



Evaluación de las prestaciones de bloques huecos de hormigón producidos con cemento LC³

AUTOR(S): Yanetsy Mejías Paumier

TUTOR(ES): Dr. C. Roger Samuel Almenares Reyes



Evaluación de las prestaciones de bloques huecos de hormigón producidos con cemento LC³

AUTOR(S): Yanetsy Mejías Paumier

TUTOR(ES): Dr. C. Roger Samuel Almenares Reyes

Moa, 2022

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

En el presente trabajo se evaluaron las prestaciones de bloques huecos de hormigón producidos con cemento LC3 para su empleo en la industria de la construcción del municipio Moa. El cemento fue formulado mediante una mezcla de cemento P-35, caliza y arcilla calcinada procedente de la región de Centeno. 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 fue valorada mediante la determinación de la resistencia mecánica y la absorción de agua. La utilización del cemento de tipo LC3 en la producción de bloques huecos de hormigón muestra un excelente potencial por la adecuada resistencia a compresión y la absorción, constituyendo así una alternativa sostenible para el desarrollo de la industria de materiales de construcción del municipio.

Abstract

In the present work, the benefits of hollow concrete blocks produced with LC3 cement for use in the construction industry of the Moa municipality were evaluated. The cement was formulated using a mixture of P-35 cement, limestone and calcined clay from the Centeno region. 400×150×200 mm blocks were made according to the production scheme of the local production plant of La Veguita in Moa. The block performance was assessed by determining the compressive strength and water absorption. The use of LC3 type cement in the production of hollow concrete blocks shows excellent potential due to suitable compressive strength and absorption, thus constituting a sustainable alternative for the development of the construction materials industry in the Moa municipality.

Índice	Pág.
Introducción	1
Capítulo I. Marco Teórico – Conceptual.....	5
1.1. Impacto de la producción de cemento. Estrategias.....	5
1.2. Materiales cementicios suplementarios. Limitaciones de su uso.	11
1.3. Los bloques huecos de hormigón. Generalidades.	12
1.3.1. Características de los hormigones para la producción de bloques	14
1.4. Impacto ambiental de la producción de bloques huecos de hormigón	14
Conclusiones del capítulo 1	16
Capítulo II. Materiales y Métodos	17
2.1. Selección de la materia prima para la elaboración del cemento de bajo carbono	17
2.2. Procesamiento de las materias primas para la elaboración del cemento de bajo carbono	17
2.3. Fabricación de bloques huecos de hormigón.....	18
2.4. Caracterización de las materias primas para la producción de los bloques huecos de hormigón.....	19
2.5. Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón	20
2.5.1. Resistencia a compresión.....	20
2.5.2. Absorción de agua	21
Conclusiones del capítulo 2	21
Capítulo III. Análisis y Discusión de los Resultados	22
3.1 Resultados de la resistencia a la compresión en bloques huecos de hormigón	22
3.1 Resultados de la absorción de agua en bloques huecos de hormigón	23
3.6 Alternativas sostenibles para incrementar la producción de bloques huecos de hormigón en Moa	24
Conclusiones del capítulo 3.....	26

Conclusiones.....	28
Recomendaciones.....	29
Referencias Bibliográficas	30

INTRODUCCIÓN

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 fabricación de hormigón o morteros (Scrivener & Nonat, 2011). Sin embargo, la industria del cemento es hoy la tercera mayor emisora de CO₂ a la atmósfera, después de las plantas de generadoras de energía que emplean combustibles fósiles y el sector del transporte, con alrededor de 3 – 5 billones de toneladas de CO₂ cada año (Danner, 2013), factores que influyen de forma negativa en su sostenibilidad económica y ecológica.

Las emisiones están asociadas fundamentalmente a las altas temperaturas y a la disociación del carbonato de calcio proveniente de la caliza, involucradas en la producción de clínquer, el principal constituyente del cemento (Adrian Alujas et al., 2015). El 40 % de las emisiones de CO₂ corresponde a la quema de combustible y el 60 % restante a la descomposición del carbonato de calcio en el proceso de fabricación de clínquer (CSI, 2010). 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) (Juenger et al., 2012; Lothenbach et al., 2011; Teklay et al., 2014; WBCSD/IEA, 2009), con lo cual se mantiene o incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad de la matriz cementicia (Sabir et al., 2001;

Samet et al., 2007), y al mismo tiempo favorece la disminución del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero por cantidad de aglomerante (Habert et al., 2009).

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 a 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 (Scrivener, 2014). A su vez, pueden correlacionar negativamente con el rendimiento energético, pues si bien contribuyen a la reducción de las emisiones de CO₂ requiere generalmente más energía para la molienda final de cemento (WBCSD/IEA, 2009).

En Cuba, los cementos más producidos son el P35 con 88 % de clínquer y el PP25 con alrededor de 75%. Entre los MCS que se emplean son la caliza molida y puzolanas naturales y en los últimos años se ha incrementado el estudio de arcillas bajo el proyecto Cemento de Bajo Carbono (*Low Carbon Cement*), con un enfoque innovador desarrollado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central de las Villas (UCLV) y el Laboratorio de Materiales de Construcción de la École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suiza (EPFL), basado en la combinación de arcilla calcinada, caliza, yeso y clínquer, conocido genéricamente como *Limestone Calcined Clay Cement* (LC³), que permite la sustitución de hasta un 50 % de clínquer. Otra de sus formulaciones, está basada es una mezcla de arcilla calcinada, caliza y yeso para obtener el denominado LC², el cual permite la sustitución de 50 % de cemento P-35 (Martirena et al., 2016). Esta última con mayor perspectiva para el desarrollo constructivo local. Otra de las particularidades que posee este aglomerante es la posibilidad de su producción a nivel local, a partir de la molienda de residuos de ladrillos y caliza.

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.

La provincia Holguín cuenta con apreciables recursos minerales arcillosos en varias localidades, que se emplean hoy como materia prima para la industria cerámica y actualmente se extienden

las investigaciones para evaluar su utilización en la producción de este tipo de cemento en varias zonas del territorio (Holguín, Rafael Freyre, Calixto García y Moa). En particular, Moa se encuentra dentro de las zonas más estudiada para la producción del referido aglomerante en la provincia, donde se proyecta la construcción de una planta. En esta región se encuentra en los sectores de Cayo Guam, La Delta y Centeno en Moa, 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). Hasta se ha logrado pequeñas producciones de prefabricados. Sin embargo, no se ha realizado este tipo de producciones con material de la zona de Centeno donde se encuentra un importante taller de producción materiales del municipio.

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 cemento de bajo carbono, formulado con material arcilloso de la región de Centeno en Moa, condiciona su utilización en la industria local de materiales.

El objeto de estudio de la investigación sobre el cual se indice son las prestaciones de bloques huecos de hormigón formulados con cemento de bajo carbono a partir de material arcilloso de la región de Centeno en Moa, y el campo de acción está enmarcado en la resistencia mecánica y absorción de agua de los bloques huecos de hormigón.

Objetivo general

Evaluar las prestaciones de bloques huecos de hormigón elaborados con cemento de bajo carbono a partir de su formulación con adición de cemento P-35, caliza, y arcilla de la región de Centeno calcinada para su utilización en la industria de materiales de la construcción en Moa.

Objetivos específicos

1. Sistematizar los fundamentos teórico-metodológicos relacionados con el impacto de la producción de cemento, las alternativas para la disminuirlo y su aplicación en la elaboración de prefabricados de pequeño formato.
2. Determinar la resistencia a la compresión mecánica y absorción de agua en los bloques huecos de hormigón elaborados con adición de cemento P-35, caliza, y arcilla de la región de Centeno calcinada.
3. Valorar aspectos económicos y ecológicos como parámetros de sostenibilidad en la producción de bloques huecos de hormigón en Moa.

Hipótesis de investigación

Si la resistencia a la compresión mecánica y absorción de agua de los bloques huecos de hormigón con cemento de bajo carbono a partir de su formulación de cemento P-35, caliza, y arcilla de la región de Centeno calcinada 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 la aplicación de la metodología.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

En el capítulo se describen y discuten las alternativas propuestas para alcanzar la sostenibilidad en el sector constructivo y particular la producción de cemento.

