



# EVALUACIÓN DEL MATERIAL CARBONATADO DEL PROSPECTO YAGUANEQUE PARA LA FORMULACIÓN DE LA ADICCIÓN MINERAL LC2

Tesis en opción al título de Ingeniería en Metalurgia y Materiales

AUTOR: Grabiél Machado León

TUTORES: Dr. C. Roger Samuel Almenares Reyes  
Dr. C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez

Moa, 2023



---

# EVALUACIÓN DEL MATERIAL CARBONATADO DEL PROSPECTO YAGUANEQUE PARA LA FORMULACIÓN DE LA ADICCIÓN MINERAL LC2

Tesis en opción al título de Ingeniería en Metalurgia y Materiales

AUTOR: Grabiél Machado León

TUTORES: Dr. C. Roger Samuel Almenares Reyes  
Dr. C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez

Moa, 2023

---

## *Dedicatoria*

Esta tesis se la dedico a mi madre por estar junto a mí enseñándome, educándome, siempre atenta conmigo para que un día me pudiera convertir en una persona de bien y en un buen profesional, siendo mi mayor apoyo y ejemplo para seguir.

Le dedico esta tesis a mi padre ya que en todo este transcurso me ha apoyado y se ha sentido orgulloso de que su hijo se va a hacer un ingeniero.

Al igual se la dedico a mi abuela que siempre estuvo conmigo en toda mi etapa de vida desde que era un niño, siempre cuidándome, protegiéndome, siendo mi otra madre.

A mi tía y mi prima por estar preocupadas y atentas por mí, para que pueda lograr cumplir con mis metas.

A toda mi familia que se siente orgulloso de quien soy, y que poco a poco me han ayudado en mi vida, para lograr lo que me he propuesto.

Se la dedico a mis dos abuelos que aunque ya no estén conmigo, me cuidaron, me ayudaron y fueron muy buenos conmigo, que diosito los cuide mucho y que sepan que yo siempre los voy a querer muchísimo.

## *Agradecimientos*

En primer lugar, le agradezco a Dios por haberme ayudado, y estar junto a mí, en esta etapa de mi vida.

Le agradezco a mi madre por estar apoyándome y siempre estando a mi lado, para que hoy me pueda graduar y ser un profesional en esta sociedad.

Le agradezco a mi padre por estar a mi lado junto a mi madre apoyándome en todo momento y poderme graduar satisfactoriamente.

Le agradezco a mi tía, mi abuela y mi prima por estar pendientes de mí para que pueda cumplir lo que me propongo.

Le agradezco a mi tutor por haberme ayudado y brindado todos sus conocimientos para poder culminar mi tesis.

Y gracias a todas aquellas personas que me han dado su apoyo incondicional en todo el transcurso en la universidad con el objetivo de formarme y ser una gran persona.

A todos,

**Muchas gracias.**

## *Pensamiento*

*Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.*

**Albert Einstein**

# Resumen

Basado en que no se ha reportado en la literatura el comportamiento del material carbonatado de región de Yaguaneque en sistemas cementicios de base arcilla calcinada y carbonato de calcio, limita su valoración para la producción cementos ternarios en Moa. Por lo que la presente investigación evaluó el material carbonatado de la región de Yaguaneque como adición para la producción de aglomerantes ternarios tipo TQC en Moa, mediante caracterización química y mineralógica de las materias primas y la determinación de la resistencia a la compresión de los sistemas cementicios ternarios. El material carbonatado evaluado presenta contenidos estimados de  $\text{CaCO}_3$  de 93.2 % y bajos valores de material arcilloso, lo que permite considerarlo como fuente de carbonatado para la formulación de cementos ternarios tipo TQC. Los morteros de cemento ternario presentan 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.

# Abstract

Since the behavior of the carbonated material from the Yaguaneque region in clay-calcined and calcium carbonate-based cement systems has not been reported in the literature, its assessment to produce ternary cements in Moa is limited. Therefore, this study evaluated the carbonated material from the Yaguaneque region as an addition to produce ternary binders of TQC type in Moa, through chemical and mineralogical characterization of the raw materials and the determination of the compressive strength of the ternary cement systems. The evaluated carbonated material shows estimated  $\text{CaCO}_3$  contents of 93.2% and low values of clayey material, allowing it to be considered as a carbonate source for the formulation of TQC type ternary cements. The ternary cement mortars show suitable compressive strength values, according to the mechanical strength requirements established by the Cuban standard NC 1340, for a TQC-25 and 35 type ternary cement.

<b>Índice</b>	<b>Pág.</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Marco Teórico – Conceptual</b> .....	<b>4</b>
1.1. Contexto actual del estudio .....	4
1.2. Estudios de arcillas como materiales cementicios suplementario en Cuba.....	4
1.3 Estudios de fuentes de carbonato de calcio como material cementicios suplementarios en el sistema LC3. ....	6
1.4. Potencial y necesidad en la implementación de los sistemas LC3 en el territorio .....	8
Conclusiones del capítulo 1 .....	9
<b>Capítulo 2. Materiales y Métodos</b> .....	<b>10</b>
2.1. Selección de la materia prima.....	10
2.2. Descripción y localización del depósito carbonatado.....	10
2.3. Toma y preparación de las muestras.....	11
2.4. Caracterización de los materiales arcillosos.....	12
2.5. Formulación de la adición mineral LC2 .....	13
2.8. Determinación de la resistencia a la compresión en morteros normalizados .....	14
Conclusiones del capítulo 2.....	14
<b>Capítulo 3. Análisis y Discusión de los Resultados</b> .....	<b>15</b>
3.1. Resultados de la caracterización química .....	15
3.2. Resultados de la caracterización mineralógica .....	15
3.3. Comportamiento físico - mecánico en sistemas ternarios .....	16
3.5. Aprovechamiento del material evaluado en la producción de la adición mineral.....	18
Conclusiones del capítulo 3.....	19
<b>Conclusiones</b> .....	<b>20</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>21</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	<b>22</b>



## INTRODUCCIÓN

El cemento de base arcilla calcinada y caliza o cemento de bajo carbono (LC3) es un tipo 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).

El uso del LC3 puede contribuir a reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono antropogénico provenientes de la industria constructiva (entre 30% y 35%), al tiempo que se generan considerables ahorros en costos económicos (entre 15% y 20%). La reducción de clínquer en la matriz del cemento trae consigo grandes ahorros en portadores energéticos. Se recomienda introducir el LC3:50 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).

La sustitución del cemento por MCS se ha convertido en la alternativa con mayor perspectiva de aplicación. Algunas de las adiciones más empleadas son los subproductos industriales como las cenizas volantes, escorias granuladas y humo de sílice (Juenger et al., 2012). Dentro de las puzolanas utilizadas como adición se encuentra las tobas volcánicas, las arcillas calcinadas y la roca caliza molida (Ramezaniapour, 2014). De estos últimos, las arcillas calcinadas han adquirido importancia en países en desarrollo (Martirena et al., 2011). A esto se suma que mezclado con caliza se obtiene un aglomerante con propiedades similares a los cementos Portland ordinarios (Antoni et al., 2012a; Martirena et al., 2016). La sinergia entre la arcilla calcinada y la caliza favorece el aumento del volumen de sólidos, y por consiguiente el incremento de las propiedades mecánicas y de la permeabilidad (De Weerd et al., 2011; Vizcaíno-Andrés et al., 2015).

