

Evaluación de bloques huecos de hormigón formulados con la adición mineral LC2

Tesis en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

AUTOR: Luis Carlos León Mejías

Moa, 2024



Evaluación de bloques huecos de hormigón formulados con la adición mineral LC2

Tesis en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

AUTOR: Luis Carlos León Mejías

TUTORES: Dr. C. Roger Samuel Almenares Reyes
M.Sc. Yunior Correa Cala

CONSULTANTE: Dr. C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez

Moa, 2024

Dedicatoria

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los técnicos del Centro de Investigaciones del Níquel y al técnico de la Planta de Beneficio de la Universidad de Moa por su invaluable colaboración en la preparación de las muestras para este estudio académico. Asimismo, deseo reconocer y agradecer profundamente al técnico de laboratorio de la UEB de Prefabricado y Premezclado de Moa por su arduo trabajo y dedicación en la realización de los ensayos que han permitido obtener los resultados presentados en este trabajo. Su compromiso y profesionalismo han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación. ¡Gracias por su valiosa contribución!

Resumen

El conocimiento limitado de las propiedades físico-mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados con la adición mineral LC2, formulada con arcilla proveniente del sector Almacenes en Cayo Guam y material carbonatado de Yaguaneque, sustituyendo el 50% del cemento Portland P-35, condiciona su producción para la construcción de viviendas. Por esta razón, este estudio tiene como objetivo evaluar las características de los bloques huecos de hormigón elaborados con la adición mineral LC2, formulada con material carbonatado de Yaguaneque y arcilla del sector Almacenes en Cayo Guam calcinada, para su uso en la industria de la construcción en Moa. Para evaluar las prestaciones de estos prefabricados, se fabricaron bloques de tipo II (395 mm de largo x 145 mm de base x 195 mm de alto) en un molde metálico, a los cuales se les sometió a ensayos de resistencia a la compresión y absorción de agua. Los resultados muestran una perspectiva alentadora para el desarrollo en Moa, ya que tanto la resistencia como la absorción de agua cumplen con los criterios mínimos normalizados para su aplicación. La producción de la adición mineral activa LC2 en la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel y su encadenamiento productivo con la planta de Prefabricado y Premezclado de Moa representan una alternativa prometedora para la fabricación de bloques huecos de hormigón destinados a los programas constructivos locales.

Abstract

The limited knowledge of the physical-mechanical properties of hollow concrete blocks made with the mineral additive LC2, formulated with clay from the Almacenes sector in Cayo Guam and carbonated material from Yaguaneque, substituting 50% of Portland cement P-35, conditions its production for housing construction. For this reason, this study aims to evaluate the performance of hollow concrete blocks made with the mineral additive LC2, formulated with carbonated material from Yaguaneque and calcined clay from the Almacenes sector in Cayo Guam, for use in the construction industry in Moa. To assess the performance of these prefabricated blocks, type II blocks (395 mm long x 145 mm wide x 195 mm high) were manufactured in a metal mold and subjected to compressive strength and water absorption tests. The results show a promising outlook for development in Moa, as both the strength and water absorption meet the minimum standardized criteria for their application. The production of the active mineral additive LC2 at the pilot plant of the Nickel Research Center and its productive integration with the Precast and Premixed Plant of Moa represent a promising alternative for the manufacture of hollow concrete blocks intended for local construction programs.

Índice	Pág.
Introducción	1
Capítulo I. Marco Teórico – Conceptual	4
1.1. Contextualización sobre las emisiones de CO ₂ de la industria del cemento	4
1.2. El sistema cementicio LC3 y la adición mineral LC2.....	11
1.3. Experiencias previas en la producción de bloques huecos de hormigón con arcillas calcinadas.....	14
Conclusiones del capítulo 1	15
Capítulo II. Materiales y Métodos	16
2.1. Selección de la materia prima para la elaboración del cemento LC2.....	16
2.2. Características de las materias primas para la producción de los bloques huecos de hormigón.....	16
2.2.1. Arcilla	16
2.2.2. Material carbonatado	17
2.2.3. Cemento.....	18
2.2.4. Áridos	18
2.3. Procesamiento de las materias primas para la elaboración del cemento LC2.....	19
2.4. Análisis granulométrico.....	21
2.5. Fabricación de bloques huecos de hormigón.....	22
2.6. Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón	23
2.6.1. Resistencia a compresión.....	23
2.6.2. Absorción de agua	25
2.6.3. Determinación de las dimensiones del bloque	26
Conclusiones del capítulo 2.....	26
Capítulo III. Análisis y Discusión de los Resultados	27
3.1 Resultados de la resistencia a la compresión en bloques huecos de hormigón	27

3.1 Resultados de la absorción de agua en bloques huecos de hormigón	27
3.3. Perspectivas para la producción de bloques huecos de hormigón a partir de la adición mineral activa LC2 en el programa de la vivienda en Moa.....	28
Conclusiones del capítulo 3.....	30
Conclusiones.....	32
Recomendaciones.....	33
Referencias Bibliográficas	34

INTRODUCCIÓN

La producción de elementos prefabricados de hormigón como metodología de construcción reduce el consumo de energía en comparación con las prácticas de construcción convencionales (Vaasudevaa et al., 2021). En este contexto, el uso de cemento mezclado también está ganando atención para reducir la huella global de CO₂ (Karen L Scrivener et al., 2018).

Los materiales cementicios suplementarios (MCS) se utilizan para reemplazar una parte del clinker Portland, y su reacción con las fases de hidratación del cemento produce hormigones de mejor calidad debido a diversos efectos físicos y químicos (Suraneni et al., 2019).

La arcilla calcinada experimenta una reacción puzolánica en presencia de Portlandita producida a partir de la hidratación del cemento Portland ordinario (OPC) (Avet et al., 2016). Esta reacción forma un gel de silicato de calcio hidratado adicional (C-S-H), que generalmente tiene una relación Ca/Si más baja que el C-S-H producido a partir de la reacción del clinker (Avet and Scrivener, 2018). Aunque la reacción es beneficiosa, a menudo se retrasa debido a la menor reactividad de los MCS comunes, como las cenizas volantes y la escoria, en comparación con el OPC (Parashar and Bishnoi, 2020).

La reactividad reducida de estos materiales reduce las propiedades de edad temprana, como el desarrollo de resistencia a la compresión, lo que limita la aplicación de sistemas cementantes mezclados en los sectores donde la resistencia temprana es esencial. Por ejemplo, la industria de los prefabricados generalmente tiene un objetivo de resistencia definido a una edad temprana para garantizar un tiempo de respuesta sin problemas para el proceso de fabricación industrial. Cualquier retraso en el montaje o reducción de la resistencia a temprana edad podría afectar a la productividad y a las perspectivas económicas de las instalaciones prefabricadas (Vaasudevaa et al., 2021). Estudios recientes han demostrado un mayor potencial de reactividad de la arcilla caolinita calcinada en sistemas cementantes a edades tempranas (Dhandapani et al., 2018).

Las arcillas constituyen un material altamente demandado por el sector constructivo por su amplia variedad de aplicaciones en esta rama. En la última década las arcillas caolínicas de bajo grado se han convertido en un material demandado por el sector de los materiales

cementantes por su alto potencial para la producción de MCS con similares prestaciones a la de un cemento CPO (Martirena and Scrivener, 2018).

El uso combinado de caliza y arcilla calcinada ha ganado mucha atención en los últimos años. El surgimiento del sistema cementante basado en la combinación de arcilla caolinítica calcinada, caliza, yeso y clínquer/OPC, conocido genéricamente como *Limestone Calcined Clay Cement* (LC³) (K. Scrivener et al., 2018), permite una alta sustitución de clínquer en el aglomerante realza aún más el papel de las arcillas caoliníticas en el sector cementero.

La composición de LC3 comúnmente reportada consiste en una parte de caliza por dos partes de arcilla calcinada a un nivel de reemplazo del 45%. Las arcillas con sólo un 40% de contenido de caolinita es adecuada para su empleo en este sistema (Scrivener et al., 2019).

Otra de las formulaciones del sistema cementante LC3, está basada es una mezcla de arcilla caolinítica calcinada y caliza para obtener el denominado LC2 (*Limestone Calcined Clay*), al cual se le adiciona yeso para potenciar su reactividad. Esta adición mineral activa, permite la sustitución de 50 % de cemento P-35 (Martirena-Hernández, 2018; Sánchez-Berriel et al., 2020; Wang et al., 2021) y puede llegar a mayores porcentajes de sustitución en dependencia de la aplicación. Esta adición se perfila como una de las alternativas más promisorias para el desarrollo constructivo local.

Recientemente se ha evaluado una formulación de LC2 en morteros, mezclando un arcilla calcinada proveniente del sector Almacenes en Cayo Guam (Rodríguez Moreno, 2018; Palacios González et al., 2023) y un prospecto de material carbonatado en la zona de Yaguaneque (Machado León, 2023), arrojando excelentes resultados. Sin embargo, no se ha evaluado en aplicaciones de elementos prefabricados, particularmente, en bloques huecos de hormigón, que es el de mayor demanda en el territorio para la construcción de viviendas.

Por lo que se formula como **problema de la investigación**: El limitado conocimiento de las propiedades físico – mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados con la adición mineral LC2 formulada con arcilla proveniente del sector Almacenes en Cayo Guam y material carbonatado de Yaguaneque, sustituyendo 50 % de cemento Portland P-35, condiciona su producción para la construcción de viviendas.

El **objeto de estudio**, sobre el cual se incide es, las prestaciones de bloques huecos de hormigón formulados con LC2 a partir de material arcilloso del sector Almacenes en Cayo

Guam y material carbonatado de Yaguaneque, y el **campo de acción** está enmarcado en la resistencia mecánica y absorción de agua de los bloques huecos de hormigón producidos.

Objetivo general

Evaluar las prestaciones de bloques huecos de hormigón elaborados con la adición mineral LC2 formulada con material carbonatado de Yaguaneque y arcilla del sector Almacenes en Cayo Guam calcinada para su utilización en la industria de la construcción de Moa.

Objetivos específicos

1. Determinar la resistencia a la compresión y la absorción de agua en los bloques huecos de hormigón elaborados con la adición mineral LC2 formulada material carbonatado y arcilla del sector Almacenes en Cayo Guam calcinada.
2. Proponer una alternativa para la producción de bloques huecos de hormigón a partir de la formación LC2 en las condiciones del territorio.

Hipótesis de investigación

Si la resistencia a la compresión mecánica y absorción de agua de los bloques huecos de hormigón elaborados con 50 % de cemento Portland P-35 por la adición mineral LC2 formulada con arcilla proveniente del sector Almacenes en Cayo Guam y material carbonatado de Yaguaneque, cumple con los requisitos establecidos por las normas cubanas para tales usos, es posible sugerir su utilización en la industria de materiales de la construcción en Moa.

Estructura del trabajo

La tesis se estructura en introducción, tres capítulos y conclusiones. El capítulo I establece el marco teórico y conceptual de la investigación. El segundo, establece la metodología que se aplicó y las características y formulación de los bloques huecos de hormigón. El tercer capítulo muestra los resultados de la aplicación de la metodología.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

En el capítulo se hace alusión a la importancia de las arcillas calcinadas en la producción de materiales cementicios suplementarios y su impacto en el sector de los prefabricados de pequeño formato.

1.1. Contextualización sobre las emisiones de CO₂ de la industria del cemento

La fabricación de cemento es un proceso que comúnmente se compone de tres etapas: preparación de materias primas, producción de clinker y molienda de clinker con yeso para producir cemento, y otros componentes, incluidos las cenizas volantes, la escoria granulada de alto horno molida (GGBFS), el humo de sílice, la piedra caliza, las arcillas calcinadas, puzolanas naturales, entre otros, en dependencia de las propiedades técnicas requeridas del cemento terminado. El cemento se puede producir en una planta integrada (Figura 1.1) o en plantas de molienda o mezcla separadas. En plantas de hormigón o prefabricados también se pueden producir cementos mezclados o “combinaciones”.

Genéricamente, existen dos tipos básicos de producción de clinker: por vía húmeda o vía seca, dependiendo del contenido de humedad de las materias primas. También hay diferentes diseños de hornos. El proceso húmedo consume más energía que el proceso seco, ya que la humedad necesita evaporarse. Por lo que, el uso más extendido es el de la tecnología seca.

El proceso de fabricación de cemento es complejo e involucra múltiples subprocesos. A continuación, se describen de forma general de acuerdo a los datos reportados por la *Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry* (IEA/CSI-WBCSD, 2018).

Extracción de materias primas

Los depósitos calcáreos naturales, como la caliza, la marga o la creta, proporcionan carbonato de calcio, que es un componente clave para el cemento. También se extraen cantidades de arcillas, esquistos, etc. Que aportan sílice y alúmina fundamentalmente, y pequeñas cantidades de otros materiales correctores, como mineral de hierro, bauxita, o arena, de los depósitos para proporcionar el déficit de óxido de hierro, alúmina y sílice en la composición química de la mezcla cruda para cumplir con el proceso y la obtención del producto con las especificaciones adecuadas.

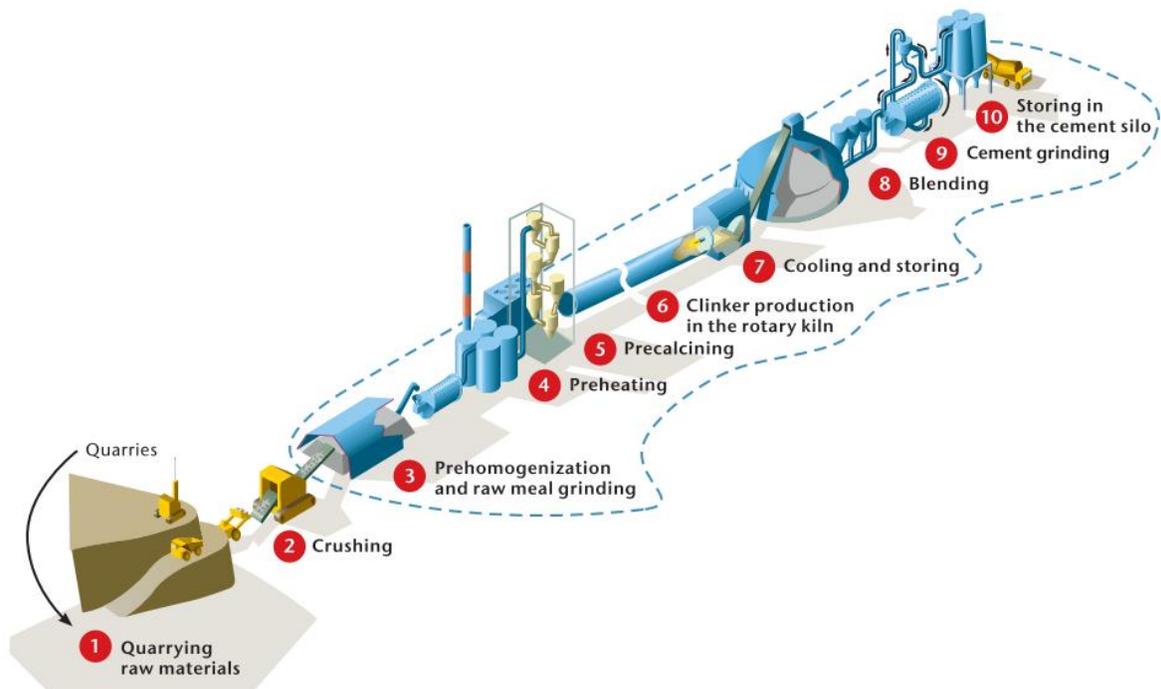


Figura 1. Tecnología de producción de cemento

Trituración

Los materiales extraídos se trituran, normalmente hasta un tamaño inferior a 10 centímetros, y se transportan a la planta de cemento.

Preparación de la harina cruda

Las materias primas se mezclan para lograr el resultado requerido de composición química en un proceso llamado “prehomogeneización”. Luego, el material triturado se muele para producir un polvo fino llamado “harina cruda”. La química de las materias primas y la harina cruda se monitorea y controla para garantizar una calidad alta y constante del cemento.

Pre calentamiento y coprocesamiento

El pre calentamiento se realiza en una serie de ciclones verticales a través de los cuales pasa la harina cruda en la que la temperatura se eleva a más de 900°C. Durante este proceso, la harina cruda entra en contacto con los gases de escape del horno calientes y arremolinados que se mueven en dirección opuesta. La energía térmica se recupera de los gases de combustión calientes en estos ciclones y la harina cruda se precalienta antes de ingresar al horno. Por

tanto, las reacciones químicas se producen de forma rápida y eficaz. Dependiendo del contenido de humedad de la materia prima, un horno puede tener hasta seis etapas de ciclones con una recuperación de calor creciente en cada etapa.

La producción de cemento puede coprocesar residuos y subproductos generados en otras industrias, como materiales para la mezcla cruda o como combustibles para piroprocesamiento. Los desechos y subproductos varían ampliamente en naturaleza y composición de humedad. Es posible que sea necesario clasificarlos, triturarlos y secarlos antes de introducirlos en el horno de cemento.

Precalcinación

La calcinación es la descomposición de la piedra caliza en óxido de calcio y dióxido de carbono. En la mayoría de los procesos tiene lugar en un “precalcinador”. Esta es una cámara de combustión en la parte inferior del precalentador encima del horno y está parcialmente dentro del horno. Aproximadamente el 65% de todo el combustible se quema en esta etapa del proceso, en plantas con tecnología de precalcinador.

Producción de clinker en el horno rotatorio

La harina precalcificada entra en el horno. El combustible se combustiona para alcanzar temperaturas de hasta 1450 °C. A medida que el horno gira (entre tres y cinco veces por minuto), el material se desliza y cae a través de zonas progresivamente más calientes hacia la llama. El intenso calor provoca reacciones químicas y físicas que funden parcialmente la harina hasta convertirla en clinker. Las reacciones en el horno incluyen la finalización de la calcinación de la caliza que no se ha producido en el precalcinador y la emisión de CO₂ de otros minerales carbonatados combinados.

Enfriamiento y almacenamiento

El clinker caliente del horno se enfría rápidamente desde más de 1 000°C a 100°C en un enfriador de parrilla, que sopla aire de combustión entrante sobre el clinker. Los sopladores de aire utilizan electricidad y circulación de aire caliente para mejorar la eficiencia térmica.

Una planta de cemento típica tendrá almacenamiento de clinker entre la producción de clinker y el proceso de molienda del cemento. El clinker puede cargarse en el transporte y luego comercializarse o procesarse para obtener cemento.

Mezclado

El clinker se mezcla con otros componentes minerales para producir cemento. Todos los tipos de cemento contienen alrededor de 4-5% de yeso para controlar el tiempo de fraguado del cemento. La escoria, las cenizas volantes, la piedra caliza u otros materiales se pueden triturar o mezclar para reemplazar parte del clinker. Esto produce cementos mezclados.

Molienda

La mezcla fría de clinker y yeso se muele hasta obtener un polvo gris, conocido como cemento Portland (CP), o se muele con otros componentes minerales para obtener cemento mezclado. Para la molienda se utilizan tradicionalmente molinos de bolas, aunque en las plantas modernas se suelen utilizar prensas de rodillos y molinos verticales debido a su mayor eficiencia energética.

El orden de las etapas del proceso de mezcla y molienda podría invertirse.

Almacenamiento en silos para carga y envasado

El producto final se homogeneiza y almacena en silos de cemento para su posterior envío. El cemento se empaca en bolsas o se carga a granel para transportarlo a los clientes.

Cada etapa del proceso de fabricación del cemento requiere energía. La electricidad se utiliza para hacer funcionar los equipos de molienda y carga, y los combustibles se utilizan para proporcionar la energía térmica necesaria en el horno y el precalcinador para las reacciones químicas necesarias para producir clinker (Figura 1.2). Así, la etapa de producción de clinker genera emisiones directas de CO₂ debido a la quema de combustibles y al carbono liberado de las materias primas.

La energía eléctrica se utiliza durante todo el proceso de fabricación del cemento, mientras que en el horno consume mayormente energía térmica.

