



CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

Premio Anual de la Academia de Ciencias de Cuba, 2020

Identificación y evaluación de arcillas caoliníticas para la producción de cemento ternario LC³ y adiciones minerales activas LC²

Roger S. Almenares Reyes ^{1*} <http://orcid.org/0000-0002-7185-7330>

Adrián Alujas Díaz ² <http://orcid.org/0000-0001-7012-9414>

José Fernando Martirena Hernández ² <http://orcid.org/0000-0002-0219-0739>

Carlos A. Leyva Rodríguez ¹ <http://orcid.org/0000-0002-9156-5327>

Sergio Betancourt Rodríguez ² <http://orcid.org/0000-0001-6532-8726>

Florencio Arcial Carratalá ² <http://orcid.org/0000-0002-7147-5228>

¹ Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Moa, Cuba

² Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Santa Clara, Cuba

*Autor para la correspondencia: ralmenares@ismm.edu.cu

RESUMEN

Palabras clave

arcillas caoliníticas; arcillas calcinadas; materiales cementicios suplementarios; adición mineral activa LC²; cemento de arcilla de base arcillas calcinada y caliza LC³

Introducción: La implementación a escala industrial de la producción de los cementos LC³ y de la correspondiente adición mineral activa (LC²) se encuentra limitada porque no existe una adecuada estrategia que permita la identificación y evaluación de los depósitos arcillosos existentes como fuente de materiales cementicios suplementarios (MCS) y a sus limitados recursos reportados. El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un procedimiento que permite la identificación y evaluación de depósitos arcillosos para ser empleados como MCS y establecer los parámetros para su adecuada selección. **Métodos:** Se estudiaron cuatro depósitos arcillosos, los cuales se caracterizaron química y mineralógicamente. Las arcillas investigadas se calcinaron a 750 y 850 °C, y fueron evaluados en su estado anhidro, en pastas y en morteros. **Resultados:** En las arcillas caracterizadas existe un predominio de los minerales arcillosos del grupo de la caolinita, mientras que sus relativamente altos contenidos de hierro limitan su explotación en aplicaciones propias de los caolines industriales. Los productos calcinados muestran una excelente reactividad puzolánica y los aglomerantes presentan un comportamiento similar a los cementos P-35. **Conclusiones:** Los cuatro depósitos presentan potencialidades para la producción de MCS a escala industrial. El contenido de caolinita, es el factor de mayor influencia sobre la reactividad puzolánica. La presencia de minerales acompañantes térmicamente inestables durante el proceso de calcinación también afecta la reactividad puzolánica. El procedimiento desarrollado constituye una sólida herramienta para la evaluación de las potencialidades de los depósitos arcillosos como fuente de MCS.



Identification and assessment of kaolinitic clays for the production of ternary cement LC3 and active mineral admixtures LC2

ABSTRACT

Keywords

kaolinitic clays; calcined clays; supplementary cementitious materials; active mineral addition LC2; limestone calcined clay cement LC3

Introduction: The industrial scale implementation of the production of LC3 cements and the corresponding active mineral addition (LC2) is limited because there is no adequate strategy that allows for the identification and evaluation of the existing clay deposits as a source of supplementary cementitious materials (MCS) and its scarce reported resources. The goal of this work is to develop a procedure that allows for the identification and evaluation of clay deposits to be used as MCS and to establish the parameters for their suitable selection. **Methods:** Four clay deposits were studied, which were chemically and mineralogically characterized. The clays investigated were calcined at 750 and 850 °C and were characterized from the chemical point of view and the specific surface, and their pozzolanic reactivity was assessed. The calcined clays were used in the formulation of LC3 cements, which were evaluated in their anhydrous state, in pastes and in mortars. **Results:** In the characterized clays there is a predominance of clay minerals from the kaolinite group, while their relatively high iron content limits their exploitation in applications of industrial kaolins. The calcined products show an excellent pozzolanic reactivity and the binders show a similar behavior to the P-35 cements. **Conclusions:** The four deposits present potentialities for the production of MCS on an industrial scale. Kaolinite content is the factor with the greatest influence on pozzolanic reactivity. The presence of thermally unstable accompanying minerals during the calcination process also affects pozzolanic reactivity. The procedure developed constitutes a solid tool for evaluating the potentialities of clay deposits as a source of MCS.

