y edificios históricos, surge la comparación entre ambos materiales y se reconocen propiedades favorables de la cal hidráulica (Zhang *et al.*, 2020).

La cal hidráulica (CalH) es obtenida a partir de la calcinación (1000°C-1250°C) de la piedra caliza y arcilla en menor proporción, y posterior hidratación (Lanas *et al.*, 2004). Durante la calcinación se produce cal viva (CaO) y se emite CO<sub>2</sub> (Ec. 1); luego se hidrata el CaO para obtener Ca(OH)<sub>2</sub> (cal apagada) (Ec. 2) y se procede a la molienda. Durante la producción se generan emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la descarbonatación de la calcita (CaCO<sub>3</sub>, principal mineral constituyente de la caliza) y a la energía necesaria para la calcinación y molienda (combustible y eléctrica). Las emisiones provenientes de la etapa de calcinación constituyen un 70% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> asociadas a la producción de cal y no pueden ser modificadas (EuLA, 2017).



En los últimos años el foco de la industria de la construcción apunta hacia la sostenibilidad, por este motivo, es que ha crecido el interés en disminuir el impacto al medio ambiente utilizando materiales con menor huella de carbono. El desarrollo de nuevas formulaciones de materiales que disminuyan las emisiones de CO<sub>2</sub>, la emisión de polvo al ambiente, y el consumo de agua se ha convertido en una prioridad para los próximos años, así como también aquellas investigaciones que permitan una mejor comprensión de los aspectos fisicoquímicos, mecánicos y durables de dichos materiales.

Las fases mineralógicas presentes en la CalH son el silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S, 2CaO.SiO<sub>2</sub>), que le proporciona el carácter hidráulico al reaccionar con agua y producir gel de tobermorita (C-S-H, CaO.SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) (Ec. 3, hidratación); portlandita (CH, Ca(OH)<sub>2</sub>), responsable del endurecimiento por contacto con el CO<sub>2</sub> ambiental bajo la acción del agua (Ec. 4, carbonatación); y la calcita (Cc, CaCO<sub>3</sub>) (Zhang *et al.*, 2020).

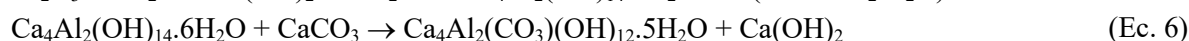


La reacción de carbonatación en pastas y morteros ocurre por la difusión del CO<sub>2</sub> ambiental a través de la estructura de poro y su disolución en el agua de poro capilar, donde reacciona con el Ca(OH)<sub>2</sub> y ocurre la precipitación de cristales de CaCO<sub>3</sub>, esto es conocido como mecanismo de endurecimiento. El perfil de carbonatación en morteros de cal es de aproximadamente 190 mm en 100 años, siendo más rápida en el primer período: 20 mm en 400 días. Si se considera para el cálculo de la huella de carbono de estos materiales la carbonatación (Ec. 4), esta podría reducirse en un 17% (EuLA, 2017).

Las puzolanas son materiales silicoaluminosos que no poseen actividad hidráulica por sí solos, ni propiedades cementicias, sin embargo, al combinarse con el Ca(OH)<sub>2</sub> a temperatura ambiente y en presencia de agua dan lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos, lo que se denomina reacción puzolánica (Murat, 1983).

A partir de la activación térmica de arcillas es posible obtener materiales puzolánicos, la temperatura de este proceso varía según el mineral arcilloso presente (Yanguatin *et al.*, 2019). Para el caso de la caolinita, la deshidroxilación y formación de fase amorfa reactiva se produce entre los 500 y 800°C, mientras que para la illita se necesita una temperatura mayor, aproximadamente 950°C (Tironi *et al.*, 2012; Cordoba *et al.*, 2020; Tironi *et al.*, 2022). Ambas temperaturas son inferiores a la de clinkerización (~1450 °C) y a la de producción de cal hidráulica (~1100 °C) lo que implica un menor consumo de energía y, además, no se libera CO<sub>2</sub> durante el proceso de activación térmica.

En la Ec. 5 se muestra la reacción puzolánica para arcilla caolinítica calcinada, uno de los productos es C-S-H. En el caso que el contenido de aluminio sea elevado, parte del mismo se incorpora en el gel de tobermorita formando C-A-S-H y se forma también una fase hidratada aluminica cristalina, que en presencia de calcita forma monocarboaluminato cálcico hidratado (MC, Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)(OH)<sub>12</sub>.5H<sub>2</sub>O) (Ec. 6, formación de MC) (Matschei *et al.*, 2007).



El reemplazo de cal hidráulica por arcillas calcinadas contribuiría a disminuir la emisión de CO<sub>2</sub> al utilizar menor cantidad de este material, pero afectaría también la captación del CO<sub>2</sub> ambiental (Ec. 4), pudiendo aumentar, mantenerse o disminuir debido a la competencia del uso de Ca(OH)<sub>2</sub> como reactivo en la reacción puzolánica (Ec. 5) o como reactivo en la carbonatación (Ec. 4), por lo cual el objetivo principal de este trabajo

es analizar que sucede con la captación de CO<sub>2</sub> ambiental y las propiedades del material cuando se varía el porcentaje de reemplazo de cal hidráulica por arcillas calcinadas.

