

## Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer–arcilla calcinada–caliza (LC<sup>3</sup>)

Roger S. Almenares-Reyes  
Adrián Alujas-Díaz  
Lisandra Poll-Legrá  
Pedro R. Bassas-Noa  
Sergio Betancourt-Rodríguez  
José F. Martirena-Hernández  
Carlos A. Leyva-Rodríguez

### Resumen

Se analizaron materiales arcillosos procedentes de dos afloramientos de la región de Moa para determinar su potencialidad de uso como material cementicio suplementario en la producción de cementos ternarios de base clínquer–arcilla calcinada–caliza. Las arcillas se caracterizaron mediante espectroscopía de absorción atómica (EAA), difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y análisis termogravimétrico (ATG). Estos métodos revelaron en las arcillas alto contenido de aluminio, moderado contenido de caolinita, una estructura desordenada y presencia de impurezas. La solubilidad del aluminio y el silicio en álcali y la resistencia a la compresión de los sistemas LC<sup>3</sup> es proporcional a su contenido en la arcilla, siendo superior para la de mayor contenido de caolinita y mayor desorden estructural (afloramiento D1), aunque la arcilla de ambos afloramientos pueden constituir materiales cementicios suplementarios en la producción de cementos ternarios de base clínquer–arcilla calcinada–caliza. El rango de activación térmica adecuado para ambas arcillas se ubica entre los 650 °C y 850 °C.

**Palabras clave:** arcillas calcinadas; actividad puzolánica; cemento LC<sup>3</sup>; solubilidad alcalina; materiales cementicios.

## **Evaluation of kaolinite clays of Moa for the production of cement based clinker-calcined clay-limestone (LC<sup>3</sup>)**

### **Abstract**

Clay materials from two outcrops of the Moa region were analyzed to determine their potential use as supplementary cementitious material in the production of ternary cements based on limestone-calcined clay. The clays were characterized by atomic absorption spectroscopy (EAA), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and thermogravimetric analysis (ATG). These methods revealed high aluminum in clays, moderate kaolinite content, a disordered structure and the presence of impurities. The solubility of aluminum and silicon in alkali and the compressive strength of LC<sup>3</sup> systems is proportional to their content in clay, being higher for the one with higher kaolinite content and greater structural disorder (outcrop D1), although the clay of both outcrops may constitute supplementary cementitious materials in the production of ternary cements based clinker-calcined clay-limestone. The suitable thermal activation range for both clays is between 650 ° C and 850 ° C.

**Keywords:** calcined clays; pozzolanic activity; LC<sup>3</sup> cement; alkaline solubility; cementitious materials.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de arcillas calcinadas como material puzolánico ha recibido considerable atención en años recientes. Este particular interés es debido a la expansión de estrategias de sustitución de clínquer por materiales cementicios suplementarios (MCS) para minimizar el impacto medioambiental provocado por las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la producción de cemento (WBCSD/IEA 2009; Lothenbach, Scrivener & Hooton 2011; Juenger *et al.* 2012; Teklay *et al.* 2014).

Se conoce que el uso de MCS mantiene o incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad de la matriz cementicia (Sabir, Wild & Bai 2001; Samet, Mnif & Chaabouni 2007; Alujas *et al.* 2015a) y al mismo tiempo favorece la disminución del consumo energético por cantidad de aglomerante (Habert *et al.* 2009; Alujas *et al.* 2015a).

De acuerdo con estudios precedentes, los materiales arcillosos presentes en las cortezas de intemperismo no ferroniquelíferas de la región de Moa han sido recomendados como materia prima de productos refractarios y de ladrillos cerámicos para la construcción (Pons y Leyva 1996; Pons *et al.* 1997; Njila *et al.* 2010a, 2010b; Njila & Díaz-Martínez 2016), sin embargo, sus potencialidades pueden ir más allá de los usos y aplicaciones señaladas.

Poll y otros investigadores (2016) muestran la posibilidad de empleo del material arcilloso existente en el depósito ferroniquelífero La Delta como sustituto parcial del cemento, lo cual ha abierto el camino para el desarrollo de investigaciones con vistas a evaluar los recursos de la región con posibilidades de ser empleados como MCS en el desarrollo futuro de la infraestructura socio-económica de la región.