INTRODUCCIÓN

Entre la amplia variedad de MCS que pueden ser empleados para reemplazar parte del clínquer en el aglomerante, existe creciente interés en el empleo de las arcillas activadas térmicamente, especialmente de los minerales arcillosos del grupo de la caolinita, por la alta reactividad puzolánica de sus productos de calcinación y sus relativamente bajas temperaturas de activación. ^(1,2) Esto incluye no solo los yacimientos de arcillas caoliniticas de alta pureza, relativamente escasos y con alta demanda, principalmente por la industria del papel y la cerámica, sino también los depósitos con contenidos moderados de arcillas caoliniticas, muy abundantes en las zonas tropicales y subtropicales, ⁽³⁾ donde se concentra la alta demanda de materiales cementicios, ⁽⁴⁾ y sus recursos identificados e hipotéticos exceden los miles de millones de toneladas. ⁽⁵⁾

Varias investigaciones han demostrado la posibilidad de obtener, a partir de arcillas multicomponentes con solo un 40 % de caolinita, un material reactivo con un comportamiento similar al metacaolín comercial. ⁽⁶⁾ El efecto sinérgico resultante de la combinación de estas arcillas calcinadas y calizas en la sustitución de hasta un 50 % de clínquer ha permitido el desarrollo de una nueva familia de cementos, denominada por sus siglas en inglés LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*), con un comportamiento físico-mecánico similar al cemen-

to Portland y mejor durabilidad ante el ataque de cloruros. ⁽⁷⁾ Otra de las formulaciones de esta familia de aglomerantes, está basada es una mezcla de arcilla calcinada, caliza y yeso para obtener el denominado LC², una adición mineral activa que permite la sustitución de 50 % de cemento P-35. De estos nuevos sistemas cementicios se han realizado varias pruebas de producción a escala industrial y piloto en Cuba, y los resultados avalan las excelentes prestaciones de estos aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer y con una amplia posibilidad de implementarse a escala industrial y la mini industria local. ⁽⁷⁻⁹⁾ Sin embargo, la implementación de la producción de los aglomerantes LC³ en el país se encuentra limitada, porque no existe una adecuada estrategia que permita la identificación y evaluación de los depósitos arcillosos existentes como fuente de materias primas para la obtención de materiales cementicios suplementarios (MCS) y los limitados recursos identificados, los cuales han sido evaluados fundamentalmente para industria cerámica, refractaria y la producción de cemento blanco.

A partir de lo anterior, el objetivo del trabajo es el desarrollo de una metodología que permite, a partir de un mínimo de datos experimentales, la identificación y evaluación de depósitos arcillosos para ser empleados como MCS y establecer los parámetros para su adecuada selección para la obtención de cemento ternario LC³ y adiciones minerales activas LC².

MÉTODOS

La identificación de los depósitos se realizó mediante la utilización de las fuentes existentes en el servicio geológico de Cuba. Las áreas con mayores perspectivas seleccionadas inicialmente encuentran en Sancti Spiritus, Ciego de Ávila y Holguín. Fueron seleccionados cuatro depósitos de diferente origen geológico, actualmente inexplorados y sin reportes previos acerca de su utilización como fuente de MCS, tres de estos en la región central (La Loma, Loma Sur y Yaguajay) y uno en la región oriental (Cayo Guam).

Se caracterizaron desde el punto de vista de la composición química mediante métodos de absorción atómica, gravimétrico y volumétrico para las muestras básicas, y una completa caracterización químico-mineralógica mediante fluorescencia de rayos x (FRX), difracción de rayos x (DRX) y análisis termogravimétrico (ATG) para las muestras compósito, representativas de cada depósito.

Las arcillas fueron calcinadas a 750 °C y 850 °C, y los productos calcinados se caracterizaron mediante granulometría láser para la determinación de la distribución del tamaño de partículas (DTP) y mediante superficie específica por adsorción de nitrógeno, según la metodología *Brunauer-Emmett-Teller* (BET). La reactividad puzolánica de estos productos fue monitoreada a través del protocolo R³,⁽¹⁰⁾ solubilidad alcalina,⁽¹¹⁾ y resistencia a la compresión en morteros normalizados.⁽¹²⁾

Se prepararon siete cementos LC³ con las arcillas calcinadas, roca caliza y yeso, en las siguientes proporciones: 49 % de clínquer, 30 % de arcilla calcinada, 15 % de caliza y 6 % de yeso, con similar distribución granulométrica, y cuyas diferencias radican esencialmente en el origen y la temperatura de calcinación de las arcillas calcinadas. Los cementos fueron caracterizados en su estado anhidro mediante DTP y BET. Las pastas preparadas fueron caracterizadas mediante ATG y DRX. Adicionalmente, la estructura de poros de las pastas fue caracterizada mediante Porosimetría por Intrusión de

Mercurio (PIM). Cada serie cemento fue sometida a ensayos de resistencia a la compresión en morteros normalizados.⁽¹²⁾

A partir de los resultados de caracterización de las arcillas, de los productos calcinados y los cementos ternarios se desarrolló un procedimiento de selección preliminar de depósitos arcillosos con cualidades para ser empleado como fuente de materia prima para la producción de MCS basado en criterios químicos y mineralógicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización químico-mineralógica de las arcillas naturales

La caracterización química y mineralógica (Tabla 1) de los depósitos arcillosos como fuente de materia prima para la obtención de MCS arrojó que todas las arcillas presentan un elevado contenido de Al₂O₃, lo cual es indicativo de la presencia de fases ricas en aluminio, como las arcillas caolínicas. Los relativamente altos contenidos de Fe₂O₃ reportados para todas las muestras se asocian fundamentalmente a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro. Dentro de los minerales arcillosos predominan los del grupo de la caolinita y los minerales acompañantes que más se distinguen son el cuarzo, fases de hierro y calcita. Los relativamente altos contenidos de Fe₂O₃ y TiO₂, formadores de compuestos cromóforos, son superiores en todos los casos a las especificaciones de los niveles de impurezas tolerados en la mayoría de las aplicaciones industriales de los caolines, aspecto que no limita su aplicación como MCS.