1.1. Impacto de la producción de cemento. Estrategias

El cemento es el constituyente primario del hormigón y del mortero, materiales de construcción fundamentales requeridos para proveer a nuestra sociedad de una infraestructura segura, cómoda, durable, robusta y económica. El cemento no solo es acaparado para la producción de hormigón, si no para otros usos en el sector de la construcción (U.S. Geological Survey, 2020), por lo que se considera indispensable para la actividad constructiva y el desarrollo económico global.

La producción de cemento crece sostenidamente cada año, en el 2021 se produjeron 4,1 billones de toneladas. Este valor refleja el desarrollo positivo de la creciente demanda de cemento; el consumo de cemento está dominado por las economías emergentes y las grandes potencias desarrolladas. China, India, Vietnam, Estados Unidos, Indonesia y Turkiye fueron las cinco primeras naciones que se posicionaron en 2021 (U.S. Geological Survey, 2021). La demanda creciente de energía y la infraestructura necesaria para satisfacerla genera una oportunidad única para las economías emergentes de reducir las emisiones de CO₂ implementando tecnologías de baja emisión de carbono

La producción de cemento es alta consumidora de energía, requiere alrededor de 5 GJ de energía y genera cerca de una tonelada métrica de CO₂ al medio ambiente por cada tonelada métrica de cemento producida (IEA/CSI-WBCSD, 2018). Se puede afirmar que esta industria es una de las mayores contaminantes del planeta e intensivas energéticamente, por lo que debe asumir alternativas que le permitan mitigar estos factores negativos a muy corto plazo.

El principal origen de las emisiones de CO₂ en la producción de cemento está en el proceso de descomposición de la caliza durante la producción de clínquer. Se calcula que del total de emisiones de CO₂, alrededor del 60 % es causado por la transformación del carbonato de calcio proveniente de la caliza a óxido de calcio en la producción de clínquer, y el restante 40 % proviene de la combustión de combustible y el consumo de energía eléctrica (IEA/CSI-WBCSD, 2018).

De acuerdo con los pronósticos sobre el crecimiento de la producción de cemento hasta el 2050, se elevarán los niveles de emisiones de CO₂, si se mantienen las condiciones de producción actuales. La sustitución de recursos naturales por desechos y subproductos de procesos industriales que contienen elementos útiles tales como calcio, silicio, alúmina e hierro se pueden utilizar como materias primas, en lugar de sustancias naturales como la arcilla, la pizarra y la piedra caliza para la producción de clínquer. En años recientes, cerca de 3-4% de materias primas usadas en la producción de clínquer en Europa consistió en materias primas alternativas y cenizas volantes. El uso de materias primas alternativas ofrece numerosas ventajas, incluyendo la reducción de la explotación de los recursos naturales y de las emisiones de CO₂, si estas materias primas han sido descarboxatadas previamente en otro proceso (CEMBUREAU, 2014). Sin embargo, el rango de materiales cementicios hidráulicos no es muy amplio y la sustitución de cemento a gran escala por otro material con características adecuadas, y que a su vez provoque menos contaminación al medio ambiente es poco probable, si se tiene en cuenta la disponibilidad de las materias primas sustitutas y las que convencionalmente se utilizan para la producción de clínquer. Los ocho elementos más comunes en la corteza terrestre, oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio y magnesio constituyen alrededor del 98 % de esta corteza y de estos son pocos elementos constituyentes del cemento que se encuentran fuera de esta lista, a excepción del hidrógeno del agua y el azufre de sulfuros y sulfatos, por lo que el cemento promete seguir siendo el aglomerante más importante en el sector de la construcción, pues las materias primas para su producción, son geológicamente extensas y abundantes, y sobre todo su agotamiento es poco probable en miles de años (U.S. Geological Survey, 2021).

La amenaza que constituye el cambio climático para la población mundial, ha concentrado a diversos países, corporaciones e instituciones en la búsqueda de políticas que contribuyan a mitigar el impacto ambiental y crear un modelo sostenible para la producción de cemento. En este sentido, las acciones a tomar para la reducción de las emisiones causadas por la industria del cemento deben ser consideradas desde un enfoque regional, atendiendo a las características geopolíticas y tecnológicas de cada país, organización o fábrica (Vizcaíno, 2014).

Las alternativas de reducción de CO₂ por la industria del cemento han estado dirigidas principalmente a la reducción de emisiones por la tonelada de cemento. Además de la sustitución parcial de fuentes no carbonatadas en las materias primas, se incluyen propuestas como la instalación de tecnologías más eficientes, la utilización de combustibles alternativos, la

sustitución parcial de clínquer por materiales cementicios suplementarios, y la captura y reutilización del CO₂.

Varios estudios se han enfocado a la reducción de las emisiones de CO₂ en la industria del cemento, tomando diferentes escenarios y pronósticos, llegando a similares conclusiones, dentro de las más destacadas están la eficiencia energética y térmica, el uso de combustibles alternativos, la sustitución de clínquer y la captura y almacenaje de CO₂ (U.S. Geological Survey, 2020, 2021).

Eficiencia energética y térmica

La eficiencia térmica y energética se basa en la instalación de tecnologías más actuales en las plantas existentes y la modificación de equipos con mejor rendimiento energético donde sea económicamente viable. Su implementación se ve limitada por los altos costos de inversión, los requisitos medioambientales y de calidad del producto final pueden elevar el consumo de energía, sin importar la tecnología aplicada. La implementación de nuevas tecnologías para reducir las emisiones de CO₂, se estima que aumenta el consumo de energía en 50-120% a nivel de planta, empleada para la separación del aire, pelando, purificación, compresión del CO₂) (WBCSD/IEA, 2009). Existe una amplia gama de tecnologías disponibles, que ahorran de 0,2-3,5 GJ por tonelada de clínquer, por lo que la industria está enfocada en el cierre de procesos ineficientes y la instalación de tecnologías más avanzadas, en la medida de que la economía lo permita. La industria está eliminando paulatinamente los largos hornos de proceso seco ineficientes y el proceso de producción húmedo. Mediante esta transición tecnológica, se puede lograr una reducción considerable en los consumos energéticos requeridos durante la combustión de las materias primas (Vizcaíno, 2014). Al mismo tiempo, con el desarrollo e implementación de nuevos tipos de molinos, se reduce el consumo específico de energía eléctrica de un 20 – 50 % con respecto a los molinos de bolas tradicionales (Damtoft et al., 2008; Hendriks et al., 1998; Worrell et al., 2008). Alrededor del 90 % de la energía usada en la producción de cemento procede de la quema de combustibles y el resto, de la energía primaria consumida es en forma de electricidad en el proceso de mezclado y molienda de los materiales (Hendriks et al., 1998).

Uso de combustibles alternativos

La cantidad de CO₂ liberado durante la calcinación depende del tipo de combustible usado, y por supuesto, de la tecnología disponible. El combustible mezclado puede disminuir alrededor del 27 % de las emisiones CO₂ (CEMBUREAU, 2013). El uso de combustibles alternativos propone sustituir los combustibles convencionales (*fuel oil*, carbón y *petcoke*) empleados en el calentamiento de los hornos de cemento, por combustibles fósiles alternativos (gas natural) y biocombustibles (CEMBUREAU, 2013). La utilización de subproductos de desecho provenientes de otras industrias como combustibles alternativos constituye una oportunidad potencial. Dentro de este grupo se puede mencionar los del tipo gaseoso (gases de refinería, gases del proceso de craqueado del petróleo, de pirólisis), líquidos (solventes libres de halógeno, aceites minerales) o sólidos (residuos de la agricultura, neumáticos, plásticos, entre otros) (WBCSD/CSI, 2005). La utilización de residuos como combustibles alternativos disminuye la dependencia energética de los combustibles tradicionales y, al mismo tiempo, reduce las emisiones de CO₂. De acuerdo a lo reportado por Hendriks et al. (1998) se puede reducir de 0,1 – 0,5 toneladas de CO₂ por tonelada de cemento, con respecto a los combustibles fósiles, además de contribuir al reciclaje de residuales industriales.

Aunque, técnicamente, los hornos de cemento podrían utilizar hasta 100% de combustibles alternativos (IEA/CSI-WBCSD, 2018), hay algunas limitaciones prácticas. Las características físico-químicas de la mayoría de los combustibles alternativos difieren apreciablemente de las de los combustibles convencionales, lo que pueden causar desafíos técnicos para adecuar los parámetros tecnológicos. Por otro lado, la posibilidad de empleo de combustibles alternativos tiene barreras más fuertes que las técnicas pues la gestión de desechos afecta perceptiblemente la disponibilidad. Unido a esto también está el problema del alto costo de los combustibles alternativos. Como consecuencia del uso de combustible alternativo se incrementa potencialmente el consumo de energía térmica debido a la instalación de tecnologías de pretratamiento. Y un factor no menos importante lo es el nivel de aceptación social pues uso de combustibles alternativos de coprocesos en las plantas de cemento puede afectar fuertemente el interés local (IEA/CSI-WBCSD, 2018).

