

Artículo Original

**EXPERIENCIAS SOBRE ACTIVACIÓN DE ARCILLAS
CAOLINÍTICAS A ESCALA PILOTO: ISLA, MOA, YAGUAJAY Y
REMEDIOS COMO CASOS DE ESTUDIO**

**EXPERIENCES ON KAOLINITIC CLAYS ACTIVATION AT PILOT SCALE:
ISLA, MOA, YAGUAJAY AND REMEDIOS AS CASE STUDIES**

Guillermo Esperanza Pérez^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-0899-9678>

Iván Machado López² <https://orcid.org/0000-0003-3866-0859>

José Fernando Martirena Hernández² <https://orcid.org/0000-0002-0219-0739>

¹ Centro de Estudios de Química Aplicada, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Centro de Investigaciones de Estructuras y Materiales, Facultad de Construcciones, Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Abril 7, 2026; Revisado: Mayo 4, 2026; Aceptado: Mayo 22, 2026

RESUMEN

Introducción:

Los procesos industriales de activación térmica de arcillas caoliníticas representan una vía alternativa en fase de implementación-expansión para reducir las emisiones globales de CO₂.

Objetivo:

Exponer experiencias, y algunos de los resultados más relevantes, obtenidos durante pruebas de calcinación de arcillas caoliníticas de diferentes yacimientos de Cuba, en la planta piloto experimental existente en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Materiales y Métodos:

Se describen las principales características físicas y químicas de las arcillas objeto de estudio, determinadas mediante técnicas de FRX y DRX, y se analizan las etapas del



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Guillermo Esperanza, Email: guillermoep@uclv.edu.cu



proceso tecnológico de activación de estos materiales en la instalación experimental. Se comparan, mediante tamizado, los cambios que se producen en la distribución de tamaños de partícula de las arcillas, al ser acondicionadas para su incorporación al horno calcinador.

Resultados y Discusión:

Se correlaciona, el grado de deshidroxilación y la reactividad puzolánica del material sometido a modificación térmica con su composición química y mineralógica; y se evalúan los resultados de la resistencia a compresión lograda en morteros estandarizados para diferentes formulaciones de arcillas caoliníticas activadas, tanto en laboratorio como a escala piloto.

Conclusiones:

Se demuestra que, la preparación inicial de las materias primas mediante molienda fina, y el control riguroso de la temperatura y la rotación del horno, son parámetros esenciales para lograr indicadores de deshidroxilación satisfactorios. Todas las arcillas caoliníticas nacionales activadas a escala piloto, cumplen con los parámetros y requerimientos de calidad necesarios para su empleo como materiales cementicios suplementarios.

Palabras clave: activación térmica; arcillas caoliníticas; cementos ternarios; grado de deshidroxilación; planta piloto.

ABSTRACT

Introduction:

The industrial processes of thermal activation of kaolinitic clays represent an alternative approach in the implementation-expansion phase to reduce global CO₂ emissions.

Objective:

To present experiences, and some of the most relevant results obtained during calcination tests of kaolinitic clays from different deposits in Cuba, in the existing experimental pilot plant at Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Materials and Methods:

The main physical and chemical characteristics of the clays under study, determined using XRF and XRD techniques, are described, and the stages of the technological process for activating these materials in the experimental facility are analyzed. The changes that occur in the particle size distribution are compared by sieving.

Results and Discussion:

The degree of dehydroxylation, and the pozzolanic reactivity of the material subjected to thermal modification are correlated with its chemical and mineralogical composition; and the results of the compressive strength achieved in standardized mortars for different formulations of activated kaolinitic clays are evaluated, both in the laboratory and at pilot scale.

Conclusions:

It is demonstrated that the initial preparation of raw materials through fine grinding, and the strict control of oven temperature and rotation, are essential parameters for achieving satisfactory dehydroxylation indicators. All national kaolinitic clays activated

at pilot scale meet the necessary quality parameters and requirements for their use as supplementary cementitious materials.

Keywords: thermal activation; kaolinitic clays; ternary cements; degree of dehydroxylation; pilot plant.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo y expansión gradual de las tecnologías de fabricación de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) permite reducir el factor clínquer en la producción de cemento Portland, e iso facto, su huella de carbono (Snellings et al., 2023). Destacan por su amplia disponibilidad y bajo costo las arcillas caoliníticas, que pueden ser activadas térmicamente, para incrementar su reactividad puzolánica, y lograr niveles de sustitución cercanos al 50 por ciento sin comprometer las propiedades químicas y mecánicas de los cementos, incrementado la sostenibilidad de los hormigones y morteros fabricados (Scrivener et al., 2025; Thiéry, 2025). Además, no se requieren grandes cambios en los procesos tecnológicos actuales para producir cementos ternarios de calidad en la mayoría de las regiones del planeta (Ayati et al., 2022).

Estos materiales también pueden ser usados como precursores en cementos activados por álcalis o geopolímeros, y en la fabricación de cementos puzolánicos. Su combinación con fuentes minerales de magnesio produce cementos de alta dureza y algunos investigadores las han mezclado con ácido fosfórico para generar geopolímeros ácidos (Barbhuiya et al., 2023).

El comportamiento de las arcillas caoliníticas al ser activadas térmicamente (ATA) está influenciado por diversos factores, siendo los más relevantes: sus características mineralógicas y estructurales, su composición química, propiedades morfológicas, finura, humedad, y no menos importantes, las condiciones operacionales y los equipos en que se desarrolla el proceso de calcinación (Ferreiro et al., 2019; Dhandapani et al., 2025; Dhar & Bishnoi, 2025). La realización de estudios de calcinación intermedios, a nivel de planta piloto, es un elemento de ingeniería y diseño imprescindible para lograr resultados reproducibles y confiables entre, los obtenidos en el laboratorio, y los esperados a escala industrial (Cheah et al., 2025).

El intervalo de temperaturas en que se desarrolla el proceso depende básicamente de los tipos y concentración de minerales arcillosos presentes en la muestra tecnológica (Martirena et al., 2024). El grado de amorfismo versus la cristalinidad existente en las caolinitas es determinante en este comportamiento. Para lograr la completa calcinación de las arcillas a escala industrial, es necesario operar los equipos en un rango de temperatura superior al determinado en el laboratorio (150 - 200 °C), o a los calculados teóricamente (Boakye et al., 2024). No obstante, hay que tener precaución en dicha selección pues, por una parte, debe evitarse la existencia de material no calcinado, y por la otra, impedir la recristalización parcial de las fases minerales, ya que ambos fenómenos conducen a la pérdida de reactividad de las ATA (Koutsouradi et al., 2025). La presencia de calcita también tiene una influencia negativa sobre este parámetro (Zunino, 2020).

El presente trabajo tiene como objetivo exponer experiencias, y algunos de los resultados más relevantes, obtenidos durante pruebas de calcinación de arcillas

caoliníticas de diferentes yacimientos de Cuba, en la planta piloto experimental existente en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Evaluación preliminar del potencial de las arcillas de los yacimientos Río del Callejón, Cayo Guam, Yaguajay y Remedios

Inicialmente es importante corroborar si los materiales extraídos de las formaciones geológicas objeto de estudio, cumplen con los criterios empíricos básicos para poder ser considerados candidatos para la obtención de arcillas caoliníticas activadas térmicamente (ATA). Para ello se les determina su composición química por Fluorescencia de Rayos X (FRX) o Espectrometría de Adsorción Atómica (AAS), se identifican las fases cristalinas presentes por Difracción de Rayos X (DRX), y se cuantifican los contenidos de caolín equivalente (K_{eq}) por gravimetría. Las materias primas arcillosas procedentes de las zonas de extracción son recibidas con su debido pasaporte descriptivo, y luego de ser secadas y homogenizadas, se envasan en sacos de aproximadamente 30 kg, quedando listas para los ensayos químicos y mineralógicos en laboratorio.

El secado inicial de estos materiales se realiza al sol, en superficie de hormigón armado, el tiempo necesario (72 - 96 h) para disminuir su humedad hasta valores inferiores a un 10 %. La molienda se efectuó en un molino de martillos marca MM modelo 1300, de fabricación nacional, el cual cuenta con tamices intercambiables que permiten limitar el tamaño máximo de partícula a la salida del mismo, en este caso inferiores a los 6 mm. El análisis granulométrico de las muestras de las arcillas, se realizó en una tamizadora marca ALFA test, modelo: 6041/45 según la norma cubana NC 178, (2002).

2.2 Metodología para la caracterización química y mineralógica de las muestras

Las muestras de arcilla para análisis son homogeneizadas y secadas en estufa a 105 °C durante 24 horas, y luego molidas en un molino planetario hasta tamaños de partículas inferiores a 0,1 mm. De estas muestras se toman porciones que son luego trituradas con un mortero de porcelana hasta una finura de 100 % de pasado por el tamiz de 90 μm, y se envían al Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) para la identificación de las fases cristalinas por DRX. Para ello, se utiliza un difractómetro X'PERT³ de PANalytical con las siguientes condiciones: barrido tipo gonio en 2θ, registro angular desde 4,0042 ° hasta 79,9962 °, distancia de paso en 2θ de 0,0080 °, radiación de Cu y filtro de níquel. La diferencia de potencial es de 45 kV e intensidad de corriente 40 mA. La preparación de las muestras se hizo con la ayuda de un molino de bolas planetario de pulido fino DECO-PBM-V (China), secadas en una estufa Venticelli, modelo: 111 (ECO line, Italia). Por otra parte, las determinaciones del Grado de Deshidroxilación (GD) y caolinita equivalente (K_{eq}) se realizaron en una mufla TR-MFL, modelo: 7301 (Intelligent Muffle Furnace, China), registrando los valores del peso de los crisoles con una balanza analítica XS BL, modelo 224 (China).

2.3 Determinación de la reactividad puzolánica de arcillas calcinadas. Protocolo R³

La reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas fue evaluada en el Laboratorio de Materiales del Centro de Estudios de Química Aplicada (CEQA, FQF, UCLV), según el

protocolo de ensayo R^3 en su modalidad de calorimetría isotérmica (Parashar et al., 2022; Pinheiro et al., 2023), siguiendo el procedimiento estándar descrito en la norma ASTM C1897-20 “*Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements*”. Este ensayo ha sido validado para un alto número de arcillas calcinadas y se basa en medir el calor liberado por la reacción puzolánica en una pasta cal-puzolana, a la cual se le adicionan también álcalis y sulfatos, de manera que se simulan las condiciones que existen en un sistema mezclado cemento-puzolana.

Todos los reactivos empleados fueron de grado analítico (p.p.a.). Para la preparación de las pastas se utilizó un mezclador IKA RW-45, con agitador de hélice de 4 palas, operando a una velocidad de 1 600 rpm durante 2 minutos. Se realizaron dos réplicas para cada muestra. El calorímetro isotérmico, TAM Air, fue operado a una temperatura de 30 °C usando agua destilada como referencia. Para el análisis las curvas de calor acumulado se integraron los valores de las curvas de calor liberado hasta las primeras 24 horas.

2.4 Calcinación de las arcillas

Los ensayos de calcinación a escala de laboratorio se realizaron en las instalaciones experimentales del CIDEM y del CEQA, UCLV; y las pruebas a escala industrial en la Planta piloto para la fabricación de cementos LC3 localizada en la propia entidad (figura 1). Estas experiencias tienen como objetivo escalar los resultados obtenidos en el laboratorio, y verificar que los materiales arcillosos de los depósitos en estudio, al ser calcinados en un horno rotatorio semi-industrial (800 – 850 °C) adquieren la reactividad adecuada para ser usados en la fabricación de adiciones minerales tipo LC2. Para ello, se realiza la evaluación de la calidad de la calcinación y determinación de la reactividad del material calcinado mediante calorimetría isotérmica, y resistencia mecánica a compresión en morteros estandarizados y en mezclas tipo LC3 – 50, a 3, 7 y 28 días de edad, incluido el ajuste del contenido de sulfatos.



Figura 1. Localización y vista de la planta piloto experimental para la fabricación de cementos de bajo carbono en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. (Elaboración propia)

2.5 Determinación de la resistencia mecánica a compresión

Los ensayos de resistencia a compresión fueron realizados en morteros estandarizados con cemento Portland ordinario (CPO) y mezclas LC3 – 50, empleando una relación agua/cemento igual a 0,5, siguiendo los métodos de ensayo y preparación cubiertos en la NC 506, (2013) “Cemento Hidráulico — Método de Ensayo — Determinación de la Resistencia Mecánica”, utilizando el método de carga concentrada y centrada por medio del equipo especificado, prensa Caenao BCCCP.

El análisis estadístico de todos los resultados se realizó usando el paquete de procesamiento STATISTICA (DASS), versión 13.0, propiedad de StatSoft. Inc.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evaluación preliminar del potencial de arcillas caoliníticas cubanas

El yacimiento “Río del Callejón” está ubicado al noroeste de la Isla de la Juventud, a unos 20 km de la ciudad de Nueva Gerona. Los caolines de este yacimiento, al formarse a partir de rocas esquistosas, conservan la estructura de las mismas. Los caolines oscuros se formaron a partir de los esquistos micáceos (moscovita y sericita) y cuarzos micáceos con materia carbonosa, causa fundamental del color gris. La presencia de minerales ferrosos (Fe_2O_3 y FeO) se atribuye a los minerales sulfurosos, principalmente la pirita, y en menor grado a la biotita. Los caolines blancos se formaron a partir de las rocas cuarzos – feldespáticos y micáceos – cuarzosas; y los caolines abigarrados aparecen a partir de caolines hipergénicos grises y blancos o a partir de esquistos carbonatados, esquistos biotíticos, esquistos calcosilicatados o esquistos con intercalaciones carbonatados. En su constitución se encuentran, además de la caolinita, minerales tales como: illita, cuarzo, clorita, pirita, calcita, materia orgánica, y otros.

En cuanto al depósito “Cayo Guam”, la zona investigada se localiza a unos 4 km de la carretera Moa – Baracoa, en la provincia de Holguín. Los afloramientos son grandes taludes como resultado de potentes cortezas de meteorización desarrolladas a partir de la alteración de rocas básicas (gabroides), en el cual se distingue un material de aspecto terroso – arcilloso, con una coloración predominantemente rojiza. Estos materiales están compuestos por fracciones arcillosas como la caolinita y la montmorillonita, además de otras fases mineralógicas como la gibbsita, hematita, goethita y pequeñas cantidades de cuarzo y feldespatos. También presenta intercalaciones de gabros pobremente alterados depositados en la zona de forma artificial. Los afloramientos alcanzan más de 200 m de extensión y un espesor promedio de 20 m, siendo la extensión del depósito superior al kilómetro cuadrado.

Los yacimientos arcillosos “Remedios” y “Yaguajay” se encuentran en las cercanías de las ciudades de Remedios y Yaguajay, pertenecientes a las provincias de Villa Clara y Sancti Spíritus. Se asocian a la zona geológica de las arcillas Bamburanao, y abarcan una superficie de aproximadamente 120 hectáreas. En los mismos están presentes los sedimentos de arcillas de edad Cuaternario, constituidos por materiales de color amarillento hasta rojizos (figura 2), que van desde muy plásticas hasta poco plásticas, con tonalidades más oscuras, aumentando con la profundidad del estudio (0 - 3 m).

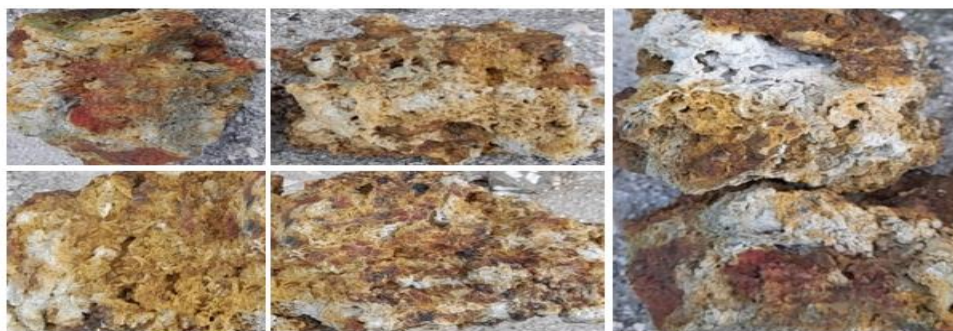


Figura 2. Muestras de los minerales de los yacimientos Remedios y Yaguajay

Macroscópicamente en su composición se aprecian pequeños cristales de carbonato hasta 3 mm, abundantes perdigones de hierro de hasta 5 mm, causantes del color rojizo, pequeños granos dispersos de feldespato, pequeños fragmentos irregulares de silicita y esporádicos nidos de caolín. En las paredes de las trincheras, en ocasiones se puede observar manchas de óxido de manganeso (birnessita).

3.2 Composición química y mineralógica

El análisis de los resultados de la caracterización química y mineralógica de los depósitos arcillosos objeto de estudio indica que: todas las arcillas evaluadas presentan un elevado contenido de Al_2O_3 y SiO_2 , lo cual refleja la presencia de fases minerales ricas en aluminio y silicio, como es el caso de las arcillas caoliníticas (tablas 1 y 2). El reporte de goethita y hematita en los difractogramas justifica los contenidos de óxidos e hidróxidos de hierro. Otros minerales acompañantes son: cuarzo, calcita, gibbsita y anatasa. Los metales pesados se encuentran en el orden del 1 – 2 %, pudiendo ser considerados como impurezas, y no tienen influencia significativa sobre la activación de las arcillas y su uso en la formulación de cementos ternarios tipo LC3.

Tabla 1. Contenidos de caolín equivalente, humedad y minerales en las muestras de arcillas

<i>Arcilla</i>	<i>% H₂O</i>	<i>% Keq</i>	<i>Minerales arcillosos</i>	<i>Minerales asociados</i>
Isla	6,3	43,8	caolinita, illita	calcita, cuarzo, clorita, pirita
Moa	8,4	59,6	caolinita, halloysita, caolinita-montmorillonita	cuarzo, gibbsita, hematita, goethita
Yaguajay	8,7	46,13	caolinita, nacrita, halloysita, vermiculita	calcita, cuarzo, goethita, hematita, birnessita, anatasa
Remedios	6,4	45,6	caolinita, halloysita, nontronita	calcita, cuarzo, goethita, hematita

Tabla 2. Composición química de las muestras de arcillas obtenida por AAS (*) y FRX

<i>Arcilla</i>	<i>Na₂O</i>	<i>MgO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>SiO₂</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>SO₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>CaO</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>PPI⁸⁵⁰</i>
Isla	0,15	0,33	30,44	56,6	0,03	0,014	1,56	0,24	0,76	1,44	10,2
Moa	0,74	1,35	30,57	34,7	0,04	1,25	0,1	1,9	0,52	13,5	14,37
Yaguajay	0,11	0,74	20,06	46,58	0,13	0,04	0,06	2,94	1,12	14,41	12,74
Remedios (*)	0,5	0,13	23,03	35,38	0,01	0,1	0,1	0,1	0,98	23,74	11,9

Por otra parte, todas las arcillas evaluadas poseen un contenido de minerales del grupo de la caolinita que oscila en un rango entre 40 % y 60 %, expresado como contenido de caolinita equivalente (K_{eq}), pudiéndose clasificar como minerales arcillosos de contenido medio, y cumplen con las recomendaciones de composición química expresadas en la norma cubana NC TS 528, (2013) para materiales de clase N, puzolanas naturales calcinadas y sin calcinar.

3.3 Molienda de las arcillas para su incorporación al proceso de calcinación piloto

Como se puede observar en la figura 3, el desmenuzamiento inicial de las arcillas provoca una redistribución significativa del tamaño de sus partículas, haciendo que disminuyan las fracciones más gruesas (+ 4,76; + 2,36 y + 1,18 mm) y aumenten las más finas (+ 0,6; + 0,3; + 0,15, + 0,09 y – 0,09 mm). Esta nueva condición es extremadamente importante desde el punto de vista tecnológico, ya que el grado de finura influye de manera positiva en la calidad de la calcinación, y sobre el grado de deshidroxilación que adquieren las arcillas al ser activadas térmicamente, principalmente en hornos rotatorios pequeños, como es el caso del instalado en la planta experimental LC3 de la UCLV.

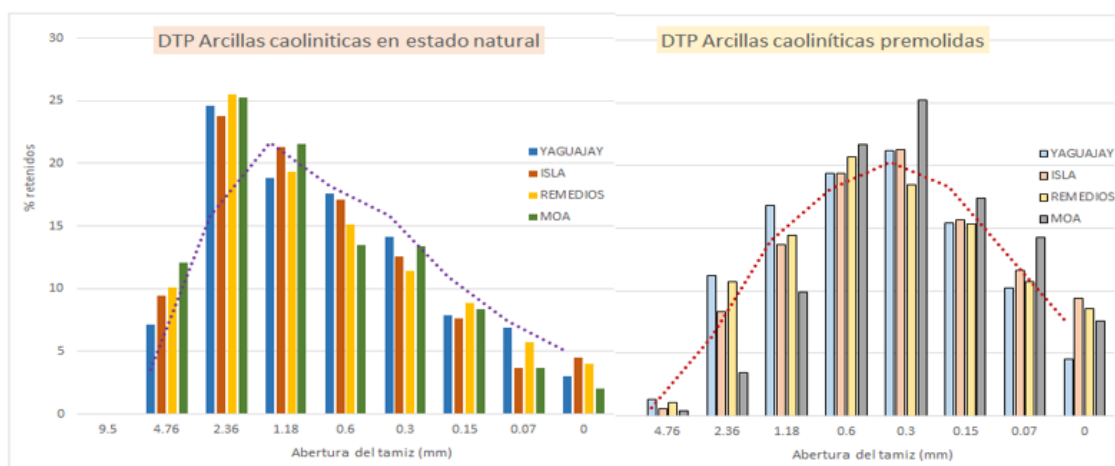


Figura 3. Variación de la DTP con la molienda inicial de las arcillas. (Elaboración propia)

3.4 Evaluación de la reactividad puzolánica y ajuste de sulfatos.

Los resultados de la evaluación de la reactividad de las arcillas por determinación del agua químicamente combinada se presentan en la figura 4. Este valor puede tomarse como un indicador directamente proporcional a la reactividad puzolánica alcanzada por los materiales calcinados y molidos. Todos los sistemas estudiados evolucionaron de manera similar en el tiempo, los valores de las muestras calcinadas a escala de laboratorio y de las calcinadas en planta piloto fueron similares, incluso si se tienen en cuenta las desviaciones asociadas al error experimental. Ello ratifica la calidad y eficiencia obtenida en la calcinación a nivel industrial, y la certeza en la definición de los parámetros de operación de la planta en estos estudios. La mayor reactividad puzolánica corresponde a la arcilla proveniente del depósito Cayo Guam, en Moa, seguida del material proveniente del depósito Remedios, y por último la arcilla extraída en Río del Callejón, Isla de La Juventud. En todos los casos la reactividad puzolánica

fue inferior a la de la muestra control. Se ratifica que el contenido de caolinita equivalente presente en los minerales arcillosos es uno de los factores principales que incide sobre la calidad en la activación de las arcillas, y en el logro de una elevada reactividad puzolánica, que se traduce luego en valores elevados de resistencia mecánica a la compresión (Martirena et al., 2024; Scrivener et al., 2025). La presencia de impurezas, calcita, sulfuros, hidróxidos metálicos y compuestos volátiles en la materia prima que entra al proceso, pueden influir de manera negativa en estos resultados.

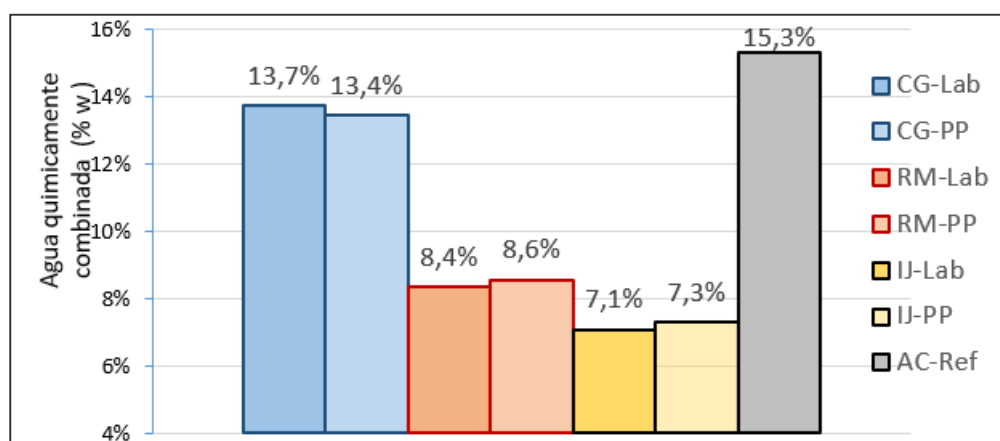


Figura 4. Valores del agua químicamente combinada para las arcillas en estudio, obtenidas a nivel de laboratorio (Lab), o en planta piloto (PP). (Elaboración propia)

Las pastas de cemento LC3 para los estudios de la cinética de hidratación a edades tempranas (ajuste de sulfatos) se formularon a partir de las arcillas provenientes de Remedios y Cayo Guam calcinadas en la Planta Piloto, debidamente molidas y homogenizadas, con incrementos progresivos de 1 % en el contenido de yeso, desde 1 hasta 4 % en peso.

Las curvas calorimétricas de evolución del calor para los productos de calcinación de estos materiales se muestran en la figura 5, observándose con claridad que, según lo reportado, el máximo exotérmico correspondiente a la formación secundaria de ettringita disminuye en intensidad y se desplaza en el tiempo, de manera proporcional al incremento en el contenido de yeso en la muestra objeto de estudio.

Los mejores resultados se obtienen, en ambos casos, para contenidos de yeso de un 4 % peso, lográndose una adecuada separación entre la reacción principal de hidratación del CPO y la formación secundaria de ettringita, y que ambos procesos se desarrollen dentro de las primeras 24 horas. En el caso de la formulación LC3 con la arcilla de Cayo Guam, y 4 % de yeso en peso, se observa un comportamiento ligeramente diferente en la cinética de hidratación. Ello pudo deberse a que no todas las muestras del Cemento Portland de referencia (CPO) adquiridas para la preparación de las pastas, tenían las mismas especificaciones técnicas, incorporando ligeras variaciones en los valores obtenidos en el ajuste de sulfatos.

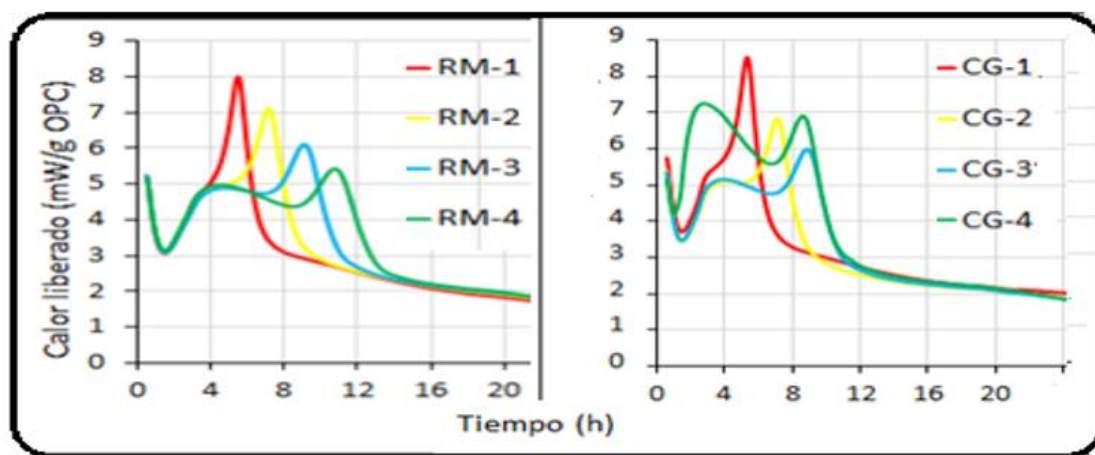


Figura 5. Curvas de evolución del calor liberado para pastas de cemento LC3 elaboradas con arcillas calcinadas de Remedios (RM) y Moa (CG), con un contenido de yeso de 1 a 4 %

3.5 Resistencia mecánica a la compresión

En la figura 6 se muestran los valores de la resistencia mecánica a compresión obtenidos para los diferentes tipos de arcillas caoliníticas evaluadas, tanto en formulaciones de cementos ternarios tipo LC3, como en morteros estandarizados elaborados con Cemento Portland Ordinario (OPC).

Las mezclas de cementos tipo LC3 (65/30/5), producidas con arcillas activadas en planta piloto (PP), superan en: 24 % (CG), 12,8 % (RM y YAG), y un 2 % (IJ), los valores del cemento Portland usado como referencia, para 28 días de curado. Ello indica que las arcillas calcinadas estudiadas tienen una alta reactividad, directamente proporcional a la concentración de caolinita equivalente. También se demuestra que las condiciones de operación, y los resultados de la deshidroxilación a nivel industrial, fueron muy satisfactorios, al no existir diferencias notables entre ellos, si se comparan con los valores obtenidos en las arcillas activadas en el laboratorio.

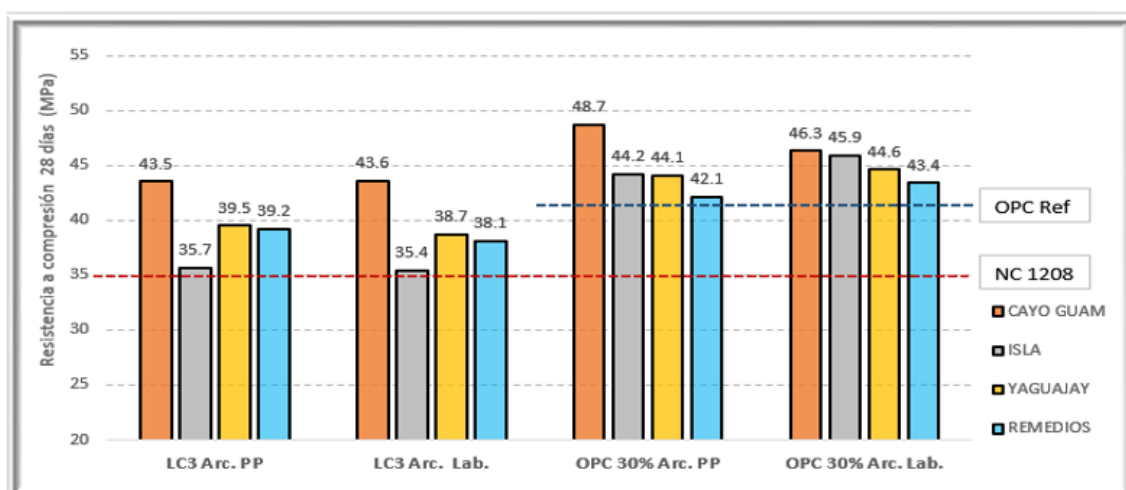


Figura 6. Valores de la resistencia a compresión a los 28 días para formulaciones de cementos y morteros con arcillas activadas en planta piloto (PP) y laboratorio (Lab). (Elaboración propia)

Los resultados de la resistencia a compresión en morteros estandarizados, fabricados con un 70 % de cemento P35 y 30 % de arcilla calcinada, muestran superioridad vs

CPO desde los 3 días. El índice de actividad puzolánica calculado por esta vía osciló entre 110 y 130 % hasta los 28 días. En los sistemas estudiados se observa una relación directamente proporcional entre la resistencia a la compresión [LC3-CG (43,6 MPa), LC3-YG (39,5 MPa), LC3-RM (39,2 MPa)] y los resultados de la reactividad puzolánica. El resultado de la Isla no se toma en cuenta en este análisis al considerarse no idóneo el CPO utilizado como estándar de referencia en esos ensayos. En todos los casos, se cumple con los requerimientos de resistencia mecánica establecidos para la clasificación de cemento con adición activa PP-35 expresados en la NC 96, (2017), y los requerimientos de resistencia mecánica establecidos por la norma cubana NC 1208, (2017) para los cementos ternarios TAC-35, la cuales establecen valores mínimos de resistencia a la compresión de 17, 25 y 35 MPa para 3, 7 y 28 días, respectivamente.

4. CONCLUSIONES

1. La molienda inicial de las arcillas provoca una redistribución significativa del tamaño de sus partículas, siendo esta nueva condición determinante para garantizar elevados niveles de deshidroxilación a escala piloto, y su adecuada activación.
2. El contenido de minerales arcillosos tipo 1:1 (grupo de la caolinita), expresado como contenido de caolinita equivalente, y el grado de deshidroxilación alcanzado durante la activación térmica, son los factores que más influyen sobre la reactividad puzolánica de las arcillas y la resistencia mecánica de sus formulaciones con CPO.
3. Los valores del agua químicamente combinada (protocolo R³), y de la resistencia a compresión, demuestran que no existen grandes diferencias entre la reactividad del material activado en laboratorio y a escala industrial, lo que indica excelentes condiciones de operación y elevada eficiencia de deshidroxilación en las pruebas tecnológicas a escala piloto.
4. Los depósitos arcillosos nacionales que fueron evaluados presentan grandes potencialidades para la fabricación, a escala industrial, de materiales cementicios suplementarios tipo LC3 y adiciones minerales activas LC2 de excelente calidad.

AGRADECIMIENTOS

A todo el personal científico, docente, técnicos, obreros y colaboradores participantes en los “Estudios piloto para la evaluación del potencial de arcillas caoliníticas como MCS” que hicieron, y hacen posible actualmente, continuar con estas experiencias de trabajo.

REFERENCIAS

- ASTM C1897-20. (2020). Standard test methods for measuring the reactivity of supplementary cementitious materials by isothermal calorimetry and bound water measurements. SV:04.02. ICS Code: 91.100.10; DOI: 10.1520/C1897-20. <https://store.astm.org/c1897-20.html>
- Ayati, B., Newport, D., Wong, H., & Cheeseaman, C. (2022). Low carbon cements: Potential for low-grade calcined clays to form supplementary cementitious
-

- materials. *Cleaner Materials*, 5, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100099>
- Barbhuiya, S., Nepal, J., & Das, B.B. (2023). Properties, compatibility, environmental benefits and future directions of limestone calcined clay cement (LC3) concrete: a review. *Journal of Building Engineering*, 79, 107794. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107794>
- Boakye, K., Khorami, M., Saidani, M., Ganjian, E., Dunster, A., Tyrer, M., & Ehsani, A. (2024). Influence of Calcining Temperature on the Mineralogical and Mechanical Performance of Calcined Impure Kaolinitic Clays in Portland Cement Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(4), 16128. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16128>
- Cheah, C. B. Liew, J.J., Khaw K., Akil, H., & Alengaram, U.J. (2025). Calcined clay as a low-carbon cementitious material: Comprehensive review of treatment method, properties, and performance in concrete. *Cleaner Waste Systems*, 11, 100323. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100323>
- Dhandapani, Y., Subramanian, K.K., Kanavaris, F., Black, L., & Bernal, S.A. (2025). The meta-kaolinite content of the calcined clay source impacts the mechanical and durability performance of blended Portland concrete. *Cement and Concrete Research*, 196, 107922. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107922>
- Dhar, M., & Bishnoi, S. (2024). Influence of calcination temperature on the physical and chemical characteristics of kaolinitic clays for use as supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 178, 107464. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107464>
- Ferreiro, S., Canut, M.M.C., Lund, J., & Herfort, D. (2019). Influence of fineness of raw clay and calcination temperature on the performance of calcined clay-limestone blended cements. *Applied Clay Science*, 169, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.12.021>
- Koutsouradi, A., Muzenda, T.R., Jensen, P., Leal da Silva, W., Damo, A., Georget, F., & Matschei, T. (2025). Impact of clay calcination method on the physicochemical properties of limestone calcined-clay cement. *Construction and Building Materials*, 473, 140939. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140939>
- Martirena, F., Mathieu, A., Oquendo, Y., Borrajo, R., Alujas, A., & Almenares, R. (2024). Impact of calcination technology on properties of calcined clays. *RILEM Technical Letters*, 8, 190 - 197. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2023.194>
- NC 96. (2017). Cemento con adición activa - Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, Cuba.
- NC 178. (2002). Áridos – Análisis Granulométrico. Oficina Nacional de Normalización, Cuba.
- NC 506. (2013). Cemento Hidráulico — Método de Ensayo — Determinación de la Resistencia Mecánica. Oficina Nacional de Normalización, Cuba.
- NC TS 528. (2013). Cemento hidráulico – Puzolanas- Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, Cuba.
- NC 1208. (2017). Cemento Ternario - Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, Cuba.
- Parashar, A., Medepalli, S., & Bishnoi, S. (2022). Reactivity Assessment of

Supplementary Cementitious Materials and Their Binary Blends Using R³ Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2), 04022434, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004607](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004607)

- Pinheiro, V.D., Alexandre, J., Xavier, G.C., Marvila, M.T., Monteiro, S.N., & de Azevedo, A.R.G. (2023). Methods for evaluating pozzolanic reactivity in calcined clays: a review. *Materials*, 16(13), 4778. <https://doi.org/10.3390/ma16134778>
- Scrivener, K., Sharma, M., & Zunino, F. (2025). Calcined Clays for Sustainable Concrete. *RILEM Bookseries*, 57, 171-181. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-83889-7>
- Snellings, R., Suraneni, P., & Skibsted, J. (2023). Future and emerging supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 171, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199>
- Thiéry, V. (2025). The discovery of pozzolanic properties of calcined clays in the late 1700s in France and the technologies associated with its activation. *Applied Clay Science*, 272, 107817. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2025.107817>
- Zunino, F., Boehm-Courjault, E., & Scrivener, K. (2020). The impact of calcite impurities in clays containing kaolinite on their reactivity in cement after calcination. *Materials and Structures*, 53, 44. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01478-9>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Guillermo Esperanza Pérez. Análisis formal, Conceptualización, conservación de datos, investigación, redacción-primera redacción, supervisión, redacción -revisión y edición, visualización.
- Dr.C. Iván Machado López. Análisis formal, conservación de datos, investigación, redacción - revisión y edición.
- Dr.Cs. José F. Martirena Hernández. Gestión de proyectos, metodología, recursos, obtención de financiación, supervisión, validación.