El desarrollo de estos sistemas cementicios con altos porcentajes de sustitución de uso de materiales cementantes suplementarios (SCM) tiene un enorme potencial para reducir las emisiones de carbono y el consumo de recursos naturales en la producción de cemento, especialmente en los países en desarrollo (Sánchez Berriel et al., 2016) y a la vez lograr mayor producción para satisfacer la creciente demanda de aglomerantes (Cancio Díaz et al., 2017). Sin embargo, la disponibilidad limitada de materiales cementicios suplementario (MCS) en muchos países o regiones es un obstáculo para un uso más amplio. Hoy en día más del 80 % de los MCS utilizados para reducir el factor de clínquer en el cemento son piedra caliza, cenizas volantes o escoria. Las arcillas calcinadas, particularmente en combinación con piedra caliza (tecnología

LC3), tienen un enorme potencial para ampliar el uso de materiales cementosos suplementarios como reemplazo parcial del clínquer en cemento y hormigón (K. Scrivener et al., 2018).

Hasta la actualidad, los estudios realizados en la región de Moa para la introducción de este sistema cementicio (Almenares Reyes et al., 2016, 2018, 2020; Almenares, 2017), han estado más centrado en la fuente de material arcilloso y mucho más limitado ha sido la evaluación de fuentes de carbonato de calcio (Meneses-Hervas, 2019).

La evaluación de 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 90 km de donde se prevé la instalación de una planta de producción de LC2 (Fernández Pérez, 2019). Otra alternativa valorada ha sido emplear residuos de la planta de cienos carbonatados de la Empresa Moa Nickel S.A, la cual ha quedado inhabilitada por la competencia de su utilización para la neutralización de ácido en la tecnología ácida a presión.

Durante la revisión de estudios anteriores, se localizó un prospecto de material carbonatado en la zona de Yaguaneque (Colectivo de autores, 1988), el cual fue estudiado como fuente de material de recebo, morteros, entre otras aplicaciones en la industria de materiales de la construcción en Moa.

A partir de lo anterior, se formula como **problema de la investigación**: no se ha reportado el comportamiento del material carbonatado de región de Yaguaneque en sistemas cementicios de base arcilla calcinada y carbonato de calcio, lo cual limita su valoración para la producción cementos ternarios en Moa.

Esta investigación tiene como **objeto de estudio** los materiales carbonatados del depósito de Yaguaneque.

### **Objetivo general**

Evaluar el material carbonato del prospecto Yaguaneque para la producción de cemento de base arcilla calcinada – caliza.

Como **hipótesis** se plantea que, si se caracterizan fuentes de carbonato de calcio del territorio y se determina el comportamiento de la resistencia mecánica en aglomerantes ternarios de base arcilla calcinada y caliza, es posible valorar su aprovechamiento en la industria local de materiales de construcción.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar química y mineralógicamente las materias primas empleadas en la formulación de la adición mineral basada en arcilla calcinada y caliza.
2. Determinar la resistencia a la compresión de los sistemas cementicios mezclados de base arcilla calcinada y caliza.

### **Campo de acción**

Composición químico-mineralógica y comportamiento físico-mecánico de morteros elaborados con el cemento de base arcilla calcinada-caliza.

### **Tareas de la Investigación**

1. Sistematización del conocimiento del carbonato de calcio en las propiedades del cemento bajo carbono a partir de la búsqueda y análisis de la información bibliográfica relacionada con los cementos adicionados arcilla calcinada y caliza.
2. Selección, toma y preparación de las muestras.
3. Caracterización del material arcilloso y el material carbonatado.
4. Preparación del material carbonatado y la arcilla calcinada hasta alcanzar 90 % pasado por el tamiz 90  $\mu\text{m}$ .
5. Formulación del sistema cementicio a partir de la mezcla de 55 % cemento P-35, 30 % de arcillas calcinadas y 15 % de caliza.
6. Evaluación de las propiedades físico-mecánica del producto obtenido en morteros normalizados.

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL**

### **1.1. Contexto actual del estudio**

El cemento LC3 es un nuevo cemento que propone una alternativa sustentable y amigable al medio ambiente, donde la Dr. Karen Scrivener mejoro la calidad del cemento reduciendo un 40% las emisiones de carbono asociadas a la producción del clínquer, además de su bajo consumo energético, garantiza una mayor durabilidad. Este cemento de arcilla calcinada (LC3), se puede encontrar de manera abundante y económica. El cemento estará compuesto por 50% clínquer, 30% arcilla calcinada, 15% caliza y 5% de yeso, alcanzando esta mezcla resistencias similares al cemento portland. (Scrivener et al., 2016).

La reducción de los consumos de clínquer para la producción de diversos y nuevos tipos de cemento, se ha convertido en la temática de mayor interés por parte de productores e investigadores, tal es así que en la *International Energy Agency (IEA) and the World Business Council for Sustainable Development's (WBCSD) Cement Sustainability Initiative (CSI)* prevé que el 27 % de la producción mundial para el 2050 estará basado en la formulación clínquer – arcilla calcinada – caliza (LC<sup>3</sup>) (IEA/CSI-WBCSD, 2018). Sobre la base de esto se desarrolla intensamente las investigaciones de nuevas formulaciones de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer, buscando al mismo tiempo mantener o mejorar las prestaciones fisico-mecánicas y la durabilidad. (IEA/CSI-WBCSD, 2018).

Las adiciones fundamentales para la producción de cementos con altos volúmenes de sustitución de clínquer la constituyen los materiales cementicios suplementarios.

### **1.2. Estudios de arcillas como materiales cementicios suplementario en Cuba**

Los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) son aquellos materiales que, a través de su actividad de carácter hidráulico o puzolánico, contribuyen a mantener o incrementar las propiedades de los hormigones en su estado endurecido. Dentro del amplio grupo de MCS se encuentran las puzolanas, que se definen como aquellos materiales naturales o artificiales, ricos en sílice y alúmina, capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio en presencia de agua para formar compuestos con propiedades cementantes (Massazza, 1976). Por su parte, un aglomerante hidráulico es un material que se fija y endurece en presencia de agua para formar productos cementicios en una reacción de hidratación (Snellings, 2011a).

Las investigaciones llevadas a cabo por Alujas, Castillo y Fernández (Alujas Días, Alujas y Alujas Días, 2010; Castillo, 2010; Fernández, 2009) reportan el potencial puzolánico que ofrece la activación de arcillas cubanas multicomponentes con bajos contenidos de caolinita para la fabricación de un aglomerante con rendimiento similar al cemento Portland.