### Materiales y Métodos

Para la elaboración de pastas se utilizaron como materias primas cal hidráulica natural (CalH) y dos tipos de arcillas calcinadas (AC): una con mayor actividad puzolánica y elevado contenido de aluminio (caolinita calcinada, KC) y otra con actividad puzolánica más lenta (illita calcinada, IC). En la Tabla 1 se presenta la composición química de la cal hidráulica y de las arcillas calcinadas, obtenida a partir de fluorescencia de rayos X (XRF). Las fases mineralógicas presentes en la cal hidráulica y en las arcillas calcinadas se identificaron mediante difracción de rayos X (DRX) empleando un equipo Bruker D2 PHASER.

**Tabla 1.** Composición química de la cal hidráulica y de las arcillas calcinadas en porcentaje en masa.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
<b>CalH</b>	16,39	2,18	1,26	76,42	0,75	0,63	0,56	-
<b>KC</b>	71,70	23,90	1,00	0,30	0,30	0,10	0,70	0,50
<b>IC</b>	60,80	15,60	12,00	4,30	1,10	-	5,50	-

Se prepararon pastas con diferentes formulaciones en moldes de 28 mm de diámetro y 10 mm profundidad, variando el porcentaje de reemplazo de cal hidráulica por KC o IC. Los porcentajes de reemplazo utilizados en el análisis variaron del 0% al 50% en peso y se mantuvo una relación constante en peso de agua / (CalH o CalH+AC) igual a 0,62, valor que asegura una fluidez en morteros según lo requerido por norma IRAM 1695. Previo a la incorporación del agua, las distintas mezclas de materiales sólidos fueron homogeneizadas con movimientos rotatorios.

Se elaboraron dos grupos de muestras de pastas con la misma composición (i-ii), ambos fueron almacenados sin cubrir durante 28 días en cámara húmeda (20°C y 80% humedad), luego de ese período al segundo grupo (ii) se lo expuso a carbonatación natural durante 1 mes en ambiente exterior rural protegido de la lluvia. Para el grupo (i) se detuvo la hidratación luego de los 28 días de almacenamiento en cámara húmeda, y para el grupo (ii) luego de transcurridos los 28 días de hidratación y el período de 1 mes de carbonatación natural. En ambos grupos se detuvo el proceso de hidratación-carbonatación utilizando alcohol isopropílico. Se identificaron las fases presentes utilizando difracción de rayos X (DRX, equipo Bruker D2 phaser) y espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR, espectrómetro Nicolet Magna 500). El contenido de Ca(OH)<sub>2</sub> y CaCO<sub>3</sub> fue determinado mediante termogravimetría.

Finalmente se midió la profundidad de carbonatación utilizando un calibre y como indicador fenolftaleína, la cual es incolora en medio ácido o cercano al neutro (pH < 8,2). El color rosado comienza a ser visible a pH cercano a 8,2 y cambia de color completamente a pH 9,8. Para detectar la carbonatación se rocía una solución de fenolftaleína en la superficie recién cortada de la pasta, la región no carbonatada es la zona color rosa, lo que indica la presencia alcalina de la portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>), mientras que en las áreas incoloras se indica que la portlandita fue carbonatada a calcita manteniendo el color de la pasta. Este método se utiliza para determinar la evolución del frente o perfil de carbonatación en el tiempo (Despotou *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2016).

### Resultados y Discusión

#### Caracterización de materias primas

Los difractogramas de la cal hidráulica y de las arcillas calcinadas se presentan en la Figura 1 (rango 5-40 grados 2θ). La cal hidráulica está constituida por portlandita (CH, hidróxido de calcio, tarjeta COD 96-100-

1788), calcita (Cc, carbonato de calcio, tarjeta COD 96-900-9669) y en menor proporción por silicato dicálcico ( $C_2S$ , tarjeta COD 96-901-2795), óxido de calcio (CaO, tarjeta COD 96-900-8606) y cuarzo (Q, tarjeta COD 96-900-9667). En las arcillas calcinadas se identifican las fases cristalinas cuarzo en KC e IC, y hematita (H, tarjeta COD 96-101-1241) en IC. Los picos correspondientes a los minerales arcillosos caolinita e illita, no se identifican en las arcillas calcinadas, corroborando la deshidroxilación y formación de fase amorfa, la cual le otorga el carácter puzolánico a estos materiales (Tironi *et al.*, 2012).

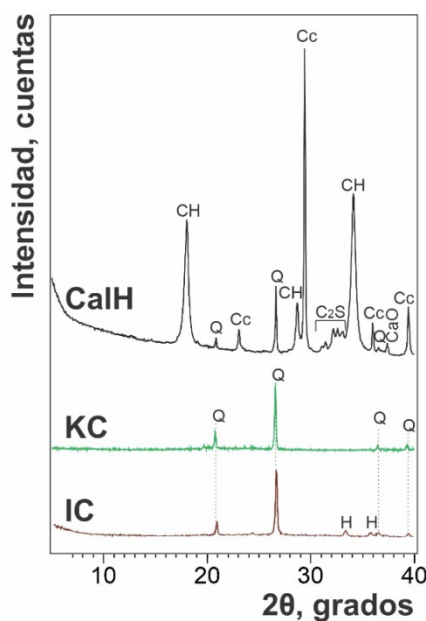


Figura 1. DRX de materias primas, rango 5-40 grados  $2\theta$ . (CH: portlandita, Q: cuarzo, Cc: calcita,  $C_2S$ : silicato dicálcico, CaO: óxido de calcio, H: hematita).