Los depósitos identificados se caracterizan por un contenido predominante de minerales del grupo de la caolinita que va desde 40 % a 80 %, calculado mediante datos proporcionados por la técnica ATG y expresado como contenido de caolinita equivalente (K^E). La expresión de cálculo desarrollada en esta investigación se presenta en la ecuación 1.^(13,14)

Tabla 1. Composición química y mineralógica de las muestras compósito en su estado natural

Composición química (%)													
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	Otros	PPI
LL	61,40	18,86	9,61	0,07	0,15	0,02	0,26	0,90	0,62	0,13	0,03	0,21	7,80
LS	50,88	25,23	12,58	0,28	0,95	0,02	0,08	0,32	0,98	0,05	0,04	0,29	8,39
YG	46,58	20,06	14,41	2,94	0,74	0,04	0,11	0,06	1,12	0,13	0,73	0,14	12,74
CG	39,55	31,58	12,68	0,05	0,53	0,13	0,14	0,17	0,52	0,04	0,14	0,24	14,37
Composición mineralógica													
	Minerales arcillosos						Minerales asociados						K ^E (%)
LL	caolinita, moscovita						cuarzo, hematita, goetita						42,16
LS	caolinita, nacrita, vermiculita, montmorillonita						cuarzo, hematita, goetita						57,78
YG	caolinita, nacrita, halloysita, vermiculita						calcita, cuarzo, goetita, anatasa						46,13
CG	caolinita, halloysita, caolinita-montmorillonita						cuarzo, gibsita, hematita, goetita						81,06

$$K^E = \frac{m(350) - m(850)}{m(200) \cdot 0.1396} \quad (1)$$

Caracterización químico-morfológica de las arcillas calcinadas

El contenido total de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ es superior a 70 % y el contenido de SO₃ inferior al 3 %, lo que asegura que los materiales caracterizados 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. ⁽¹⁵⁾

Se evidencia una disminución de la superficie específica en las arcillas activadas térmicamente con el aumento de la temperatura de calcinación de 750 °C a 850 °C, la cual está influenciada por la composición mineralógica y el contenido de minerales arcillosos en la muestra. La presencia de calcita, vermiculita y montmorillonita, provoca una disminución de la superficie específica, mientras que, en las muestras con contenidos de minerales más estables a las temperaturas analizadas como la moscovita y el cuarzo, el efecto sobre la disminución de la superficie específica es menor (Fig. 1A).

Reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas

Los resultados de la reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas presentan cualidades para obtener productos de elevada reactividad puzolánica. A la temperatura de calcinación de 750 °C, la reactividad puzolánica determinada mediante R³ presenta un orden decreciente: LS > YG > LL, lo cual se corresponde con el contenido de caolinita equivalente para estas muestras. Sin embargo, a la temperatura de calcinación de 850 °C, el orden decreciente de la reactividad es CG > LS > LL > YG. Similar comportamiento se observa mediante solubilidad alcalina y resistencia a la compresión.

El contenido de minerales arcillosos, expresado como K^E es el factor de mayor influencia sobre la reactividad puzolánica de sus productos de calcinación, aunque la temperatura de calcinación y la presencia de minerales acompañantes térmicamente inestables durante el proceso de calcinación también pueden afectar la reactividad puzolánica. Lo anterior se evidencia, en que los productos de calcinación alcanzan su mayor reactividad puzolánica a la temperatura de calcinación de 850 °C para las muestras de Cayo Guam, Loma Sur y La Loma, en ese orden, y a la temperatura de 750 °C para la muestra de Yaguajay, donde la presencia de calcita con un contenido de aproximadamente 4 % provoca un efecto fundente, que contribuye a la aglomeración de las partículas y a la formación de fases amorfas ricas en calcio con baja superficie específica que atrapan Al y/o Si. Por tanto, para materiales arcillosos que contie-

nen calcita en aproximadamente 4 %, se recomienda disminuir la temperatura de calcinación a valores entre 750 °C y 800 °C.

Evaluación de los cementos ternarios LC³

Los cementos ternarios LC³, con similar distribución granulométrica, presentan una superficie específica que está determinada por la superficie específica de los productos de calcinación de la arcilla (Figura 1B). En estos aglomerantes se identifican los carboaluminatos y la etringita como principales productos de hidratación. El alto contenido de agua químicamente combinada y el contenido de portlandita muestran una relación inversamente proporcional entre sí, y están en correspondencia con la reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas ⁽¹⁶⁾, según los valores de calor acumulado determinados mediante el ensayo R³.