Se ha reportado el desarrollo y uso de un nuevo sistema cementicio mediante la combinación de materiales arcillosos multicomponentes: caliza y clínquer que permite la sustitución del 50 % del clínquer (Vizcaíno *et al.* 2015). Este sistema es denominado cemento de bajo carbono, mejor conocido por *Limestone Calcined Clay Cement* (LC<sup>3</sup>), de acuerdo con su designación en idioma inglés y se presenta como alternativa para ser producida no solo a escala industrial, sino también a pequeña escala. La evaluación de materias primas para este uso se considera un factor fundamental para potenciar el desarrollo de sistemas cementicios LC<sup>3</sup>.

El objetivo de esta investigación fue valorar las potencialidades de dos afloramientos arcillosos presentes en la región de Moa, como fuente de MCS para la producción de cemento LC<sup>3</sup>, a través de la evaluación de la influencia del contenido de alúmina y caolinita y del orden estructural de la

arcilla natural sobre la reactividad puzolánica de los productos de calcinación

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Muestreo

Se evaluaron dos afloramientos arcillosos (D1 y D2, Figura 1) con potencia superior a 10 m, ubicados dentro del depósito La Delta y localizados al sureste de la localidad de Moa, provincia de Holguín.

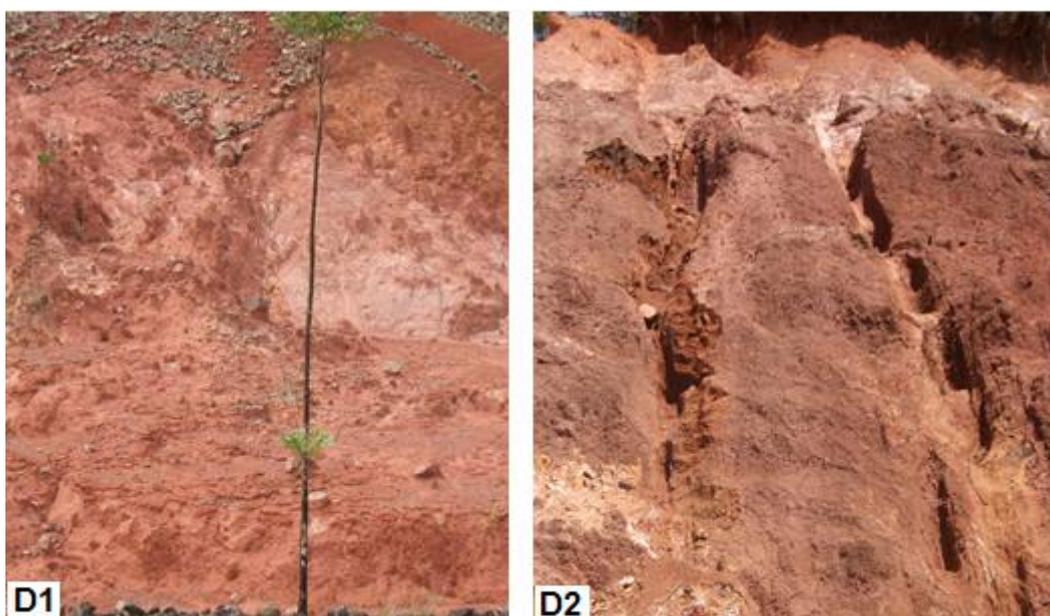


Figura 1. Fotografía del corte de los afloramientos evaluados.

De cada afloramiento se seleccionaron 10 muestras por el método de surco continuo, de modo que se abarcara toda la potencia. De cada surco fueron tomados alrededor de 5 kg y mezclados para conformar una muestra compósito de 50 kg de cada sector.

### 2.2. Caracterización de la materia prima natural

La observación de campo sirvió para caracterizar cualitativamente los afloramientos arcillosos. La composición química y mineralógica de las muestras fue determinada mediante espectrometría de absorción atómica (EAA), difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR).

El orden estructural de la caolinita en el material arcilloso fue evaluado mediante el índice FWHM-002, obtenido por DRX (Aparicio & Galan 1999; He *et al.* 2005; Tironi *et al.* 2014) y  $P_0$  determinado por FTIR (Bich, Ambroise & Péra 2009; Tironi *et al.* 2014).

El contenido de caolinita fue calculado como la pérdida de masa en el intervalo de deshidroxilación de la caolinita entre 400 °C y 600 °C, mediante análisis termogravimétrico (TGA), de acuerdo con la metodología reportada por Avet y otros investigadores (2016).