### Identificación de fases en pastas hidratadas y carbonatadas

Mediante DRX se identificaron en todas las pastas las siguientes fases cristalinas: portlandita (CH), cuarzo (Q), calcita (Cc) y monocarboaluminato (MC, tarjeta COD 96-100-0460), los difractogramas se presentan en las Figuras 2-5. Los picos asignados al cuarzo, correspondiente a una impureza en las materias primas (Fig. 1), tienen mayor intensidad a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de cal hidráulica por arcillas calcinadas. La intensidad de los picos asignados a la calcita es elevada en todas las pastas, a pesar de la menor cantidad de cal hidráulica en las pastas elaboradas con arcillas calcinadas, y en todos los casos aumenta en el grupo (ii) respecto al grupo (i), mostrando el avance de la carbonatación (Ec. 4). En las pastas elaboradas con IC se observa, para ambos grupos, mayor contenido de Cc respecto a las pastas elaboradas con KC.

Se observa menor intensidad de los picos asignados a la portlandita (CH) en las pastas elaboradas con arcillas calcinadas, disminuyendo a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo. Para las pastas elaboradas con KC se identifica monocarboaluminato cálcico hidratado (MC), producto obtenido cuando la reacción puzolánica se lleva a cabo en presencia de calcita (Antoni *et al.*, 2012) y el contenido de aluminio en la fase amorfa es elevado (Tabla 1).

El menor contenido de portlandita en las pastas elaboradas con arcillas calcinadas y la disminución a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo, se corrobora mediante FTIR (Figs. 6-9) a partir del análisis de la banda a  $3642\text{ cm}^{-1}$  (Hartmann *et al.*, 2014). Para todas las muestras la intensidad de la banda asignada a OH en CH es menor en el grupo (ii) respecto al (i), mostrando la disminución del contenido de CH debido a la reacción puzolánica (Ec. 5) y a la carbonatación (Ec. 4). Cuando se compara dentro del grupo (ii), en las muestras con IC la disminución de la intensidad de la banda asignada a OH en CH es mucho mayor respecto de las muestras con KC. Se identifica la formación de C-S-H (Hartmann *et al.*, 2014) como producto de hidratación del  $C_2S$  (Ec. 3) y de la reacción puzolánica entre el CH y las arcillas calcinadas (Ec. 5) (Figs. 6-9). En las pastas elaboradas con KC se identifica la banda asignada a C-A-S-H (Fujita *et al.*, 2002) y la formación de MC (banda

de estiramiento O-H a  $3676\text{ cm}^{-1}$ ) (Hidalgo *et al.*, 2009), siendo mayor la intensidad de esta banda cuanto mayor es el porcentaje de reemplazo para ambos grupos.

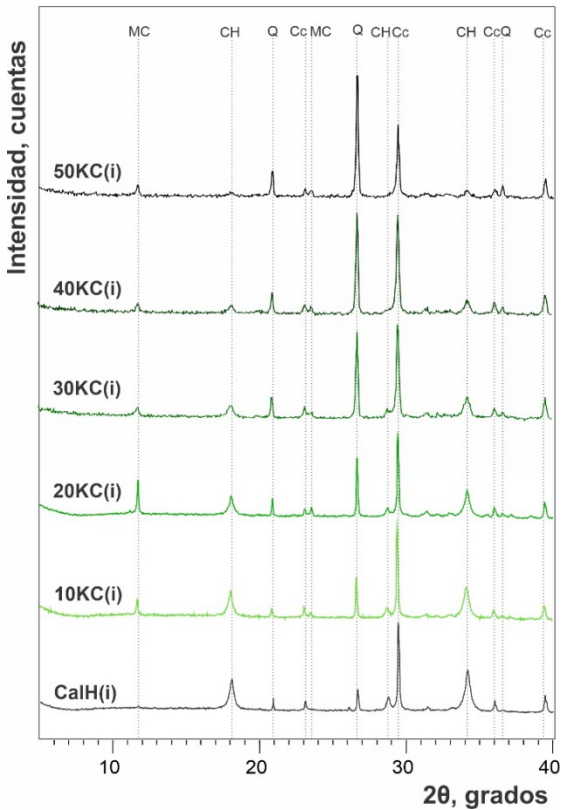


Figura 3. DRX pastas grupo (i) serie caolinita.