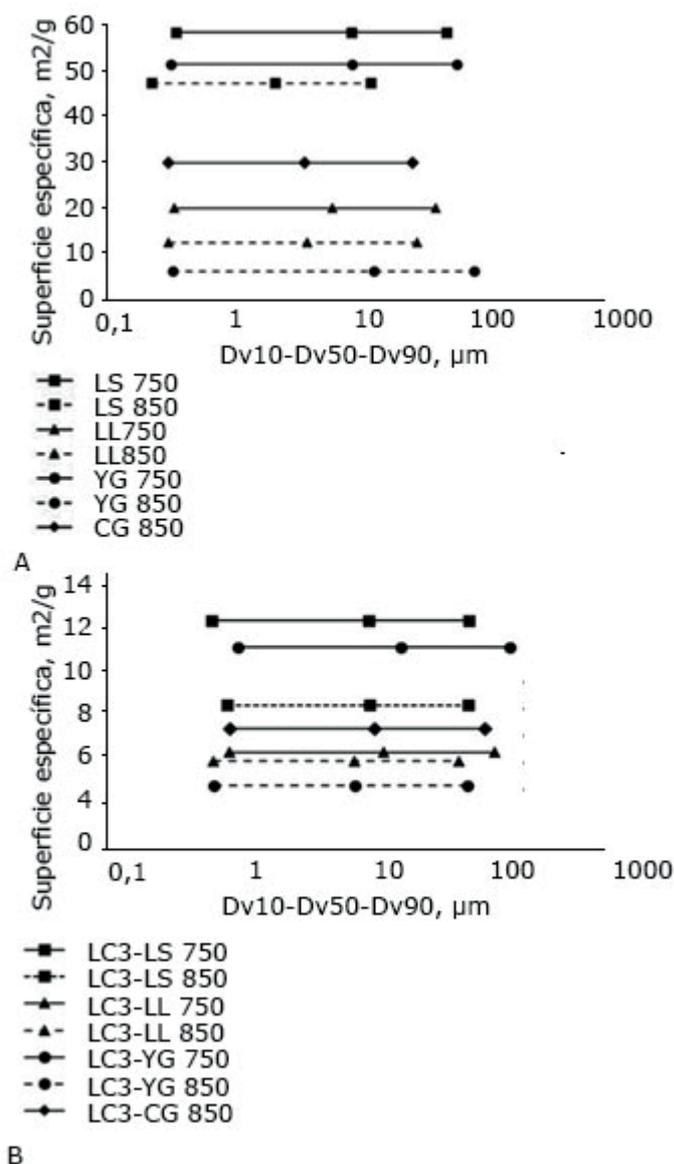


Fig. 1. Relación entre la superficie específica y la distribución granulométrica de los productos de calcinación (A) y los cementos LC³ (B)

En todos los sistemas LC³ se observa un refinamiento de la estructura de poros desde los 2 días a los 28 días y una resistencia a la compresión [LC3-CG (52,66 MPa), LC3-LS (50,68 MPa), LC3-LL (41,67 MPa), LC3-YG (39,48 MPa)] que tiene relación con los resultados de la reactividad puzolánica.⁽¹⁶⁾ 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 96:2011 y los requerimientos de resistencia mecánica establecidos por la norma cubana NC 1208 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.^(18,19,20)

Estos resultados confirman las buenas potencialidades de los depósitos arcillosos estudiados para ser utilizados como fuente de MCS en la producción de cementos con altos volúmenes de sustitución de clínquer en Cuba y que sus prestaciones están fundamentalmente definidas por el contenido de caolinita equivalente en la muestra de arcilla en su estado natural.

Propuesta de un procedimiento para la evaluación y selección preliminar de las arcillas como fuentes de material cementicio suplementario

El procedimiento propuesto se presenta en la Figura 2. A partir de los resultados de investigaciones previas y de la discusión de los resultados de esta investigación presentados parcialmente en varias contribuciones de los autores del presente trabajo,^(6,10,13,16,17) el parámetro más importante en la determinación de la reactividad puzolánica de los productos de calcinación de las arcillas caoliníticas es su contenido de caolinita, en contenidos no inferiores al 40 % en masa. Teniendo en cuenta la composición teórica de un material arcilloso con 40 % de caolinita y los resultados del análisis de las diferentes arcillas caoliníticas evaluadas en esta investigación y de otros materiales arcillosos reportados en investigaciones precedentes,^(21,22,23) permite, a partir del límite mínimo teórico y de la experiencia práctica, establecer como criterio empírico de selección los siguientes parámetros: $Al_2O_3 \geq 18,00 \%$; $Al_2O_3/SiO_2 \geq 0,30$ y $PPI \geq 7,00 \%$, $SO_3 \leq 2,0$ y $CaO \leq 3,0 \%$.

En este análisis se incluye la influencia de minerales acompañantes sobre la reactividad puzolánica. En el caso de la calcita, mineral común en arcillas cubanas de origen sedimentario, tiene un efecto negativo cuando se calcina a temperaturas superiores a 800 °C, producto a la formación de fases vítreas ricas en calcio, silicio y aluminio de baja superficie específica. También se ha reportado un efecto negativo en muestras de que contienen piritita en arcillas de origen hidrotermal. En ambos casos, la descomposición de

sulfuros y carbonados generan emisiones indeseables a la atmósfera con un impacto negativo sobre el medio ambiente, perdiendo la esencia de la tecnología de bajo carbono de los cementos LC³.