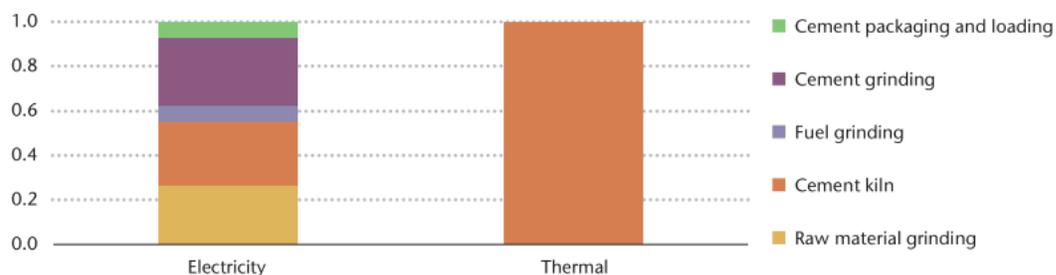


Figure 1.2. Distribución de la demanda de energía por etapas del proceso

El cemento se encuentra entre los materiales más empleados y con mayor volumen de producción a nivel mundial. La mayor parte del cemento de Portland producido a escala global se utiliza en la industria de los prefabricados (Scrivener and Nonat, 2011). Después de las plantas de generadoras de energía con combustibles fósiles y el sector del transporte, la industria cementera es el sector que mayor emisiones emite a la atmósfera con alrededor de 4 mil millones de toneladas de CO₂ cada año (Danner, 2013), lo que influye negativamente en la sostenibilidad ambiental.

Las emisiones de esta industria están asociadas esencialmente a la producción de clínquer (Alujas et al., 2015). Del 30 al 40 % de las emisiones de CO₂ corresponde a la combustión del combustible y del 60 al 70 % restante es de origen químico, asociado con la descomposición del carbonato de calcio en el proceso de fabricación de clínquer (IEA/CSI-WBCSD, 2018).

Por esta razón, el sector cementero está ampliando su apoyo a las oportunidades de reducción de emisiones que pueden lograrse más allá de la etapa de fabricación. Adoptar un enfoque de ciclo de vida y trabajar en colaboración a lo largo de toda la cadena de valor de la construcción ofrece la posibilidad de oportunidades adicionales para la reducción de emisiones. Estas áreas ofrecen oportunidades mediante (IEA/CSI-WBCSD, 2018):

- Optimización del uso del hormigón en la construcción: La especificación eficiente y el uso de concreto con un diseño eficiente pueden ayudar a reducir el residual al alinear la opción más baja en carbono con el rendimiento técnico óptimo requerido para la aplicación específica.
- Maximizar la vida útil de diseño de edificios e infraestructuras: La durabilidad del hormigón brinda oportunidades para una larga vida útil del diseño y un mantenimiento mínimo, mientras que un diseño intencionado puede garantizar que la edificación tenga mayor vida útil.
- Reducir la energía operativa: El uso óptimo de las propiedades de masa térmica inherentes al hormigón puede reducir las emisiones operativas de carbono de un edificio a lo largo de su vida útil.

- Contribuyendo al efecto albedo: Por ejemplo, el color claro y las propiedades reflectantes de las superficies de hormigón pueden reducir la temperatura del aire en las ciudades y reducir la necesidad de iluminación en los túneles.
- Fomentar la reutilización y el reciclaje: Reducir el impacto de las nuevas construcciones mediante la reutilización de edificios y componentes de infraestructura de hormigón y el reciclaje del hormigón puede reducir la demanda de hormigón primario, evitando así las emisiones de carbono asociadas con la producción.
- Optimización de la recarbonatación: Los productos a base de cemento absorben y fijan químicamente CO₂ a lo largo de su vida. La recarbonatación es un proceso lento que se puede mejorar, especialmente al final de su vida útil, aumentando la superficie expuesta al ambiente.

Existe una creciente presión para mejorar su sostenibilidad, lo que está relacionado con la conservación de los recursos minerales y energéticos, así como la reducción de emisiones de CO₂ (Schneider et al., 2011).

Entre las soluciones más extendidas a este problema se encuentran, el uso racional de recursos naturales y obtención de productos más eficientes, la mejora de la eficiencia térmica y energética de las tecnologías y el transporte, la captura y reutilización del CO₂, y el reciclado de materias primas en la producción de hormigón (CEMBUREAU, 2013). El uso de combustibles alternativos, la sustitución de materias primas, la sustitución de clínquer, producción de nuevos cementos y la eficiencia del transporte, son los caminos más comunes a los que se dirige la industria cementera para mitigar las emisiones y disminuir los consumos energéticos, y mantener una producción sostenible.

Desde el punto de vista técnico, económico y social, la solución de mayor potencial a mediano y corto plazo para reducir la emisiones de CO₂ atribuida a la manufactura de cemento, es la sustitución de clínquer por materiales cementicios suplementarios (MCS) (WBCSD/IEA, 2009), con lo cual se mantiene o incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad de la matriz cementicia (Alujas et al., 2015) y al mismo tiempo favorece la disminución del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero por cantidad de aglomerante y tiene un potencial del aumento de la producción de cemento.

La marcada tendencia hacia el incremento del consumo de cemento y la reducción del contenido de clínquer, estimula el empleo de materiales cementicios suplementarios de acuerdo con las condiciones propias de cada región. Materiales como las cenizas volantes, humo de sílice y escorias granulada de alto horno, son muy empleados (U.S. Geological Survey, 2015). Sin embargo, su uso está limitado por la ausencia de grandes industrias metalúrgicas y energéticas capaces de proveer estos subproductos que tampoco logran satisfacer la demanda global (Martirena and Scrivener, 2019).

Esta tecnología permitió abrir el camino para el desarrollo de una importante industria necesaria en el país, y que debe contemplarse como una opción para dar respuesta a la demandada de cemento en los procesos constructivos de la región y en particular, a la producción local de materiales destinados al Programa de la Vivienda.

En Cuba se cuenta con apreciables recursos minerales arcillosos en varias localidades con potencial, como materia prima para la industria cerámica en varias zonas del territorio (Holguín, Rafael Freyre, Calixto García y Moa). En el municipio de Moa, en particular, se encuentra dentro de las zonas más estudiada para la producción de arcillas calcinadas y donde hay una proyección para su producción a nivel industrial. En esta región, se encuentra los sectores de Cayo Guam, La Delta, Centeno, entre otros, donde se han realizado investigaciones que muestran las potencialidades para la producción de este material cementicio suplementario, lo cual se ha reportado en varios artículos científicos, trabajos de diploma, tesis de maestría y una tesis doctoral (Almenares, 2017).

Otro componente del sistema cementicio es el carbonato de calcio. Hasta la actualidad, los estudios realizados en la región para evaluar material carbonatado como adición en la mezcla de sistemas cementicios basados en arcillas calcinadas y calizas han estado enfocado en materiales que se encuentran aproximadamente entre 70 y 80 km. Otra de las alternativas estudiadas, son los residuos de la planta de cienos carbonatados, lo cual está limitado por la competencia de su utilización para la neutralización de ácido en la tecnología ácida a presión de la Moa Nickel S.A. Pero en estudios recientes se evaluó el prospecto de material carbonatado de Yaguaneque, a unos 15 km del territorio, y del cual se estudió una mezcla de adición mineral LC2 con excelentes resultados (Machado León, 2023). Sin embargo, no se ha logrado producciones de prefabricados con esta adición como fue recomendado en la referida investigación.

1.2. El sistema cementicio LC3 y la adición mineral LC2

El sistema cementante basado en arcilla calcinada, caliza, yeso y cemento Portland o cemento de bajo carbono (LC3) es una familia de cemento mezclado desarrollado por expertos de Cuba y Suiza. Es un sustituto cercano del cemento Portland puzolánico y su desempeño es comparable con el cemento Portland ordinario (Fernández Pérez, 2019).

Los cementos de arcilla calcinada (LC3) son una familia de cementos multicomponentes que incorporan piedra caliza y arcillas caoliníticas calcinadas sustituyendo hasta el 50% del OPC convencional. Alcanzan una resistencia similar a la del PC convencional a partir de 7 días (Karen L. Scrivener et al., 2018) y exhiben un mejor rendimiento contra la penetración de cloruro (Dhandapani et al., 2022) y la reacción álcali-sílice (ASR) (Nguyen et al., 2020; Dhandapani et al., 2022), los dos fenómenos más importantes que afectan la durabilidad del hormigón. En general, los cementos LC3 pueden reducir entre un 30 y un 40% de las emisiones de CO₂ por tonelada de cemento producida en comparación con el OPC (Scrivener et al., 2019) al tiempo que se generan considerables ahorros económicos (entre 15% y 20%). La reducción de clínquer en la matriz del cemento trae consigo grandes ahorros en portadores energéticos. Por esto han recomendado introducir el LC3 en el país en dos fases: a corto plazo, sustituyendo al cemento PP25 y a mediano plazo, sustituyendo también al cemento P35 (Cancio Díaz et al., 2017).

Otra de sus formulaciones, está basada es una mezcla de arcilla calcinada, caliza y yeso para obtener el denominado LC2, que es una adición mineral, la cual permite la sustitución de 50 % de cemento P-35 (Martirena-Hernández, 2018).

En Cuba, el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales ha explorado la viabilidad de los productos LC3 y ha utilizado la nueva adición mineral basada en arcilla calcinadas y caliza en la proporción 2:1. Esta adición mineral puede usarse para fabricar una gran cantidad de productos a base de cemento bajo en carbono a nivel local. El diseño de mezcla optimizado propone la adición del 50% de LC2 que se mezclará con el 50% de OPC (Figura 1.3). El primer impacto de esta adición es la extensión de las capacidades productivas que podrían permitir satisfacer un mayor porcentaje de la demanda local (Sánchez-Berriel et al., 2020).

En 2018, se llevó a cabo una prueba industrial en la planta de cemento Siguaney, ubicada en el centro de la isla, para producir LC2 (Martirena-Hernández, 2018). La producción de LC3 y

LC2 productos está muy relacionada ya que LC2 puede considerarse como un producto intermedio en la producción de LC3.