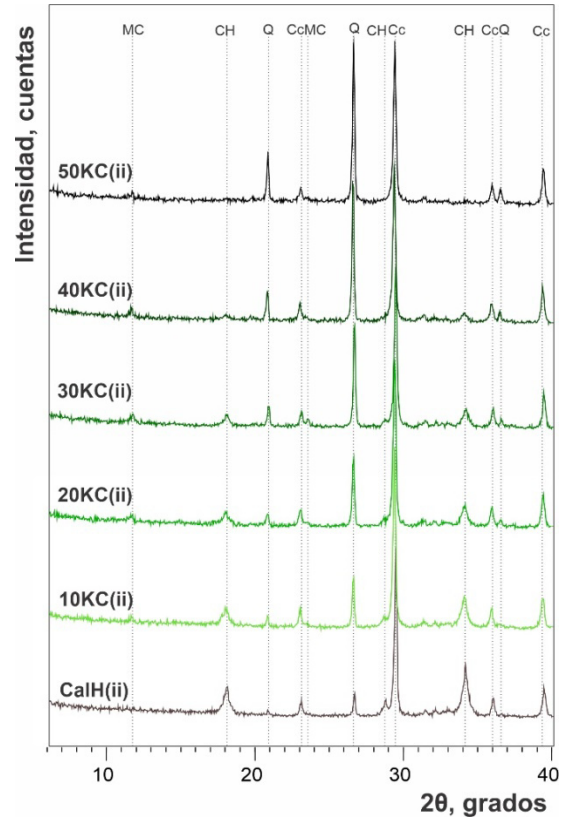


Figura 2. DRX pastas grupo (ii) serie caolinita.

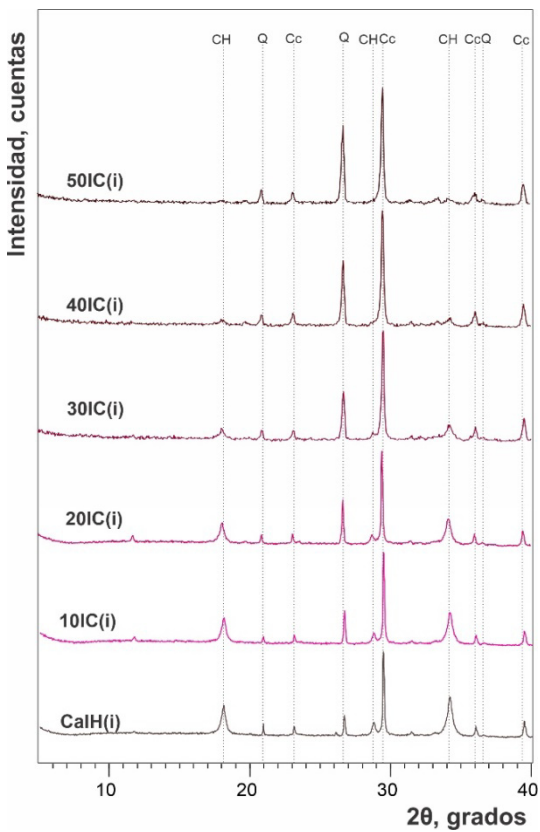


Figura 5. DRX pastas grupo (i) serie illita.

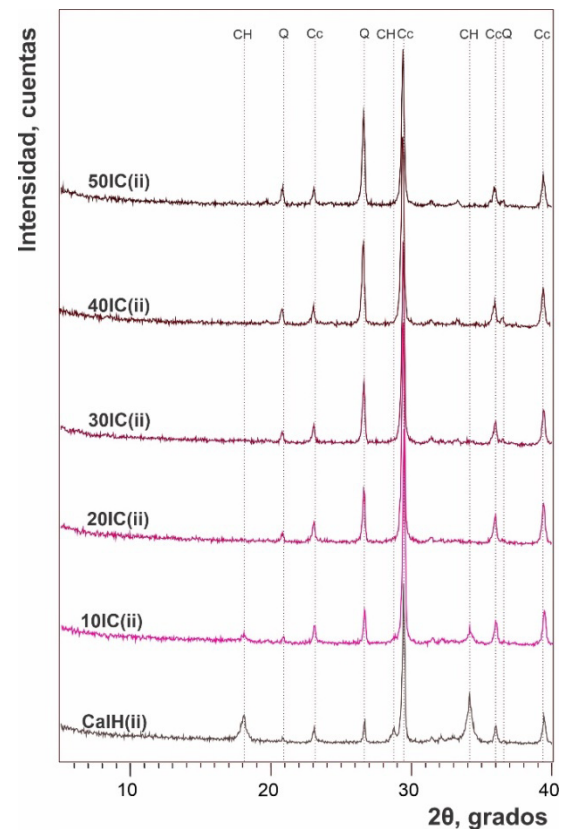


Figura 4. DRX pastas grupo (ii) serie illita.

2023, Volumen 8, Número 2: 122-131

---

Dossier

“5tas. Jornadas Nacionales de Investigación Cerámica”

Editores invitados: Diego Richard, María Guillermina Couso, María Florencia Serra & Nicolás M. Rendtorff

## Pastas elaboradas con cal hidráulica y arcillas calcinadas: análisis de la captación de CO<sub>2</sub> ambiental

Luisina Aristarán<sup>1</sup>, Cecilia Paulo<sup>1</sup> & Alejandra Tironi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA-CICPBA-CONICET), Argentina. [luisina.aristaran@fio.unicen.edu.ar](mailto:luisina.aristaran@fio.unicen.edu.ar), [cpaulo@fio.unicen.edu.ar](mailto:cpaulo@fio.unicen.edu.ar), [atironi@fio.unicen.edu.ar](mailto:atironi@fio.unicen.edu.ar)