De manera general, la implementación de esta práctica tiene carácter regional, en su mayoría ha estado concentrada fundamentalmente en países desarrollados, donde las tecnologías y el nivel

de desarrollo permiten disponer de la infraestructura y los sistemas de gestión para la recuperación de los desechos, además de contar con las políticas y regulaciones de manejo y seguridad sanitaria. Lo que, sin dudas, condiciona su disponibilidad en las diferentes regiones.

Captura y almacenaje de CO₂

La captura y almacenamiento de CO₂ constituye una nueva vía para disminuir las emisiones, aún no probada a escala industrial en la producción de cemento, pero que es potencialmente prometedora. El objetivo fundamental es, capturar el CO₂ que se emite durante la combustión del combustible y la calcinación de la caliza, y comprimirlo hasta obtener un líquido que luego es transportando por tuberías para ser almacenado de forma permanente a gran profundidad en la tierra. La implementación de esta tecnología está siendo evaluada en diferentes sectores energéticos y los resultados iniciales plantean que se podría capturar alrededor del 90 % de las emisiones. Sin embargo, podría incrementar los costos de producción de un 25 a un 100 %, pues requiere de importantes inversiones y el uso de energía eléctrica adicional (IEA/CSI-WBCSD, 2018; WBCSD/IEA, 2009). Esta alternativa, es solo realista a muy largo plazo, cuando la infraestructura de transporte de CO₂ y los sitios de almacenaje sean convenientes y aprobados para ese propósito.

Sustitución de clínquer

La reducción del factor de clínquer en el cemento a través del empleo de materiales cementicios suplementarios es otra de las alternativas definida por la industria del cemento para lograr la sostenibilidad ecológica. El 60 % de las emisiones de CO₂ en la producción de cemento es causado por la descarbonatación de las materias primas durante el proceso de fabricación del clínquer (IEA/CSI-WBCSD, 2018). Subproductos industriales como las escorias granuladas de alto horno, cenizas volantes, humo de sílice y materiales naturales como las rocas volcánicas y la caliza pueden ser utilizados en la sustitución parcial de clínquer en el cemento, de este modo se reducen los volúmenes de clínquer utilizados, se logran mitigar las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de producción de cemento, y reducir el consumo específico de energía, aunque el uso de substitutos tales como escorias granuladas de alto horno y las cenizas volantes pueden correlacionar negativamente con el rendimiento energético, pues requieren generalmente más energía para la molienda final de cemento (IEA/CSI-WBCSD, 2018).

El factor de reducción de clínquer es limitado por la reducción de la resistencia, sobre todo a edades tempranas, y la baja cinética de reacción de muchos materiales cementicios suplementarios en comparación con la dilución del cemento. Otros demandan mayor cantidad de agua, lo que provoca un efecto negativo sobre la reología y las resistencia (Lawrence et al., 2005; Pekmezci & Akyüz, 2004; Turanli et al., 2004). Todo ello restringe los niveles de sustitución de cemento hasta el 35 %, en dependencia del tipo de material cementicio utilizado. Solo puede ser superior para escasas aplicaciones especiales. El mayor reto para el desarrollo de la producción de cementos mezclados y el aumento de los niveles de sustitución a partir del uso de materiales cementicios radica en la evaluación de nuevos materiales y su disponibilidad regional, pues el cambio de la composición del cemento podría tener un impacto en la calidad del producto. Los cambios en formulaciones del cemento requieren de tiempo para que se incorpore en las normas internacionales y sea aceptado por el mercado.

Desde el punto de vista técnico no parece que existan barreras importantes para lograr reducir el factor clínquer en la producción de cemento por materiales cementicios suplementarios pero el nivel de sustitución que estos pueden lograr depende de la naturaleza y características químico - físicas de cada material, así como de la disponibilidad regional e incremento de sus precios. La existencia de normas nacionales que incluyan el uso de cementos compuestos para las diferentes aplicaciones, además de la aceptación por parte de los constructores y clientes también debe considerarse como limitaciones (WBCSD, 2015). Sin embargo, el impacto que causa con respecto a la reducción de las emisiones de CO₂ y al mismo tiempo la favorable reducción del consumo energético y el aumento de los volúmenes de producción de cemento sin grandes costos de inversión asociados (WBCSD/IEA, 2009; WBCSD, 2015), el empleo de materiales cementicios suplementarios como sustitutos del clínquer en la producción de cementos mezclados constituye una de las alternativas ecológicas con mayor potencial para desarrollar a corto y a mediano plazo (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Acciones para la reducción del impacto negativo de las emisiones de CO₂ del sector cementero y su potencial impacto.

Acciones de mitigación	Ahorro de energía	Reducción de emisiones de CO₂	Producción de cemento	Inversiones necesarias
Eficiencia energética y térmica	+++	++	+++	+++

Uso de combustibles alternativos	+	+++	+	++
Captura y almacenaje de CO₂	-	+++	+	+++
Sustitución de clínquer	++	+++	++	+

NOTA: + bajo; ++ medio; +++ alto; - negativo

1.2. Materiales cementicios suplementarios. Limitaciones de su uso.

Una de las limitaciones del empleo de las puzolanas y/o materiales cementicios suplementarios se encuentra en su disponibilidad, debido a que muchos de estos materiales no se encuentran distribuidos de manera uniforme sobre la corteza terrestre. El uso de materiales cementicios suplementarios en la sustitución de clínquer depende de la disponibilidad, propiedades y precios de los metariales así como la futura aplicación del cemento, las normativas y la aceptación del mercado (IEA/CSI-WBCSD, 2018; WBCSD/IEA, 2009).

El mineral más abundante y disponible para la producción de cemento es el CaCO_3 en forma de piedra caliza. La piedra caliza es usada habitualmente como fuente de CaO para la producción del clínquer de cemento Portland (CP), pero adicionalmente puede ser usada en su estado natural, finamente molida, como adición mineral. El empleo de cantidades de hasta el 5 % de caliza como material minoritario, es una práctica regular en la producción de CP ordinario en más de 25 países. Se ha demostrado que adiciones entre 2 – 5 % intermolidas con el clínquer no tienen efectos negativos sobre las propiedades físico-mecánicas del cemento, incluso las mejora. Recientemente, la norma europea EN 197-1 (UNE-EN 197-1, 2011) estableció dos clases de cementos, CEM II/A-L y CEM II/B-L, que permiten la incorporación de adiciones de caliza que pueden llegar hasta el 20 y 35 %, respectivamente; mientras que en Canadá, Australia y Nueva Zelanda se admite hasta el 15 % (Tsivilis et al., 1999).

Las arcillas son productos naturales que se encuentran disponibles en abundancia bajo la forma de depósitos arcillosos con fracciones arcillosas multicomponentes, y como tales, su empleo en cualquier aplicación industrial siempre será más factible que el derivado del uso de yacimientos de alta pureza (Murray, 2000). A pesar de la abundancia del mineral como constituyente de la corteza terrestre, los depósitos de caolinita con contenidos lo suficientemente altos para su aprovechamiento industrial son escasos y su explotación es muy competitiva, factor que encarece su empleo en la obtención de materiales puzolánicos. En consecuencia, una parte

importante del costo del metacaolín está asociada al valor de la materia prima utilizada (Murray, 2000). Aunque se espera que los materiales puzolánicos derivados del empleo de este tipo de yacimientos puedan estar disponibles a un costo mucho menor que el metacaolín derivado de la activación de yacimientos ricos en caolinitas, y que encuentren amplio uso en la elaboración de cementos mezclados (Adrián Alujas, 2010).