Se conoce que la sustitución en el cemento por arcillas calcinadas mejora las características del cemento. El producto comercial más conocido es el metacaolín, que se obtiene a partir de arcillas caoliníticas de alta pureza, aunque en la actualidad se produce arcilla calcinada con materia prima de bajo contenido de caolinita (40 %) (Alujas et al., 2015). Ambos productos mejoran la resistencia mecánica de los morteros, refina la micro estructura de los poros y aumenta la durabilidad (Martirena et al., 2016).

El proceso de calcinación de las arcillas se distingue por varios períodos. Con el calentamiento desde temperatura ambiente hasta 250°C ocurre la pérdida (reversible en algunos casos) del agua adsorbida y absorbida en las superficies externas e internas de la arcilla (deshidratación). Entre los 400 °C y los 950 °C ocurre la remoción de los OH- estructurales (deshidroxilación) acompañada por el desorden parcial de la estructura cristalina y la formación de fases metaestables, caracterizadas por una alta reactividad química (Snellings, 2011b). La pérdida de los OH<sup>-</sup> desestabiliza eléctricamente la estructura, especialmente en la zona de la capa octaédrica. Es por eso que en las arcillas calcinadas las fases de alúmina juegan un papel muy importante en la reactividad puzolánica, pues son estas zonas de la estructura las primeras en desestabilizarse estructuralmente durante el proceso de deshidroxilación.

Más reciente se ha reportado la activación térmica de arcillas multicomponentes y la producción de un aglomerante con solo 50 % de clínquer mezclado con 30 % de arcilla calcinada y 15 % de caliza molida que mostró un comportamiento similar el cemento PP-35 y a menor costo que este (Vizcaíno, 2014). Es por ello por lo que, el estudio de nuevas fuentes de materiales arcillosos con bajos contenidos de caolinita, material ampliamente disseminado y de menor competencia de utilización con otras industrias de mayor valor agregado, resulta una importante alternativa para suplir la demanda de cemento, disminuir sus costos, y en la medida de lo posible aprovechar las tecnologías existentes sin grandes inversiones. Extender estos estudios permite, además, tener un mayor grado de conocimiento de las reservas existentes en todo el país, vinculado particularmente al empleo de estos materiales arcillosos con características adecuadas para su uso como materiales cementicios suplementarios (Herrera del Sol, 2018).

Los minerales arcillosos son el producto de la meteorización sobre minerales primariamente ígneos como los feldespatos o formados durante la alteración diagenética a bajas temperaturas. En dependencia de las condiciones de intemperismo y de la composición química de la roca original, varios minerales arcillosos son favorecidos en su formación. Dentro de ellos, los más comunes son la caolinita, las esmectitas (montmorillonita), illita, clorita y palygorskite-epiolita. Las illitas y las cloritas son formadas predominantes en climas fríos o templados, las esmectitas en climas mediterráneos y zonas tropicales con diferencias entre las estaciones, mientras que la formación de caolinita es más común bajo condiciones húmedas tropicales y ecuatoriales. (Martirena et al., 2016).

Las ventajas que presentan las arcillas calcinadas, como fuente de puzolanas, unido a las deficiencias que se presentan en la producción de cemento a nivel nacional las hace poseer la mayor perspectiva de utilización para la producción de materiales cementicios suplementarios que permita orientar su desarrollo de acuerdo con las condiciones establecidas para su uso, no solo su empleo como adición puzolánica al CPO, sino también su empleo en la elaboración de nuevas fórmulas aglomerantes. (Martirena et al., 2016).

En la región de Moa se ha demostrado las potencialidades de los depósitos arcillosos como fuente de materia prima para la producción de materiales cementicios suplementarios, reportados en varios artículos científicos, trabajos de diploma, dos tesis de maestría y una tesis doctoral (González-Verdecia, 2015; Almenares-Reyes et al., 2016; Poll-Legrá et al., 2016; Almenares, 2017). Sin embargo, es aún una limitante la fuente de carbonato de calcio para la producción del sistema cementicio cemento Portland-Arcilla Calcinada-Yeso.

### **1.3 Estudios de fuentes de carbonato de calcio como material cementicios suplementarios en el sistema LC3.**

La piedra caliza ha encontrado su posición en la industria del hormigón como material de reemplazo del cemento debido a su bajo precio, alta disponibilidad y bajo consumo energético durante su molienda; permitiendo su uso para el ajuste de la distribución del tamaño de partículas de componentes cementosos para mejorar el trabajo y resistencia a temprana edad en el concreto. Además, la piedra caliza favorece la hidratación de clínquer al proporcionar una superficie adecuada para la nucleación del hidrato (efecto de relleno) y contribuye a reacciones de hidratación en presencia de aluminatos. Esto lleva al interés por los cementos con una

sustitución acoplada de piedra caliza por calcinada. Arcilla, que llamamos LC3: cemento de arcilla calcinada-caliza. Anteriormente demostramos que existe una fuerte relación entre el desarrollo de resistencia de las mezclas LC3-50 (contenido de clínquer reducido al 50%) y el contenido de caolinita calcinada de la arcilla calcinada. Además, utilizando una arcilla con sólo el 40% de caolinita calcinada da una resistencia similar al cemento simple después de aproximadamente 7 días. (J. F. Martirena, 2012).

Las calizas constituyen la principal fuente de calcio para la producción de clínquer, las mismas representan del 70 al 90 % de las materias primas empleadas (Taylor, 1997). A partir su descomposición se obtienen los cuatro componentes principales del clínquer (alita, belita, aluminato de tricálcico y ferrita).

El mineral más abundante y disponible para la producción de cemento es el  $\text{CaCO}_3$  en forma de piedra caliza (U.S. Geological Survey, 2019). La piedra caliza es usada habitualmente como fuente de CaO para la producción del clínquer de cemento CP y LC3, pero adicionalmente puede ser usada en su estado natural, finamente molida, como adición mineral (Vizcaíno, 2014).

Como adición mineral, la roca caliza se ha convertido en un material de interés para ser empleada en su estado natural pulverizada como sustituto parcial del clínquer. La misma tiene la ventaja de ser abundante, barata, y sin el costo ambiental asociado a la producción de clínquer. La producción de cementos con la incorporación de la piedra caliza como extensor del clínquer se ha diseminado de forma internacional. Europa, Canadá y en otros 25 países se ha empleado como adición al cemento con una sustitución de hasta un 5 % (B Lothenbach et al., 2008). Actualmente varios sistemas cementicios - caliza contienen de 5 a 40 % de caliza y son producidos y utilizados alrededor del mundo (Ramezani pour, 2014).

La participación de la caliza en las reacciones de hidratación del cemento se encuentra limitada por el contenido de  $\text{C}_3\text{S}$ . Esta interactúa químicamente con las fases del cemento para estabilizar la fase de carboaluminatos a costa de la formación de monosulfoaluminatos. Esta acción dentro de ciertos límites, aumenta la cantidad de ettringita formada, lo que conduce al aumento del volumen de sólidos, y por consiguiente al aumento de las propiedades mecánicas (Barbara Lothenbach et al., 2008). A través de su empleo se manifiesta un efecto de relleno en la mezcla, lo cual conduce al decrecimiento de la porosidad de la pasta, a este efecto se le atribuye el aumento de la resistencia mecánica a la compresión (Oey et al., 2013).