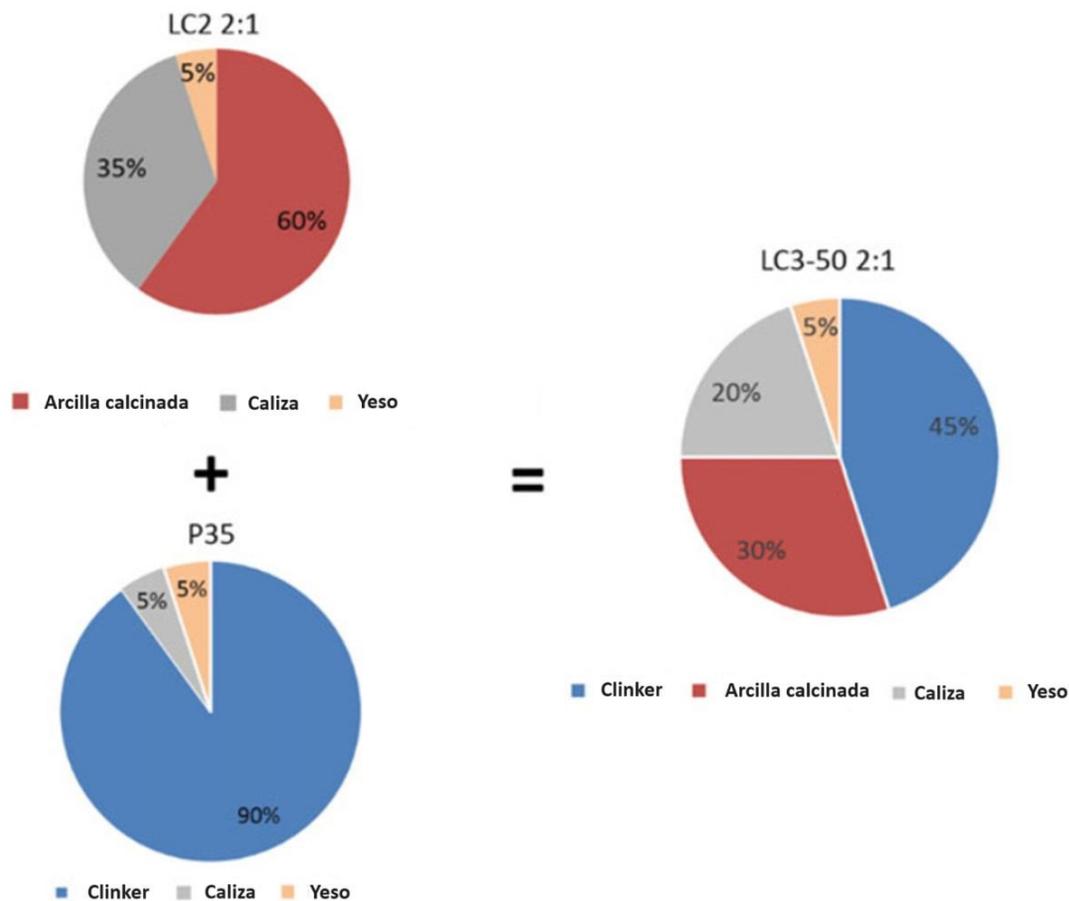


Figura 1.3. Composición de la adición mineral LC2 y el sistema cementante LC3. Modificado a partir de (Martirena-Hernández, 2018)

Esta adición mineral se puede utilizar directamente en la producción de hormigón (Muni et al., 2020; Vaasudevaa et al., 2021). En la India se estudió una mezcla LC2 mediante intermolienda con 65% arcillas calcinadas, 33% de caliza y 2% de yeso a escala industrial (Shah et al., 2020) y una investigación realizada con este material encontró que es viable como material cementicio suplementario en un amplio rango de hormigones (Basavaraj et al., 2023), del cual se detalla lo siguiente:

- La incorporación de LC2 al 45% de reemplazo de clinker puede producir un amplio rango de hormigones de resistencia moderados a alta utilizando esquemas de proporción de mezcla convencionales.

- Se observa una resistencia significativa a las edades tempranas en los sistemas LC2 con una mayor resistencia que los hormigones con cenizas volantes.
- La importancia de la composición del aglomerante en la resistividad del hormigón se refleja en el aumento principal en los valores para LC2 entre 3 y 7 días, mientras que los hormigones de cenizas volantes solo exhiben un aumento similar en la resistividad entre 28 y 90 días.
- Los resultados de la LCA reiteran que los hormigones con un contenido de clinker más bajo tienen un impacto positivo en las emisiones y la energía de CO₂. Aunque la energía incorporada de LC2 es mayor que la ceniza volante, la huella de carbono es significativamente menor para los hormigones de LC2 que los concretos OPC.
- El marco de sostenibilidad utilizado aquí muestra que los concretos LC2 y PFA tienen un mayor potencial que OPC. Entre los concretos estudiados aquí, los hormigones LC2 con relación agua cemento ≤ 0.45 y el contenido de aglomerante inferior a 400 kg/m³ tienen el mayor potencial de sostenibilidad.

A partir de la prueba industrial realizada en Cuba en 2018 se evaluaron los impactos ambientales, se realizó una evaluación simplificada del ciclo de vida para comparar tanto los cementos, OPC y PPC. El cemento basado en LC2 arroja ventajas económicas en comparación con los otros cementos: LC3 industrial, OPC y PPC. Los resultados ambientales muestran un comportamiento similar para LC3 local e industrial, pero una disminución significativa de las emisiones y la demanda de energía versus OPC y PPC. La comparación técnica muestra que los resultados locales de LC3 son variables, pero cumple con el estándar para su uso en morteros y aplicaciones no estructurales. Finalmente, los resultados muestran que la introducción de LC3 es una opción factible para reducir los impactos de la industria del cemento en Cuba, y una combinación de su producción local e industrial es la mejor alternativa para lograr los objetivos de sostenibilidad en los tramos cortos y medios. Las principales oportunidades de LC3 local son la reducción de los costos, el almacenamiento más fácil, el uso de materiales locales, entre otros. El principal desafío está relacionado con un uso correcto de la adición de minerales en localidades (Sánchez-Berriel et al., 2020).

1.3. Experiencias previas en la producción de bloques huecos de hormigón con arcillas calcinadas

En la Universidad Central de Las Villas han evaluado las propiedades físico - mecánicas de morteros de albañilería y prefabricados de pequeño formato a base de cemento LC3 (Aguiar Pérez, 2014). De acuerdo con los resultados de este trabajo la utilización del cemento ternario con arcilla calcinada y caliza en la producción de bloques huecos de hormigón muestra un excelente potencial por la adecuada resistencia a compresión y la absorción, constituyendo así una viable alternativa para nuestro país.

Los primeros estudios en Moa se realizaron con material del depósito La Delta, en los cuales se formularon diferentes aglomerantes para obtener bloques huecos de hormigón. Reyes Silot (Reyes Silot, 2015), evaluó las propiedades físico – mecánicas de los prefabricados de pequeño formato elaborados con cemento de bajo carbono criollo a partir de su formulación con adición de cemento P-35, caliza y arcilla del depósito La Delta calcinada para su utilización en la industria de materiales de la construcción en Moa. Los bloques huecos de hormigón mostraron un excelente potencial por la adecuada resistencia a compresión y la absorción de agua, constituyendo así una viable alternativa para nuestro municipio. Las baldosas hidráulicas producidas, mostraron resistencia a flexión, absorción al agua y espesor adecuados según las especificaciones para su explotación.

Por su parte, en el trabajo de Ramírez Silvera (Ramírez-Silvera, 2018) se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye un 30 y 50 % de cemento por materiales arcillosos mostró un excelente potencial, por la adecuada resistencia a la compresión y la absorción de agua, constituyendo así una alternativa alentadora para la industria de la construcción local.

En la investigación de Pico Justi (Pico Justi, 2020) formuló un aglomerante LC2 y produjo bloques huecos de hormigón. La resistencia a la compresión promedio de los bloques huecos de hormigón producidos con adición de LC2 en lugar de 50 % de cemento Portland fue de 4,25 y 5,83 MPa para 7 y 28 días, respectivamente. La absorción de agua mostrada por los bloques fue de 8,53 %. En ambos casos se considera que los elementos prefabricados elaborados con sustitución de 50 % de cemento P-35 por la adición mineral LC2 cumplen con los requisitos establecidos para ser empleados en la construcción de muros y tabiques.

Una investigación con arcillas del depósito Centeno realizada por Mejías Paumier (Mejías Paumier, 2020) evaluó las prestaciones de bloques huecos de hormigón producidos con cemento LC3 para su empleo en la industria de la construcción del municipio Moa. Se elaboraron bloques 400×150×200 mm según el esquema productivo de la planta de producción local de La Veguita en Moa. Las prestaciones de bloques fueron valoradas positivamente a partir de los resultados de la resistencia mecánica y la absorción de agua.

En todos los casos, se empleó como material calcáreo la caliza proveniente de la cantera El Pílon en Mayarí. Sin embargo, con el material carbonatado del prospecto Yaguaneque no se ha realizado este tipo de estudio.

Conclusiones del capítulo 1

- El cemento es un producto indispensable para la actividad constructiva, lo que lo hace estar estrechamente enlazado al desarrollo socioeconómico global y se pronostica se mantenga como el aglomerante más importante y necesario para satisfacer las demandas de la construcción y el continuo desarrollo de la infraestructura de la sociedad.
- Asociado a los procesos de manufactura del cemento, grandes cantidades de dióxido de carbono son liberadas a la atmósfera, lo que hace responsable a esta industria de entre 5 – 8 % de las emisiones globales.
- La reducción del factor de clínquer mediante el empleo de materiales cementicios suplementarios en la producción de cementos mezclados con altos volúmenes de sustitución de cemento Portland se perfila como la alternativa con mayores perspectivas de aplicación a corto plazo para la reducción de las emisiones de CO₂, y a su vez suplir la creciente demanda nacional.
- La implementación a escala industrial de cementos ternarios podría ser una vía de emisiones de bajo carbono para que países en vías de desarrollo puedan lograr sus metas de industrialización y construcción de infraestructura con un bajo impacto ambiental y económico.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo contiene las características de los materiales que se utilizaron y los experimentos realizados destinados a la evaluación de las prestaciones de los bloques producidos con la adición mineral LC2 donde se sustituye el 50 % de cemento Portland por un 50 % de la combinación arcilla calcinada-carbonato de calcio.

2.1. Selección de la materia prima para la elaboración del cemento LC2

Basado en la investigación que evaluó el material carbonatado de la región de Yaguaneque como adición para la producción de aglomerantes ternarios tipo TQC en Moa (Machado León, 2023), en la cual los morteros de cemento ternario arrojaron valores de resistencia a la compresión adecuados, de acuerdo con los requerimientos de resistencia mecánica establecidos por la norma cubana NC 1340, para un cemento ternario de tipo TQC-25 y 35. Por lo tanto, se pretende evaluar su utilización en bloques huecos de hormigón en este trabajo.

2.2. Características de las materias primas para la producción de los bloques huecos de hormigón

2.2.1. Arcilla

Las características de la arcilla se presentan en la Tabla 2.2 y Figura 2.31.

Tabla 2.2. Composición química de la muestra natural y pérdida por ignición (PPI) en %.

Tomado de (Rodríguez Moreno, 2018)

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

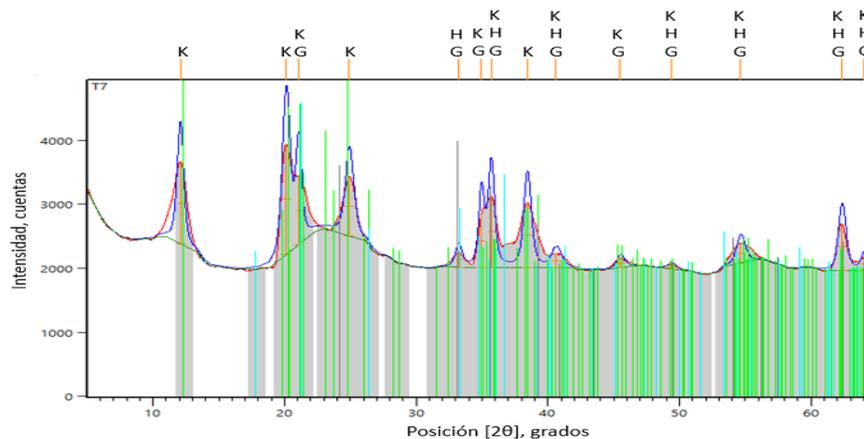


Figura 2.3. Difractograma de la muestra compósito de arcillas. K: caolinita; H: hematita; G: goethita. Tomado de (Rodríguez Moreno, 2018)

2.2.2. Material carbonatado

El material se caracteriza por un alto contenido de CaO y PPI (Tabla 2.3), lo que indica que es un material rico en carbonato. El contenido de calcita estimado, a partir de la composición química, asumiendo que el contenido reportado de CaO se encuentra asociado únicamente a la calcita es de 93.20 % (Machado León, 2023). La especie mineralógica principal es la calcita, lo que está en correspondencia con la composición química y como fases secundarias el cuarzo, montmorillonita, illita y feldespato (Figura 2.4).

A partir de los resultados por lo que de forma preliminar esta fuente de carbonato se considera apta para su empleo como adición en cementos ternarios de la serie TQC (Ternario con adición de puzolana natural calcinada hasta 40 % y caliza hasta 15 %) según la norma cubana NC 1340 (NC/CTN22, 2021), que plantea el contenido de carbonato de calcio (CaCO_3), calculado a partir del óxido de calcio, no debe ser inferior al 75 % en masa.

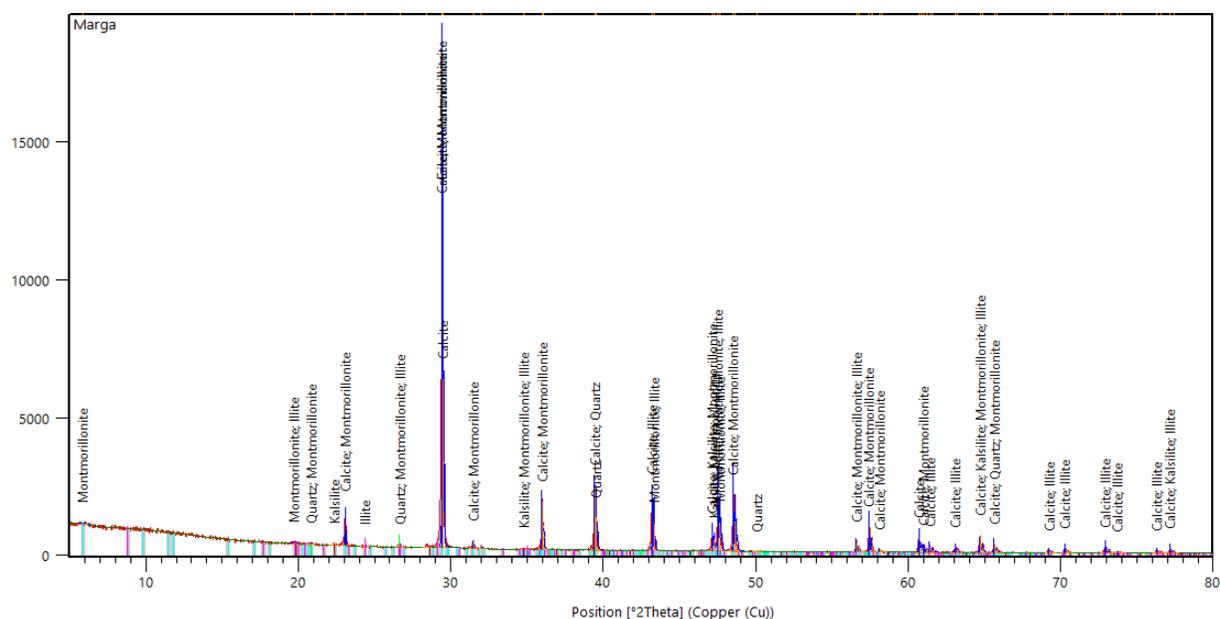


Figura 2.4. Difractograma de la muestra de material carbonatado de Yaguanque. Fuente: (Machado León, 2023)

Tabla 2.3. Composición química de la muestra de material carbonatado. Fuente: (Machado León, 2023)

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MnO ₂	K ₂ O	Otros	PPI
Material carbonatado de Yaguaneque	3.02	1.77	1.34	52.22	0.04	0.15	1.44	40.02

2.2.3. Cemento

El cemento P-35 utilizado fue elaborado en la fábrica de cemento Cienfuegos y suministrado por la UEB de Prefabricado y Premezclado de Moa, con una granulometría del 92 % pasado por el tamiz por el tamiz 90 µm.

2.2.4. Áridos

Para la fabricación de los bloques huecos de hormigón se utilizó el árido grueso procedente de la cantera Pilón en Mayarí y la arena procedente de la planta de Sagua de Tánamo. Todos los materiales se consideran conforme según Norma Cubana 251:2005 de acuerdo con los resultados suministrados por la empresa de prefabricados de Cuba, UEB Moa. Ver las características en las tablas 2.4 – 2.7.

Tabla 2.4. Composición granulométrica del árido grueso

Diámetro del tamiz, mm	% pasado	Especificaciones
12,7	100	100
9,52	96	85 – 100
4,76	32	15 – 35
2,38	6	0 – 10
1,19	0	0 – 5

Tabla 2.5. Características físico – mecánicas del árido grueso

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones
Material más fino que el tamiz 200	%	0,69	≤ 1,00
Partículas de arcilla	%	0,03	≤ 0,25
Partículas planas y alargadas	%	1,30	≤ 10
Peso específico corriente	g/cm ³	2,54	≤ 2,50
Absorción	%	1,60	≤ 3,00

Tabla 2.6. Composición granulométrica del árido fino

Diámetro del tamiz, mm	% pasado	Especificaciones
9,52	100	100
4,76	100	90 – 100
2,38	86	70 – 100
1,19	56	45 – 80
0,59	34	25 – 60

0,297	23	10 – 30
0,149	9	2 – 10

Tabla 2.7. Características físico – mecánicas de los áridos finos

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones
Material más fino que el tamiz 200	%	4,19	$\leq 5,00$
Partículas de arcilla	%	1,55	$\leq 1,00$
Peso específico corriente	g/cm^3	2,61	$\geq 2,50$
Absorción	%	1,10	$\leq 3,00$

2.3. Procesamiento de las materias primas para la elaboración del cemento LC2

Las muestras trabajadas fueron las propias utilizadas en la investigación de Rodríguez Moreno (Rodríguez Moreno, 2018) en la que se tomaron las muestras en el sector Almacenes en Cago Guam (Figura 2.1). La selección de la materia prima se produjo con la asesoría de especialistas del departamento de Geología de la Universidad de Moa.

Fueron seleccionados cuatro perfiles en el depósito, a una distancia de 30 m, a partir de la aflorabilidad del material arcilloso. 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 alrededor de 5 kg y mezclados para conformar una muestra compósito de 20 kg.

El total de muestras acumuladas se trasladó hasta el laboratorio de beneficio de la universidad para ser preparada para los ensayos previstos.



Figura 2.1. Ubicación del afloramiento donde se tomaron las muestras de arcilla

El material caracterizado en el trabajo de diploma desarrollado por Rodríguez Moreno (Rodríguez Moreno, 2018) se calcinó en una mufla de laboratorio a 850 °C, por un período de una hora. Esta es la temperatura a la que se alcanza la mayor reactividad de estas arcillas según la referida investigación, posteriormente fue sometido a un proceso de molienda en el molino de bolas (Figura 2.2) hasta lograr valores de finura de 100 % de pasado por el tamiz de 90 μm y menos del 34 % retenido en el tamiz 45 μm .



Figura 2.2. Molino de bolas de laboratorio

El material carbonatado del depósito Yaguaneque al norte noreste del poblado de Cananova y al este del poblado de Yaguaneque (Figura 2.3), fue el mismo utilizado por Machado (Machado León, 2023).



Figura 2.3. Ubicación del afloramiento donde se tomaron las muestras de material carbonatado. Fuente: (Machado León, 2023)

La selección de la materia prima se produjo con la asesoría de especialistas del departamento de Geología de la Universidad de Moa. Se seleccionó un corte en la zona de Pozo Prieto. En el afloramiento se practicaron tres trincheras (profundidad de 50 cm y una longitud de 3 m) de las cuales se extrajeron 100 kg de material carbonatado mediante la utilización de pico y pala. Las muestras tomadas se homogenizaron y redujeron mediante el método del cono y el anillo. La muestra de trabajo fue sometida a un proceso de reducción de tamaño de partículas en el molino de bolas de la Figura 2.3 mediante molienda conjunta con arcilla calcinada con una formulación 2:1 (Tabla 2.1), hasta alcanzar una granulometría del 100 % por debajo del tamiz 90 μm y menos del 34 % retenido en el tamiz 45 μm .

Tabla 2.1. Dosificación del LC2 para la fabricación de los bloques

Caliza (partes)	Arcilla calcinada (partes)
1	2

2.4. Análisis granulométrico

Se realizó un análisis de tamices por vía húmeda (Figura 2.4) del material molido mediante un tamiz de 0,045 mm para verificar que más del 66 % de material pasara por este tamiz, que es el tamaño de partícula que se exige para que un material se pueda emplear como puzolana de acuerdo la especificación técnica NC TS 528:2013 (NC TS 528:2013, 2013).



Figura 2.4. Muestras tamizadas

2.5. Fabricación de bloques huecos de hormigón

Se realizó la producción de los bloques huecos de hormigón en la UEB de Prefabricado y Premezclado de Moa. Se utilizó las materias primas caracterizadas anteriormente, con una dosificación utilizada en su producción, pero con sustitución de un 50 % de cemento P-35 por la adición mineral LC2 formulada. El volumen de material utilizado se muestra en la tabla 2.8.

En la planta se utiliza un molde de metal para hacer los bloques, los cuales se dosificaron, y se compactaron manualmente. Los bloques producidos fueron de tipo II (395 mm de largo x 145 mm de base x 195 mm de alto), a los cuales se les realizó el ensayo de resistencia a la compresión.

Tabla 2.8. Dosificación utilizada para cada bloque

Materiales	Imagen	Dosificación volumétrica en partes.	Relación porcentual, %
Arena		2	20
Grava 3/8		4	40
Cemento P-35		1.5	15

Arcilla calcinada		1.5	15
-------------------	---	-----	----

2.6. Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón

2.6.1. Resistencia a compresión

- Para este ensayo se eliminaron las irregularidades o los excesos que poseían los bloques y se aplicó una capa de nivelación sobre la superficie de carga y apoyo del bloque de mortero. Se puso en contacto la cara superior del bloque suavemente con el plato superior de la máquina para evitar que se produjeran impactos.
- Para el ensayo de resistencia a la compresión se aplicó una carga de velocidad constante de 5 KN/s en el sentido longitudinal hasta determinar el esfuerzo máximo hasta la rotura.

En el ensayo de resistencia a la compresión cada bloque se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales en una prensa hidráulica (Figura 2.5). Para ello, el bloque se recubrió con una capa de cemento P-35 (Figura 2.6) de manera que se lograran dos caras planas para asegurar la compresión en la mayor área posible en el bloque. El bloque se colocó entre los platos de 30x30 cm de la prensa, cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión. Los platos se guiaron sin fricción apreciable durante el ensayo para poder mantener siempre la misma proyección horizontal. Uno de los platos se mantuvo ligeramente inclinado con el objetivo de obtener un perfecto contacto con el bloque.

La resistencia a la compresión de cada bloque (R'_{i}) se calcula por medio de la siguiente expresión: $R'_{i} = F_j / a_j$

Donde:

R'_{i} resistencia a la compresión de cada bloque (MPa)

F_j carga de rotura

a_j área de la sección bruta del bloque



Figura 2.5. Prensa Hidráulica



Figura 2.6. Recubrimiento de los bordes del bloque con una capa de cemento P-35

2.6.2. Absorción de agua

El ensayo de absorción se realizó con el objetivo de determinar la capacidad de los bloques para absorber una determinada cantidad de agua, donde deberán cumplir con los valores máximos según la categoría de estos, fijados en la norma. Se determina colocando los bloques en la estufa 24 horas a una temperatura aproximadamente de 100 °C y luego pesándolos, después se colocan en un recipiente lleno (Figura 2.7) de agua por 24 horas para determinar el peso húmedo y la diferencia de ambos pesos muestra el porcentaje de absorción que es capaz de absorber cada bloque que se calcula por medio de la ecuación siguiente:

$$A_i = \frac{M_{hi} - M_{si}}{M_{hi}} \cdot 100 \%$$

A_i absorción de la muestra (%)

M_{hi} masa húmeda de cada unidad de la muestra (kg)

M_{si} masa seca de cada unidad de la muestra (kg)

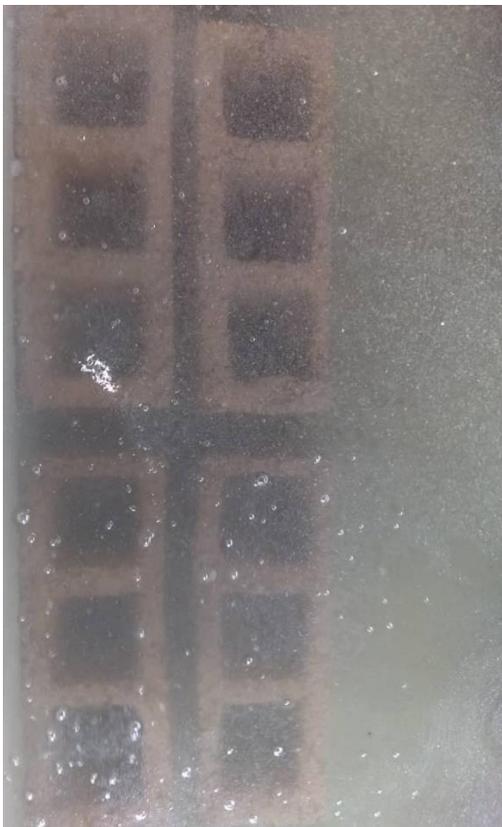


Figura 2.7. Bloques en el recipiente de agua

2.6.3. Determinación de las dimensiones del bloque

La medición se realizó con una regla graduada con valor de división de 1 mm. Las mediciones se efectuarán siguiendo el plan establecido en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Mediciones según NC 247: (NC 247, 2010)

Dimensiones	Procedimiento de medición
Longitud	3 mediciones en las cabezas.
Anchura	7 mediciones en 3 puntos por la cara superior y 3 puntos por la cara inferior.
Altura	6 mediciones en 3 puntos de cada cara lateral.

Las dimensiones de cada bloque de hormigón ensayado es una media de cada seis bloques en cada edad de ensayo. Los bloques deberán adaptarse preferentemente en sus dimensiones nominales y de fabricación, a los valores establecidos en la Tabla 2.10. El espesor efectivo de las paredes exteriores y tabiques de los bloques no podrá ser inferior a 20 mm en ningún punto de estos, incluso en las paredes cizalladas.

Tabla 2.109. Dimensiones y tolerancia admisibles según NC 247: (NC 247, 2010)

Tipo de bloque	l (± 3 mm)	b (± 3 mm)	h (± 3 mm)
I	495	195	195
	395		
II	495	145	
	395		
III	495	95	
	395		
IV	495	60	
	395		

Conclusiones del capítulo 2

- Las características que presenta las arcillas y el material carbonatado son adecuadas para la formulación de la adición minerales LC2.
- Las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicados en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos según las normalizados.
- Los bloques para los ensayos no presentaron grietas visibles, sus aristas estaban vivas, no se presentaron descorchados, sus caras estaban aparentemente paralelas y no le faltaron las esquinas.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la resistencia a la compresión y absorción de agua de los bloques huecos de hormigón. Se presenta además alternativas para incrementar la sostenibilidad en la producción de bloques huecos de hormigón.

3.1 Resultados de la resistencia a la compresión en bloques huecos de hormigón

Se ensayaron 6 bloques huecos de hormigón de 395×145×195 mm donde se sustituye el aglomerante P-35 por cemento de tipo LC2. En la Figura 3.1 se presentan los resultados de la resistencia a la compresión. Como se observa, los bloques ensayados cumplen satisfactoriamente con la resistencia mínima establecida en la NC 247: 2010 — Bloques huecos de hormigón — Especificaciones para este tipo de elemento, la cual especifica que para los bloques ensayados el valor mínimo de resistencia a la compresión a la edad de 7 días es de 4 MPa.

Es necesario destacar que, además de sobrepasar la resistencia mínima normalizada también sobrepasa los valores de los bloques de referencia utilizados en el que se emplea como aglomerante solo cemento Portland P-35.

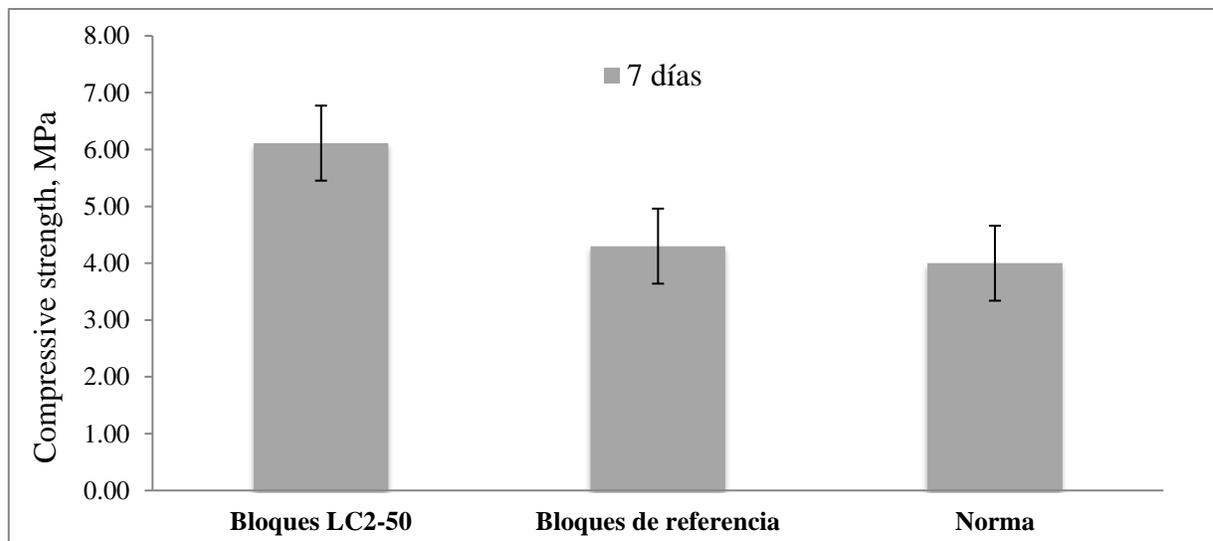


Figura 3.1 Comportamiento de la resistencia a compresión de los bloques huecos de hormigón a la edad de 7 días.

3.1 Resultados de la absorción de agua en bloques huecos de hormigón

El ensayo de absorción de los bloques huecos de hormigón se les realizó a 3 bloques producidos con la adición mineral LC2 con el propósito de evaluar si los bloques fabricados

cumplen con lo establecido en la norma. La siguiente tabla 3.1 muestra los resultados del ensayo de absorción de los bloques huecos de hormigón y al patrón.

Tabla 3.1: Absorción de los bloques huecos de hormigón

Muestras analizadas	Masa, g		Absorción, %
	Masa seca	Masa húmeda	
Bloque 1	7.68	8.42	9.6
Bloque 2	7.89	8.66	9.8
Bloque 3	7.94	8.59	8.2
Patrón	6.85	7.35	7.3

Como se puede apreciar en la Figura 3.2, la muestra ensayada cumple con lo establecido en la NC 247: 2010 — Bloques huecos de hormigón — Especificaciones, la cual indica que para este tipo de bloques el porcentaje de absorción debe ser menor que 10. Aquí es necesario destacar que los bloques elaborados con la adición LC2, presentan mayor absorción que el patrón de referencia, lo cual puede estar dado por la elevada superficie específica de la arcilla calcinada.

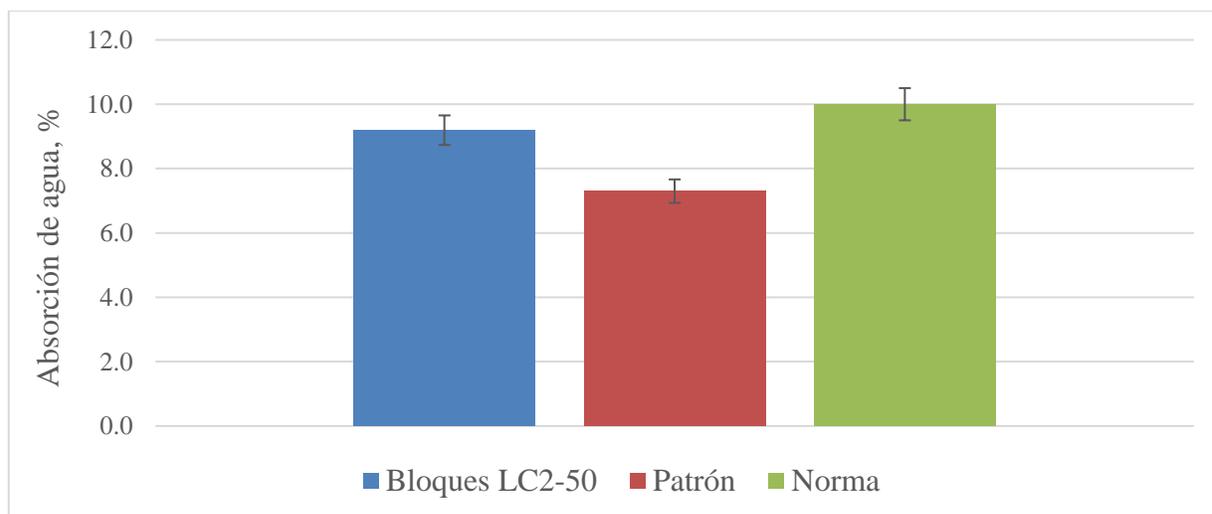


Figura 3.2. Comparación de la absorción de agua de los bloques elaborados con LC2 con respecto al patrón y la norma.

3.3. Perspectivas para la producción de bloques huecos de hormigón a partir de la adición mineral activa LC2 en el programa de la vivienda en Moa

La adición mineral activa LC2 es un material que se puede utilizar como alternativa para la producción de bloques huecos de hormigón en el programa de la vivienda en Moa. Esta adición mineral activa tiene propiedades que pueden mejorar las características del hormigón y

los bloques producidos a partir de él. Algunas alternativas para la producción de bloques huecos de hormigón utilizando adición mineral activa LC2 podrían incluir:

1. La adición mineral activa LC2 se puede utilizar para optimizar las mezclas de hormigón, lo que permite reducir la cantidad de cemento utilizada en la producción de bloques huecos. Esto no solo reduce los costos de producción, sino que también disminuye la huella de carbono asociada con la producción de cemento.
2. La adición mineral activa LC2 puede mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, como la resistencia a la compresión y la durabilidad. Esto significa que los bloques producidos con esta adición podrían tener una mayor resistencia y vida útil, lo que los hace más adecuados para su uso en programas de vivienda.
3. El uso de adición mineral activa LC2 en la producción de bloques huecos de hormigón puede contribuir a la reducción del impacto ambiental, ya que disminuye la cantidad de cemento Portland utilizado, lo que a su vez reduce las emisiones de dióxido de carbono asociadas con su producción.
4. La adición mineral activa LC2 puede ayudar a cumplir con las normativas y estándares de calidad para los materiales de construcción, lo que es fundamental en el programa de vivienda en Moa para garantizar la seguridad y durabilidad de las estructuras construidas.

Una variante de producción de la adición mineral activa LC2 en el CEDINIQ podría incluir el uso de materias primas locales disponibles en Moa. Estas materias primas podrían ser procesadas en el CEDINIQ modificando la tecnología actual. El esquema tecnológico propuesta se presenta en la Figura 3.3.

La materia prima arcillosa se extrae del depósito y serán transportadas en camiones hacia la Planta Piloto del Centro de Investigaciones del Níquel donde serán depositadas en un patio de materia prima en forma de pila. Cuando la humedad de la arcilla esté por debajo del 25 % producto de la exposición al aire, se pasará por un proceso de desintegración, y luego se envía a un proceso de secado en el horno de tambor rotatorio. El material seco (5 % de humedad) será enviado mediante un transportador hasta el horno de tambor rotario para realizar el proceso de calcinación en el horno de soleras múltiples, el cual contará con un sistema de preparación y alimentación de combustible al quemador y un sistema de limpieza de gases.

La arcilla calcinada, a una temperatura entre 800 y 850 °C en la zona de calcinación, con un tiempo de retención de no menos de 40 minutos, será sometido a enfriamiento mediante un sistema de transportador jacoby-enfriador de tambor.

Posteriormente, el material calcinado frío se envía a una plataforma techada y se suministrará a un molino de bolas para garantizar una finura del 90 % por debajo de 0,09 mm y un 70 % por debajo de la clase 0,045 mm.

Luego de la obtención del producto se formulará una mezcla para la obtención de la adición mineral LC2 (arcilla calcinada 65%, caliza 30%, yeso 5%).

Una vez producida y formulada la adición mineral activa LC2, esta podría ser transportada a la Planta de Prefabricados y Premezclado de Moa para su incorporación en la producción de bloques huecos de hormigón. La adición mineral activa LC2 se mezclaría con los demás componentes del hormigón en la planta de prefabricados, siguiendo las especificaciones técnicas y proporciones adecuadas para obtener bloques de alta calidad con elevados porcentajes de sustitución de cemento.

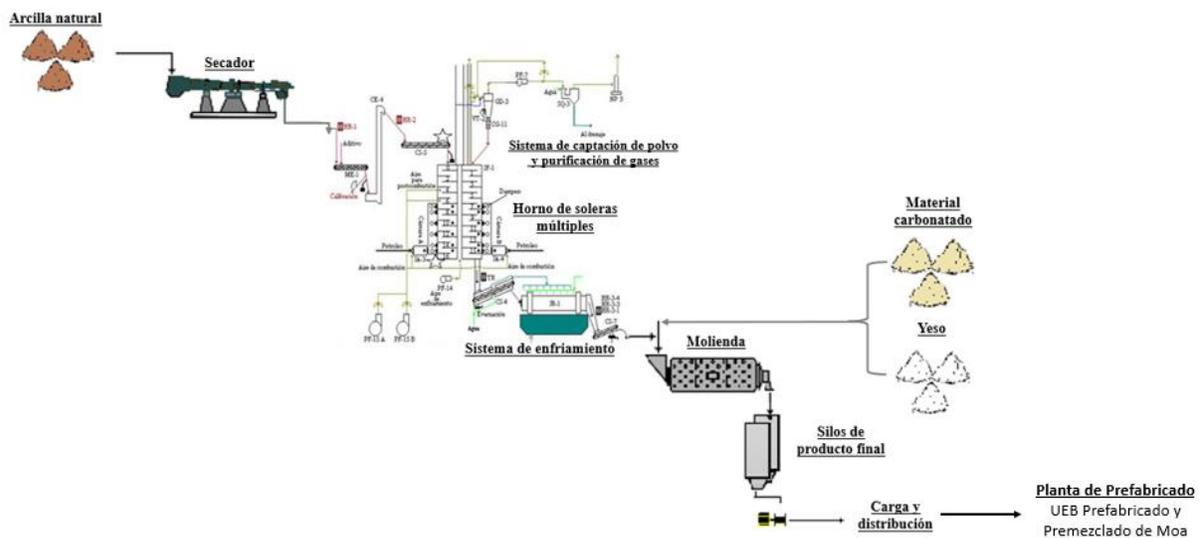


Figura 3.3. Flujo de la planta piloto del CEDINIQ adaptado para la producción de la adición mineral LC2 con encadenamiento productivo con la UEB de Prefabricado y Premezclado de Moa.