Las escorias de alto horno pueden sustituir generalmente más del 70 % de clínquer en el aglomerante pero la cantidad de escorias disponibles en todo el mundo representa solo el 5 % de la cantidad de clínquer producido y su localización depende de las regiones donde se enclava sus industrias metalúrgicas generadoras. Las cenizas volantes aunque se encuentran disponibles en grandes cantidades y constituyen alrededor del 30 % de la producción de clínquer a nivel mundial están ausentes en muchos países donde se produce cemento y su calidad dificulta en muchos casos su aprovechamiento en la producción de cemento. La disponibilidad regional y calidad de las puzolanas naturales comunmente empleadas también varían considerablemente, así como sus aplicaciones en otros campos e industrias también afecta el incremento de su uso en la producción de cementos. El metacaolín producido a partir de la calcinación de arcillas de alta contenido de caolinita ha constituido otra de las alternativas valoradas por la industria, sin embargo el inconveniente de uso se centra en la baja disponibilidad de yacimientos de alta pureza y la competencia con industrias ya establecidas durante muchos años como la cerámica y el papel (Harvey & Legaly, 2006; Murray, 2000, 2002). Las arcillas comunes y la caliza se encuentran ampliamente diseminadas por toda la corteza terrestre, es difícil de estimar sus reservas pero es probable que exceda los miles de millones de toneladas alrededor de todo el mundo (Harvey & Legaly 2006), aunque no todas tienen las características adecuadas para ser empleadas como MCS.

1.3. Los bloques huecos de hormigón. Generalidades.

Los bloques huecos de hormigón es el material moderno más popular para construir todo tipo de edificios, como casas, edificios de oficinas, fábricas y hasta edificios de varias plantas sin necesidad de soporte estructural adicional. El buen bloque de hormigón es sinónimo de economía y versatilidad, aplicándose a todas las formas constructivas. Es adaptable, creativo y relativamente fácil de usar.

Los bloques de hormigón soportan altas cargas, resisten el fuego, tienen caras y lados bien formados y son uniformemente de la más alta calidad. Están disponibles en cientos de formas,

tamaños, colores resistentes a la intemperie y alta estabilidad ante la exposición a la luz de sol y agentes climáticos, texturas lisas y símil piedra, normales e hidrorrepentes.

La experiencia internacional en construcción de bloques de hormigón ha demostrado el excelente comportamiento de este sistema constructivo al que se asigna cada vez mayor preferencia sobre otros materiales usados en la construcción como consecuencia de las conocidas ventajas que resultan de su empleo y que en esencia se pueden resumir en resistencia, durabilidad, economía y velocidad constructiva. Esto unido a la simplicidad de fabricación hace de este sistema constructivo uno de los procedimientos más completos para resolver el problema de las construcciones, en las cuales todas las ventajas de aplicación de los bloques son más evidentes al permitir una economía total en materiales y mano de obra en la fabricación de piezas hasta su colocación que difícilmente puede alcanzarse con otros sistemas.

Según la NC 247- 2010 — Bloques huecos de hormigón. Especificaciones, los bloques huecos de hormigón son piezas prefabricadas a base de cemento, agua, áridos finos y/o gruesos, naturales y/o artificiales, con o sin aditivos, incluidos pigmentos, de forma sensiblemente ortoédrica, con dimensiones exteriores no superiores a 500 mm, con una relación alto/ancho inferior a 6, y alto/largo inferior a 1, sin armadura alguna con densidades normalmente comprendidas entre 1700 kg/m³ y 2200 kg/m³.

Los bloques se fabrican vertiendo una mezcla de cemento, arena y agregados pétreos (normalmente calizos) en moldes metálicos, donde sufren un proceso de vibrado para compactar el material.

Dentro de las numerosas tipologías de bloques que existen en el mercado podemos citar:

- Cara vista: son bloques con al menos una de las caras especialmente preparadas para no precisar revestimiento.
- De gafa: deben ser posteriormente revestidos con algún tratamiento superficial. Pueden ser empleados con los huecos en vertical y en horizontal, para crear celosías que no impidan totalmente la visión o el paso de aire con el exterior.
- Multicámara: sus huecos internos están compartimentados. Estos bloques se utilizan frecuentemente cuando se pretende construir una pared de una sola hoja. Las divisiones internas aíslan el aire en distintas cámaras, por lo que aumentan el aislamiento de la pared.
- De carga: son más macizos, y se emplean cuando el muro tiene funciones estructurales.

- Armados: diseñados como encofrado perdido de muros macizos de hormigón. Presentan rebajes interiores para apoyar las armaduras de acero.

1.3.1. Características de los hormigones para la producción de bloques

El hormigón que se utiliza para la producción de bloque debe ser un hormigón de consistencia seca para que este pueda conservar su forma al salir de la máquina de fabricación que se encarga de compactarlo por un efecto de vibración – compactación. Este tipo de hormigón tiene un contenido de cemento en el rango de 190-270 kg/m³ y alcanza una resistencia a compresión bruta a los 28 días entre 2.5-7.0 MPa.

El tiempo de compactación puede utilizarse como una medida de la consistencia del hormigón y de la efectividad del equipo de compactación. La ACI 207 afirma que un equipo de vibración aceptable debe ser capaz de compactar totalmente las mezclas más secas en 60 segundos, dentro de un amplio rango de dosificaciones. Para la medición de la consistencia de este tipo de hormigón puede utilizarse el consistómetro Vebe. Una de las vías para reducir la producción del clínquer de cemento Pórtland en los países en vías de desarrollo es la de la utilización de materiales puzolánicos como sustitutos parciales del clínquer para la producción de bloques, por lo que es una importante motivación el estudio de los bloques producidos a partir de la utilización de un aglomerante sobre la sustitución parcial del contenido del clínquer por la combinación de arcillas calcinadas con caliza

1.4. Impacto ambiental de la producción de bloques huecos de hormigón

La tecnología de producción de hormigón constituye una fuente de generación de residuos, por una parte, y por otra parte la emanación de gases a la atmósfera, que proviene mayoritariamente de la producción de cemento, como constituyente principal, por lo que se debe considerar como elemento fundamental para mitigar el impacto al medio ambiente. La producción de cemento sostenible depende del impacto ambiental de las distintas actividades durante todo el ciclo de vida. Los impactos de la manufactura del cemento sobre el medio ambiente se pueden agrupar en dos grandes categorías, tal como se muestra en la Figura 1. 1) los impactos producidos por la extracción de recursos del medio ambiente; y 2) aquellos generados por los desechos y vertido al medio ambiente. Estos dos grupos a su vez pueden ser subdivididos en cuatro categorías de acuerdo al origen del impacto ambiental: 1.1) Utilización de recursos naturales; 1.2) Consumo energético; 2.1) Contaminación; y 2.2) Generación de residuos. Cada categoría tiene efectos

sobre el medio natural y sobre el medio modificado. Para garantizar una producción sostenible se deben constituir exigencias incluidas en los instrumentos legales, normativos y técnicos, y formar parte de los códigos de práctica profesional (Acosta, 2009).

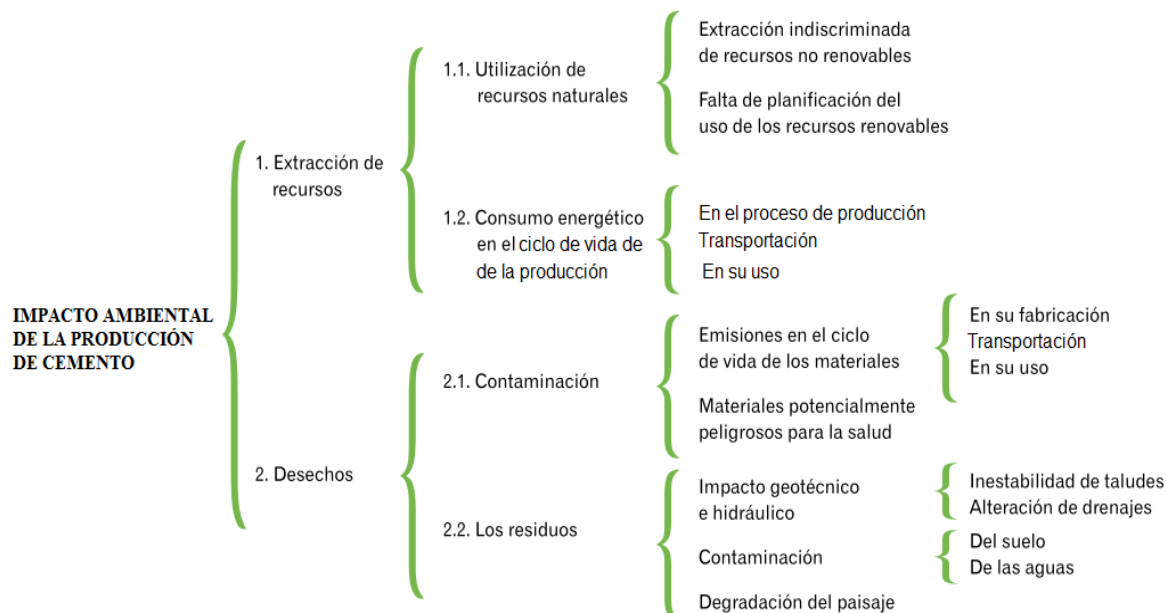


Figura 1. Impacto ambiental de las distintas actividades durante todo el ciclo de vida de la producción de cemento

La extracción indiscriminada de recursos naturales tiene diversas consecuencias negativas sobre la economía y el ambiente. Las reservas de recursos no renovables, como la minería y los recursos energéticos, no son infinitos y el manejo inadecuado de los recursos renovables, conlleva a otros efectos indeseables sobre el medio natural como el agotamiento de las fuentes de recursos hidráulicos.