A partir de este contenido mínimo los cementos elaborados en presencia de su adición manifiestan propiedades comparables y en algunos casos hasta superiores a aquellas propiedades logradas para cementos puros (Damtoft et al., 2008).

El efecto de la calidad de la caliza sobre la hidratación del cemento LC3, además de la influencia en las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y la porosidad. Los resultados de las investigaciones concluyen que no existe influencia significativa en el grado de hidratación y la porosidad, y se obtienen resistencias similares a las de CP, tanto para calizas de alta calidad como para calizas dolomíticas con bajos niveles de sustitución (Yanes Ruiz, 2014).

La caliza ha sido evaluada con arcillas cubanas de baja pureza de caolinita mostrando comportamientos similares (Vizcaíno et al., 2015; Martirena et al., 2016). Las propiedades de los cementos producidos en presencia de sustituciones de clínquer por la combinación de las mismas son muy similares a las de los cementos ternarios donde se utiliza metacaolín (Martirena et al., 2016).

#### **1.4. Potencial y necesidad en la implementación de los sistemas LC3 en el territorio**

La introducción del cemento LC3 podría contribuir a aumentar la capacidad de producción de cemento en el país en un 17-45% en el corto plazo, con inversiones pequeñas de ciclo corto, a partir de emplear los niveles actuales de producción de clínquer que tiene la industria. Por esta vía podría mitigarse el déficit que se creará, y consecuentemente evitar las importaciones, y brindar un espacio de tiempo para concretar las inversiones en camino (K. L. Scrivener et al., 2018).

La producción de este tipo de cemento podrá consolidar el programa de producción y venta local de materiales del MICONS, a partir de incrementar las existencias de cemento en los mercados de venta de materiales de construcción del MINCIN (Martirena et al., 2016).

El mismo tiene un impacto en el medio ambiente, por ejemplo, que la introducción de este unida a la maximización de la producción de cementos puzolánicos, permitiría a la industria de cemento cubana ampliar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria a niveles superiores de 20 al 30% sin necesidad de realizar grandes inversiones. Este cemento ha sido aplicado de forma exitosa como cemento de uso general en la producción de una variada gama de productos de hormigón (K. L. Scrivener et al., 2018).

Se han hecho evaluaciones económicas y ambientales del cemento de bajo carbono producido usando modernas herramientas de cálculo. El estudio prueba la reducción de las emisiones de



Gases de Efecto de Invernadero en la producción de cemento superior al 30%. El cemento producido, con un 50% de clínquer, tiene un costo de producción ligeramente menor que el cemento P-35, con 88% de clínquer, y permite una mayor rentabilidad de la inversión (Sánchez Berriel et al., 2016).

Por su gran resistencia se han creado sistemas de concreto con LC3, que alcanzan la resistividad más alta, independientemente del rango de mezclas de concreto consideradas. Este tipo de cemento por su alta resistencia a la corrosión es de alto valor para la elaboración de hormigón con el cemento antes mencionado (Antoni et al., 2012a).

Se han realizado clasificaciones cualitativas de la calidad del hormigón, lo cual sugiere que las cenizas volantes producen una excelente calidad de hormigón sólo después de un curado prolongado, mientras que la LC3 alcanza una resistencia mucho mejor a una edad relativamente temprana.

Independientemente de las diferentes mezclas de concreto, se encontró que los valores RCP de las mezclas de concreto LC3 estaban en la categoría de carga aprobada "insignificante". La razón principal se debe a la estructura de poros refinada alcanzada en edades tempranas en el LC3 (Vizcaíno, 2014; Martirena et al., 2016).

En la actualidad se han hecho construcciones civiles, las cuales han tenido buena demanda por la calidad de este cemento el cual ha demostrado tener gran durabilidad e hidratación esto también ha sido posible gracias a los avances tecnológicos que han ayudado a que los resultados sean más confiados a la hora de comparar este con el cemento Portland (Vizcaíno-Andrés et al., 2015).

### **Conclusiones del capítulo 1**

- Existe un amplio conocimiento de las arcillas calcinadas como material cementicios suplementario provenientes de depósitos de la región, sin embargo, el estudio en material carbonatado para la formulación de sistemas cementantes ternarios es aún una limitante.
- Los materiales carbonatados evaluados hasta ahora han perdido la objetividad, debido a la distancia que se encuentran ubicados o por la competencia en aplicaciones de mayor valor agregado, por lo tanto, se necesita estudiar propuestas más concretas.

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

El propósito de este capítulo es describir los criterios básicos para la selección, toma y preparación de las muestras, selección de las materias prima, y los procedimientos experimentales utilizados para la caracterización de esta.

### **2.1. Selección de la materia prima**

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 de donde se prevé la instalación de una planta de producción de LC2. Y, por otro lado, la alternativa de emplear residuos de la planta de cienos carbonatados ha quedado inhabilitada por la competencia de su utilización para la neutralización de ácido en la tecnología ácida a presión de la Moa Nickel S.A. Por ello, en la revisión de estudios anteriores realizados, se localizó un prospecto de material carbonatado en la zona de Yaguaneque, que está cerca del territorio.

### **2.2. Descripción y localización del depósito carbonatado**

La zona de estudio está ubicada al norte noreste del poblado de Cananova y al este del poblado de Yaguaneque (Figura 2.1). En esta zona existen rocas carbonatadas aflorables las cuáles fueron estudiadas para utilizar como materia prima en la industria de la construcción del municipio de Moa. Esta región está representada por sedimentos pantanosos y aluviales, como son alcurolitas calcáreas y organodetríticas, arenas y arcillas a veces con gravas de color carmelitoso grisáceo, cantos rodados y hasta bloques derivados de la erosión fluvial, localizándose fundamentalmente en la margen litoral norte y ocupando el cauce, las orillas y las desembocaduras de los ríos.

Un amplio desarrollo de esta zona lo tienen las rocas de la formación Mucaral, compuestas por calizas margosas y órgano-detríticas de color crema, estratificadas y con espesor variables. Raramente se ven intercalaciones de areniscas tobáceas. Los ángulos de buzamiento oscilan entre 20 y 30 grados. Hacia la superficie y hasta 13 m de profundidad se observan margas de color crema, arcillosas de granos finos y medios, estratificación gruesa y con un ángulo de buzamiento de 25 grado. La capa superior de marga es muy homogénea.



Figura 2.1. Ubicación del afloramiento donde se tomaron las muestras (20.646293, -75.082803)

### **2.3. Toma y preparación de las muestras**

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 bien expuesto en la zona de Pozo Prieto, del cual se tiene información previa. 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 trasladaron hasta el laboratorio de beneficio para ser preparadas para los posteriores ensayos previstos. Las muestras se homogenizaron y redujeron mediante el método del cono y el anillo (Figura 2.2).