### **2.3. Activación térmica**

Las muestras de arcilla natural fueron calcinadas en un horno de laboratorio J.P. SELECTA, a temperaturas de 650 °C, 750 °C y 850 °C, rango que corresponde con la ventana de activación comúnmente estudiada para la caolinita (Murat & Comel 1983) y a 950 °C, temperatura cercana a la cual ocurre el fenómeno de recristalización o reorganización estructural (He, Makovicky & Osback 1994; Földvári 2011; Alujas *et al.* 2015a).

Los productos calcinados fueron sometidos a un proceso de molienda en un molino de bolas de laboratorio, hasta alcanzar aproximadamente 90 % de partículas de tamaño menor de 90 µm.

Para las determinaciones por EAA, DRX, FTIR, ATG, activación térmica y la molienda se siguió el mismo procedimiento descrito previamente por Poll y demás colaboradores (2016).

### **2.4. Evaluación de la actividad puzolánica**

La medición de sílice y alúmina solubles en álcali ha sido sugerida como un método simple y rápido para la evaluación de la actividad puzolánica (He, Makovicky & Osback 1994; He, Osback & Makovicky 1995). Basado en el método descrito por He, Makovicky y Osback (1994) fue evaluada la actividad puzolánica. Dos gramos de cada producto calcinado fueron introducidos en 100 mL de una solución de NaOH al 0,5 N y calentados hasta estado de ebullición durante tres minutos. La cantidad de aluminio y silicio disueltos en álcali fueron medidos por espectroscopía de absorción atómica.

### **2.5. Determinación de resistencia a la compresión en cementos de base clínquer-arcilla calcinada-caliza**

Fueron preparados morteros normalizados para determinar la evolución de la resistencia a la compresión de los sistemas cementicios LC<sup>3</sup>-50 (50 % de clínquer, 30 % de arcilla calcinada y 15 % de caliza), según lo reportado por Avet y demás colaboradores (2016). La composición del clínquer, la caliza y el yeso se presentan en la Tabla 1. Los morteros se prepararon con una relación agua/aglomerante de 0,5 de acuerdo con la norma NC 506:2013 (NC/CTN22 2013). La resistencia a la compresión se midió en prismas de mortero normalizado de 40x40x160 mm a los 3, los 7 y 28 días después de fundidos. Los aglomerantes fueron denominados por la sigla

LC<sup>3</sup>, más el nombre del depósito de arcilla y la temperatura de activación; por ejemplo, para la arcilla D1 calcinada a 750 °C, la designación del aglomerado es LC<sup>3</sup>-D1 750. Como referencia se utilizó cemento Portland P-35.

Tabla 1. Composición química del yeso, clínquer y caliza utilizados

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	PPI	SO <sub>3</sub>	RI
Clínquer	20,81	5,01	4,37	65,70	0,90	0,50	0,34	0,21
Yeso	8,10	2,03	1,97	30,27	2,81	20,91	31,39	9,91
Caliza	3,02	0,94	0,49	51,49	0,71	41,74	---	...

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización de las arcillas

La observación de campo reveló que los afloramientos arcillosos evaluados son resultado de la meteorización de los gabros, formando potentes cortezas ricas en arcillas de coloración variada, desde el rosado hasta el rojo intenso y, en ocasiones, abigarrado, de aspecto terroso-arcilloso. Desde la base hasta la superficie se observa un incremento gradual de la meteorización.

En los patrones de difracción de rayos X de los materiales arcillosos de ambos afloramientos se identificaron las fases minerales (Figura 2). Los materiales estudiados presentan un carácter multicomponente, por lo que no es posible asignar los picos a una sola fase. La arcilla D1 está compuesta por caolinita, hematita, gibsita y goetita. En la muestra D2 no se identificó gibsita mediante DRX.