El consumo energético ocurre durante todo el ciclo de vida de la producción de cemento, desde la extracción de materia prima y su transporte a las plantas, y su uso en las edificaciones y su distribución.

Por otra parte, al ser transformados para su incorporación a la producción y al ciclo de vida de la manufactura, los recursos generan desechos y residuos en forma de gases, calor y escombros, ocasionando pérdida de recursos naturales, contaminación y desechos tóxicos, originando costos adicionales por el material que se pierde, la mano de obra y energía adicionales que se emplean.

Sin embargo, el mayor impacto de la producción de la producción de cemento lo tienen las emisiones de gases de efecto de invernadero. Por lo que los mayores esfuerzos deben concentrarse en la toma de decisiones responsables apoyado en los criterios de las investigaciones existentes (Núñez Jover, 2004).

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 y la mitigación del impacto ambiental de la industria de cemento cubana.
- La implementación a escala industrial de forma masiva de la producción de cementos ternarios podría ser una vía 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 cemento de bajo carbono, aglomerante ternario sobre la sustitución del 50 % de cemento Portland por un 50 % de la combinación arcilla calcinada-carbonato de calcio con una relación 1,5:1 entre ellas; elaborado a escala de laboratorio.

2.1. Selección de la materia prima para la elaboración del cemento de bajo carbono

En Cuba existe experiencia en la producción de cementos de bajo carbono tanto a escala de laboratorio como a escala industrial y piloto. Los buenos resultados obtenidos han despertado el interés del uso de materias prima que permitan su producción local. Los principales constituyentes de este sistema cementicio ternario son la arcilla calcinada como material extensor de cemento, la caliza, que aporta el carbonato de calcio y el clínker o el cemento Portland P-35.

Trabajos de investigación realizados han mostrado las excelentes propiedades de las arcillas de los sectores Cayo Guam – La Delta en la región de Moa (Almenares, 2017; Almenares Reyes et al., 2016; Alvarez, 2013; Poll-Legrá, 2016; Romero-Ramírez, 2014) y de manera particular en la región de Centeno (Cardoso da Silva, 2019; Martínez De la Cruz, 2017) al ser activadas térmicamente. La alta reactividad puzolánica las hace candidatas para la producción de estos sistemas cementicios y, por tanto, se pretende evaluar su utilización en bloques huecos de Hormigón en este trabajo.

2.2. Procesamiento de las materias primas para la elaboración del cemento de bajo carbono

Las muestras trabajadas fueron las propias utilizadas en la investigación de Martínez de la Cruz (Martínez De la Cruz, 2017) en la que se tomaron las muestras en el depósito Centeno (Figura 1). La selección de la materia prima se produjo con la asesoría de especialistas del departamento de Geología de la Universidad de Moa. Se seleccionaron dos cortes del afloramiento con el objetivo de obtener una muestra representativa a todo lo largo de los perfiles de meteorización. El tipo de muestreo empleado fue el muestreo por surcos o canales, desde la base hasta la superficie, ya que a partir de este tipo de muestreo se abarca toda la potencia del afloramiento con posibilidad de explotación. Se aplicaron cuatro surcos, las muestras de éstos fueron

mezcladas para constituir una muestra compuesta homogénea de 40 kg. El total de muestras acumuladas se trasladó hasta el laboratorio de beneficio de la universidad para ser preparada para los ensayos previstos.



Figura 1. Ubicación del afloramiento donde se tomaron las muestras

El material caracterizado en el trabajo de diploma desarrollado por Martínez de la Cruz (Martínez De la Cruz, 2017) se calcinó en una mufla de laboratorio a 800 °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 hasta lograr valores de finura en el rango de 90-95 % de pasado por el tamiz de 90 μ m. Las muestras de caliza procedentes de la cantera Pílon en Mayarí fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño de partículas, hasta alcanzar una granulometría del 90 % por debajo del tamiz 90 μ m. El cemento P-35 utilizado fue elaborado en la fábrica de cemento Siguaney con una granulometría del 92 % pasado por el tamiz por el tamiz 90 μ m. Luego se procedió a la formulación de los cementos según se muestran en la Tabla 1 para la elaboración de los bloques.

Tabla 1. Dosificación de cemento de bajo carbono para la fabricación de los bloques

Caliza (20 %), g	Arcilla calcinada (30 %), g	P-35 (50 %), g	Total, g
286	429	714	1429

2.3. Fabricación de bloques huecos de hormigón

Se realizó la producción de los bloques huecos de hormigón en la planta de bloques de La Veguita, perteneciente a la empresa de materiales de la construcción de Moa. Se utilizó las

materias primas caracterizadas anteriormente. En este taller se utiliza una máquina estacionaria de hacer bloques fabricada en Cuba, compuesta por una estructura metálica de vigas y angulares, así como los moldes y mecanismos que permiten el vertido, la vibración y la compactación de la mezcla. También es parte de esta un motor eléctrico trifásico para lograr el funcionamiento del mecanismo de vibración en la mesa vibratoria, lo cual logra la compactación de los bloques dentro de los moldes y su posterior remoción con el mecanismo botador hacia las parrillas para el traslado al secado de los mismos.

Las mezclas para la producción de estos bloques fueron fabricadas en una hormigonera basculante, luego se vertió en el suelo cerca de la máquina de hacer bloques y se paleó en la cajuela de la máquina para la producción de los diferentes tipos de bloques. Los bloques una vez terminado el proceso de producción se retiran encima de paletas de madera, los cuales se trasladan con dos hombres para su posterior secado y curado. El curado es llevado a cabo rociándole agua a cada uno de los bloques durante 48 horas. La formulación empleada para producir los bloques se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Dosificación utilizada para la fabricación de bloques huecos de hormigón

Dosificación volumétrica			
LC3	Arena beneficiada	Polvo Piedra	Granito
1	2	1	4

2.4. Caracterización de las materias primas para la producción de los bloques huecos de hormigón

Para la fabricación de los bloques huecos de hormigón se utilizó el árido grueso, árido fino y el polvo de piedra procedente de la cantera Pílon en Mayarí. Todos los materiales se consideran conforme según Norma Cubana 251:2005 de acuerdo a los resultados suministrados por la empresa de prefabricados de Cuba, UEB Moa.

Las características químicas (Tabla 3) y mineralógicas de las arcillas originales (Figura 2). La determinación de la composición química de las arcillas permitió comprobar que pueden ser utilizadas como puzolanas. Por otro lado, esta composición es similar a las obtenidas por otros autores para muestras del depósito Cayo Guam (Almenares-Reyes et al., 2016; Poll-Legrá et al., 2016). Desde el punto de vista mineralógico, los materiales estudiados presentan un carácter

multicomponente con un contenido de minerales arcillosos de 71,67 % (Martínez De la Cruz, 2017).

Tabla3. Composición química de la muestra de arcilla natural

Compuestos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PPI
Contenido, %	39,45	29,24	13,03	0,03	0,48	0,14	0,08	0,21	0,1	14,16

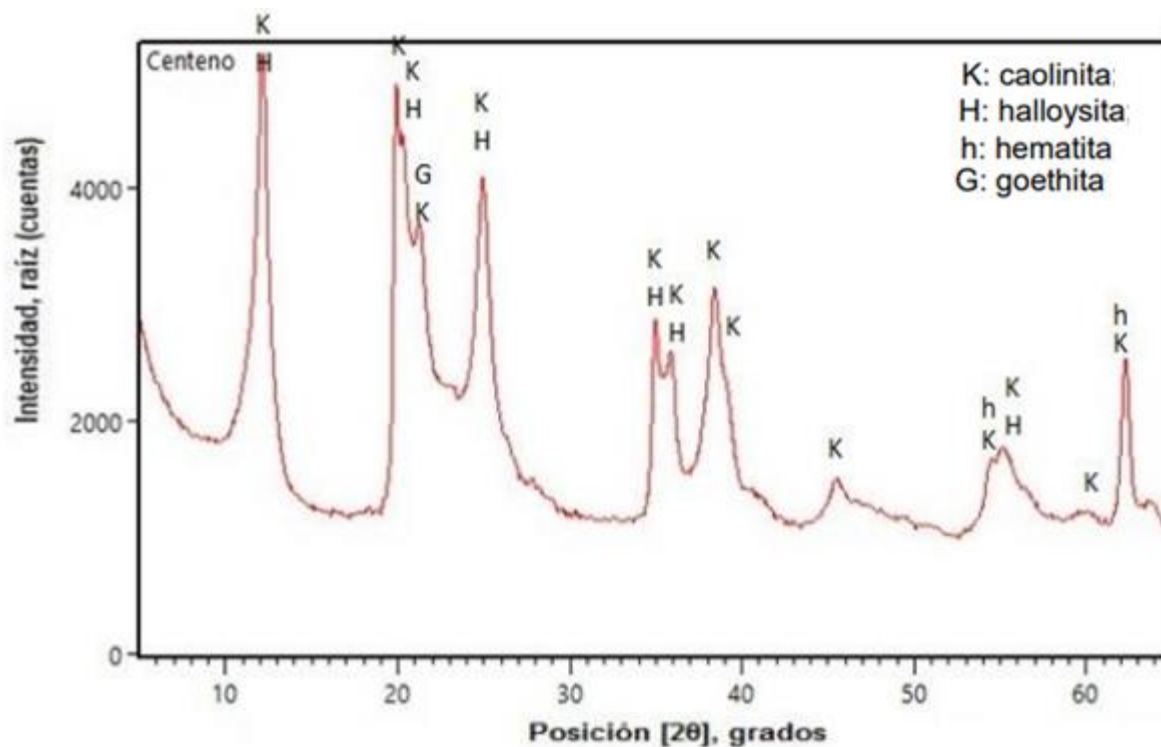


Figura 2. Difractograma de la muestra de la arcilla natural

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

2.5.1. 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.

2.5.2. 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 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)

Conclusiones del capítulo 2

- Las características que presenta el depósito arcilloso analizado indica que es una materia prima con potencial como MCS.
- Las técnicas empleadas para la evaluación de las prestaciones son las de mayor interés desde el punto de vista práctico.

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 400×150×200 mm donde se sustituye el aglomerante por cemento de tipo LC3. Se puede ver en la Figura 3.1 y 3.2 que todos 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 y 28 días es de 4 MPa y 5 MPa, respectivamente. Es necesario destacar que para ambas edades de ensayo, 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 PP-35.

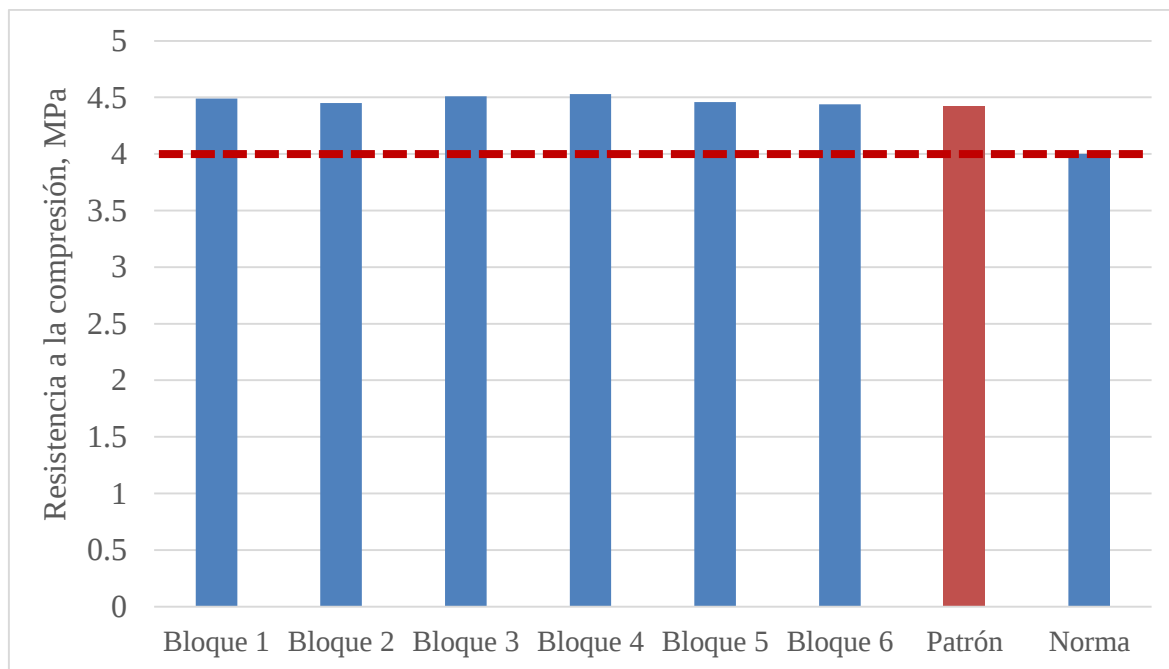


Figura 3.1 Comportamiento de la resistencia a compresión de los bloques huecos de hormigón a la edad de 7 días.

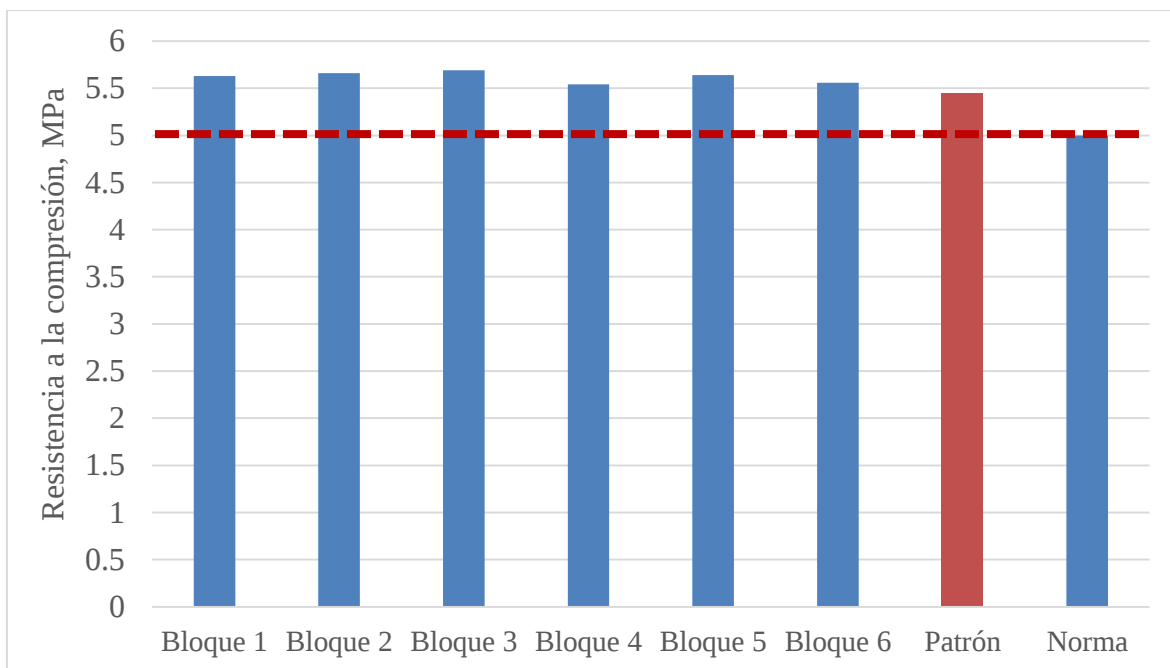


Figura 3.2 Comportamiento de la resistencia a compresión de los bloques huecos de hormigón a la edad de 28 días.

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

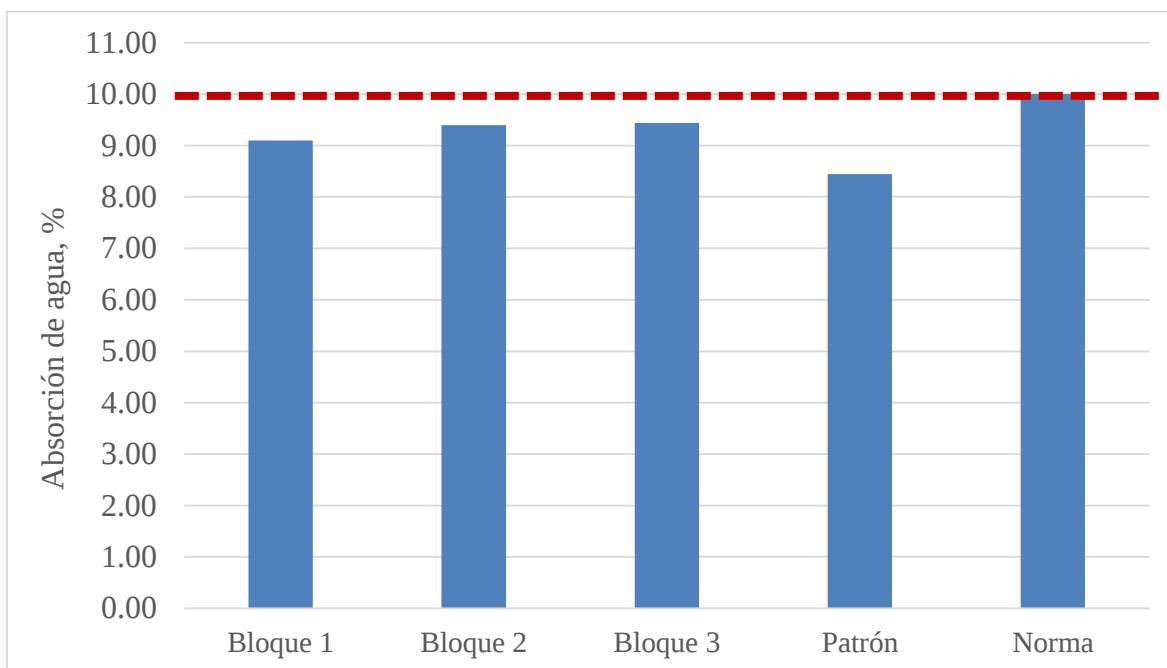
El ensayo de absorción de los bloques huecos de hormigón se les realizó a 3 bloques producidos con la dosificación antes mencionada en el capítulo anterior con el cemento de tipo LC3 con el propósito de evaluar si los bloques fabricados a escala industrial cumplen con lo establecido en la norma. La siguiente tabla 3.1 muestra los resultados del ensayo de absorción a 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	6566	7223	9.10
Bloque 2	6478	7150	9.40
Bloque 3	6417	7086	9.44
Patrón	6624	7235	8.45
Norma	-	-	10.00

Como se puede apreciar en la Figura 3.3, 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 cemento LC3, presentan mayor absorción que el patrón de referencia, lo cual puede estar dado por la elevada superficie específica de la arcilla que compone este aglomerante.



3.6 Alternativas sostenibles para incrementar la producción de bloques huecos de hormigón en Moa

Como el cemento es el principal constituyente del hormigón que compone el bloque y también es en su proceso de producción donde se genera el mayor impacto ambiental, se profundizará en las acciones para disminuir su impacto sobre el medio ambiente.

Las acciones para disminuir la carga ambiental generada por la industria del cemento en Cuba han estado concentradas por muchos años en la conversión del proceso húmedo al seco. Sin embargo, este tipo de cambio tecnológico conlleva grandes inversiones, que el país no está en condiciones de hacer, por lo que la estrategia ambiental ha sido concentrar la producción en las fábricas de Cienfuegos y Mariel, que son menos contaminantes. La reducción del factor de clínquer y el aumento de la producción de cementos mezclados representa una buena alternativa, no solo para mitigar el impacto ambiental sino para incrementar los volúmenes de producción de cemento y ayudar a suplir la demanda nacional; ello requiere de pequeñas inversiones amortizadas a corto plazo.

Contrario a las tendencias internacionales, la producción de cemento Portland en la isla representa el 75 % de las producciones totales de manera sostenida durante los últimos años, mientras que los cementos mezclados significan aproximadamente el 23 %. Aunque el empleo de MCS como extensores de clínquer también es una alternativa empleada en Cuba, esta ha estado centrada solamente en el uso de tobas zeolíticas – llamadas en el argot popular como “zeolitas” – debido a su probada reactividad puzolánica (Rabilero, 1988) y la gran disponibilidad de reservas, que se estiman en el orden de los 360 MMt de recursos identificados y hasta 500 MMt inferidos (Batista & Coutin, 2013) de acuerdo a los yacimientos estudiados. Las tobas zeolíticas son adicionadas al clínquer de cemento Portland en cantidades del 10 – 35 % para la producción de cementos PP-25, PP-35 y Pz-25, según establece la norma cubana NC 96:2001 (NC 96, 2011); cantidades superiores pueden provocar el detrimento de las propiedades mecánicas (Poon et al., 1999).

A partir de los fundamentos de los problemas anteriormente señalados, una forma de intentar resolver este problema es integrando criterios de sostenibilidad, en el que se atiende las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de atender a sus propias necesidades (WCED, 1987) y por lo tanto es necesario seguir la tendencia del desarrollo actual, para atender estas necesidades (Savater, 1999), no solo equivalente a crecimiento económico sino que debe incorporar también elementos no monetarios de la calidad de vida y/o bienestar de la sociedad en busca de la equidad entre el presente y el futuro y la integración de las consideraciones medioambientales en la toma de decisiones de la político - económicas (Jacobs, 1997).

El motivo central que se propone como meta para perseguir la sostenibilidad de la producción de bloques u otro prefabricado en Moa no es tan sencillo, pero hay que implementar estrategias para resolver los problemas de hoy con una acertada visión del mañana.

Estas consideraciones conllevan a la propuesta de alternativas para mitigar el impacto ambiental negativo, así como el incremento de la producción. Dichas estrategias deben apuntar directamente a la minimización de los impactos ambientales, contribuir a la mejora y recuperación del medio ambiente. Dentro de las propuestas, alcanzables a corto plazo se destacan:

- Disminución la cantidad de cemento Portland a partir de la implementación de políticas para el desarrollo y empleo de cementos mezclados por parte de las empresas constructoras, que faciliten la expansión de este tipo de aglomerantes en la industria de prefabricados. Esto incide directamente en la reducción de los costos ambientales, asociados a las emisiones de CO₂, sin que ello implique mayores costos de producción, los cuales pueden ser incluso menores, con pequeñas inversiones.
- Mediante la producción industrial de un cemento ternario, adicionalmente, posibilita incrementar los volúmenes de producción para satisfacer la demanda prevista para los próximos años.
- El desarrollo de una metodología para la selección adecuada de las materias primas, sobre la base de criterios geotecnológicos y socioeconómicos, suficiente disponibilidad de recursos, y una composición químico-mineralógica tal, que no tenga mayor competencia de mercado para otras aplicaciones ya establecidas, contribuirá a la explotación racional de los recursos naturales y valorar su influencia sobre la sociedad, la economía y la ecología en el presente y el futuro.

Una empresa de producción de bloques consume aproximadamente 270 t para la fabricación de 489 600 bloques. Si se emplea el aglomerante LC3 es posible reducir 135 t de cemento o incrementar la producción de bloques hasta 734 400, lo cual se traduce en la posibilidad de construir 204 viviendas de 8x6 m. Esto ayudaría a sustentar la creciente demanda de prefabricados, especialmente, cuando la principal dificultad que presenta la producción de estos materiales es el déficit del cemento. La producción de este tipo de aglomerante en Moa, según está previsto en el programa de desarrollo de Moa, contribuiría con la sostenibilidad de la industria constructiva local.

Conclusiones del capítulo 3

- Los bloques huecos de hormigón fabricados con cemento LC3 presentan un excelente comportamiento en cuanto a la resistencia a compresión y a la absorción, cumpliendo con los parámetros normalizados para su tipo.

- Las perspectivas de utilización de los materiales arcillosos muestra resultados alentadores para los programas de construcción de viviendas y otras obras sociales, lo cual permite influir positivamente en el desarrollo local.
- La producción de bloques huecos de hormigón con aglomerante LC3 contribuiría con la sostenibilidad de la industria constructiva local.

CONCLUSIONES

Se evaluaron las prestaciones de bloques huecos de hormigón elaborados con cemento de bajo carbono a partir de su formulación con adición de cemento P-35, caliza, y arcilla de la región de Centeno calcinada para su utilización en la industria de materiales de la construcción en Moa.

Las conclusiones generadas de esta investigación se exponen a continuación:

- El empleo de cemento de tipo LC3 en la producción de bloques huecos de hormigón muestra un escenario promisorio para la producción de materiales de construcción en Moa, con resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, superior en todos los casos a la resistencia mostrada por los patrones de referencia y los valores mínimos estandarizados.
- La absorción de agua de los bloques huecos de hormigón fabricados con cemento LC3, muestran valores por debajo de 10 %, requisito mínimo establecido en las especificaciones para su uso.
- El empleo de bloques huecos de hormigón con cemento LC3 se considera una alternativa favorable para la sostenibilidad económica y ecológica de la industria de materiales de construcción del municipio de Moa. Por una parte, disminuye el impacto sobre el medio ambiente y por otra, puede incrementar los volúmenes productivos.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de este trabajo se presentan a continuación:

- Introducir los resultados para la producción de bloques huecos de hormigón en el combinado de materiales de la construcción de centeno a pequeña escala.
- Extender la evaluación con otras materias primas del territorio para garantizar una diseminación de esta tecnología amigable con el medio ambiente y con impacto favorable en el incremento de la producción de bloques para el programa de la vivienda en Moa.

.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, D. (2009). Arquitectura y construcción sostenibles: conceptos, problemas y estrategias. *Revista de Arquitectura de La Universidad de Los Andes*, 04, 14–23.
- 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 Geología*, 32(4), 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.
- 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.
- Alujas, Adrián. (2010). *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente* [Tesis Doctoral]. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.
- Alujas, Adrian, 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. *Applied Clay Science*, 108, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>
- Alvarez, A. (2013). *Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico* *Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez.”
- Batista, R., & Coutin, D. (2013, October). Potencialidades de las puzolanas naturales y arcillas caoliníticas como aglomerantes en Cuba. *10mo Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción*.
- Cardoso da Silva, R. (2019). *Ideas conceptuales acerca del potencial del depósito arcilloso centeno para la producción de cemento de bajo carbono en el municipio Moa* [Universidad de Moa].

- <http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/3796/DaSilvaCardoso2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castillo, R. (2010). *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza* [Tesis Doctoral]. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- CEMBUREAU. (2009). *Producción Sostenible de Cemento*. www.cembureau.eu
- CEMBUREAU. (2013). *The role of cement in the 2050 low carbon economy*.
- CEMBUREAU. (2014). *Activity Report 2014*. www.cembureau.eu
- CSI. (2010). *Cement Industry Energy and CO2 Performance “Getting the Numbers Right”* (p. 42). World Business Council for Sustainable Development.
- Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., & Sorrentino, D. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 38, 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>
- Danner, T. (2013). Reactivity of Calcined Clays [Tesis Doctoral]. In *NTNU*, 2013:218. Norwegian University of Science and Technology.
- Fernández, R. (2009). Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries [Tesis Doctoral]. In *Faculté Sciences et Techniques de L’Ingenieur* (Issue 4302). École Polytechnique Federale de Lausanne.
- Habert, G., Choupay, N., Escadeillas, G., Guillaume, D., & Montel, J. M. (2009). Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science*, 43(3–4), 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.09.009>
- Harvey, C. C., & Legaly, G. (2006). Conventional applications. In F. Bergaya, B. K. G. Theng, & G. Lagaly (Eds.), *Handbook of Clay Science* (1st ed., Vol. 1, pp. 501–540). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01016-0](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01016-0)
- Hendriks, C. A., Worrell, E., de Jager, D., Blok, K., & Riemer, P. (1998). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. *Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, 939–944. <http://www.ieagreen.org.uk/prghgt42.htm>
- IEA/CSI-WBCSD. (2018). *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. www.iea.org/technology-roadmap/cement
- Jacobs, M. (1997). *La economía verde: medio ambiente, desarrollo sostenible y la política del*

futuro. ICARIA.

- 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. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1488, imrc12-1488. <https://doi.org/10.1557/opl.2012.1536>
- Lawrence, P., Cyr, M., & Ringot, E. (2005). Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and. *Cement and Concrete Research*, 35, 1092– 1105.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Martínez De la Cruz, E. (2017). *Evaluación de las arcillas rojas de Centeno para su utilización como material cementicio suplementario* [Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa]. <https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/2554/Ernesto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martirena, F., Alujas, A., Vizcaino, L., Berriel, S., Díaz, E., Abdel, P., Almenares, R., Scrivener, K., Antoni, M., Habert, G., & Favier, A. (2016). Desarrollo y producción industrial de un cemento de bajo carbono en Cuba. *Anales de La Academia de Ciencias de Cuba*, 6(3), 1–8.
- Murray, H. (2000). Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: A general overview. *Applied Clay Science*, 17(5–6), 207–221. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(00\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00016-8)
- Murray, H. (2002). Industrial clays case study. *Mining, Minerals and Sustainable Development*, 64, 1–9.
- NC 96. (2011). *Cemento con adición activa. Especificaciones*. Oficina Nacional de Normalización (NC). www.nc.cubaindustria.cu
- Núñez Jover, J. (2004). *Ética, Ciencia y responsabilidad*. Félix Varela.
- Pekmezci, B. Y., & Akyüz, S. (2004). Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 2175–2179.
- Poll-Legrá, L. (2016). *Evaluación de la actividad puzolánica de arcillas del sector La Delta para su utilización como material cementicio suplementario* [Tesis de Maestría]. Instituto

Superior Minero Metalúrgico de Moa.

- 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 Geología*, 32(1), 15–27.
- Poon, C. S., Lam, L., Kou, S. C., & Lin, Z. S. (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 13(8), 427–432.
- Rabilero, A. (1988). *Las Puzolanas. Cinética de las reacciones*. Editorial Oriente.
- Romero-Ramírez, Y. (2014). *Caracterización de la actividad puzolánica de arcillas de la región de Cayo Guam para su utilización como material cementicio suplementario* [Trabajo de Diploma]. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Sabir, B., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Samet, B., Mnif, T., & Chaabouni, M. (2007). Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement. *Cement and Concrete Composites*, 29(10), 741–749. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.012>
- Savater, F. (1999). *Las Preguntas de la Vida*. Ariel, S.A.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). *Sustainable cement production—present and future*.
- Scrivener, K. L. (2014). Options for the future of cement. *The Indian Concrete Journal*, 88(7), 11–21. http://www.lc3.ch/wp-content/uploads/2014/09/0851_ICJ_Article.pdf
- Scrivener, K. L., & Nonat, A. (2011). Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 651–665. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>
- Teklay, A., Yin, C., Rosendahl, L., & Bøjer, M. (2014). Calcination of kaolinite clay particles for cement production: A modeling study. *Cement and Concrete Research*, 61, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.04.002>
- Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Badogiannis, E., Pahoulas, G., & Ilias, A. (1999). A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements. *Cement and Concrete Composites*, 21, 107–116.

- Turanli, L., Uzal, B., & Bektas, F. (2004). Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research*, 34, 2277–2282. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.011>
- U.S. Geological Survey. (2015). *Mineral commodity summaries 2015: U.S. Geological Survey*. <https://doi.org/10.3133/70140094>
- U.S. Geological Survey. (2020). *Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey*. <https://doi.org/10.3133/mcs2020>.
- U.S. Geological Survey. (2021). *Mineral commodity summaries 2021: U.S. Geological Survey*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/mcs2021>
- UNE-EN 197-1. (2011). *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. AENOR.
- 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.
- WBCSD/CSI. (2005). *The Cement CO2 and Energy Protocol- Version 3.0*. World Business Council for Sustainable Development. <http://www.wbcsdcement.org/>
- WBCSD/IEA. (2009). *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050*. IEA Publications. <http://www.iea.org/papers/2009/>
- WBCSD. (2015). *Low carbon technology partnerships initiative (LCTPi)*. <http://www.lctpi.wbcsdservers.org/>
- WCED. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*.
- Worrell, E., Galitsky, C., & Division, E. E. T. (2008). Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making. In *An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California.