

Potencialidades del depósito arcilloso Almacenes en Cayo Guam para la producción de LC3

Rosa Delia Palacios González

rosa@profix.co.cu

Salder Sánchez Hechavarría

sshechavarría@ismm.edu.cu

Leryanis Rodríguez Moreno

lrmoreno@ismm.edu.cu

Aurelia Viada Estévez

avestevez@ismm.edu.cu

Universidad de Moa. (Cuba)

Resumen: Se evaluaron las potencialidades del depósito arcilloso Almacenes en Cayo Guam para ser empleado como material cementicio suplementario en la producción de cemento LC3. La materia prima fue caracterizada mediante fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y análisis termogravimétrico. La arcilla calcinada, el cemento ternario y el cemento Portland de referencia fueron caracterizados mediante la determinación de la distribución de tamaño de partículas. La reactividad puzolánica fue determinada mediante el índice de actividad de resistencia en sistemas cemento Portland y el comportamiento físico-mecánico del cemento LC3 formulado fue seguido mediante resistencia a la compresión en morteros. El índice de actividad de resistencia a los 28 días es 106,26 %, lo que indica una elevada reactividad puzolánica. Los morteros de aglomerante LC3 presentan un comportamiento similar al cemento ternario TAC-35. Se concluye que el material del depósito arcilloso Almacenes en Cayo Guam presenta potencialidades para ser utilizado como material cementicio suplementario para la fabricación del cemento ternario de tipo LC3.

Palabras claves: aglomerante ternario; clínquer; materiales de construcción; caolinita.

Recibido: 3 enero 2023/ Aceptado: 10 mayo 2023.

Potentialities of the argillaceous deposit Almacenes in Cayo Guam for the production of LC3

Abstract: The potential of the Almacenes clayey deposit in Cayo Guam to be used as supplementary cementitious material in the production of LC3 cement was evaluated. The raw material was characterized by X-ray fluorescence, X-ray diffraction and thermogravimetric analysis. The calcined clay, the ternary cement and the reference Portland cement were characterized by determining the particle size distribution. The clayey deposit under study is characterized by a relatively high content of aluminum oxide and loss on ignition, which is related to the predominance of kaolinite (~ 77%), an adequate composition to be considered with potential for use as a cementitious material. supplementary. The resistance activity index at 28 days is 106.26 %, which indicates a high pozzolanic reactivity. LC3 binder mortars behave similarly to TAC-35 ternary cement. It is concluded that the material from the Almacenes clay deposit in Cayo Guam has the potential to be used in the construction materials industry as a supplementary cementitious material for the manufacture of LC3 type ternary cement.

Keywords: ternary binder; clinker; construction material; kaolinite.

Introducción

La aplicación más importante del cemento Portland está vinculada a la fabricación del hormigón, material estimado como uno de los más utilizados y producidos en todo el mundo (Scrivener, 2014; Maghfouri *et al.*, 2021; Díaz, Altamirano & Muñoz, 2022). Contradictoriamente, su proceso de fabricación es considerado el responsable del 7 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera debido a los elevados volúmenes de producción a escala global, además de ser una industria altamente consumidora de energía, con alrededor de 7 % del consumo de energía total en el sector industrial (IEA/CSI-WBCSD, 2018).

La reducción del clínquer a través del empleo de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) es una de las alternativas más satisfactorias para su desarrollo a corto y a mediano plazo, entre las definidas por la industria del cemento para mitigar su impacto negativo al medio ambiente (IEA/CSI-WBCSD, 2018).

En años recientes ha surgido un sistema cementicio ternario de base cemento, arcilla calcinada y caliza, conocido por sus siglas en inglés como LC3 (Limestone Calcined Clay Cement), que permite sustituir hasta 50 % de clínquer en el aglomerante (Martirena *et al.*, 2016; Martínez *et al.*, 2022).

Una de las mayores limitaciones para la introducción de este novedoso sistema cementicio se encuentra en la disponibilidad conocida de materias primas. Por tanto, el mayor reto para el aumento de los niveles de sustitución de clínquer a partir del uso de MCS radica en la identificación y evaluación de fuentes de este tipo de materiales sobre la base de su disponibilidad regional.

Materiales y métodos

Selección de la materia prima

El área de interés fundamental en esta investigación es la región de Moa, donde se conoce de numerosos depósitos con diferentes contenidos de caolinita y otras fases arcillosas que podrían ser aprovechadas para la obtención de MCS. Sobre la base de los estudios experimentales previos, el área más promisoría es Cayo Guam, con varios afloramientos evaluados con buenas potencialidades.

Estas cortezas aluminosas han sido recomendadas como materia prima de productos refractarios y de ladrillos cerámicos para la construcción (Njila and Díaz-Martínez, 2016; Cabo de Villa, Palacios & Garrido, 2017). Sin embargo, en la actualidad no son empleadas en ninguna de estas industrias.

Los criterios de selección se basan generalmente en el contenido de caolinita en el material arcilloso, debido a su elevada reactividad en comparación otros minerales arcillosos (Garg and Skibsted, 2019; Tironi, 2013). El procedimiento para la selección de este tipo de material basado en criterios químicos y mineralógicos se presenta de forma esquemática en la Figura 1.