Conclusiones del capítulo 3

- El uso de adición mineral activa LC2 en la producción de bloques huecos de hormigón ofrece múltiples beneficios, como la disminución de cemento en las mezclas, la mejora de

las propiedades mecánicas, la reducción del impacto ambiental, cumplimiento las normativas técnicas. Estas alternativas pueden contribuir positivamente al programa de vivienda en Moa, promoviendo la sostenibilidad, la eficiencia y la calidad en la construcción de viviendas.

- La producción de bloques huecos de hormigón a partir de la adición mineral activa LC2, que puede ser producida en las facilidades de la planta Piloto del Centro de Investigaciones del Níquel, contribuye con la reducción de costos logísticos y promueven la sostenibilidad al utilizar recursos locales.

CONCLUSIONES

Se evaluaron las prestaciones de bloques huecos de hormigón elaborados con 50 % de la adición mineral LC2, formulada con material carbonatado de Yaguaneque y arcilla del sector Almacenes en Cayo Guam calcinada para su utilización en la industria de la construcción de Moa. Las conclusiones emanadas de esta investigación se presentan a continuación:

- Los bloques huecos de hormigón producidos con la adición mineral LC2 muestra un escenario promisorio para el desarrollo de Moa, lo cual se fundamenta en que:
 1. Los bloques estudiados presentan resistencia a la compresión a los 7 días, superior en todos los casos a la resistencia mostrada por los patrones de referencia y los valores mínimos normalizados.
 2. La absorción de agua de los bloques huecos de hormigón fabricados donde se sustituye el 50 % de cemento P-35 por la adición mineral LC2, muestran valores por debajo de 10 %, requisito mínimo establecido en las especificaciones para su uso.
- La producción de la adición mineral activa LC2 en planta Piloto del Centro de Investigaciones del Níquel y su consiguiente encadenamiento productivo con la planta de Prefabricado y Premezclado de Moa constituye una alternativa adelantadora para la producción de bloques huecos de hormigón destinados a los programas constructivos del territorio.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de este trabajo se presentan a continuación:

- Completar la caracterización de los bloques elaborados hasta los 28 días. Y se continúe arrojando resultados satisfactorios, realizar una producción piloto para introducir los resultados en la producción de viviendas en el Moa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar Pérez, A., 2014. Evaluación de las propiedades físico - mecánicas de morteros de albañilería y prefabricados de pequeño formato a base de Cemento de Bajo Carbono (Trabajo de Diploma). Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Almenares, R.S., 2017. Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios (Tesis Doctoral). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K., Martirena, F., 2015. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays : Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Appl. Clay Sci.* 108, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>
- Avet, F., Scrivener, K., 2018. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cem. Concr. Res.* 107, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016>
- Avet, F., Snellings, R., Alujas, A., Ben, M., Scrivener, K., 2016. Development of a new rapid , relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cem. Concr. Res.* 85, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>
- Basavaraj, A.S., Muni, H., Dhandapani, Y., Gettu, R., Santhanam, M., 2023. Limestone- Calcined Clay (LC2) as a supplementary cementitious material for concrete. *RILEM Tech. Lett.* 8, 12–22.
- Batista, R., Coutin, D., 2013. Potencialidades de las puzolanas naturales y arcillas caoliníticas como aglomerantes en Cuba, in: 10mo Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción. Cayo Santa María, Santa Clara, Cuba.
- Cancio Díaz, Y., Sánchez Berriel, S., Heierli, U., Favier, A.R., Sánchez Machado, I.R., Scrivener, K.L., Martirena Hernández, J.F., Habert, G., 2017. Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. *Dev. Eng.* 2. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2017.06.001>
- CEMBUREAU, 2013. The role of cement in the 2050 low carbon economy. Bruselas, Bélgica.
- Danner, T., 2013. Reactivity of Calcined Clays (Tesis Doctoral). NTNU, 2013:218. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

- Dhandapani, Y., Joseph, S., Bishnoi, S., Kunther, W., Kanavaris, F., Kim, T., Irassar, E., Castel, A., Zunino, F., Machner, A., Talakokula, V., Wilson, W., Elsen, J., Martirena, F., Santhanam, M., 2022. Durability performance of binary and ternary blended cementitious systems with calcined clay : a RILEM TC 282 CCL review. *Mater. Struct.* 55, 145. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01974-0>
- Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., Pillai, R.G., 2018. Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC³). *Cem. Concr. Res.*
- Fernández Pérez, J., 2019. Producción de cemento LC3 en Cuba: El camino de la autarquía [WWW Document]. *Cubadebate*. URL <http://www.cubadebate.cu/especiales/2019/05/24/produccion-de-cemento-lc3-en-cuba-el-camino-de-la-autarquia/> (accessed 8.10.23).
- IEA/CSI-WBCSD, 2018. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. París y Ginebra, Francia y Suiza.
- Jacobs, M., 1997. La economía verde: medio ambiente, desarrollo sostenible y la política del futuro. ICARIA, Barcelona.
- Machado León, G., 2023. Evaluación del material carbonatado del prospecto Yaguaneque para la formulación de la adicción mineral LC2. Universidad de Moa.
- Martirena-Hernández, J.F., 2018. Advances in local production of Low Carbon Cement. Santa Clara, Cuba.
- Martirena, F., Scrivener, K., 2019. Hacia la sostenibilidad en la producción de cemento en América Latina. *Cem. Concreto* 92–98.
- Martirena, F., Scrivener, K., 2018. Low carbon cement LC3 in Cuba: Ways to achieve a sustainable growth of cement production in emerging economies, in: Martirena, Fernando, Favier, A., Scrivener, Karen (Eds.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, pp. 318–321.
- Mejías Paumier, Y., 2020. Evaluación de las prestaciones de bloques huecos de hormigón producidos con cemento LC³. Universidad de Moa.
- Muni, H., Dhandapani, Y., Vignesh, K., Santhanam, M., 2020. Anomalous Early Increase in Concrete Resistivity with Calcined Clay Binders BT - *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, in: Bishnoi, S. (Ed.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. RILEM

- Bookseries, Vol 25. Springer Singapore, Singapore, pp. 749–757.
- NC/CTN22, 2021. NC 1340: 2021. Cement — Specifications.
- NC 96, 2011. Cemento con adición activa. Especificaciones.
- Nguyen, Q.D., Kim, T., Castel, A., 2020. Mitigation of alkali-silica reaction by limestone calcined clay cement (LC3). *Cem. Concr. Res.* 137, 106176. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106176>
- Palacios González, R.D., Sánchez Hechavarría, S., Rodríguez Moreno, L., Viada Estévez, A., 2023. Potencialidades del depósito arcilloso Almacenes en Cayo Guam para la producción de LC3. *Cienc. Futur.* 13, 183–202.
- Parashar, A., Bishnoi, S., 2020. A comparison of test methods to assess the strength potential of plain and blended supplementary cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* 256, 119292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119292>
- Pico Justi, K., 2020. Evaluación de bloques huecos de hormigón producidos con la adición aglomerante LC2. Universidad de Moa.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S., 1999. A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 13, 427–432.
- Rabilero, A., 1988. Las Puzolanas. Cinética de las reacciones. Editorial Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- Ramírez-Silvera, M., 2018. Evaluación de los bloques huecos de hormigón con diferentes dosificaciones de materiales cementicios suplementarios (Trabajo de Diploma). Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.
- Reyes Silot, D., 2015. Evaluación de prefabricados de pequeño formato con cemento de bajo carbono criollo (Trabajo de Diploma). Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba.
- Rodríguez Moreno, L., 2018. Valoración de las potencialidades del depósito arcilloso Almacenes en Cayo Guam para la producción de LC 3. Universidad de Moa.
- Sánchez-Berriel, S., Cancio-Díaz, Y., Sánchez-Machado, I.R., Martirena-Hernández, J.F., Rosa-Domínguez, E.R., Habert, G., 2020. Impacts Assessment of Local and Industrial LC3 in Cuban Context: Challenges and Opportunities, in: Bishnoi, S. (Ed.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. RILEM Bookseries, Vol 25. Springer Singapore, Singapore, pp. 263–270. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_30

- Savater, F., 1999. *Las Preguntas de la Vida*. Ariel, S.A., Barcelona.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., Bolio, H., 2011. Sustainable cement production—present and future.
- Scrivener, K., Avet, F., Maraghechi, H., Zunino, F., Ston, J., Hanpongpun, W., Favier, A., 2019. Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). *Green Mater.* 7, 3–14. <https://doi.org/10.1680/jgrma.18.00029>
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., Maity, S., 2018. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cem. Concr. Res.* 114, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Scrivener, Karen L., John, V.M., Gartner, E.M., 2018. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.* 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Scrivener, Karen L, John, V.M., Gartner, E.M., Environment, U.N., Scrivener, K.L., John, V.M., Gartner, E.M., 2018. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Scrivener, K.L., Nonat, A., 2011. Hydration of cementitious materials, present and future. *Cem. Concr. Res.* 41, 651–665. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>
- Shah, V., Parashar, A., Mishra, G., Medepalli, S., Krishnan, S., Bishnoi, S., 2020. Influence of cement replacement by limestone calcined clay pozzolan on the engineering properties of mortar and concrete. *Adv. Cem. Res.* 32, 101–111. <https://doi.org/10.1680/jadcr.18.00073>
- Suraneni, P., Hajibabae, A., Ramanathan, S., Wang, Y., Weiss, J., 2019. New insights from reactivity testing of supplementary cementitious materials. *Cem. Concr. Compos.* 103, 331–338. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.017>
- U.S. Geological Survey, 2015. *Mineral commodity summaries 2015*: U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/70140094>
- Vaasudevaa, B. V, Dhandapani, Y., Santhanam, M., 2021. Performance evaluation of limestone-calcined clay (LC2) combination as a cement substitute in concrete systems subjected to short-term heat curing. *Constr. Build. Mater.* 302, 124121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124121>
- Wang, H., Hou, P., Li, Q., Adu-Amankwah, S., Chen, H., Xie, N., Zhao, P., Huang, Y., Wang,

S., Cheng, X., 2021. Synergistic effects of supplementary cementitious materials in limestone and calcined clay-replaced slag cement. *Constr. Build. Mater.* 282, 122648. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122648>

WBCSD/IEA, 2009. *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050.* IEA Publications, Paris, France.

WCED, 1987. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.* Oslo.