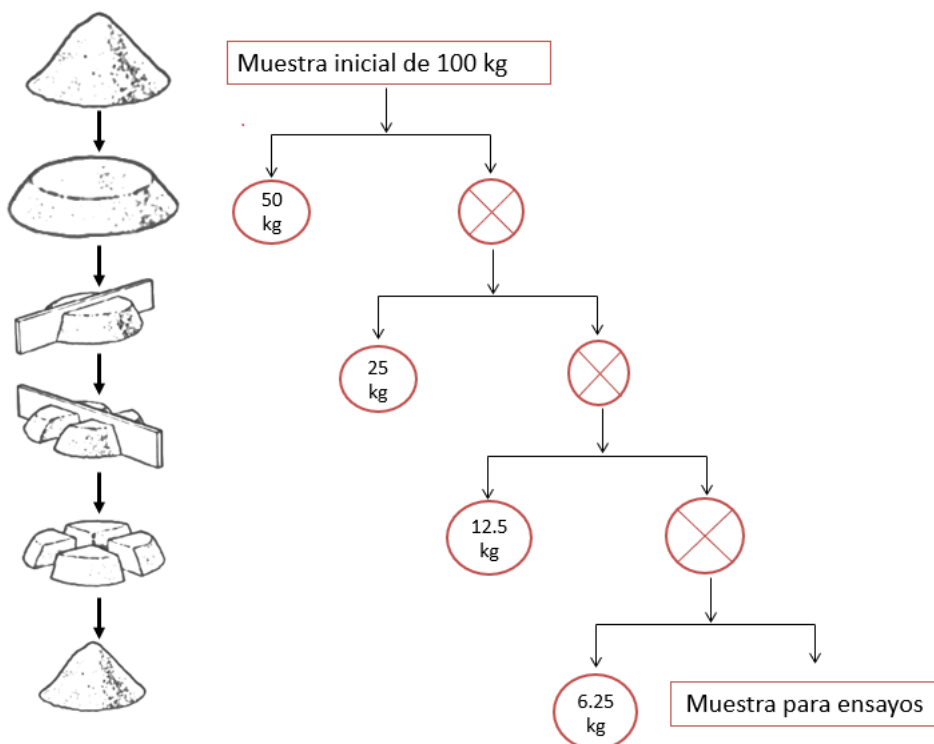


Figura 2.2. Esquema de homogenización y reducción de la muestra.

#### 2.4. Caracterización de los materiales arcillosos

La determinación de la composición química de la arcilla natural fue realizada mediante fluorescencia de rayos X, empleando un espectrómetro marca *OLYMPUS* modelo Terra 476, ubicada en el laboratorio analítico químico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El contenido de carbonato de calcio fue estimado mediante análisis estequiométrico asumiendo que el contenido reportado de CaO se encuentra asociado únicamente a la calcita.

El análisis de la composición mineralógica se llevó a cabo mediante difracción de rayos X. Las muestras se homogeneizaron mediante un mortero de ágata y se midieron utilizando un portamuestras de aluminio (fracciones no orientadas). Los difractogramas se obtuvieron en un Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D. La medición se realizó en el intervalo angular  $2\theta$  de  $4^\circ$  a  $80^\circ$  en escaneo por pasos con un “step scan” de  $0.003^\circ$  (2 Theta) y un tiempo de integración de 40s por paso. La identificación y semicuantificación se realizó utilizando el HighScore Plus 3.0.2 (2011), mediante subrutinas programadas para la identificación de fases minerales utilizando las bases de datos COD (2014).

## 2.5. Formulación de la adición mineral LC2

Para la formulación de la adición mineral LC2 se tomó una arcilla calcinada proveniente del depósito Cayo Guam, cuyas características se presentan en la Tabla 2.1 y Figura 2.3, basado en los resultados reportados por (Rodríguez Moreno, 2018) y se mezcló con material carbonatado de Yaguaneque y yeso de Punta Alegre en las proporciones que se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1. Composición química de la muestra natural y pérdida por ignición (PPI) en %. Tomado de (Rodríguez Moreno, 2018)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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

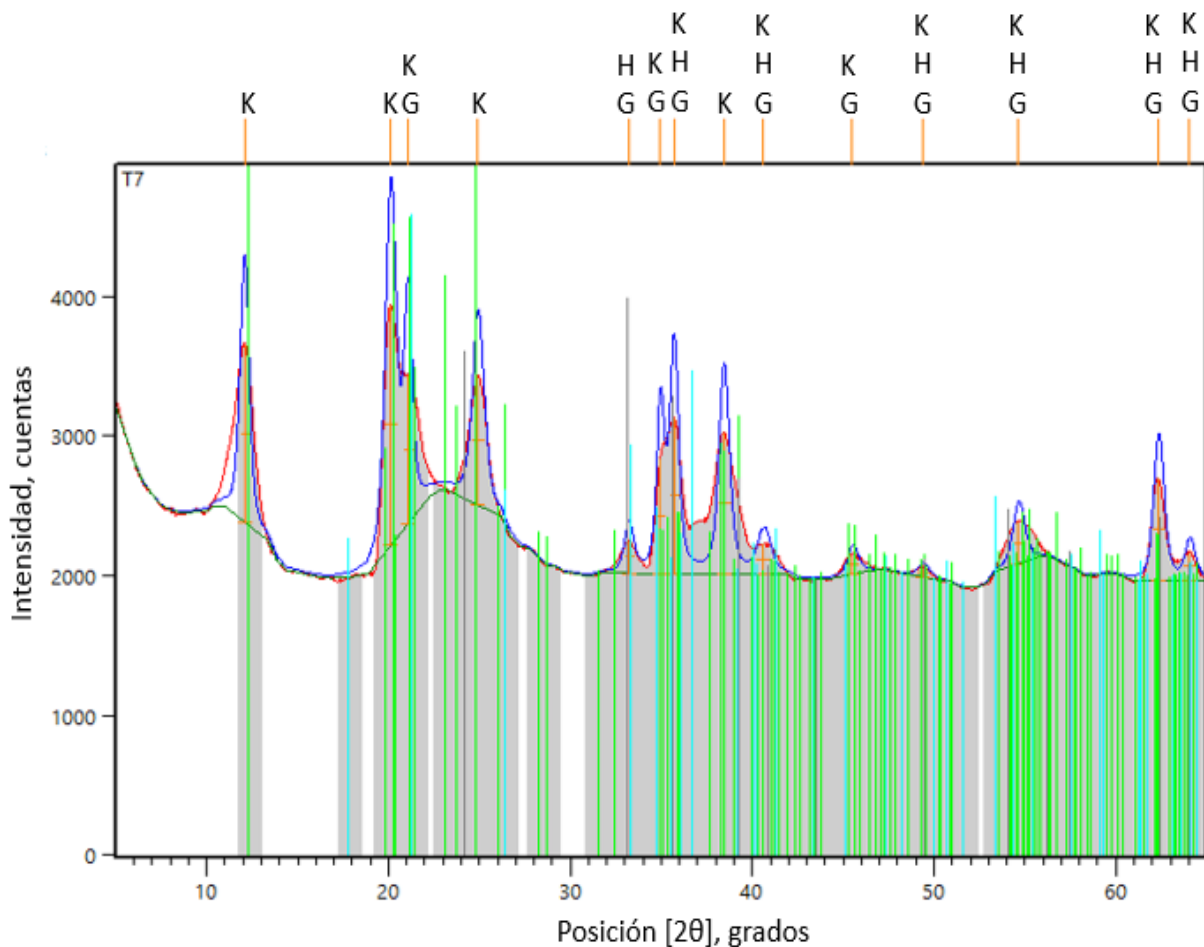


Figura 2.3. Difractograma de la muestra compósito de arcillas. K: caolinita; H: hematita; G: goethita. Tomado de (Rodríguez Moreno, 2018)