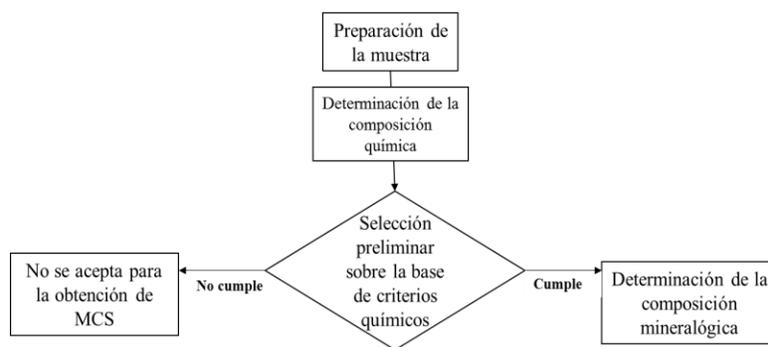


Figura 1. Procedimiento para la evaluación preliminar de las potencialidades de los depósitos arcillosos como fuente de MCS (Almenares, 2017).

Los criterios de selección para que un material arcilloso se pueda considerar, de forma preliminar, con cualidades para ser empleado como fuente de materia prima para la obtención de MCS, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios establecidos para la selección preliminar

	Criterios límites
Al ₂ O ₃	>18,0 %
CaO	<5,0 %
SO ₃	<3,0 %
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	>0,3
Pérdida por ignición (PPI)	>7,0 %
Contenido de caolinita	>40,0 %

Descripción del depósito arcilloso

El sector analizado está ubicado a 1 km de la carretera Moa – Baracoa. Aflora una corteza de gabros meteorizados que han dado lugar a una potente corteza de material

arcilloso de elevada plasticidad con algunas intercalaciones de gabros menos afectados por el intemperismo en comparación con el material más abundante que se observa.

El área que ocupa el depósito donde afloran estas capas meteorizadas bien expuestas es de aproximadamente 150 m de longitud y 60 m de ancho (9000 m²), con una potencia promedio de material útil de 8 m y 2 m de material estéril compuesto por un material no arcilloso (gabros poco alterados y óxidos e hidróxidos de hierro intercalados y una pequeña capa vegetal).

La génesis del yacimiento está determinada por la alteración de los feldspatos producto de la meteorización de los gabroides (Njila & Díaz-Martínez, 2016) de acuerdo a los estudios realizados en otras áreas aledañas que se localizan otros afloramientos con características similares.

Toma y preparación de las muestras

La toma de la muestra se produjo con la asesoría de especialistas del departamento de Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Fueron seleccionados cuatro perfiles en el depósito, a una distancia de 30 m, a partir de la aflorabilidad del material arcilloso. Las coordenadas de cada perfil se presentan en la Tabla 2.

El muestreo se realizó por el método de surco continuo, de modo que se abarcaron las diferentes litologías del afloramiento con el objetivo de obtener una muestra representativa a todo lo largo de los perfiles de meteorización. De cada surco fueron tomados 5 kg y mezclados para conformar una muestra compósito de 20 kg.

Tabla 2. Coordenadas de los perfiles en el sistema de referencia WGS 84

Puntos	X	Y
1	20.601954	74.838887
2	20.601863	74.838559
3	20.601716	74.838434
4	20.602123	74.838137

Las muestras básicas individuales fueron homogeneizadas mediante el método del cono y el anillo (Mitrofánov, 1982), el cual consistió en mezclar el material para posteriormente apilarlo en forma de un cono (Figura 2a). Este se aplasta en forma de pastel (Figura 2b) y se divide con una pala o espátula en forma de cruz en cuatro partes iguales (Figura 2c). Se retiran dos cuartos opuestos y las otras dos restantes partes (Figura 2d) forman la nueva muestra. El proceso se repite hasta obtener el

tamaño adecuado de la muestra para su posterior utilización en los análisis y ensayos previstos. La muestra compósito resultante fue dividida en un cortador de Rifles y se seleccionó la mitad para someterla a un proceso de calcinación para activar la arcilla. La otra mitad fue dividida otras tres veces para seleccionar las muestras a utilizar para la caracterización química y mineralógica mediante Fluorescencia de rayos X (FRX), Difracción de rayos X (DRX) y Análisis Termogravimétrico (ATG).

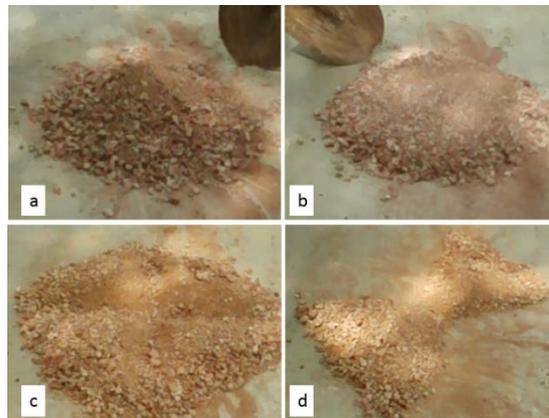


Figura 2. Proceso de homogeneización mediante el método del cono y el anillo.