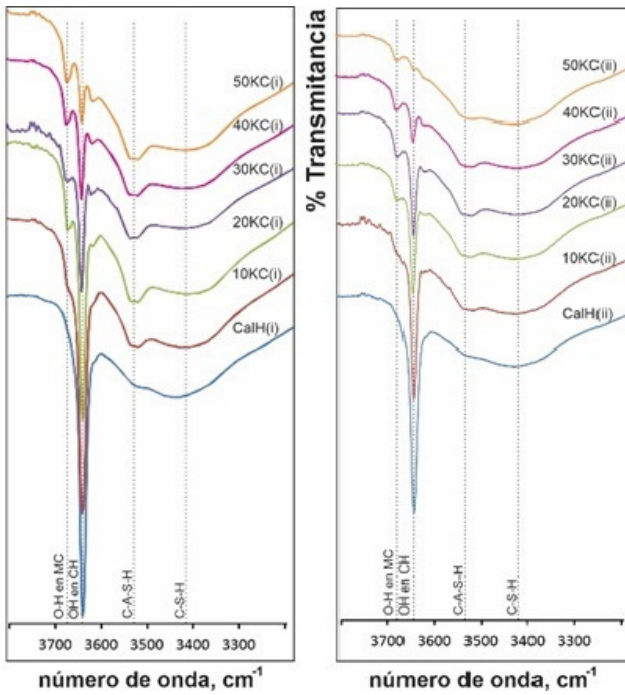


Figura 7. FTIR rango 3800-3200  $\text{cm}^{-1}$  serie caolinita - grupos (i) e (ii).

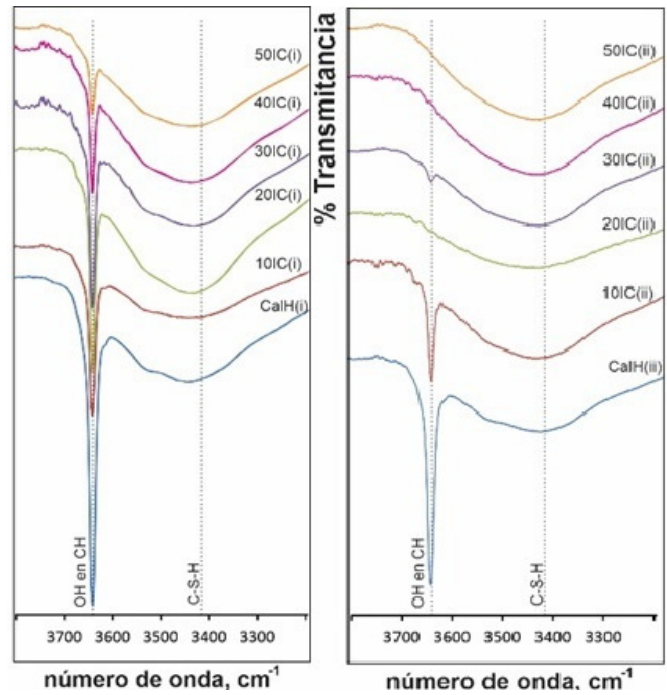


Figura 6. FTIR rango 3800-3200  $\text{cm}^{-1}$  serie illita - grupos (i) e (ii).

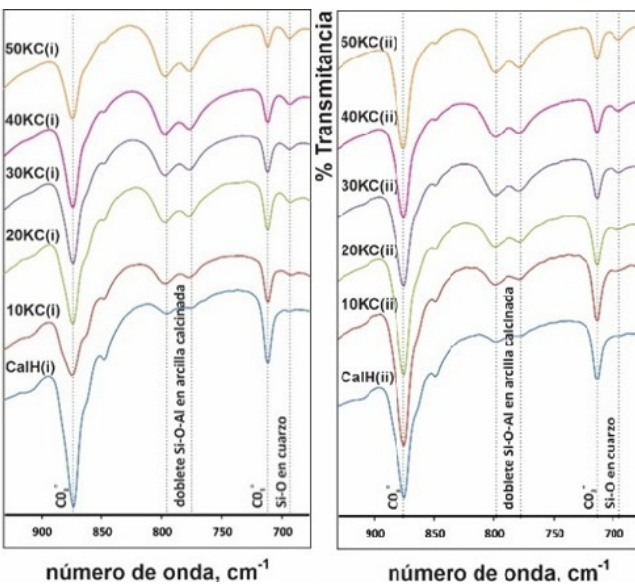


Figura 8. FTIR rango 950-650  $\text{cm}^{-1}$  serie caolinita - grupos (i) e (ii).