Tabla 2.2. Formulación de la adición mineral LC2

Sistema cementicio	Arcilla calcinada, %	Material carbonatado de Yaguaneque, %	Yeso, %
LC2	65	30	5

## 2.8. Determinación de la resistencia a la compresión en morteros normalizados

Para la determinación de la resistencia a la compresión se formuló una mezcla de sistema cementicio LC3, en las proporciones que se presentan en la Tabla 2.3. Las muestras fueron envasadas y preservadas en bolsas plásticas hasta el momento de su mezcla para la evaluación en morteros.

Tabla 2.3. Formulación del sistema cementante LC3

Sistema cementicio	Arcilla calcinada, %	Material carbonatado de Yaguaneque, %	Yeso, %	Cemento P-35, %
LC2 + Cemento P-35	30	12	3	55

Para la determinación de la resistencia a la compresión del aglomerante cementicio de base cemento Portland-arcilla calcinada-caliza-yeso, fueron preparadas tres series de morteros para ser sometidos a ensayos de resistencia mecánica a las edades de 3, 7 y 28 días. Cada serie de mortero contiene 450 g de sistema cementicio LC3 y 1350 g de arena normalizada. En todos los casos se utilizó una relación agua/aglomerante de 0,5 como lo exige la norma NC 506 (NC 506: 2013, 2013). Después de 24 horas, las muestras fueron desmoldadas y conservadas en agua a temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ . Los prismas fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión usando una prensa hidráulica de 10 t. El cemento P-35 sin adiciones, fue utilizado para la preparación de una serie de referencia.

## Conclusiones del capítulo 2

- El material arcilloso seleccionado para la formulación posee elevadas potencialidades como fuente de puzolana.
- La fuente de caliza a estudiar es alternativa destacada debido la cercanía que se encuentra del territorio.
- Las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicados en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos para este tipo de estudios.

### CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados sobre la evaluación del material carbonatado del prospecto Yaguaneque, a través de sus características químicas y mineralógicas, y los ensayos mecánicos que permitieron la determinación su resistencia a la compresión, y el análisis de las perspectivas de utilización a partir de los resultados.

#### 3.1. Resultados de la caracterización química

La composición química del material carbonatado se presenta en la Tabla 3.1. El material se caracteriza por un alto contenido de CaO y PPI, 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 %, 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 ( $\text{CaCO}_3$ ), calculado a partir del óxido de calcio, no debe ser inferior al 75 % en masa.

El carbonato de calcio actúa no solo como una fuente de  $\text{Ca}^{2+}$  para compensar la disminución del contenido de Portlandita por los altos volúmenes de sustitución de cemento, sino que además participa en la reacción puzolánica, formando hemicarboaluminatos y monocarboaluminatos, productos de la hidratación de estos sistemas complejos (Antoni et al., 2012b).

Tabla 3.1. Composición química de la muestra de arcilla en su estado natural

Muestra	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{MnO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	Otros	PPI
Material carbonatado de Yaguaneque	3.02	1.77	1.34	52.22	0.04	0.15	1.44	40.02

#### 3.2. Resultados de la caracterización mineralógica

La Figura 3.1 muestra la composición mineralógica de la muestra de material carbonatado de Yaguaneque. 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.

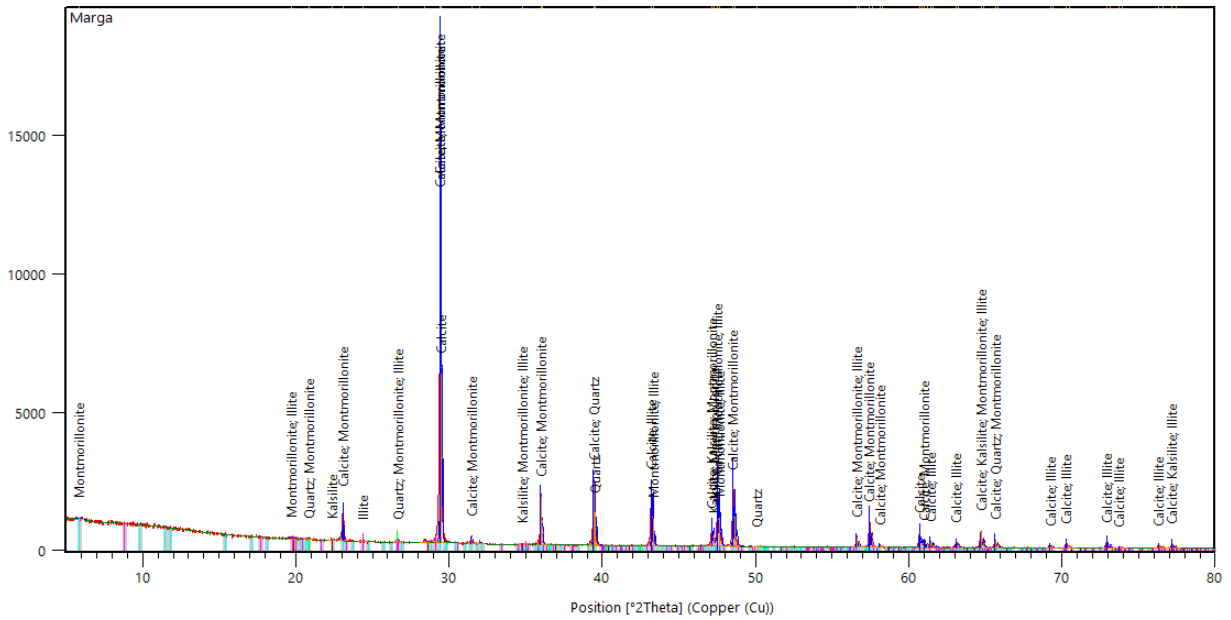


Figura 3.1. Difractograma de la muestra de material carbonatado de Yaguajay

### 3.3. Comportamiento físico - mecánico en sistemas ternarios

En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestra el comportamiento de la resistencia a la flexión y a la compresión en morteros normalizados, preparados con un 45 % de la adición mineral LC2 y 55 % de cemento Portland P-35. Como valores de referencia se utilizan los resultados de resistencia a la compresión de una serie con 100 % de P-35.

La evolución de la resistencia a la flexión de los morteros de cemento ternario presenta valores similares a los del cemento de referencia, incluso, se puede observar que a los 7 y 28 días el aglomerante ternario está en el intervalo de error de los valores de resistencia del cemento Portland. Solo a los 28 días se observa una mayor diferencia entre ambos sistemas, con mejores prestaciones a edades tempranas para el cemento P-35.