La muestra compósito de 5 kg seleccionada fue sometida a un proceso de activación térmica a través del empleo de la calcinación estacionaria en una mufla de laboratorio española marca J.P Selecta 2000-367 (Figura 3). Previo a la calcinación, el material arcilloso fue secado en una estufa marca DHG 9146A a 120 °C durante 24 horas para eliminar la humedad natural. La muestra fue calcinada a 850 °C, por considerarse que esta es la temperatura donde se han obtenido los mejores resultados para otros afloramientos en la región de Cayo Guam (Almenares *et al.*, 2021).

El material calcinado fue enfriado rápidamente en una bandeja de metal con el objetivo de garantizar su máxima reactividad (Figura 4). El procedimiento descrito pretende simular, en cierta medida, el tratamiento que sufre la arcilla durante su calcinación en un horno rotatorio, donde el material se seca y tritura parcialmente producto de los gases calientes y de la rotación del horno, respectivamente.



Figura 3. Horno eléctrico J.P Selecta 2000-367.

La arcilla calcinada se sometió a un proceso de reducción de tamaño en un molino de bolas de 19,5 cm de diámetro interior y 24 cm de longitud (Figura 5), hasta alcanzar una granulometría de 90 % pasado por el tamiz 90 μm para la preparación formulación de los cementos y preparación de los morteros.



Figura 4. Material calcinado esparcido en una bandeja de metal.



Figura 5. Molino de bolas empelado para molienda de la arcilla calcinada.

Caracterización del material arcilloso en su estado natural y calcinado

A la muestra compósito se le realizó una caracterización químico-mineralógica mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X (DRX) y Análisis Termogravimétrico (ATG).

Las determinaciones de la composición química mediante FRX fueron realizadas empleando un espectrómetro Bruker AXS S4 operado a una potencia de 1 kW con un

cátodo de Rodio (Rh). Los cristales analizadores utilizados fueron OVO55FC para el Na, con un colimador con ángulo de divergencia 0,46°; PET para Al, Si, P y Mn con un colimador con un ángulo de divergencia 0,23 grados y LiF200 con un colimador con un ángulo de divergencia de 0,23° para el resto de los elementos analizados.

El análisis de la composición mineralógica a partir de los resultados de DRX se realizó utilizando el software HighScore Plus 3.0.2 (2011), mediante subrutinas programadas para la identificación de fases minerales utilizando las bases de datos PDF 2 (2004) y COD (2015), teniendo en cuenta la composición química de las muestras. El difractograma se realizó empleando un difractómetro Panalytical Xpert Pro MPD, con radiación CuK α y una rejilla de divergencia de 0,5°. Las muestras fueron analizadas entre los 4 y los 80° (2 θ), a un paso angular de 0,017° y un tiempo por paso de 80 s.

Para el análisis del comportamiento térmico mediante análisis termogravimétrico (ATG) se usó un instrumento Mettler-Toledo TGA/SDTA 851, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min desde 30 °C hasta 1000 °C. El contenido de caolinita fue calculado a partir de la modificación de la ecuación reportada por Almenares (2017) y (Alujas *et al.*, 2018).

$$K^E = \frac{m(350\text{ }^\circ\text{C}) - m(650\text{ }^\circ\text{C})}{m(200\text{ }^\circ\text{C}) \cdot 0,1396}$$

El análisis de la distribución granulométrica de las arcillas calcinadas y molidas, del cemento Portland P-35 y el cemento ternario LC3, se realizó en suspensión acuosa, homogeneizada mediante dispersión ultrasónica. Para las mediciones fue empleado un granulómetro *Malvern Mastersizer* con un láser tipo S, que permite determinaciones de tamaño de partícula en el orden de las 0,05 y 900 μm . Se realizaron tres replicas para cada ensayo.

Ensayos de resistencia a la compresión en morteros normalizados

La determinación del índice de reactividad puzolánica mediante ensayos de resistencia a la compresión en morteros normalizados CP – Puzolana es el método indirecto más extendido para la evaluación de la reactividad puzolánica y se encuentra referenciado en los documentos normativos de diferentes países (ASTM C311/C311M - 16 (2022)). Su principal ventaja consiste en la estrecha relación de sus resultados con el comportamiento de las puzolanas en la práctica.

La reactividad puzolánica de la arcilla calcinada fue evaluada mediante resistencia a la compresión en morteros estandarizados en sistemas cemento Portland - Puzolana. La resistencia a la compresión de los productos de calcinación a 850 °C fue determinada mediante ensayos en morteros normalizados. El porcentaje de sustitución de cemento por arcilla calcinada fue de un 30 %. Se preparó adicionalmente una serie de referencia con un 100 % de P-35. La preparación de los morteros y los ensayos de resistencia mecánica se realizaron de acuerdo con las especificaciones de la norma 506 (2013). Los ensayos se practicaron a los 3, 7 y 28 días.

El índice de actividad de resistencia fue determinado a partir del procedimiento que presenta la norma 527 (2013), través de la ecuación:

$$IAR = \frac{A}{B} \cdot 100$$

Dónde:

IAR: Índice de actividad de resistencia

A: Promedio de la resistencia a la compresión de los morteros de ensayo 30 % puzolana y 70 de cemento P-35), MPa.

B: Promedio de la resistencia a la compresión de los morteros patrones (100 % cemento Portland), MPa.

Metodología para la evaluación del comportamiento de los cementos ternarios en morteros

Preparación y formulación de los cementos

Para la formulación de los sistemas cementicios ternarios se empleó la arcilla calcinada objeto de estudio, cemento P-35 y caliza del yacimiento Pilón en Mayarí. El criterio de selección fundamental de la caliza es que el material se emplea en Moa para la producción polvo de piedra, factor que influyen de manera positiva en un escenario productivo de cemento con adición de caliza y arcilla calcinada como MCS.

En la Tabla 3 se presenta la composición química de la caliza y cemento P-35 determinada por FRX en las condiciones explicadas en la descripción del depósito.

Tabla 3. Composición química del aglomerante P-35

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PPI	SO ₃	RI	CaCO ₃	CaO libre
Caliza	3,02	0,94	0,49	51,49	0,71	41,74	-	-	91,90	-
P-35	20,37	4,55	3,08	62,91	1,15	3,49	2,49	1,41	-	1,1

Los componentes fueron mezclados durante 5 minutos en el molino de bolas del laboratorio de beneficio del ISMMM. La cantidad de cada material que constituye el cemento empleado para la evaluación de la resistencia en morteros normalizados, se pesó en una balanza semi-analítica con una precisión de ± 1 mg, en las proporciones que se presentan en la Tabla 4, para formular un cemento ternario TCA-25, según la norma cubana 1208 (2017). Las muestras fueron envasadas y preservadas en bolsas plásticas hasta el momento de su evaluación en morteros.

Tabla 4. Proporciones de las materias primas utilizadas para elaborar los cementos

Agglomerante	Cemento P-35, g 55 %	Caliza, g 15 %	Arcilla calcinada, g 30 %	Masa total, g
TAC	247,5	67,5	135	450

Determinación de la resistencia a la compresión en morteros

La resistencia a la compresión de los morteros de cementos ternarios fue determinada de forma similar a los ensayos de resistencia a la compresión practicados en morteros CP-Puzolana. Se prepararon prismas de mortero mediante los procedimientos descritos en la norma 506 (2013). Cada serie de mortero contiene 450 g de cemento, 1350 g de arena normalizada. En todos los casos se utilizó una relación agua/aglomerante de 0,5 como lo exige la norma.

Los prismas fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión a las edades de 3, 7 y 28 días, usando una prensa hidráulica de 300 kN. El cemento P-35 sin adiciones, fue utilizado para la preparación de una serie de referencia.

Resultados y discusión

Resultados de la caracterización química

Los resultados de composición química determinados por FRX presentados en la Tabla 5, muestran que el contenido de óxidos fundamentales (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) es de 80 %, lo cual cumple con la normativa cubana 528 (2013), para las puzolanas clase N (naturales calcinadas y sin calcinar).

Tabla 5. Composición química de la muestra natural y pérdida por ignición (PPI) en %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	Otros	PPI
42,52	32,17	11,31	0,04	0,28	0,10	0,12	0,22	0,03	0,09	0,22	12,88

El contenido promedio de Al₂O₃ es superior al 18 %, lo cual es indicativo de la presencia de fases ricas en aluminio. El relativamente alto contenido de hierro reportado como Fe₂O₃ puede estar asociado, fundamentalmente, a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro como se evidencia en el color rojizo de las muestras, lo cual es común en este tipo de depósitos, y es superior en todos los casos a las especificaciones de los niveles de impurezas tolerados en la mayoría de las aplicaciones industriales de los caolines.

La muestra presenta relativamente bajos niveles de óxido alcalinos, óxido de magnesio. Esto sugiere que esta materia prima no contiene, al menos de manera significativa, minerales arcillosos del grupo 2:1. Los bajos contenidos de óxido de calcio y trióxido de azufre, indican que la muestra no presenta carbonatos o sulfuros y sulfatos, respectivamente. Las características de este material arcilloso producto del intemperismo de gabros, presenta una relación Al₂O₃/SiO₂ (~0,76), cercana a la relación teórica para los minerales del grupo de la caolinita (~0,85). Los relativamente bajos contenidos de elementos alcalinos y alcalino-térreos, sugieren que han sido lavados durante el proceso de formación de la corteza de intemperismo.

Como se puede observar en la Tabla 6, la muestra compósito evaluada cumple con los requisitos preliminares de composición química. Esta consideración permite continuar la evaluación de la materia prima.

Tabla 6. Comparación de los criterios establecidos para la selección preliminar

Material	Criterios límites	Contenido en el material evaluado
Al ₂ O ₃	>18,00 %	32,17 %
CaO	<5,00 %	0,04 %
SO ₃	<3,00 %	0,10 %
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	>0,30	0,76
PPI	>7,00 %	12,88 %

Por otro lado, esta composición es similar a las obtenidas por Poll *et al.* (2016) y Almenares *et al.* (2021), para muestras de la región de Cayo Guam lo que demuestra la similitud de la composición de los afloramientos de la zona.

Resultados de la caracterización mineralógica

El análisis de la composición química se confirma en la caracterización mineralógica que se presenta en la Figura 6, donde se identifica la presencia de caolinita como fase arcillosa predominante. El depósito producto del intemperismo de rocas básicas, es también rico en óxidos e hidróxidos de hierro, que se forman de conjunto con los minerales arcillosos durante el proceso de meteorización.

No se observan minerales como la montmorillonita, illita y feldspatos, lo cual tiene relación con la composición química, que presentan bajos contenidos de óxido de sodio, óxido de potasio y óxido de magnesio. De forma similar, no se observan sulfatos, sulfuros y carbonatos que puedan limitar la reactividad del material. Los principales cambios que ocurren con el aumento de la temperatura se presentan en la Figura 7.

En la muestra se observa una pérdida de masa a temperaturas inferiores a 200 °C, asociada a la pérdida de agua absorbida superficialmente en la muestra. El efecto menos intenso observado entre los 200 °C y los 330 °C para las muestras se atribuye a la descomposición de hidróxidos de hierro presentes en el material (goethita). La pérdida de masa que se manifiesta entre los 330 °C y los 800 °C corresponde a la deshidroxilación de los minerales arcillosos presentes en las muestras analizadas (caolinita).

El contenido total de minerales arcillosos cuantificado mediante ATG en el intervalo de pérdida de masa correspondiente a la pérdida de los grupos OH- estructurales de la caolinita según la ecuación modificada a partir de Almenares (2017) y Alujas *et al.*, (2018) es de 77 %.

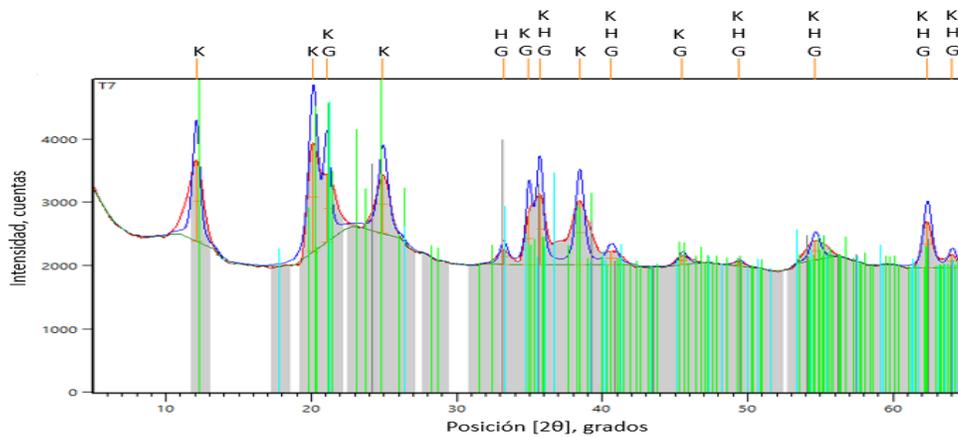


Figura 6. Difractograma de la muestra compósito de arcillas. K: caolinita; H: hematita; G: goethita.

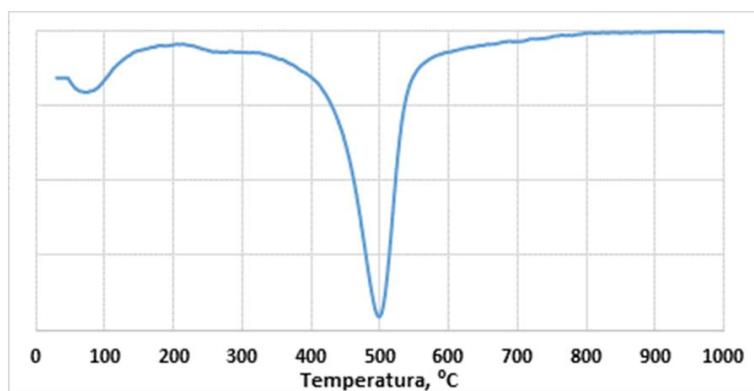


Figura 7. TGD de la muestra compósito de arcillas.

La identificación positiva de minerales del grupo 1:1, con contenido de caolinita superior a 40 % (Almenares, 2017; Avet *et al.*, 2016), y un alto contenido de alúmina (Alujas *et al.*, 2022) muestran las potencialidades de utilización de depósito arcilloso para su empleo como fuente de MCS en la producción de LC3.

Caracterización granulométrica de los productos de calcinación

Los resultados de la distribución de tamaño de partículas se muestran en la Figura 8. Se puede apreciar, que las muestras calcinadas a 850 °C presentan una distribución de tamaño de partícula fina, con el 90 % de las partículas cernidas por el tamiz 32 µm y un tamaño máximo de 120 µm. Según establece la norma cubana 528 (2013), un material para ser empleado como adición puzolánica debe tener un 66 % de material cernido por el tamiz 45 µm, por lo que se considera que este material presenta características adecuadas para su uso como puzolanas. Mientras que para el cemento

ternario compuesto por cemento P-35, arcilla calcinada y caliza, el 90 % de las partículas pasan por el tamiz 43,84 μm con un tamaño máximo de 302 μm (Figura 9).

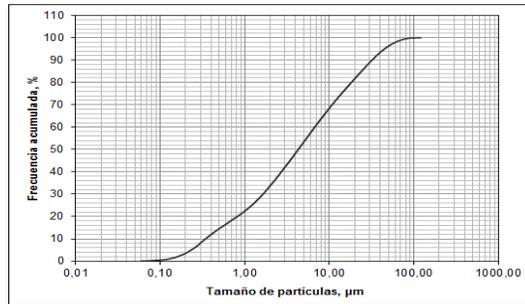


Figura 8. Característica de tamaño de la arcilla calcinada.

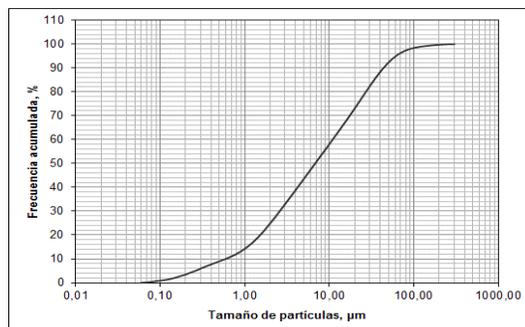


Figura 9. Característica de tamaño del cemento ternario LC3.

A partir de la comparación de ambos resultados, el cemento presenta una distribución granulométrica que se desplaza a fracciones más gruesas con un tamaño máximo de partícula mayor que la arcilla calcinada molida. Este comportamiento puede estar dado por la presencia de caliza en el sistema, que es un material con menor movilidad en comparación con la arcilla calcinada (Pérez *et al.*, 2018) y a la granulometría del cemento P-35 empleado para la mezcla, el cual presenta un 90 % pasado por el tamiz 67,52 μm , con un tamaño máximo de 229,08 μm (Figura 10).

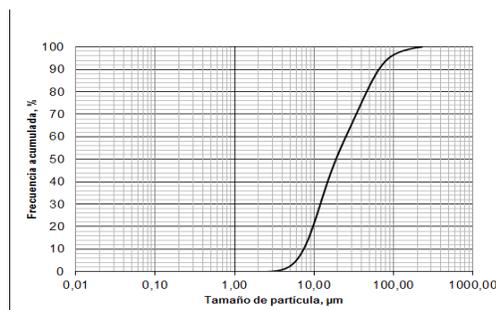


Figura 10. Característica de tamaño del cemento P-35.

Resultados de la reactividad puzolánica

La Figura 11 presenta la evolución de la resistencia a la compresión para los morteros con 30 % de sustitución de cemento P-35 por los productos de calcinación a 850 °C. A los 3 días los morteros presentan valores de resistencia a la compresión notablemente inferior a los de la serie control. A esta edad la resistencia está gobernada por la reacción de hidratación del cemento y la puzolana solo actúa como un fenómeno físico como lo es el efecto de relleno o efecto filler (Berodier and Scrivener, 2014).

A partir de los 7 días la resistencia a la compresión es superior para las series con incorporación de arcillosas calcinadas, y en este caso, las diferencias en los valores de resistencia mecánica son una consecuencia de la diferencia de la disponibilidad de material reactivo y no una diferencia en el mecanismo de reacción.

En la Tabla 7 se presentan los resultados del índice de actividad de resistencia (IAR). Estos sistemas donde se emplea como material puzolánico arcilla calcinada cumplen con el IAR de acuerdo a la norma cubana 528 (2013).

Tabla 7. Índice de actividad de resistencia de los morteros con adición de arcillas calcinadas

Edad del ensayo	IAR
3 días	92,06
7 días	98,22
28 días	99,25

Comportamiento físico-mecánico en sistemas ternarios

Los resultados promedios de resistencia a la compresión de los morteros de cemento ternario y de referencia se presentan en la Figura 11. A los 3 días, donde predomina la hidratación del cemento P-35, y el efecto de relleno para el aglomerante con alto volumen de sustitución, el cemento ternario muestra valores de resistencia a la compresión ligeramente inferior a los de la serie de control. A partir de los 7 días se observa esta diferencia disminuye entre los aglomerantes ternarios y P-35. Los valores de resistencia a la compresión de los sistemas ternarios presentan valores similares al cemento de referencia. Esto se acentúa en relación directamente proporcional al IAR de la arcilla calcinada.

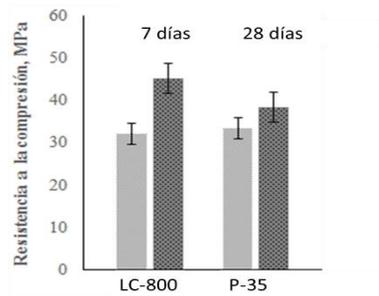


Figura 11. Desarrollo de resistencia a la compresión de los morteros de cemento ternario.

La resistencia a la compresión desarrollada por todas las series de morteros de cementos ternario cumplen con los requerimientos de resistencia mecánica establecidos por la norma cubana 1208 (2017) para los cementos ternarios TAC-35, la cual establece valores mínimos de resistencia a la compresión de 17, 25 y 35 MPa para 3, 7 y 28 días, respectivamente.

Ventajas de la producción de cemento TAC

La utilización de cemento con altos volúmenes de sustitución de clínquer tiene un impacto positivo sobre el medio ambiente, debido a la disminución de las emisiones de CO₂ proveniente de la descomposición del carbonato de calcio y la combustión de combustible (Figura 12), a partir de diferentes escenarios de producción.

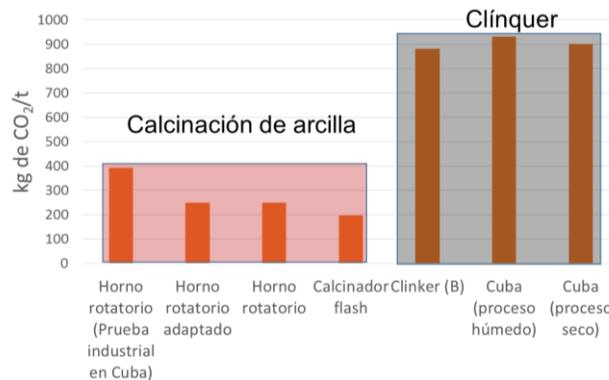


Figura 12. Emisiones de CO₂ de clínquer vs. calcinación de arcillas.

Por otra parte, en el proceso de fabricación del cemento ternario con arcilla calcinada, la temperatura de calcinación disminuye hasta aproximadamente la mitad de la temperatura necesaria para la producción del clínquer, lo cual influye notablemente en el ahorro de energía del proceso (Figura 13).

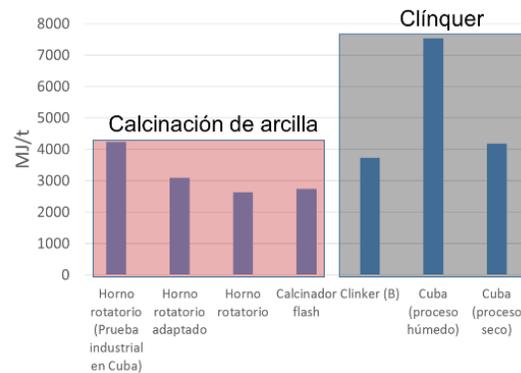


Figura 13. Consumo de energía de clínquer vs. calcinación de arcilla.

La introducción de este sistema cementicio a escala local genera un aporte económico, por concepto de sustitución de cemento por aglomerante ternario en la industria de materiales de construcción, a la vez que permite incrementar la producción de prefabricados a un menor costo, garantizando los estándares de calidad, y la resistencia y durabilidad ante determinados medios agresivos.

Conclusiones

Se evaluaron las potencialidades del depósito arcilloso Almacenes en Cayo Guam, para ser empleado como material cementicio suplementario en la producción de cementos LC3, a partir de la caracterización química, mineralógica, la reactividad puzolánica y el comportamiento físico-mecánico de los aglomerantes ternarios.

El material arcilloso del sector Almacenes en Cayo Guam, se caracteriza por un alto contenido de óxido de aluminio (32,17 %), elevada relación Al_2O_3/SiO_2 ($\sim 0,76$), alto valor de PPI (12,88 %), bajos contenidos de CaO y SO_3 , y predominio de caolinita (~ 77 %); composición adecuada para ser considerado con potencial para su utilización como material cementicio suplementario.

Los morteros con incorporación de 30 % de arcillas calcinadas presentan un índice de actividad de resistencia a los 28 días de 106,26 %, lo cual indica una elevada reactividad puzolánica de acuerdo a la norma cubana 528.

Los morteros de cemento ternario LC3 presentan valores de resistencia a la compresión superior al cemento P-35. El comportamiento de este sistema está en correspondencia con los requerimientos de resistencia mecánica establecidos por la Norma Cubana 1208 (2017), para un cemento ternario de tipo TAC-35.

El material arcilloso del depósito Almacenes en Cayo Guam presenta potencialidades para ser utilizado en la industria de materiales de construcción como material cementicio suplementario para la fabricación del cemento ternario de tipo LC3, basado en la composición química-mineralógica de la materia prima y el comportamiento físico-mecánico del cemento ternario.

Referencias bibliográficas

ALMENARES, R. S., ALUJAS, A., MARTIRENA, J. F., LEYVA, C. A. & BETANCOURT, S. (2021). Identificación y evaluación de arcillas caoliníticas para la producción de cemento ternario LC3 y adición de minerales activos LC2. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 32(4), 63-76. Disponible en: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/444/4442475008/html/>.

ALMENARES, R. S. (2017). *Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios*. Tesis Doctoral. Universidad Central de Las Villas, Santa Clara.

ALUJAS, A., ALMENARES, R. S., ARCIAL, F. & MARTIRENA, J. F. (2018). Proposal of a methodology for the preliminary assessment of kaolinitic clay deposits as a source of SCMs. En: F. Martirena, A. Favier Y K. Scrivener (eds.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Dordrecht: Springer, pp. 29-34. ISBN 9789402412062.

ALUJAS, A., ALMENARES, R. S., HANEIN, T., IRASSAR, E., JUENGER, M., KANAVARIS, F. & SNELLINGS, R. (2022). Propiedades y ocurrencias de recursos arcillosos para uso como materiales cementicios suplementarios: Un artículo de RILEM TC 282-CCL. *Materiales y estructuras*, 55(5), 139. Disponible en: <https://revistacuba.sld.cu/index.php/revacc/rt/printerFriendly/1034/1182>.

ASTM. (2022). ASTM-C311. Métodos de prueba estándar para muestreo y prueba de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso en concreto de cemento Portland. 11p. Disponible en: <https://www.document-center.com/standards/show/ASM-C311>.

AVET, F., SNELLINGS, R., ALUJAS, A., BEN, M. Y 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.

- BERODIER, E. & SCRIVENER, K. (2014). Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. *Journal of the American Ceramic Society* 97, 3764–3773. Disponible en: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jace.13177>.
- CABO DE VILLA, S. R., PALACIOS, A. & GARRIDO, M. (2017). Lixiviación ácida inversa en la eliminación de hierro de la arcilla caolinítica de Cayo Guam, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 33(2), 191-203. Disponible en: <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1093/777>.
- DÍAZ, L., ALTAMIRANO, L. F. & MUÑOZ, S. P. (2022). Uso de materiales ligeros para la producción de hormigón de baja densidad: una revisión literaria. *Revista habitat sustentable*, 12(1), 90-101. Disponible en: <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/5158>.
- GARG, N. & SKIBSTED, J. (2019). Cinética de disolución de caolinita calcinada y montmorillonita en condiciones alcalinas: evidencia de sitios reactivos de AI (V). *Revista de la Sociedad Americana de Cerámica*, 102(12), 7720-7734.
- IEA/CSI-WBCSD, 2018. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry 2060. París y Ginebra, Francia y Suiza.
- MAGHFOURI, M., ALIMOHAMMADI, V., AZARSA, P., ASADI, I., DOROUDI, Y. & BALAKRISHNAN, B. (2021). Impact of Fly Ash on Time-Dependent Properties of Agro-Waste Lightweight Aggregate Concrete. *Journal of Composites SCIENCE*, 5(6). Disponible en: <https://www.mdpi.com/2504-477X/5/6/156>.
- MARTÍNEZ, M. P., GUERRA, S. E., DOMÍNGUEZ, L. D. & PRIETO, L. (2022). Análisis estratégico de las canteras de la provincia de Matanzas para la producción de cemento bajo en carbono (LC3) mediante el software QGIS. *Revista Ciencia y Construcción*, 3(2), 29-37. Disponible en: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/72>.
- MARTIRENA, F., ALUJAS, A., VIZCAINO, L., BERRIEL, S., DÍAZ, E., ABDEL, P., ALMENARES, R., SCRIVENER, K., ANTONI, M., HABERT, G., FAVIER, A. (2016). Desarrollo y producción industrial de un cemento de bajo carbono en Cuba. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba* 6, 1–8. Disponible en: <https://revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/570>.

- MITROFÁNOV, S. I. (1982). Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Editorial Mir, Moscú, Rusia.
- NJILA, T., DÍAZ, 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. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/21149>.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2013). NORMA CUBANA 506. Cemento Hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica. Disponible en: <https://ftp.isdi.co.cu/Biblioteca/BIBLIOTECA%20UNIVERSITARIA%20DEL%20ISDI/COLECCION%20DIGITAL%20DE%20NORMAS%20CUBANAS/2013/NC%20506%20a2013%2026p%20spk.pdf>
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2013). NORMA CUBANA 527. Cemento hidráulico. Método de ensayos. Evaluación de las puzolanas.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2013). NORMA CUBANA 528. Especificaciones técnicas. Cemento Hidráulico. Puzolanas. Especificaciones.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2017). Norma cubana 1208. Cemento ternario-Especificaciones.
- PÉREZ, A., FAVIER, A., SCRIVENER, K. & MARTIRENA, J. F. (2018). Influence grinding procedure, limestone content and psd of components on properties of clinker-calcined clay-limestone cements produced by intergrinding. *RILEM Bookseries*, 16, 358–365. Disponible en: <https://infoscience.epfl.ch/record/263368>.
- 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, 15–27. Disponible en: <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1203>
- SCRIVENER, K. L. (2014). Options for the future of cement. *The Indian Concrete Journal* 88, 11–21. Disponible en: https://www.giatecscientific.com/wp-content/uploads/2018/05/0851_ICJ_Article.pdf.