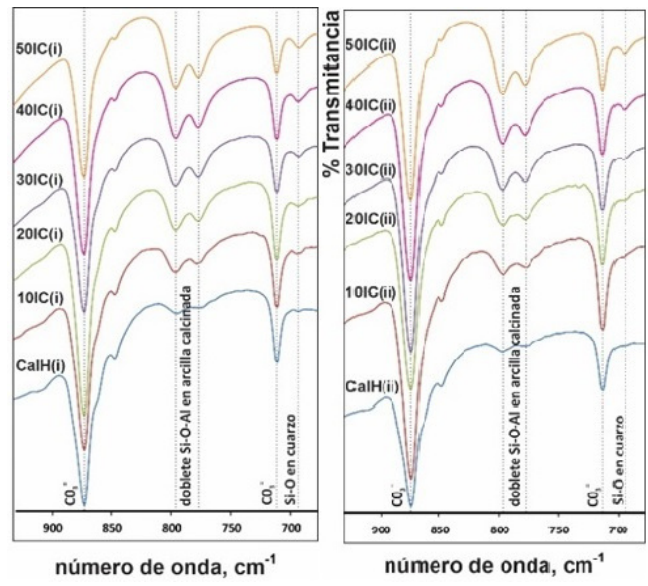


Figura 9. FTIR rango 950-650  $\text{cm}^{-1}$  serie illita - grupos (i) e (ii).

### Ensayo termogravimétrico

Del análisis termogravimétrico (Figs. 10-13) se concluye para todas las pastas que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de cal hidráulica por arcillas calcinadas disminuye el porcentaje de portlandita debido a los procesos de carbonatación y reacción puzolánica, de acuerdo a lo determinado mediante DRX y FTIR. La menor diferencia en el contenido de CH entre los grupos (i) e (ii) para las muestras con KC, indicaría la mayor reactividad puzolánica de esta arcilla calcinada. En las Figuras 11 y 13, se puede observar que el contenido de calcita para todas las pastas aumenta en el grupo (ii) respecto al grupo (i) evidenciando el avance de la carbonatación, de acuerdo a lo determinado mediante DRX y FTIR.



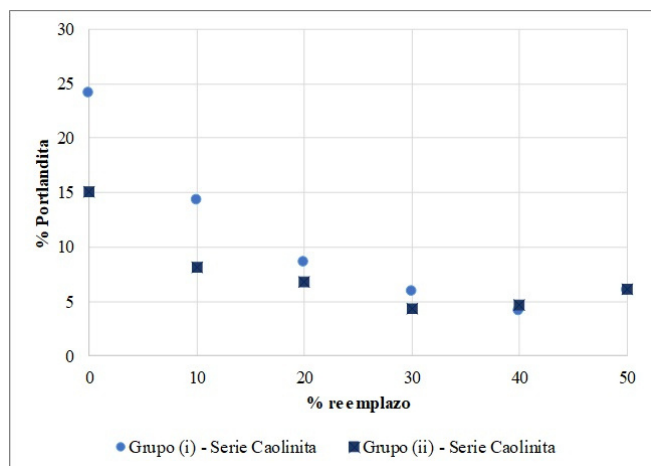


Figura 11. Composición % CH serie caolinita - grupos (i) e (ii).

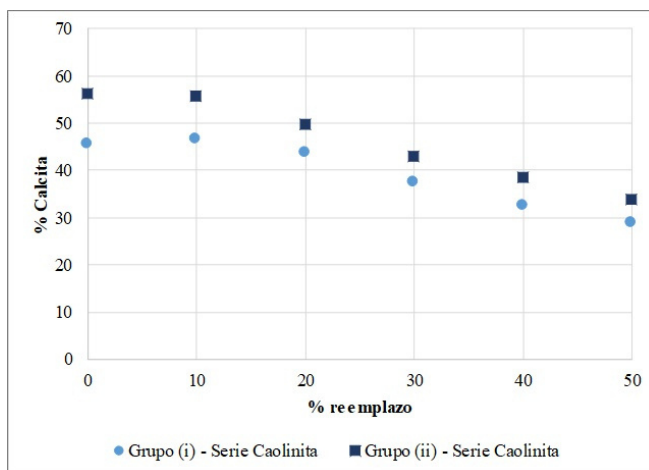


Figura 10. Composición % Cc serie caolinita - grupos (i) e (ii).

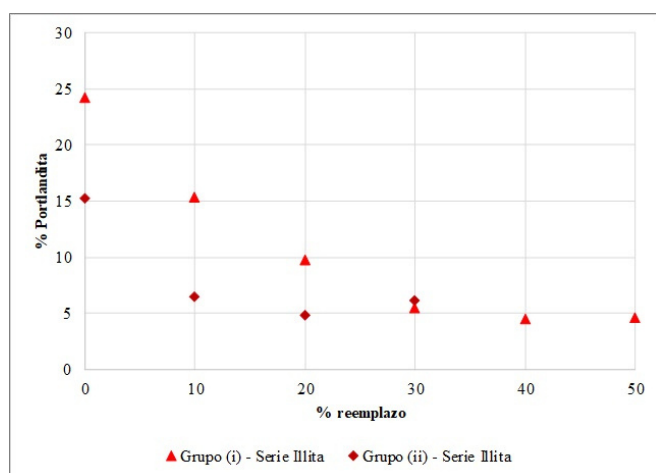


Figura 12. Composición % CH serie illita - grupos (i) e (ii).