El material aceptado a partir de su conformidad con los criterios de composición química anteriormente planteados, se establecen criterios adicionales semicuantitativos, tomando como principal criterio las pérdidas de masa asociadas a la deshidroxilación en el intervalo de temperatura de entre los 350 °C y 850 °C. Entonces los criterios químicos y mineralógicos se relacionan en la representación gráfica de un diagrama que combina el % Al_2O_3 con las PPI en el intervalo de 350 °C a 850 °C (Fig. 3), donde I representa la zona de alto potencial, II la zona de buen potencial, III zona de moderado potencial y IV constituye la zona donde se valora el material de acuerdo a la presencia de minerales arcillosos que afectan la reactividad o que su activación provoca efectos negativos sobre el medio ambiente. La línea A en el gráfico indica la relación que existe entre ambos parámetros para los minerales del grupo de la caolinita, e indica asimismo el máximo valor que pueden tomar las pérdidas de masa asociadas a los minerales arcillosos, en relación con el contenido de Al_2O_3 .

Estos criterios fueron aplicados para la evaluación de las arcillas objeto de estudio en este trabajo y de otras 9 muestras de arcillas caoliníticas procedentes de distintos yacimientos de Latinoamérica, Europa y Asia (A-I). También se incluyen dos arcillas de la región central de Cuba (designadas como MN y PZ), MN la primera arcilla evaluada en Cuba como MCS a escala de laboratorio,^(6,22) y PZ evaluada y empleada en la primera prueba industrial de producción de cemento de bajo carbono LC³ en Cuba,^(8,23,24) y tres patrones mineralógicos de caolinita (KW), illita (IW) y montomorillonita (MW) suministrados por la firma *Wards Natural Science Establishment, Inc* (Fig. 4).

El procedimiento se extendió a otras 120 arcillas y fue aplicado para realizar la investigación geológica de la materia prima arcillosa utilizada en la segunda prueba industrial de producción de cemento LC³ y la adición activa en la Fábrica de Cemento Siguaney. Los resultados de la resistencia a la compresión de los cementos ternarios LC³ obtenidos en esta prueba (LC³ YGT) que se presentan en la Tabla 2, demuestran que el procedimiento propuesto constituye una herramienta confiable para la selección de arcillas caoliníticas como fuente de materia prima en la obtención de MCS y que resuelve la limitante de la necesidad de técnicas avanzadas para la evaluación de la reactividad puzolánica de arcillas calcinadas con la consiguiente disminución de los costos de una completa evaluación de reactividad.

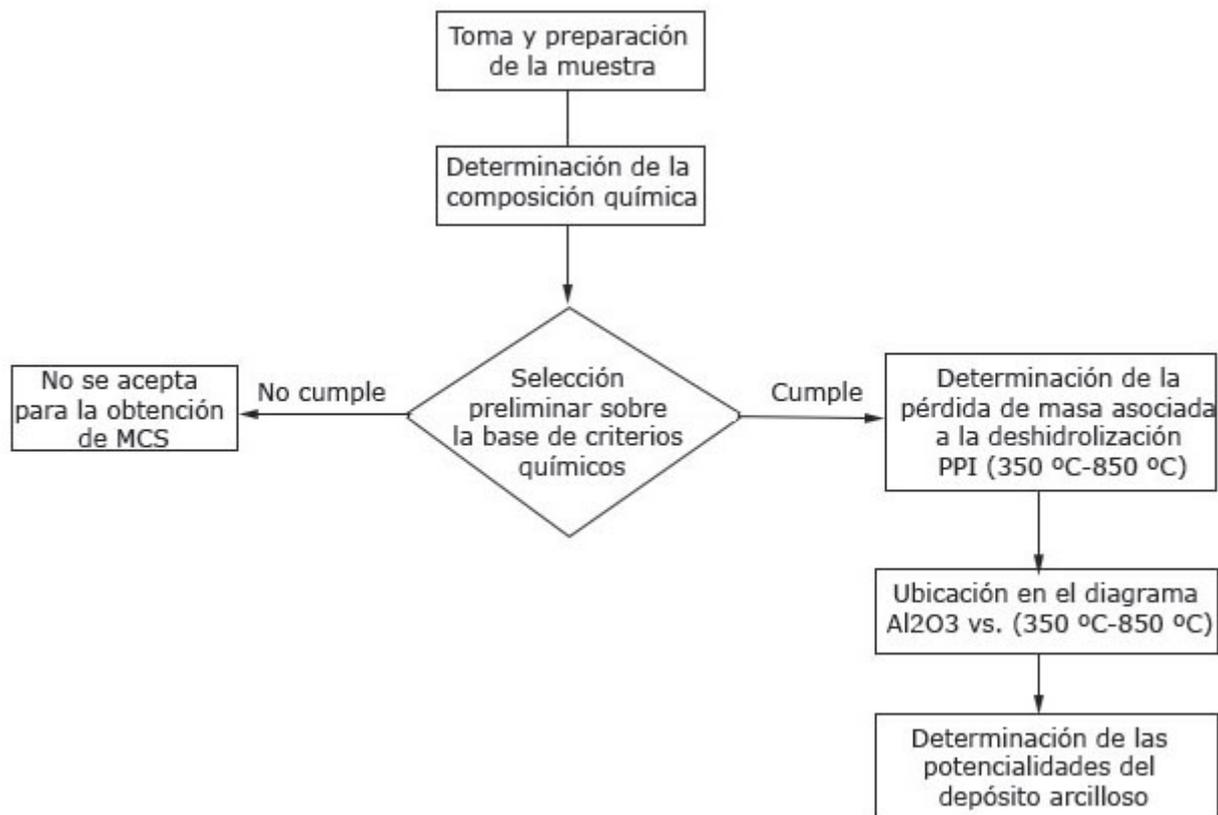


Fig. 2. Procedimiento para la evaluación preliminar de las potencialidades de los depósitos arcillosos como fuente de MCS.

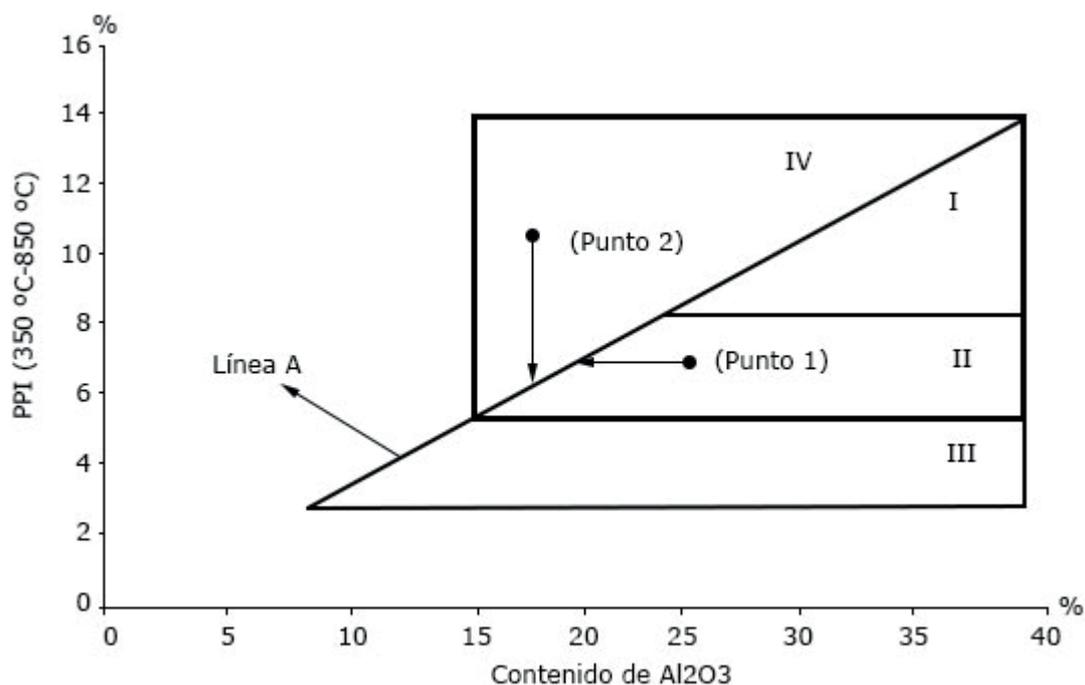


Fig. 3. Clasificación de la arcilla de acuerdo a su potencial

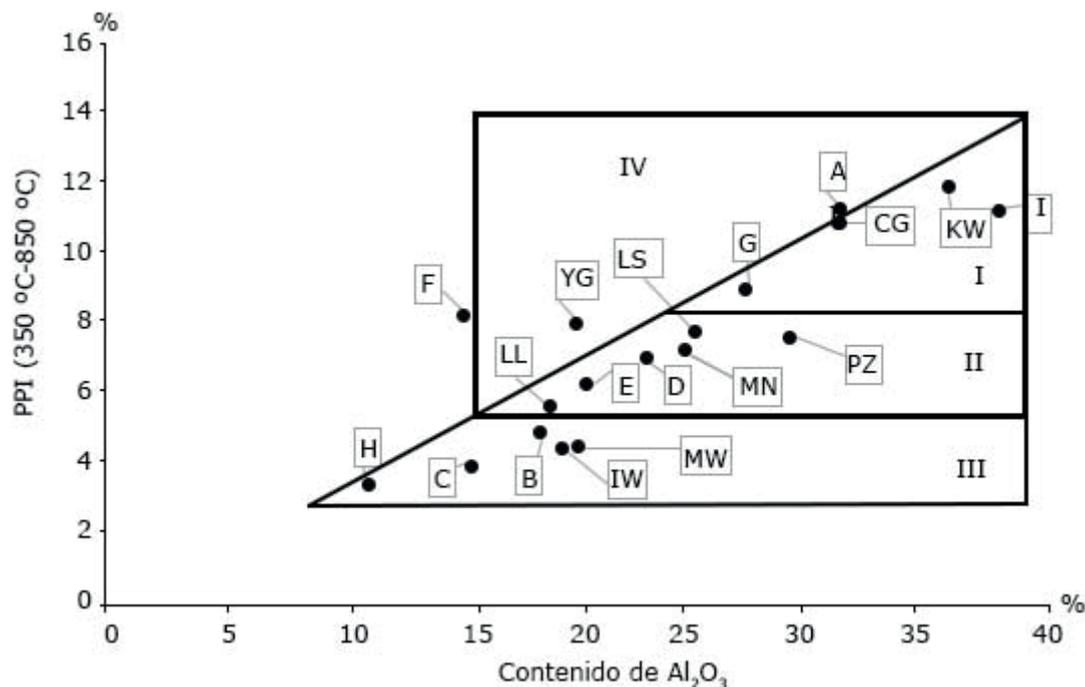


Fig. 4. Ejemplo de clasificación de arcillas de acuerdo a su localización en las zonas del diagrama.

Tabla 2. Resistencia a la compresión del cemento ternario de tipo LC³ producido a escala piloto

Cementos	Resistencia a la compresión, MPa		
	2 días	7 días	28 días
LC ³ YGT	17,66	30,83	43,37

Conclusiones

Se identifican, evalúan y documentan, por primera vez, cuatro depósitos arcillosos cubanos con potencialidades para la producción, a escala industrial, de materiales cementicios suplementarios en la producción de LC³ y adiciones minerales activas LC².

El contenido de minerales arcillosos en la muestra en su estado natural, expresado como contenido de caolinita equivalente, es el factor de mayor influencia sobre la reactividad puzolánica de sus productos de calcinación. La temperatura de calcinación y la presencia de minerales acompañantes térmicamente inestables durante el proceso de calcinación también pueden afectar la reactividad puzolánica.

El procedimiento propuesto, basado en el desarrollo de criterios de selección según la composición química del material (% Al₂O₃ > 18,0; Al₂O₃ / SiO₂ > 0,3; PPI > 7,0; % CaO < 3,0; % SO₃ < 3,0), y la representación gráfica en un diagrama que combina el % Al₂O₃ con las PPI en el intervalo de 350 a 850 °C constituye una herramienta rápida, sencilla y confiable para la selección de arcillas caoliniticas como fuente de materia prima en la obtención de MCS.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Elizabeth Cabrera Apolinaire, Lisandra Poll Legrá, François Avet, Prof. Dr. Karen Scrivener y Luis Alberto Pérez García. También nos gustaría reconocer el apoyo brindado por la Empresa Geomina del Centro, el Servicio Geológico de Cuba, la Dirección de Geología del Ministerio de Energía y Minas, y al Laboratorio de Materiales de Construcción de la École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suiza (EPFL).

Recibido: 25/05/2021

Aprobado: 12/08/2021

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. He C, Osbaeck B, Makovicky E. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*. 1995;25(8):1691-702.
2. Fernández R, Martirena F, Scrivener KL. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*. 2011;41(1):113-22.
3. Velde B, editor. *Origin and Mineralogy of Clays*. Clays and the Environment. Guelders, Netherlands: Springer Science & Business Media; 1995: 439p.
4. Scrivener KL. Options for the future of cement. *The Indian Concrete Journal*. 2014; 88(7):11-21.

5. Harvey CC, Legaly G. Conventional applications. En: Bergaya F, Theng BKG, Lagaly G, editors. Handbook of Clay Science. Amsterdam: Elsevier Ltd.; 2006: 501-40p.
6. Alujas A, Fernández R, Quintana R, Scrivener K, Martirena F. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays : Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. Applied Clay Science. 2015; 108: 94-101.
7. Vizcaíno L, Sánchez S, Pérez A, Damas S, Scrivener K, Martirena F. Industrial trial to produce low clinker, low carbon cement. Materiales de Construcción. 2015; 65(317): e045.
8. Almenares RS, Vizcaíno LM, Damas S, Mathieu A, Alujas A, Martirena F. Industrial calcination of kaolinitic clays to make reactive pozzolans. Case Studies in Construction Materials. 2017; 6: 225-32.
9. Hernández JFM, Scrivener K. Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba. En: Scrivener K, Favier A, editores. Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries Vol. 10. Netherlands: Springer; 2015:323-29p.
10. Avet F, Snellings R, Alujas A, Ben M, Scrivener K. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. Cement and Concrete Research. 2016; 85:1-11.
11. Cabrera E, Almenares R, Alujas A. Assessment of the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays by a rapid alkaline solubility test. En: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editores. Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries Vol. 16. Dordrecht: Springer; 2018:98-104p.
12. NC 506: 2013. Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica. Oficina Nacional de Normalización (NC); 2013:26.
13. Alujas Díaz A, Almenares Reyes RS, Arcial Carratalá F, Martirena Hernández JF. Proposal of a methodology for the preliminary assessment of kaolinitic clay deposits as a source of SCMs. En: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editores. Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries Vol. 16. Dordrecht: Springer; 2018:29-34p.
14. Díaz AA, Reyes RSA, Carratalá FA, García LAP, Rodríguez CAL, Hernández JFM. The Experience of Cuba TRC on the Survey of Kaolinitic Clay Deposits as Source of SCMs-Main Outcomes and Learned Lessons. En: Bishnoi S, editor. Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries Vol. 25. Singapore: Springer; 2020:1-8p.
15. NC TS 528. Cemento hidráulico-Puzolanas-Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización (NC); 2013:8.
16. Almenares Reyes RS, Díaz AA, Rodríguez SB, Rodríguez CAL, Hernández JFM. Assessment of Cuban kaolinitic clays as source of supplementary cementitious materials to production of cement based on clinker-Calcined clay-Limestone. En: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editores. Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries (16)Dordrecht: Springer; 2018:21-8.
17. Almenares-Reyes RS, Díaz AA, Legrá LP, Bassas-Noa PR, Rodríguez SB, Martirena-Hernández JF, et al. Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer-arcilla calcinada-caliza (LC3). Minería y Geología. 2016; 32(4):63-76.
18. NC 96. Cemento con adición activa. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización (NC);2011:7.
19. Rocha D, Almenares R, Sanchez S, Alujas A, Martirena F. Standardization strategy of low carbon cement in Cuba. Case study for "Siguaney" cement factory. En: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editores. Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries Vol. 16. Dordrecht: Springer; 2018:391-407.
20. NC/CTN22. NC 1208:2017. Cemento Ternario-Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización (NC); 2017:9.
21. Fernández R. Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries [Tesis Doctoral]. Faculté Sciences et Techniques de L'Ingenieur. [Lausanne, Suiza]: École Polytechnique Federale de Lausanne; 2009.
22. Alujas A. Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente [Tesis Doctoral]. [Santa Clara, Cuba]: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas; 2010.
23. Vizcaíno LM. Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer-arcilla calcinada-caliza [Tesis Doctoral]. [Santa Clara, Cuba]: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas; 2014.
24. Martirena F, Alujas A, Vizcaino L, Berriel S, Díaz E, Abdel P, et al. Desarrollo y producción industrial de un cemento de bajo carbono en Cuba. Anales de la Academia de Ciencias de Cuba. 2016; 6(3):1-8.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autoría

- Conceptualización: Roger Samuel Almenares Reyes, Adrián Alujas Díaz, José Fernando Martirena Hernández.
- Curación de datos: Roger Samuel Almenares Reyes, Adrián Alujas Díaz.
- Análisis formal: Roger Samuel Almenares Reyes, Adrián Alujas Díaz.
- Adquisición de fondos: José Fernando Martirena Hernández.
- Investigación: Roger Samuel Almenares Reyes, Adrián Alujas Díaz.
- Metodología: Roger Samuel Almenares Reyes, Adrián Alujas Díaz, José Fernando Martirena Hernández.
- Administración del proyecto: José Fernando Martirena Hernández
- Recursos: Roger Samuel Almenares Reyes, Adrián Alujas Díaz, José Fernando Martirena Hernández, Carlos Alberto Leyva Rodríguez, Sergio Betancourt Rodríguez, Florencio Arcial Carratalá.
- Supervisión: Adrián Alujas Díaz, José Fernando Martirena Hernández, Carlos Alberto Leyva Rodríguez, Sergio Betancourt Rodríguez, Florencio Arcial Carratalá.
- Validación: Roger Samuel Almenares Reyes, Adrián Alujas Díaz
- Visualización: Roger Samuel Almenares Reyes

- Redacción-borrador original: Roger Samuel Almenares Reyes, Adrián Alujas Díaz, José Fernando Martirena Hernández, Carlos Alberto Leyva Rodríguez, Sergio Betancourt Rodríguez, Florencio Arcial Carratalá.
- Redacción-revisión y edición: Roger Samuel Almenares Reyes, Adrián Alujas Díaz, José Fernando Martirena Hernández, Carlos Alberto Leyva Rodríguez, Sergio Betancourt Rodríguez, Florencio Arcial Carratalá.

Financiación

La investigación fue financiada por la Agencia Suiza para la Cooperación y Desarrollo (COSUDE) bajo el proyecto *Low Carbon*

Cement, con la participación del Servicio Geológico de Cuba y el Ministerio de la Construcción.

Cómo citar este artículo

Almenares Reyes RS., Alujas Díaz A, Martirena Hernández JF, Leyva Rodríguez CA. et al. Identificación y evaluación de arcillas caoliníticas para la producción de cemento ternario LC3 y adiciones minerales activas LC2. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba* [internet] 2021[citado en día, mes y año];11(3): e1034. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1034>