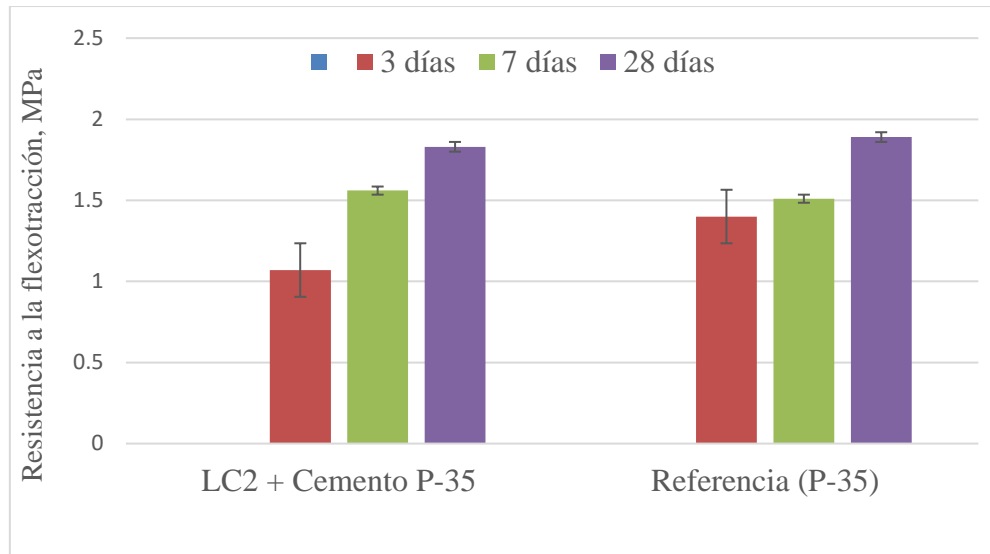


Figura 3.2. Resistencia a la flexión de los cementos ternarios y la referencia.

El comportamiento de la resistencia a la compresión es similar al de la resistencia a la flexotracción. A los tres días los morteros presentan valores de resistencia a la compresión inferiores a los de la serie de referencia. A partir de los siete días, no se observa diferencia significativa entre la resistencia la referencia y el cemento ternario.

Los morteros presentan valores de resistencia que cumplen con los requerimientos de resistencia mecánica establecidos por la norma cubana NC 1340 (NC/CTN22, 2021) para los cementos ternarios TQC-25 y TQC-35, la cual establece valores mínimos de resistencia a la compresión de 17 y 25 MPa, y 17, 25 y 35 MPa a los 7 y 28 días, respectivamente.

De forma general, el cemento ternario puede tomarse en cuenta para su utilización de acuerdo con la resistencia mostrada. La diferencia en el comportamiento de estos cementos parece estar influenciado por la formulación, la cual debe ser optimizada para lograr mejores prestaciones.

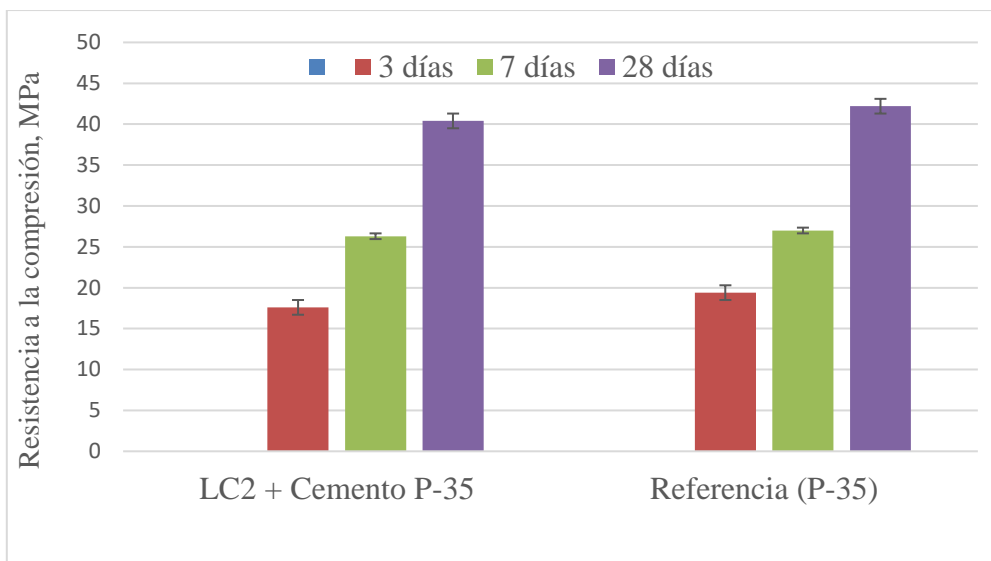


Figura 3.5. Resistencia a la compresión de los cementos ternarios y la referencia

### 3.5. Aprovechamiento del material evaluado en la producción de la adición mineral

Basado en los resultados de la caracterización químico-mineralógica y evaluación físico-mecánica, se considera que la investigación puede pasar a una fase más avanzada en la que se pruebe el material a mayor escala de producción y se realicen algunos elementos dentro del ciclo de la industria de la construcción, en la fabricación de diferentes tipos de cementos, morteros de albañilería, hormigones, elementos de piso, entre otros.

Esto contribuiría a consolidar el conocimiento para que a corto plazo, la producción de este material sirva para compensar el déficit de cemento mediante el aprovechamiento de las potencialidades de materiales disponibles localmente, que permitan incrementar los volúmenes, a la vez que puede contribuir a la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente por concepto de sustitución de clinker en el aglomerante, práctica que en la actualidad tiene un auge a nivel global por el extremo problema del cambio climático. Esto permitiría lograr abastecer, a los productores industriales de prefabricados, y sufragar las demandas locales del programa de la vivienda y diversificar las aplicaciones.

También puede contribuir a disminuir, en más de 100 km, la distancia de las fuentes de material carbonatado que proveen al municipio, pues la única opción es la caliza proveniente de la planta de áridos del Pílon en Mayarí, a unos 90 km de Moa.

### **Conclusiones del capítulo 3**

- El material carbonatado presenta una composición química y mineralógica adecuada para ser consideradas con potencial para su empleo como adición en la formulación de sistemas cementicios ternarios.
- Las resistencias mecánicas del sistema ternario, muestra un comportamiento adecuado y clasifica dentro de las normas para cementos ternarios tipo TQC.
- La producción de este aglomerante a nivel local constituye una alternativa de perspectivas para satisfacer la demanda de aglomerante en el municipio.

## CONCLUSIONES

La evaluación del material carbonatado del prospecto Yaguaneque para la formulación de la adición mineral LC2 permite concluir lo siguiente:

- El material carbonatado evaluado presenta contenidos estimados de  $\text{CaCO}_3$  de 93.2 y bajos valores de material arcilloso, lo que permite considerarlo como fuente de carbonatado para la formulación de cementos ternarios tipo TQC.
- Los morteros de cemento ternario presentan 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.