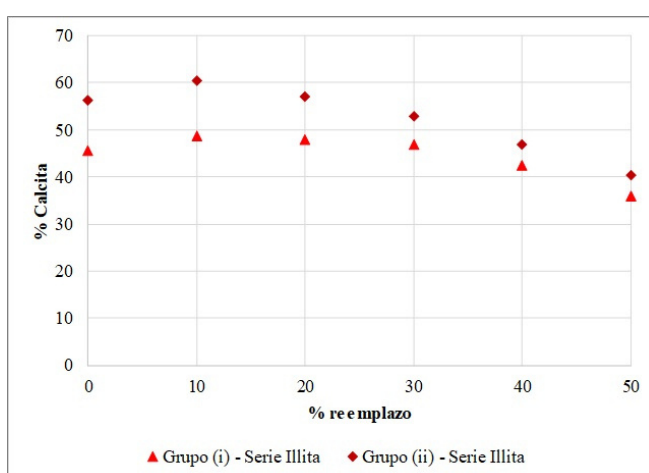


Figura 13. Composición % Cc serie illita - grupos (i) e (ii).

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 2, considerando un 50% de reemplazo de cal hidráulica por arcillas calcinadas para el grupo de muestras (i), la reducción del porcentaje de calcita es de un 17% para KC y de un 10% para IC, respecto a la muestra con 0% de reemplazo. Para el grupo de muestras (ii) la reducción del contenido de calcita es de un 22% para KC y de un 16% para IC, respecto a las pastas elaboradas únicamente con cal hidráulica (0% reemplazo). En ambos casos la disminución del contenido de calcita es menor al porcentaje de reemplazo (50%), y dicha diferencia es aún menor cuando se utiliza IC, evidenciando que el reemplazo de cal hidráulica por illita calcinada favorece la captación de CO<sub>2</sub> ambiental.

Tabla 2. Composición porcentual de calcita en pastas de cal hidráulica y 50% arcillas calcinadas, grupos (i) e (ii).

Pasta	CalH (0% reemplazo)	50 KC (50 % reemplazo)	50 IC (50% reemplazo)
Grupo (i)	45,6	28,9	35,8
Grupo (ii)	56,2	33,8	40,4

### Perfil fenolftaleína en pastas

Luego de transcurridos los 28 días de hidratación en cámara húmeda, se frenó la hidratación-carbonatación de las pastas del grupo (i) y se midió la profundidad de carbonatación de las pastas utilizando fenolftaleína como indicador de pH, tal como lo muestra la Figura 14. Para el caso del grupo de pastas (ii), se frenó la hidratación-carbonatación luego del mes de carbonatación al aire libre, y midieron los perfiles de carbonatación

pulverizando con el indicador fenolftaleína y observando los cambios en la coloración (Fig. 15) (Despotou *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2016).

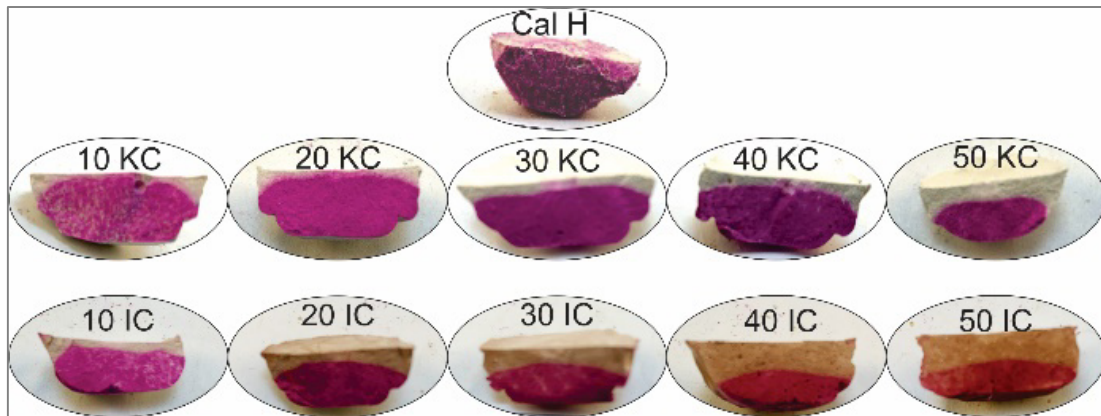


Figura 14. Perfil de carbonatación con fenolftaleína en pastas 28 días cámara húmeda (i).



Figura 15. Perfil de carbonatación con fenolftaleína en pastas 28 días cámara húmeda + 1 mes carbonatación (ii).

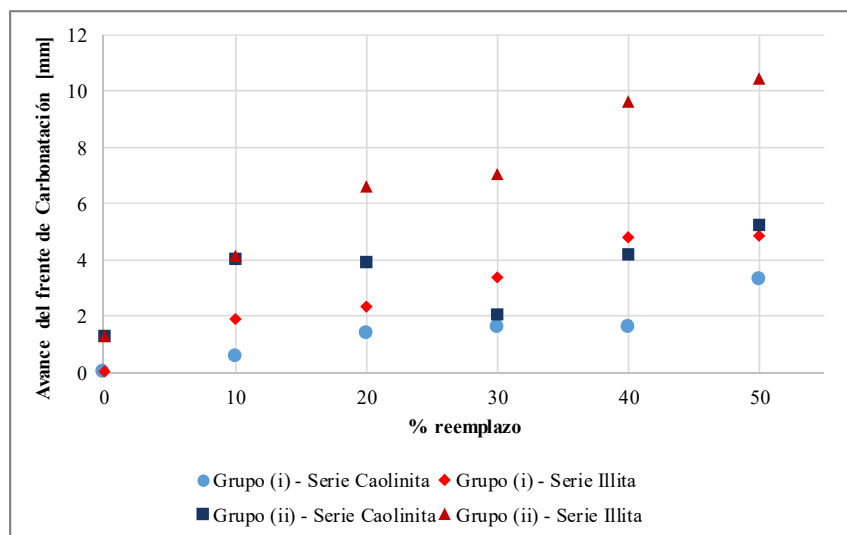


Figura 16. Perfil de carbonatación en pastas para arcillas caolinita e illita.

En la Figura 16, se presentan los valores de la profundidad de carbonatación medida en mm para todas las muestras en función del porcentaje de reemplazo. En todas las pastas la profundidad de carbonatación es mayor en el grupo (ii) respecto del (i). Comparando ambas figuras, se observa que las pastas elaboradas con IC muestran mayor profundidad de carbonatación que las elaboradas con KC, y esto aumenta con el porcentaje de

reemplazo, de acuerdo a lo determinado mediante análisis termogravimétrico. El comportamiento de la pasta depende de la actividad puzolánica de la arcilla calcinada incorporada: IC con menor actividad puzolánica, consume menor cantidad de CH, por lo que se ve favorecida la reacción de carbonatación del mismo (mayor avance en el perfil de carbonatación).

### Conclusiones

Se concluye que el agregado de arcilla calcinada como reemplazo parcial de la cal hidráulica en pastas, afecta la captación de CO<sub>2</sub> ambiental: si se utiliza illita calcinada con menor actividad puzolánica aumenta la captación; mientras que cuando se utiliza caolinita calcinada, la actividad puzolánica es mayor, afectando en forma negativa la captación de CO<sub>2</sub> ambiental.

Estas mismas conclusiones se ven reflejadas en los datos del perfil de fenolftaleína en pastas, en el cual se observa una mayor carbonatación con el agregado de illita calcinada que con el agregado de caolinita calcinada.

### Referencias

- Antoni, M.; Roseen, J.; Martirena, F. & Scrivener, K. (2012) "Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone", *Cement and Concrete Research*, 42, pp. 1579-1589.
- Cordoba, G.P.; Zito, V.S.; Sposito, R.; Rahhal, V.F.; Tironi, A.; Thienel, Ch. & Irassar, E.F. (2020) "Concretes with Calcined Clay and Calcined Shale: Workability, Mechanical, and Transport Properties", *Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 32(8), 04020224.
- Despotou, E.; Shtiza, A.; Schlegel, T. & Verhelst, F. (2016) "Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars", *Mauerwerk*, 20, pp. 124-137.
- EuLA (European Lime Association) (2017) "Innovation in the lime sector" [en línea]. Disponible en <https://www.eula.eu/wp-content/uploads/2019/07/Innovation-in-the-Lime-Sector-.pdf>
- Fujita, S.; Suzuki, K.; Shibasaki, Y. & Mori, T. (2002) "Synthesis of hydrogarnet from molten slag and its hydrogen chloride fixation performance at high temperature", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 4, pp. 70-76.
- Hartmann, A.; Khakhutov, M. & Buhl, J.-Ch. (2014) "Hydrothermal synthesis of CSH-phases (tobermorite) under influence of Ca-formate", *Materials Research Bulletin*, 51, pp. 389-396.
- Hidalgo, A.; García, J.L.; Cruz Alonso, M.; Fernández, L. & Andrade, C. (2009) "Microstructure development in mixes of calcium aluminate cement with silica fume or fly ash", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96, pp. 335-345.
- Lanas, J.; Pérez Bernal, J.L.; Bello, MA. & Alvarez Galindo, J.I. (2004) "Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars", *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 2191-2201.
- Matschei, T.; Lothenbach, B. & Glasser, F.P. (2007) "The AFm phase in Portland cement", *Cement Concrete Research*, 37, pp. 118-130.
- Murat, M. (1983) "Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite", *Cement and Concrete Research*, 13(2), pp. 259-266.
- Shi, Z.B.; Lothenbach, B.; Geiker, M.R.; Kaufmann, J. & Leemann, A. (2016) "Experimental studies and thermodynamic modeling of the carbonation of Portland cement, metakaolin and limestone mortars", *Cement and Concrete Research*, 88, pp. 60-72.
- Tironi, A.; Sposito, R.; Cordoba, G.P.; Zito, S.V.; Rahhal, V.F.; Thienel, Ch. & Irassar, E.F. (2022) "Influence of different calcined clays to the water transport performance of concretes", *Magazine of Concrete Research*, 74(14), pp. 702-714.
- Tironi, A.; Trezza, M.A.; Scian, A.N.; & Irassar, E.F. (2012) "Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans", *Construction and Building Materials*, 28, pp. 276-281.
- Yanguatin, H.; Ramírez, J.H.; Tironi, A. & Tobón, J.I. (2019) "Effect of thermal treatment on pozzolanic activity of excavated waste clays", *Construction and Building Materials*, 211, pp. 814-823.
- Zhang, D.; Zhao, J.; Wang, D.; Wang, Y. & Ma, X. (2020) "Influence of pozzolanic materials on the properties of natural hydraulic lime based mortars", *Construction and Building Materials*, 244, 118360.