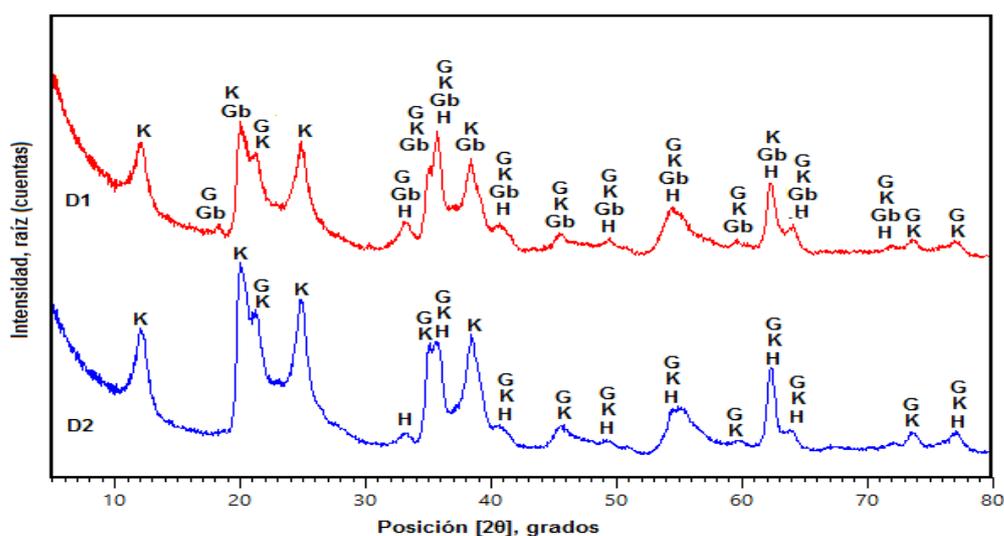


Figura 2. Patrones de difracción de las arcillas naturales D1 y D2.; K: caolinita; Gb: gibsita; G: goetita; H: hematita.

La presencia de caolinita fue confirmada por FTIR (Figura 3), identificada por las bandas de absorción entre  $3\ 620\text{ cm}^{-1}$  y  $3\ 696\text{ cm}^{-1}$  (Russell & Fraser 2012) y la presencia de una sola banda intermedia a los  $3\ 656\text{ cm}^{-1}$  para D1 y a los  $3\ 654\text{ cm}^{-1}$  para D2, que sugiere la presencia de una caolinita con estructura desordenada; desorden que podría estar dado por pequeñas cantidades de dickita o nacrita apiladas en la estructura de la caolinita (Russell & Fraser 2012).

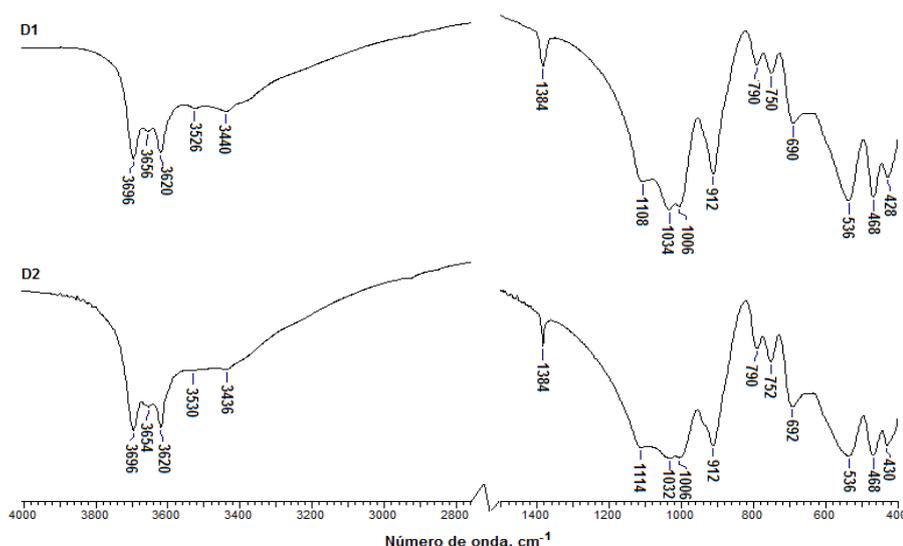


Figura 3. Espectro infrarrojo de los materiales arcillosos D1 y D2.

La presencia de bandas a los  $3\ 526\text{ cm}^{-1}$  y  $3\ 440\text{ cm}^{-1}$  confirma la presencia de gibsita en la muestra D1, sin descartar la presencia de cierta cantidad de goetita (Yusiharni & Gilkes 2010), mientras que la baja intensidad de las bandas  $3\ 536\text{ cm}^{-1}$  y  $3\ 430\text{ cm}^{-1}$ , casi imperceptibles, demuestra que es insignificante la presencia de gibsita en la muestra D2.

Los resultados de orden estructural y el contenido de caolinita se presentan en la Tabla 2. Ambas arcillas poseen cristalinidad y contenido de caolinita similar, siendo, ligeramente más desordenada y con mayor contenido de caolinita, la arcilla D1.

Tabla 2. Índice de cristalinidad y contenido de caolinita

	D1		D2	
	Valor	Cristalinidad	Valor	Cristalinidad
índice $P_0$	0,89	desordenada	0,90	desordenada
índice FWHM-002	0,59	desordenada	0,44	desordenada
Contenido de caolinita, %	64,04		63,51	

La composición química de las arcillas en su estado natural (Tabla 3) muestra un alto contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que está relacionado con la presencia de

minerales arcillosos del grupo de la caolinita y en la muestra D1 está también enlazado a la presencia de la gibsita. La relación  $Al_2O_3/SiO_2$  igual a 0,81 y 0,78 para D1 y D2, respectivamente, confirma la presencia de fases arcillosas del grupo 1:1. Los altos contenidos de  $Fe_2O_3$  se asocian a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, según se indica en los patrones de DRX.

Tabla 3. Composición química y pérdida por ignición

Sector	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PPI
D1	39,38	31,83	9,88	0,04	0,55	0,07	0,11	0,13	0,11	14,26
D2	37,99	29,47	13,20	0,05	0,56	0,06	0,08	0,12	0,14	13,37

La identificación positiva de minerales arcillosos del grupo 1:1, con contenido de caolinita superior a 60 % (Castillo *et al.* 2010; Fernández, Martirena & Scrivener 2011; Alujas *et al.*, 2015a), estructura desordenada (Tironi *et al.* 2014) y un alto contenido de alúmina (Alujas *et al.* 2015b) fundamenta las potencialidades de utilización de los afloramientos arcillosos evaluados como fuente de MCS en la producción de cementos de base clínquer-arcilla calcinada-caliza.

### 3.2. Evaluación química de la actividad puzolánica

Los minerales arcillosos estudiados están compuestos, predominantemente, por alúmina y sílice que al ser calcinados a temperaturas adecuadas se transforman a un estado amorfo inestable desordenado (Toledo Filho *et al.* 2007). La reacción puzolánica tiene lugar bajo condiciones alcalinas (He, Makovicky & Osback 1994) y describe la reacción del aluminio y el silicio disueltos con el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento (Garg & Skibsted 2014).

La disolución de estos compuestos en álcali proporciona una información valiosa para el estudio de la actividad puzolánica de las arcillas. En la Figura 4 se muestra la solubilidad del silicio y aluminio en álcali para los dos materiales arcillosos estudiados. El aluminio comienza a reaccionar más bruscamente que el silicio debido a la solubilidad de la alúmina en álcali. En ambos casos, después de que el material ha sido calcinado hasta 650 °C, los valores de silicio y aluminio disueltos se incrementan. Se observa que desde 650 °C a 850 °C hay un ligero incremento de los valores de aluminio y silicio solubles, un poco más acentuados en el rango de 750 °C a 850 °C para el aluminio. Para ambas arcillas existe la misma tendencia. La solubilidad de los dos componentes es proporcional a su contenido en la arcilla en su estado natural y es superior para el material arcilloso con

mayores contenidos de caolinita y desorden estructural. El aluminio se comporta como el componente activo mayoritario.

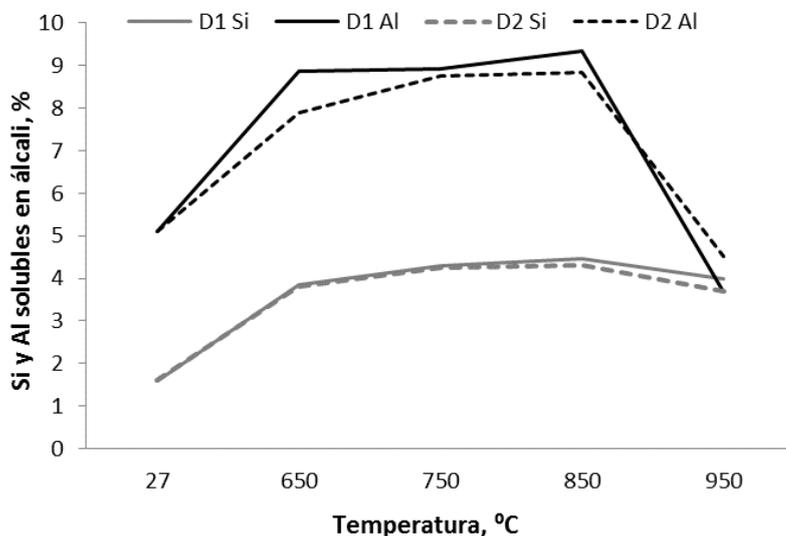


Figura 4. Contenido de aluminio y silicio solubles en álcali en función de la temperatura.

A 950 °C la cantidad de aluminio disuelto cae abruptamente, mientras que el silicio decrece ligeramente; fenómenos dados posiblemente por la reorganización de nuevas fases cristalinas (He, Makovicky & Osback 1994; He, Osback & Makovicky 1995) que conducen a la pérdida de reactividad.

De acuerdo con los resultados de este ensayo se puede concluir que los materiales arcillosos evaluados pueden comportarse con carácter puzolánico en el rango de temperatura de 650 °C a 850 °C, con la máxima reactividad a 850 °C. La medición de la actividad puzolánica mediante solubilidad alcalina demostró ser un método rápido y confiable para la evaluación de materiales puzolánicos ricos en aluminio.

### 3.3. Comportamiento de la resistencia a la compresión de los aglomerantes de base clínquer-arcilla calcinada-caliza

La Figura 5 presenta la evolución de la resistencia a la compresión para los morteros de sistemas cementicios del tipo LC<sup>3</sup>. Con el aumento de la temperatura de calcinación desde 650 °C a 850 °C se incrementa la resistencia, sin embargo, cuando se calcina hasta 950 °C, ambos sistemas arcillosos muestran una ligera caída de resistencia, comportamiento similar al observado en el ensayo de solubilidad alcalina, lo cual puede estar dado fundamentalmente por la recristalización de nuevas fases de transición (metacaolinita a mullita) del tipo espinela que tiene lugar entre los 925 °C y 1 075 °C (Brindley & Nakahira 1959a, 1959b).

Ambos sistemas cementicios presentan similar desarrollo de resistencia a la compresión. El sistema con desempeño ligeramente superior en todo el rango de temperatura evaluado es el LC<sup>3</sup>-D1, lo cual corresponde con mayores contenidos de alúmina y caolinita y mayor desorden estructural. La máxima resistencia se alcanza a los 850 °C.

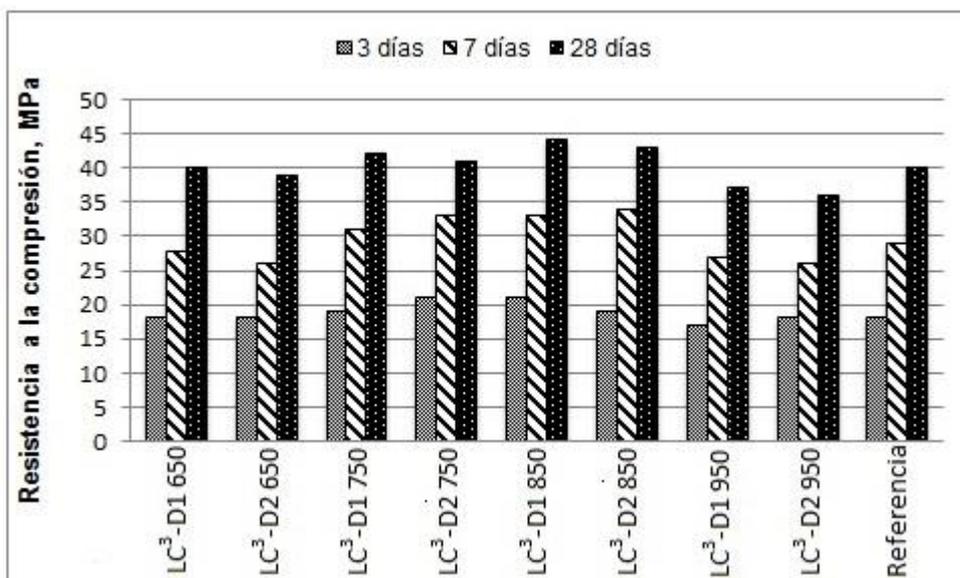


Figura 5. Resistencia a la compresión de los morteros de cemento.

Los sistemas ternarios donde se emplea como material puzolánico arcilla calcinada de los afloramientos D1 y D2 clasifican como P-35, de acuerdo con la NC 95 (NC/CTN22 2011).

#### 4. CONCLUSIONES

- Los dos afloramientos arcillosos de origen primario de la región de Moa presentan potencialidades como fuente de material puzolánico para la producción de cemento ternario de base clínquer-arcilla calcinada-caliza.
- La solubilidad del aluminio y el silicio en álcali y la resistencia a la compresión de los sistemas LC<sup>3</sup> es proporcional a su contenido en la arcilla, siendo superior para la de mayor contenido de caolinita y mayor desorden estructural.
- El intervalo de temperaturas de calcinación adecuado se ubica entre los 650 °C y 850 °C. El incremento de la temperatura de activación hasta 950 °C provoca la disminución de la reactividad y de la resistencia a la compresión.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración en los ensayos químicos y mineralógicos al equipo del Laboratorio del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ), Moa, Cuba y al equipo del Proyecto *Low Carbon Cement* del Laboratorio de Materiales de Construcción, Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza.

## 6. REFERENCIAS

- ALUJAS, A.; FERNÁNDEZ, R.; QUINTANA, R.; SCRIVENER, K. L. & MARTIRENA, F. 2015a: Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays : Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science* 108: 94–101.
- ALUJAS, A.; ALMENARES, R. S.; BETANCOURT, S. & LEYVA, C. 2015b: Pozzolanic Reactivity of Low Grade Kaolinitic Clays: Influence of Mineralogical Composition. In: K. SCRIVENER & A. FAVIER (editors). *Calcined Clays for Sustainable Concrete RILEM Book*. Springer Netherlands, Lausanne, p. 339–345.
- APARICIO, P. & GALAN, E. 1999: Mineralogical interference on kaolinite crystallinity index measurements. *Clays and Clay minerals* 47(1): 12–27.
- AVET, F.; SNELLINGS, R.; ALUJAS, A.; BEN, M. & SCRIVENER, K. 2016: Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research* 85: 1–11.
- BICH, C.; AMBROISE, J. & PÉRA, J. 2009: Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin. *Applied Clay Science* 44(3): 194–200.
- BRINDLEY, G. W. & NAKAHIRA, M. 1959a: The Kaolinite-Mullite Reaction Series: II, Metakaolin. *Journal of the American Ceramic Society* 42(7): 314–318.
- BRINDLEY, G. W. & NAKAHIRA, M. 1959b: The Kaolinite-Mullite Reaction Series: III, The High-Temperature Phases. *Journal of the American Ceramic Society* 42(7): 319–324.
- CASTILLO, R.; FERNÁNDEZ, R.; ANTONI, M.; SCRIVENER, K.; ALUJAS, A. & MARTIRENA, J. F. 2010: Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista Ingeniería de Construcción* 25(3): 329–352.
- FERNÁNDEZ, R.; MARTIRENA, F. & SCRIVENER, K. L. 2011: The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research* 41(1): 113–122.

- FÖLDVÁRI, M. 2011: *Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice.*
- GARG, N. & SKIBSTED, J. 2014: Thermal Activation of a Pure Montmorillonite Clay and Its Reactivity in Cementitious Systems. *The Journal of Physical Chemistry C* 118(21): 11464-11477.
- HABERT, G.; CHOUPAY, N.; ESCADEILLAS, G.; GUILLAUME, D. & MONTEL, J. M. 2009: Clay content of argillites : Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science* 43(3): 322-330.
- HE, C.; MAKOVICKY, E. & OSBACK, B. 1994: Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. *Applied Clay Science* 9(3): 165-187.
- HE, C.; OSBAECK, B. & MAKOVICKY, E. 1995: Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research* 25(8): 1691-1702.
- HE, H.; YUAN, P.; GUO, J.; ZHU, J. & HU, C. 2005: The influence of random defect density on the thermal stability of kaolinites. *Journal of the American Ceramic Society* 88(4): 1017-1019.
- JUENGER, M. C. G.; PROVIS, J. L.; ELSÉN, J.; MATTHES, W.; HOOTON, R. D.; DUCHESNE, J.; COURARD, L.; HE, H.; MICHEL, F.; SNELLINGS, R. & DE BELIE, N. 2012: Supplementary cementitious materials for concrete: characterization needs. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1-15.
- LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K. & HOOTON, R. D. 2011: Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 41(12): 1244-1256.
- MURAT, M. & COMEL, C. 1983: Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals III. Influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite. *Cement and Concrete Research* 13(5): 631-637.
- NC/CTN22. 2013: NC 506 Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- NC/CTN22. 2011: NC 95 Cemento Portland. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- NJILA, T. & DÍAZ-MARTÍNEZ, R. 2016: Estudio químico-mineralógico de los perfiles lateríticos ferrosialíticos en los sectores Téneme, Farallones y Cayo Guam en el noreste de Cuba. *Revista Geológica de América Central* 54: 67-83.
- NJILA, T.; DÍAZ, R.; OROZCO, G. & ROJAS, L. A. 2010a: Un acercamiento a las cortezas de meteorización no níquelíferas del nordeste de Cuba. *Minería y Geología* 26(2): 14-34.

- NJILA, T.; DÍAZ, R.; PROENZA, J. & OROZCO, G. 2010b: Evaluación mineralógica semi-cuantitativa de las cortezas de meteorización no niquelíferas en la región nororiental de Cuba. *Minería y Geología* 26(4): 1–15.
- POLL, L.; ALMENARES, R. S.; ROMERO, Y.; ALUJAS, A.; LEYVA, C. A. & MARTIRENA, J. F. 2016: Evaluación de la actividad puzolánica del material arcilloso del depósito La Delta Moa, Cuba. *Minería y Geología* 32(1): 15–27.
- PONS, J. & LEYVA, C. 1996: Empleo de las arcillas ferrocaoliníticas–gibbsíticas de la región de Moa en los talleres de fundición. *Minería y Geología* 13: 93–97.
- PONS, J.; PÉREZ, O.; RAMÍREZ, B. & RAMÍREZ, M. 1997: Caracterización de las arcillas refractarias de la zona de Cayo Guam y su empleo en la fundición. *Minería y Geología* 14: 19–23.
- RUSSELL, J. D. & FRASER, A. R. 2012: Infrared methods. In: M. H. REPACHOLI (editor). *Clay Mineralogy: Spectroscopic and Chemical Determinative Methods*. Springer Netherlands, p. 11–67.
- SABIR, B.; WILD, S. & BAI, J. 2001: Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cement and Concrete Composites* 23(6): 441–454.
- SAMET, B.; MNIF, T. & CHAABOUNI, M. 2007: Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement. *Cement and Concrete Composites* 29(10): 741–749.
- TEKLAJ, A.; YIN, C.; ROSENDAHL, L. & BØJER, M. 2014: Calcination of kaolinite clay particles for cement production: A modeling study. *Cement and Concrete Research* 61–62: 11–19.
- TIRONI, A.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N. & IRASSAR, E. F. 2014: Potential use of Argentine kaolinitic clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science* 101: 468–476.
- TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B. & FAIRBAIRN, E. M. R. 2007: Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and Concrete Research* 37(9): 1357–1365.
- VIZCAÍNO, L.; SÁNCHEZ, S.; PÉREZ, A.; DAMAS, S.; SCRIVENER, K. & MARTIRENA, F. 2015: Industrial trial to produce low clinker, low carbon cement. *Materiales de Construcción* 65(317): e045.
- WBCSD/IEA. 2009: Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050. IEA Publications, Paris, 36 p.
- YUSIHARNI, B. E. & GILKES, R. 2010: Do heated gibbsite, kaolinite and goethite rehydroxylate? In: 21 St Australian Clay Minerals Conference. Brisbane, Australia, p. 131–134.

**Roger S. Almenares-Reyes**, [ralmenares@ismm.edu.cu](mailto:ralmenares@ismm.edu.cu)

Máster en Metalurgia. Profesor Asistente.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Cuba.

**Adrián Alujas-Díaz**, [adrianad@uclv.edu.cu](mailto:adrianad@uclv.edu.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.  
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.

**Lisandra Poll-Legrá**, [lplegra@ismm.edu.cu](mailto:lplegra@ismm.edu.cu)

Máster en Metalurgia. Profesora Instructora  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Cuba

**Pedro R. Bassas-Noa**, [pbassas@cil.moa.minem.cu](mailto:pbassas@cil.moa.minem.cu)

Máster en Ciencias. Director U. P Laboratorio  
Centro de Investigaciones del Níquel “Alberto Fernández Montes de Oca”, Moa, Cuba.

**Sergio Betancourt-Rodríguez**, [sbetancourt@uclv.edu.cu](mailto:sbetancourt@uclv.edu.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.  
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.

**José Fernando Martirena-Hernández**, [f.martirena@enet.cu](mailto:f.martirena@enet.cu)

Doctor en Ciencias. Profesor Titular.  
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.

**Carlos Alberto Leyva-Rodríguez**, [cleyva@ismm.edu.cu](mailto:cleyva@ismm.edu.cu)

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Cuba.