## **RECOMENDACIONES**

- Realizar pruebas para la producción de prefabricados y morteros de albañilería en la industria local de materiales de construcción.
- Elaborar un proyecto para la determinación de los recursos de carbonato de calcio de la región, que permita una explotación sostenida de esta materia prima.
- Estudiar las posibles fuentes de yeso para la producción de cemento de bajo carbono en Moa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almenares-Reyes, R.S., Alujas-Díaz, A., Poll-Legrá, L., Bassas-Noa, P.R., Betancourt-Rodríguez, S., Martirena-Hernández, J.F., Leyva-Rodríguez, C.A., 2016. Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer – arcilla calcinada – caliza (LC3). *Minería y Geol.* 32, 63–76.
- 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.
- Almenares Reyes, R.S., Alujas Díaz, A., Leyva Rodríguez, C.A., Poll Legrá, L., Pérez García, L.A., Betancourt Rodríguez, S., Arcial Carratalá, F., Martirena Hernández, J.F., 2020. Clay Deposits from the Northeastern of Cuba: Characterization, Evaluation, and Use as a Source of Supplementary Cementitious Materials. *RILEM Bookseries* 25, 49–56. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_6)
- Almenares Reyes, R.S., Alujas Díaz, A., Poll Legrá, L., Bassas Noa, P.R., Betancourt Rodríguez, S., Martirena Hernández, J.F., Leyva-Rodríguez, C.A., 2016. Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer–arcilla calcinada–caliza (LC 3 ). octubre-diciembre 63–76.
- Almenares Reyes, R.S., Díaz, A.A., Rodríguez, S.B., Rodríguez, C.A.L., Hernández, J.F.M., 2018. Assessment of Cuban kaolinitic clays as source of supplementary cementitious materials to production of cement based on clinker – Calcined clay – Limestone, in: Martirena, F., Favier, A., Scrivener, K. (Eds.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, Dordrecht, pp. 21–28. [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_4)
- 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>
- Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., Scrivener, K., 2012a. Cement substitution by blends of metakaolin and limestone. *Cem. Concr. Res.* 42, 1579–1589. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
- Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., Scrivener, K., 2012b. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cem. Concr. Res.* 42, 1579–1589.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>

- 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>
- Colectivo de autores, 1988. Informe de reconocimiento de las margas de Yaguaneque. Moa.
- Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., 2008. Sustainable development and climate change initiatives. *Cem. Concr. Res.* 38, 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>
- De Weerd, K., Kjellsen, K.O., Sellevold, E., Justnes, H., 2011. Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. *Cem. Concr. Compos.* 33, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.006>
- 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).
- González-Verdecia, R.A., 2015. Evaluación de materiales puzolánicos como fuente de materia prima para la producción de cemento de bajo carbono (Trabajo de diploma). Metal. y Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba.
- IEA/CSI-WBCSD, 2018. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. París y Ginebra, Francia y Suiza.
- Juenger, M.C.G., Provis, J.L., Elsen, J., Matthes, W., Hooton, R.D., Duchesne, J., Courard, L., He, H., Michel, F., Snellings, R., De Belie, N., 2012. Supplementary cementitious materials for concrete: characterization needs., in: *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, pp. imrc12-1488. <https://doi.org/10.1557/opl.2012.1536>
- Lothenbach, Barbara, Le, G., Gallucci, E., Scrivener, K., 2008. Influence of limestone on the hydration of Portland cements 38, 848–860. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>
- Lothenbach, B., Matschei, T., Möschner, G., Glasser, F.P., 2008. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. *Cem. Concr.*

- Res. 38, 1–18. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.017>
- 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. *An. la Acad. Ciencias Cuba* 6, 1–8.
- Martirena, J., Fernandez, R., Alujas, A., Castillo, R., Scrivener, K., 2011. Production of activated clays for low cost building materials in developing countries, in: 13th International Congress on the Chemistry of Cement. *Cementing and Sustainable Future*. Madrid, España, pp. 1–7.
- Massazza, F., 1976. Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements. *ILCemento* 1, 3–38.
- Meneses-Hervas, A.R., 2019. Evaluación de fuentes de carbonato de calcio de la región nordeste de Holguín para la producción de aglomerantes ternarios TAC en Moa (Trabajo de Diploma). Universidad de Moa, Moa, Cuba.
- NC/CTN22, 2021. NC 1340: 2021. Cement — Specifications.
- NC 506: 2013, 2013. Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica.
- Oey, T., Kumar, A., Bullard, J.W., Neithalath, N., Sant, G., 2013. The Filler Effect : The Influence of Filler Content and Surface Area on. *J. Am. Ceram. Soc.* 96, 1978–1990. <https://doi.org/10.1111/jace.12264>
- Poll-Legrá, L., Almenares-Reyes, R.S., Romero-Ramírez, Y., Alujas-Díaz, A., Leyva-Rodríguez, C.A., Martirena-Hernández, J.F., 2016. Evaluación de la actividad puzolánica del material arcilloso del depósito La Delta Moa, Cuba. *Minería y Geol.* 32, 15–27.
- Ramezaniapour, A.A., 2014. *Cement Replacement Materials. Properties, Durability, Sustainability*. Springer-Verlag Berlin Heidel, Heidelberg/ New York/ Dordrecht/ London, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>
- 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., Favier, A., Domínguez, E.R., Sánchez Machado, I.R., Heierli, U., Scrivener, K., Martirena Hernández, F., Habert, G., 2016. Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *J. Clean. Prod.* 124, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125>



- 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, K.L., John, V.M., Gartner, E.M., 2018. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.* 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Scrivener, K.L., John, V.M., Gartner, E.M., 2016. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low CO<sub>2</sub>, cement based materials industry.
- Snellings, R., 2011a. Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites (Tesis Doctoral). Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Bélgica.
- Snellings, R., 2011b. Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites. Chapter 2- Supplementary cementitious materials. Section 2.3.2.1- Burned clays and shales. Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgie.
- Taylor, H., 1997. *Cement Chemistry*, 2nd ed. Thomas Telford Publishing, London, UK.
- U.S. Geological Survey, 2019. Mineral commodity summaries 2019: U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, United States.
- Vizcaíno-Andrés, L.M., Sánchez-Berriel, S., Damas-Carrera, S., Pérez-Hernández, A., Scrivener, K.L., Martirena-Hernández, J.F., 2015. Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. *Mater. Construcción* 65, e045. <https://doi.org/10.3989/mc.2015.00614>
- Vizcaíno, L., Sánchez, S., Pérez, A., Damas, S., Scrivener, K., Martirena, F., 2015. Industrial trial to produce low clinker, low carbon cement. *Mater. Construcción* 65, e045. <https://doi.org/10.3989/mc.2015.00614>
- Vizcaíno, L.M., 2014. Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer - arcilla calcinada - caliza (Tesis Doctoral). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Yanes Ruiz, Y., 2014. Influencia de la composición química y mineralógica de las calizas en su empleo para la producción de cementos de base clínker-arcilla calcinada-caliza-yeso (Trabajo de Diploma). Fac. Construcciones. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba.