



Evaluación de bloques huecos de hormigón formulados con tobas zeolitizadas activadas térmicamente

AUTOR: Taili Trujillo Maranje

Moa, 2024



Evaluación de bloques huecos de hormigón formulados con tobas zeolitizadas activadas térmicamente

Tesis en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

AUTOR: Taili Trujillo Maranje

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

CONSULTANTE: Dr. C. Hugo Javier Angulo Palma

Moa, 2024

Dedicatoria

Con todo el amor del mundo le dedico esta tesis a:

Mi abuelita por siempre estar a mi lado apoyándome en hacer mis sueños realidad, por su confianza y dedicación en todo momento y sobre todo por ser mi motor impulsor.

A mi hermano por apoyarme siempre en todo y ayudarme a seguir adelante.

A mis padres por confiar todo el tiempo en que si podía lograrlo y por todo el sacrificio que han hecho por mí.

A mi novio por haber sido mi compañero incondicional, mi amigo y acompañarme en los momentos más difíciles de mi vida.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente:

A mi tutor el Dr. C. Roger Samuel Almenares Reyes por transmitirme sus conocimientos y dedicarme su tiempo cuando lo necesité.

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

¡Gracias por su valiosa contribución!

Resumen

El uso de tobas zeolitizadas activadas térmicamente como materiales cementicios suplementarios en la producción de bloques huecos de hormigón se ve limitado, en parte, por la falta de investigación sobre sus propiedades físico-mecánicas. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo evaluar las prestaciones de bloques huecos de hormigón en los cuales se sustituye el 50% del cemento por tobas zeolitizadas activadas térmicamente, para su fabricación en la industria de prefabricados de Moa. Para llevar a cabo esta evaluación, se produjeron bloques huecos de hormigón tipo II y se determinó su resistencia a la compresión a los 7 días y la absorción de agua. Los resultados obtenidos al producir bloques huecos de hormigón utilizando tobas zeolitizadas tratadas a 350 °C son alentadores para la industria de la construcción en Moa. La resistencia a la compresión a los 7 días superó los valores mínimos estandarizados y los valores de absorción se comportaron de acuerdo con la norma, lo que sugiere un potencial significativo en esta aplicación. La activación de tobas zeolitizadas en el sistema de secado de la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel emerge como una alternativa prometedora para aumentar la producción de materiales cementicios suplementarios, con posibles beneficios para el programa de vivienda local.

Abstract

The use of thermally activated zeolitized tuffs as supplementary cementitious materials in the production of hollow concrete blocks is limited, in part, by the lack of research on their physical-mechanical properties. In this sense, the present study aims to evaluate the performance of hollow concrete blocks in which 50% of the cement is replaced by thermally activated zeolitized tuffs, for their manufacture in the prefabricated industry of Moa. To carry out this evaluation, type II hollow concrete blocks were produced and their compressive strength at 7 days and water absorption were determined. The results obtained when producing hollow concrete blocks using tuffs zeolitized treated at 350 °C are encouraging for the construction industry in Moa. The compressive strength at 7 days exceeded the standardized minimum values, suggesting significant potential in this application. The activation of zeolitized tuffs in the drying system of the pilot plant at the Nickel Research Center emerges as a promising alternative to increase the production of supplementary cementitious materials, with possible benefits for the local housing program.

Índice	Pág.
Introducción	1
Capítulo I. Marco Teórico – Conceptual.....	4
1.1. Estrategias para mitigar el impacto de la producción de cemento	4
1.2. Perspectivas de utilización de tobas zeolitizadas activadas térmicamente como materiales cementicios suplementarios.....	10
1.2.1. Tobas zeolitizadas.....	10
1.2.2. Activación térmica de las tobas zeolitizadas para su utilización como puzolana ...	13
1.3. Generalidades sobre los bloques huecos de hormigón	14
1.3.1. Características de los hormigones para la producción de bloques	15
Conclusiones del capítulo 1	16
Capítulo II. Materiales y Métodos	17
2.1. Selección de la muestra	17
2.1.1. Ubicación y características del yacimiento de Caimanes.....	17
2.1.2 Toma y preparación de la muestra.....	18
2.2. Procesamiento de las tobas para la elaboración del aglomerante	19
2.3. Análisis granulométrico.....	21
2.4. Caracterización de las materias primas para la producción de los bloques huecos de hormigón.....	23
2.5. Fabricación de bloques huecos de hormigón.....	24
2.6. Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón	25
2.6.1 Ensayo de resistencia a la compresión	25
2.6.2. Absorción de agua	27
2.6.3. Determinación de las dimensiones del bloque	27
Conclusiones del capítulo 2.....	28
Capítulo III. Análisis y Discusión de los Resultados	29

3.1 Resultados de la caracterización granulométrica del material obtenido en el proceso de molienda	29
3.2. Análisis de los resultados obtenidos en bloques huecos de hormigón	29
3.2.1. Resultados de la desviación típica de las dimensiones de los bloques.....	29
3.2.2. Resultados de la resistencia a la compresión en bloques huecos de hormigón	30
3.2.3. Resultados de la absorción de agua en bloques huecos de hormigón	31
3.3. Alternativa para la producción de bloques huecos de hormigón a partir de tobas zeolitizadas activadas térmicamente.....	32
Conclusiones del capítulo 3.....	34
Conclusiones.....	35
Recomendaciones.....	36
Referencias Bibliográficas	37

INTRODUCCIÓN

La construcción de viviendas, edificios y estructuras es uno de los motores más importantes en el desarrollo de cualquier país. Para llevar a cabo estas obras, se requiere de una gran cantidad de materiales de construcción, lo que convierte a este sector en uno de los más importantes en la economía de cualquier nación (Figueredo Reinaldo et al., 2023).

A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado soluciones para satisfacer sus necesidades constructivas, especialmente en lo que respecta a la seguridad y comodidad del entorno familiar. El avance científico y técnico ha tenido un impacto significativo en la vida económica, política y social de los países, especialmente en un mundo en constante crecimiento poblacional que demanda más viviendas y otros recursos. En el caso de Cuba, la escasez de materiales de construcción y el deterioro de las estructuras existentes han generado dificultades para dar respuesta rápida a esta problemática (Almenares-Reyes, 2011).

La utilización de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) se ha convertido en una práctica común para aumentar la producción y mejorar la calidad de los productos (Juenger & Siddique, 2015). En este contexto, se reconoce la importancia de analizar el potencial empleo de materiales tobáceos localmente disponibles como materiales puzolánicos, especialmente las tobas vítreas y zeolitizadas. Aunque se han obtenido resultados satisfactorios en estudios previos sobre la sustitución de estos materiales en aglomerantes, su uso en la producción de prefabricados y albañilería no ha sido explorado.

De acuerdo con las características geológicas de Cuba, se ha identificado una gran disponibilidad de materiales tobáceos en el país, especialmente en la provincia de Holguín, incluyendo tobas vítreas y zeolitizadas (Batista, 2007; Batista & Coutin, 2013). Estos materiales han sido objeto de estudios previos como posibles materiales puzolánicos, con resultados satisfactorios (Almenares-Reyes, 2011; Rosell et al., 2006). A pesar de esto, su uso ha sido limitado en parte debido a la falta de estudios que respalden su aplicación y a la baja reactividad puzolánica que impide altos niveles de sustitución en los aglomerantes. No obstante, se han obtenido resultados positivos a nivel local y territorial.

Investigaciones anteriores sobre la evaluación de puzolanas en la provincia de Holguín (Almenares-Reyes, 2011; González-Verdecia, 2015) han demostrado que la sustitución de tobas vítreas y zeolitizadas no compromete la resistencia de los morteros en sustituciones de hasta un 20 %. Sin embargo, aún es muy baja la reactividad con respecto a otros materiales puzolánicos. Por su parte, Guerra (Guerra González, 2015) demostró que es posible incrementar los niveles de

sustitución cuando las tobas zeolitizadas son activadas pero sin que se haya evaluado en aplicaciones de prefabricados. Sin embargo, no se ha estudiado el uso de este sistema activado en la producción de prefabricados, industria que representa un importante consumidor de la producción nacional de cemento. A partir de esta situación problemática se formula como **problema de la investigación**:

El uso de tobas zeolitizadas activadas térmicamente como materiales cementicios suplementarios en la producción de bloques huecos de hormigón está limitado, en parte, porque no se ha investigado sus propiedades físico – mecánicas.

Objeto de estudio

Bloques huecos de hormigón a partir de la sustitución de 50 % de tobas zeolitizadas activadas térmicamente por cemento Portland P-35.

Campo de acción

Propiedades físico – mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados con un 50 % de sustitución de tobas zeolitizadas activadas térmicamente por cemento Portland P-35.

Objetivo general

Evaluar las prestaciones de bloques huecos de hormigón donde se sustituye 50 % de cemento por toba zeolitizada activada térmicamente para su producción en la industria de prefabricados de Moa.

Objetivos específicos

1. Determinar la resistencia a la compresión y la absorción de agua en bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerante donde se sustituye 50 % de cemento por toba zeolitizada tratada térmicamente.
2. Proponer una alternativa para la producción de bloques huecos de hormigón a partir de tobas zeolitizadas activadas térmicamente.

Hipótesis de investigación

Si las propiedades físico – mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye 50 % de cemento por materiales toba zeolitizada activada térmicamente tratados 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, las

características de los materiales empleados y la formulación de los bloques huecos de hormigón.
El tercer capítulo muestra los resultados de la aplicación de la metodología.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

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

1.1.Estrategias para mitigar el impacto de la producción de cemento

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 2022 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 y Turkiye fueron las cinco primeras naciones que se posicionaron en 2022. Aunque las cuatro últimas incrementaron su producción, China disminuyó en 300 millones de toneladas (U.S. Geological Survey, 2024). 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.

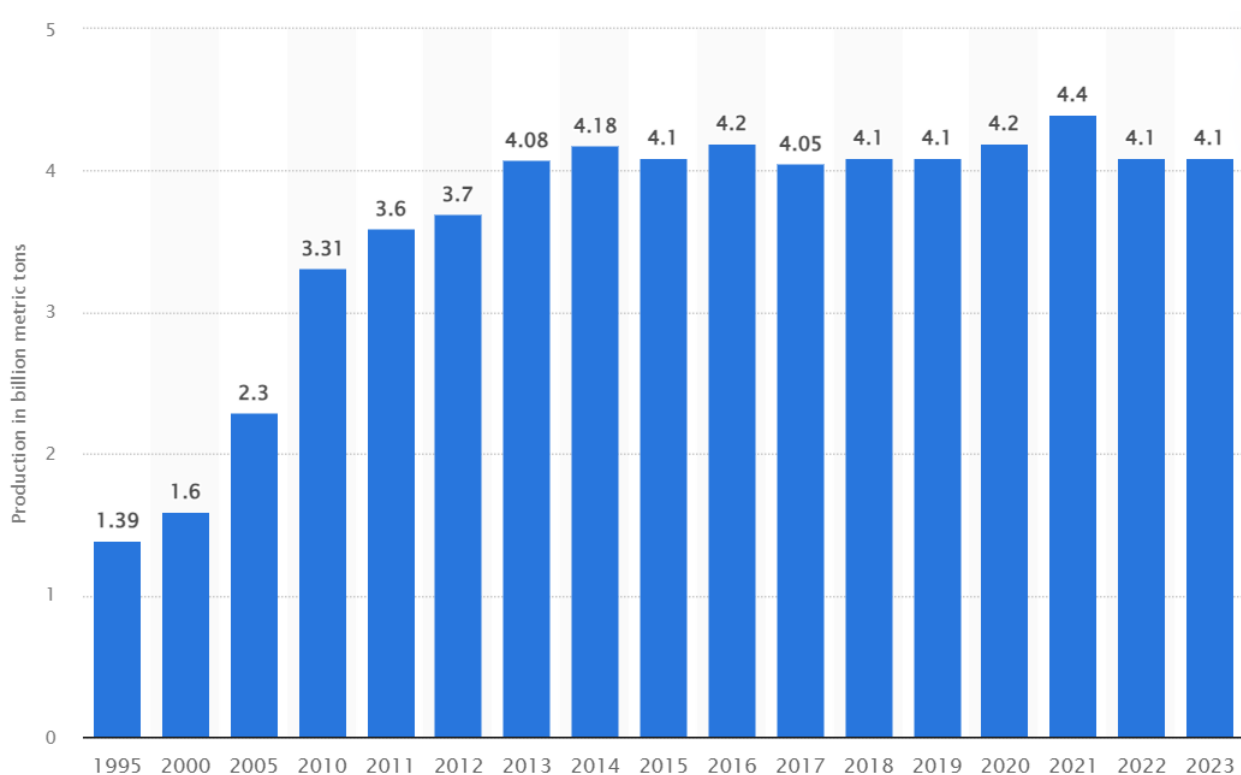


Figura 1.1. Producción global de cemento los últimos 17 años

Fuente: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>

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). Esta industria se encuentra dentro de los mayores contaminantes del planeta y también una de las más consumidoras de energía, 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 a 70 % 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 30 a 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, aluminio 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 descarbonatadas 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, 2024).

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, polvo, purificación y 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 fisicoquímicas 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. Fuente: (Almenares-Reyes, 2017)

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. Perspectivas de utilización de tobas zeolitizadas activadas térmicamente como materiales cementicios suplementarios.

1.2.1. Tobas zeolitizadas

Las tobas zeolitizadas son también de origen volcano-sedimentario. Tienen composición predominante mordenítica-clinoptilítica con variables contenidos de celadonita, montmorillonita,

feldespato cálcico y cuarzo, predominando en algunas regiones la mordenita y en otras la clinoptilolita. Son rocas vitroclásticas y cristalovitroclásticas, ligeras, porosas y masivas, presentándose en el perfil sin inclusiones con otras rocas o con alternancia de areniscas, tufitas y conglomerados o sobrecorridas por lavas. La zeolitización es irregular promediando 70% y en ocasiones más. Sus cuerpos son en capas de hastacentenares de metros de potencia, alcanzando gran desarrollo territorial.

Existen más de 50 objetivos de tobas zeolitizadas en Cuba, de ellos están listos para su asimilación industrial 8 yacimientos en Guantánamo, Granma, Santiago de Cuba, Holguín, Camagüey, La Habana, Cienfuegos y Villa Clara (Rodríguez González et al., 2009).

Los productos obtenidos de las zeolitas se emplean en la actualidad en Cuba, principalmente en:

1. Producción de fertilizantes
2. Uso directo en el mejoramiento de suelos
3. Alimentación animal
1. Tratamiento de aguas
2. Pigmentos
3. Desecantes
4. Purificación de oxígeno

La materia prima se procesa en cuatro plantas ubicadas en las provincias: Holguín, Villa clara, Camagüey y La Habana. Estos productos zeolíticos cubanos se consumen en otros países donde se destinan para ser usados en la agricultura, producción de fertilizantes, producción de detergentes, así como elementos filtrantes y tratamiento de residuales (Juventud Rebelde, 2011; Casado Camacho, 2014; Santos, 2008; Juventud Rebelde, 2016, 2008; Hechavarría, 2012; Grogg, 2016; Camacho Casado, 2014; Casals Corella, 1988).

Los materiales puzolánicos son muy conocidos actualmente, así como sus ventajas en la mejora de gran número de cementos. A partir de la década de los años 70 del siglo XX, en Cuba se han efectuado numerosas investigaciones que han elevado el conocimiento geológico del territorio nacional, así como investigaciones a nivel de laboratorio; semiindustriales e industriales que han validado las tobas meteorizadas, tobas vítreas (vidrio volcánico) y tobas zeolitizadas como puzolanas naturales, aptas para producir aglomerantes como el cemento romano y adiciones o mezclas al cemento Portland, las cuales han dejado el camino abierto a nuevas investigaciones (Rabilero, 1988, 1992, 2005).

Las zeolitas han tenido un gran desempeño en diversas esferas, es un valioso recurso para la rama

de la construcción. Se ha empleado como adición mineral puzolánico en las mezclas con cal en las construcciones antiguas. Estas se utilizan en la construcción como aditivos puzolánicos del cemento y hormigones (Sersale, 1993; Rosell et al., 2006), en la construcción de carreteras, acueductos y edificios, porque el contenido de silicio les permite reaccionar con la cal libre producida durante el fraguado (Rosell et al., 1997).

Costafreda y otros autores (Costafreda et al., 2011) mostraron resultados prácticos, obtenidos de recientes investigaciones de tobas de composición dacítica, capaces de sustituir al cemento Portland de alta resistencia inicial en morteros y hormigones. Los contenidos apreciables en sílice y en alúmina, los bajos contenidos en sulfato y materias orgánicas, y una molienda adecuada, entre otros, son las causas, al parecer, de la eficacia de este material a la hora de aportar valores apreciables de resistencias mecánicas a edades cercanas y superiores a los 28 días.

En otras investigaciones los autores anteriores (Costafreda, 2011; Costafreda et al., 2011) determinan las propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España y su incidencia en ciertas aplicaciones eminentemente prácticas. Plantean que los resultados indican que cada variedad de zeolita natural aporta respuestas diferentes frente a los ensayos, posiblemente influenciado por la sutil variabilidad de su composición química. Es evidente que las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las zeolitas naturales varían sensiblemente de un tipo a otro dentro de la propia familia mineralógica. Es un hecho que se refuerza cuando estas zeolitas se encuentran en paragénesis con otros minerales distintos, como ocurre en el sureste de España, donde es frecuente encontrar representantes de los filosilicatos, fundamentalmente montmorillonita, como especie mayoritaria del grupo de las esmectitas que son singenéticas con la mordenita en los yacimientos zeolíticos españoles. En el caso de las zeolitas de México y de Cuba, plantean los autores que puede deducirse su pureza a partir de la gran estabilidad de volumen y del tiempo de fraguado; asimismo, por las resistencias mecánicas elevadas que ofrecen sus probetas ante la compresión.

Otras investigaciones han dirigido su objetivo al empleo de las zeolitas naturales procedentes del yacimiento de Tasajeras, Provincia de Villa Clara, como material de construcción, principalmente en la producción de cementos y otros aglomerantes, y como aditivos o agregados ligeros, para la producción de hormigones de altas prestaciones con excelentes cualidades técnicas, como la impermeabilidad y durabilidad (Rosell, 2007).

Las adiciones activas en los hormigones son cada día más usuales, no solo debido a razones económicas, sino porque los efectos que se desarrollan son beneficiosos para las prestaciones del

hormigón, dígase durabilidad y resistencias mecánicas. En Cuba ha sido frenada al no existir fuentes como las tradicionalmente conocidas y comercializadas como lo son las cenizas volantes y las microsílices. El desarrollo de estudios de algunos minerales industriales nacionales de génesis ígnea como los vidrios volcánicos, las tobas vítreas o zeolitas, han demostrado su actividad puzolánica. Es conocido que la zeolita tiene actividad puzolánica desde la época romana, y actualmente se utilizan en el mundo para la producción de cementos mezclados, sin embargo, la experiencia cubana es el precedente de su uso como adición activa a hormigones. Se han realizado investigaciones a diferentes escalas del uso de adiciones de zeolita en tecnologías de prefabricado, premezclado y pretensado que han demostrado las mejoras en las prestaciones (Rosell, 2010; Rosell et al., 2006).

Varios autores han estudiado materiales similares como es el yacimiento toba vítreas Sagua de Tánamo y Guaramanao en la provincia de Holguín para su utilización como árido ligero y puzolana natural. En estas investigaciones se evaluó la sustitución de 15 y 30 % de tobas por cemento, con la obtención de resultados favorables; sin embargo, estos se consideran preliminares, al no contar, con las técnicas y métodos empleados para la realización de los ensayos con las debidas certificaciones de calidad, lo cual no permite homologar sus resultados, para dar lugar a la necesidad de efectuar nuevas investigaciones (Almenares-Reyes, 2011).

1.2.2. Activación térmica de las tobas zeolitizadas para su utilización como puzolana

Muchos investigadores como Türkmenoğlu y Tankut (2002), Shi y Day (2001), Perraki y Kakali (2003), Osbaeck y Makovicky (1995), han estudiado la actividad puzolánica de minerales zeolíticos, sin embargo, lo han hecho con minerales secundarios o acompañante de otras puzolanas naturales como son los vidrios volcánicos. No obstante, con estos estudios es posible conocer el efecto de la activación de los minerales zeolíticos, aplicando la activación térmica. Estos minerales se alteran a temperaturas relativamente bajas. Por lo que el análisis térmico diferencial (ATD) permite encontrar la desestabilización de estos minerales a diferentes temperaturas. Y finalmente estos autores han comprobado el efecto de la actividad puzolánica a partir de la evaluación de su resistencia en morteros normalizados (Brussels, 1995).

Diferentes estudios concluyen que la presencia de zeolita influye positivamente en la actividad puzolánica de las tobas en su estado natural Türkmenoğlu y Tankut (2002), Perraki y Kakali (2003), Poon, Lam y Lin, (1999). Sin embargo, los resultados de investigadores como Costa y Massazza (1977), Liebig y Althaus (1998), Habert et al. (2008), concluyen que la activación de los minerales zeolíticos, produce una desestabilización de su estructura e incrementa su reactividad.

Resultados que fueron comprobados a partir de los ensayos de resistencia mecánica. El aumento de la resistencia se correlaciona claramente con la desestructuración de los minerales de heulandita y de forma similar también ocurre con la filipsita. El proceso de activación puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, siendo este último el candidato más fuerte para modificar la estructura cristalina de las zeolitas y alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica. La activación del material zeolitizado se refiere al proceso de lograr, a partir del aumento de la temperatura, la ruptura de los enlaces químicos y la desestabilización resultante de la estructura cristalina de las fases mineralógicas que la contienen y obtener un material con propiedades puzolánicas superiores a su estado natural. Durante la calcinación de estas, pueden distinguirse varias etapas. Con el calentamiento desde temperatura ambiente hasta 220 °C ocurre la pérdida del agua adsorbida en las superficies externas e internas de la zeolita (deshidratación). A los 300 °C comienza la desestructuración de la heulandita y la clinoptilolita a 450 °C (Habert, 2008). La presencia de minerales no zeolíticos tiende a aumentar la temperatura de activación, tal es el caso de las fases arcillosas que es a temperaturas superiores a 750 °C donde ocurre la destrucción de sus fases mineralógicas. Si la temperatura alcanza valores de 800 °C toma lugar la reorganización de la estructura para formar nuevas fases cristalinas estables a altas temperaturas y químicamente poco reactivas. Frazao (2007).

Por tanto, la temperatura de calcinación a la cual se obtiene la mayor reactividad puzolánica debe situarse dentro del intervalo que se extiende entre el final de la deshidratación y el inicio de la recristalización.

1.3. Generalidades sobre los bloques huecos de hormigón

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

Conclusiones del capítulo 1

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

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder evaluar las tobas zeolitizadas en bloques huecos de hormigón se tomaron y prepararon las muestras y se caracterización los materiales y se describen los métodos utilizados en la investigación.

2.1. Selección de la muestra

En la región existen cuatro depósitos de tobas con algún o ningún grado de zeolitización, entre los cuales se encuentran el yacimiento Sagua de Tánamo, en la localidad —El Picao; el yacimiento Caimanes ubicado cerca del poblado Farallones y los depósitos Amansa Guapo y el Lirial en Sagua de Tánamo.

Basado en las investigaciones previas (Almenares-Reyes, 2011; Guerra González, 2015), las tobas con mayor potencial son las del yacimiento Caimanes, las cuales han mostrado la mayor reactividad tanto de forma natural como activadas térmicamente. Por esta razón, fueron seleccionadas para los estudios del presente trabajo. El material empleado en el trabajo fue el trabajado por Sánchez Sanregré (Sánchez Sanregré, 2023).

2.1.1. Ubicación y características del yacimiento de Caimanes

El yacimiento Caimanes se encuentra ubicado cerca del poblado Farallones y limita al Norte con el río Cabaña, al Sur con el río Moa, al Oeste por el río Castro y está situado a unos 24 km, al Suroeste del municipio Moa (Figura 2.1). Las tobas zeolitizadas de este yacimiento están compuestas principalmente por zeolita del tipo clinoptilolita-heulandita cálcicas y ligeramente potásicas con contenidos que varían de 80 a 85 % aproximadamente, presenta cuarzo en forma de calcedonia y contenidos de montmorillonita con valores de hasta 13 y 14 %, mientras el óxido de hierro no llega a constituir fase mineralógica por su bajo contenido. Presenta vidrio volcánico amorfo no cristalizado (Frazao-Ndumba & Coello-velázquez, 2007).



Leyenda: ● Yacimientos

Figura 2.1. Ubicación del yacimiento Caimanes

2.1.2 Toma y preparación de la muestra.

Para la realización de la investigación las muestras fueron tomadas en el depósito Caimanes. El muestreo se realizó mediante el método por puntos, que consistió en la toma de trozos de la materia prima en seis puntos del depósito, con la ayuda de un martillo geológico (Figura 2.2).



Figura 2.2. Vista de un punto de muestreo

Las muestras fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño mediante tres etapas de trituración. En la primera etapa se utilizó la trituración por impacto de forma manual con el martillo de geólogo hasta lograr obtener fragmentos menores de 100 mm. La segunda y tercera etapa se llevó a cabo en trituradoras de mandíbulas (Figura 2.3 y 2.4), las cuales redujeron el material de 100 a 25 mm y de 25 a 6 mm, respectivamente.



Figura 2.3. Trituradora de mandíbula TQ (320x165).



Figura 2.4. Trituradora de mandíbula TQ (150x75).

En la descarga de la tercera etapa del proceso de trituración se realizó la operación de cribado de control con un tamiz de 3.15 mm, donde el material retenido fue recirculado a la tercera etapa de trituración hasta lograr que todo el material pasara por el tamiz.

2.2. Procesamiento de las tobas para la elaboración del aglomerante

El material cernido por el tamiz 3.5 mm fue calcinado en una mufla de laboratorio a 350 °C, por un período de una hora. Esta es la temperatura en la que se establece un compromiso entre reactividad y los parámetros técnico-económicos según las investigaciones realizadas (Guerra González, 2015).

Luego de su activación térmica fue sometido a molienda en un molino de bolas de laboratorio (Figura 2.5) durante 45 min. Luego se trasladó para el Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) y fue sometido a un proceso de secado en una estufa (Figura 2.6) durante 24 horas

a una temperatura constante de 110 °C. El material seco fue remolido en un molino de disco de 30 cm de diámetro (Figura 2.7) para lograr un material con más del 66 % pasado por el tamiz 0.045 mm.



Figura 2.5. Molino de bolas de laboratorio



Figura 2.6. Estufa



Figura 2.7. Molino de disco

El material calcinado molido fue empleado para la formulación del aglomerante según se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Dosificación del aglomerante con tobas zeolitizadas calcinadas

Toba zeolitizadas calcinada (50 %), kg	P-35 (50 %), g	Total, g
7,5	7,5	15

2.3. Análisis granulométrico

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



Figura 2.8. Muestras tamizadas



Figura 2.9. Residuos en el tamiz 0.045 mm

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

En la tabla 2.2 se muestra la composición mineralógica de la muestra de tobas zeolitizadas tratada térmicamente a 350 °C mediante Difracción de rayo X. Las fases zeolitizadas prácticamente no sufre transformaciones y los cambios no son perceptibles por esta técnica analítica (Guerra González, 2015; Sánchez Sanregré, 2023).

Tabla 2.2. Características mineralógicas de los materiales tobáceos estudiados

Principales fases cristalinas	
Natural	Calcinada
Clinoptilolita - heulandita, cuarzo, calcita	Clinoptilolita - heulandita, cuarzo, calcita.

Para la fabricación de los bloques huecos de hormigón se utilizó árido grueso (granito 3/8 y árido fino), cemento Portland P-35. Tos los materiales fueron suministrados por la UEB de Prefabricado y Premezclado de Moa.

Las características del áridos fino y grueso se muestran en las tablas 2.3 a la 2.6. Todos los materiales se consideran conforme según Norma Cubana NC 251 (NC 251, 2013).

Tabla 2.3. Composición granulométrica del árido grueso

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

Tabla 2.4. Características físico – mecánicas del árido grueso

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

Tabla 2.5. Composición granulométrica del árido fino

Diámetro del tamiz, mm	% pasado	Especificaciones
9,52	100	100
4,76	100	90 – 100
2,38	86	70 – 100
1,19	56	45 – 80
0,59	34	25 – 60
0,297	23	10 – 30
0,149	9	2 – 10

Tabla 2.6. Características físico – mecánicas de los áridos finos

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

2.5. Fabricación de bloques huecos de hormigón

Se realizó la producción de los bloques huecos de hormigón en la UEB de Prefabricado y Premezclado de Moa. Se utilizó las materias primas caracterizadas anteriormente, con una dosificación utilizada en su producción, pero con sustitución de un 50 % de cemento P-35 por tobas zeolitizadas activadas térmicamente. El volumen de material utilizado se muestra en la tabla 2.7.

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

Tabla 2.7. Dosificación utilizada para cada bloque

Materiales	Imagen	Dosificación volumétrica en partes.	Relación porcentual, %
Arena		2	20

Grava 3/8		4	40
Cemento P-35		1.5	15
Tobas zeolitizadas activadas		1.5	15

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

Los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón fueron:

- Resistencia a la compresión a los 7 días.
- Absorción de agua.
- Dimensiones del bloque

2.6.1 Ensayo de resistencia a la compresión

En el ensayo de resistencia a la compresión de cada bloque se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales en una prensa hidráulica de 100 toneladas (Figura 2.10).

Para ello el bloque se recubrió con una capa de cemento P-35 (Figura 2.11) de manera que se lograran dos caras planas para asegurar la compresión en la mayor área posible en el bloque. El bloque se colocó entre los platos de 30x30 cm de la prensa, cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión. Los platos se guiaron sin fricción apreciable durante el ensayo para poder mantener siempre la misma proyección horizontal. Uno de los

platos se mantuvo ligeramente inclinado con el objetivo de obtener un perfecto contacto con el bloque.

La resistencia a la compresión de cada bloque ($R'i$) se calcula por medio de la siguiente expresión: $R'i = Fj / aj$

Donde:

$R'i$ resistencia a la compresión de cada bloque (MPa)

Fj carga de rotura

aj área de la sección bruta del bloque



Figura 2.10. Prensa Hidráulica de 100 t



Figura 2.11. Recubrimiento de los bordes del bloque con una capa de cemento P-35

2.6.2. Absorción de agua

El ensayo de absorción se realizó con el objetivo de determinar la capacidad de los bloques para absorber una determinada cantidad de agua, donde deberán cumplir con los valores máximos según la categoría de estos, fijados en la norma. Se determina colocando los bloques en la estufa 24 horas a una temperatura aproximadamente de 100 °C y luego pesándolos, después se colocan en un recipiente lleno 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)

2.6.3. Determinación de las dimensiones del bloque

Las dimensiones de cada bloque de hormigón ensayado es una media de cada seis bloques en cada edad de ensayo. Los bloques deberán adaptarse preferentemente en sus dimensiones nominales y de fabricación, a los valores establecidos en la Tabla 2.8. El espesor efectivo de las paredes

exteriores y tabiques de los bloques no podrá ser inferior a 20 mm en ningún punto de estos, incluso en las paredes cizalladas.

Tabla 2.8. Dimensiones y tolerancia admisibles según NC 247: (NC 247, 2010)

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

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

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

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

Conclusiones del capítulo 2

- Las muestras de tobas zeolitizadas fueron seleccionadas a partir del conocimiento de su reactividad puzolánica.
- Las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicados en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos según las normalizados.
- Los bloques para los ensayos no presentaron grietas visibles, sus aristas estaban vivas, no se presentaron descorchados, sus caras estaban aparentemente paralelas y no le faltaron las esquinas.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización química y mineralógica de las tobas calcinadas y la resistencia a compresión de los bloques huecos de hormigón, donde se sustituye un 50 % de cemento por tobas zeolitizadas calcinadas. Finalmente se realiza un análisis para incrementar la producción de bloques huecos de hormigón en el municipio.

3.1 Resultados de la caracterización granulométrica del material obtenido en el proceso de molienda

La norma NC TS 528:2017 establece un valor máximo de 34 % retenido en el tamiz 45 μm , para que una puzolana natural o calcinada pueda ser empleadas como sustituto parcial del cemento. En este caso, se logró que el material tobáceo calcinado pasara en más del 80% por el tamiz 45 μm , característica granulométrica adecuada según lo establecido en la referida norma.

3.2. Análisis de los resultados obtenidos en bloques huecos de hormigón

En la figura 3.1. se presentan una imagen de los bloques huecos de hormigón sometidos a los ensayos de resistencia a la compresión, pruebas de dimensiones y absorción de agua.



Figura 3.1. Bloques huecos de hormigón elaborados con 50 % de tobas zeolitizadas por cemento Portland P-35.

3.2.1. Resultados de la desviación típica de las dimensiones de los bloques

Las desviaciones de las dimensiones de los bloques ensayados se presentan en la tabla 3.1. Los resultados de las dimensiones de cada bloque hueco de hormigón ensayado en una media de cada

seis bloques para cada edad. Como se observa, las desviaciones fueron menor que 3 mm en todas las aristas.

Tabla 3.1. Desviaciones típicas promedios en las dimensiones de los bloques

Tipo	Longitud (± 3 mm)	Ancho (± 3 mm)	Altura (± 3 mm)
Bloque tipo II	395	145	195
Valores para los bloques ensayados	397	145	197

3.2.2. Resultados de la resistencia a la compresión en bloques huecos de hormigón

En la figura 3.1 se presenta la resistencia promedio de 6 bloques huecos de hormigón de 395×145×195 mm donde se sustituye el 50 % de cemento Portland P-35 por tobas zeolitizadas calcinadas a 350 °C. Como se observa, los bloques ensayados cumplen satisfactoriamente con la resistencia mínima establecida en la NC 247: 2010 — Bloques huecos de hormigón — Especificaciones para bloques de tipo II, la cual especifica que el valor mínimo de resistencia de 4 MPa a la compresión a la edad de 7 días.

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

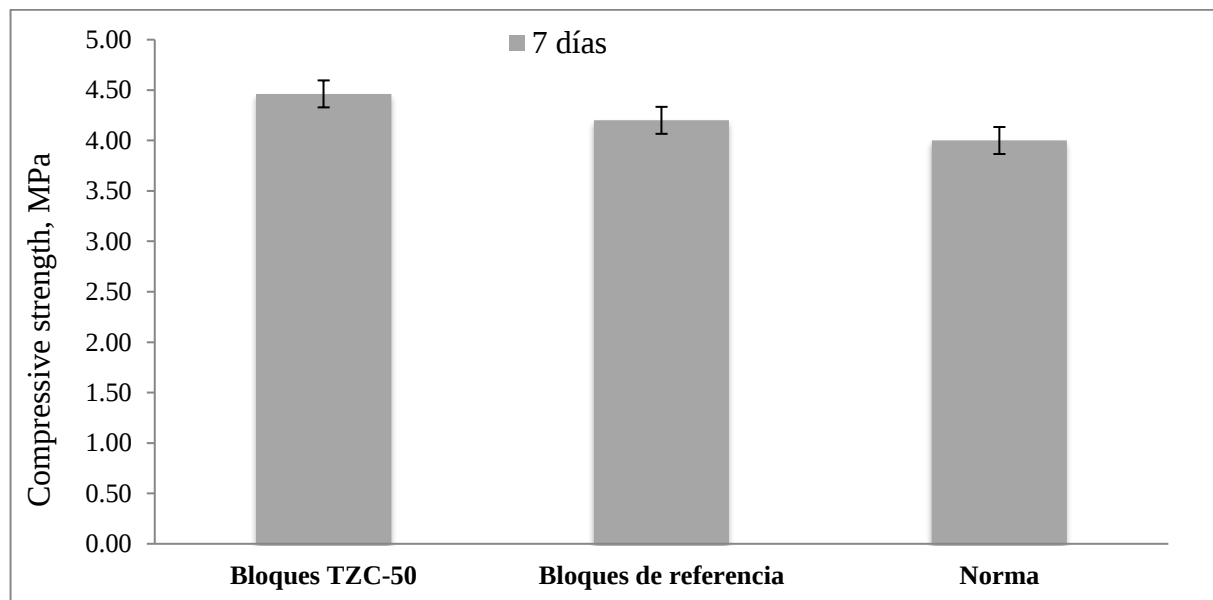


Figura 3.1 Comportamiento de la resistencia a compresión de los bloques huecos de hormigón a la edad de 7 días.

3.2.3. Resultados de la absorción de agua en bloques huecos de hormigón

El ensayo de absorción de los bloques huecos de hormigón que se le realizó a 3 bloques producidos con la dosificación mencionada en el capítulo 2. La tabla 3.1 muestra los resultados del ensayo de absorción de los bloques huecos de hormigón y al patrón.

Como se puede observar en la Figura 3.2, la muestra ensayada cumple con lo establecido en la NC 247: 2010 — Bloques huecos de hormigón — Especificaciones, la cual indica que para este tipo de bloques el porcentaje de absorción debe ser menor que 10, aunque se observa que la absorción con respecto a los bloques de referencia es ligeramente superior que el valor promedio del patrón de referencia, lo cual puede estar dado por la elevada superficie específica de la tobas zeolitizada calcinada que compone el 50 % del aglomerante.

Tabla 3.1: Absorción de los bloques huecos de hormigón

Muestras analizadas	Masa, g		Absorción, %
	Masa seca	Masa húmeda	
Bloque 1	7.34	7.98	8.7
Bloque 2	7.45	8.12	9.0
Bloque 3	7.42	8.05	8.5
Promedio			8.7

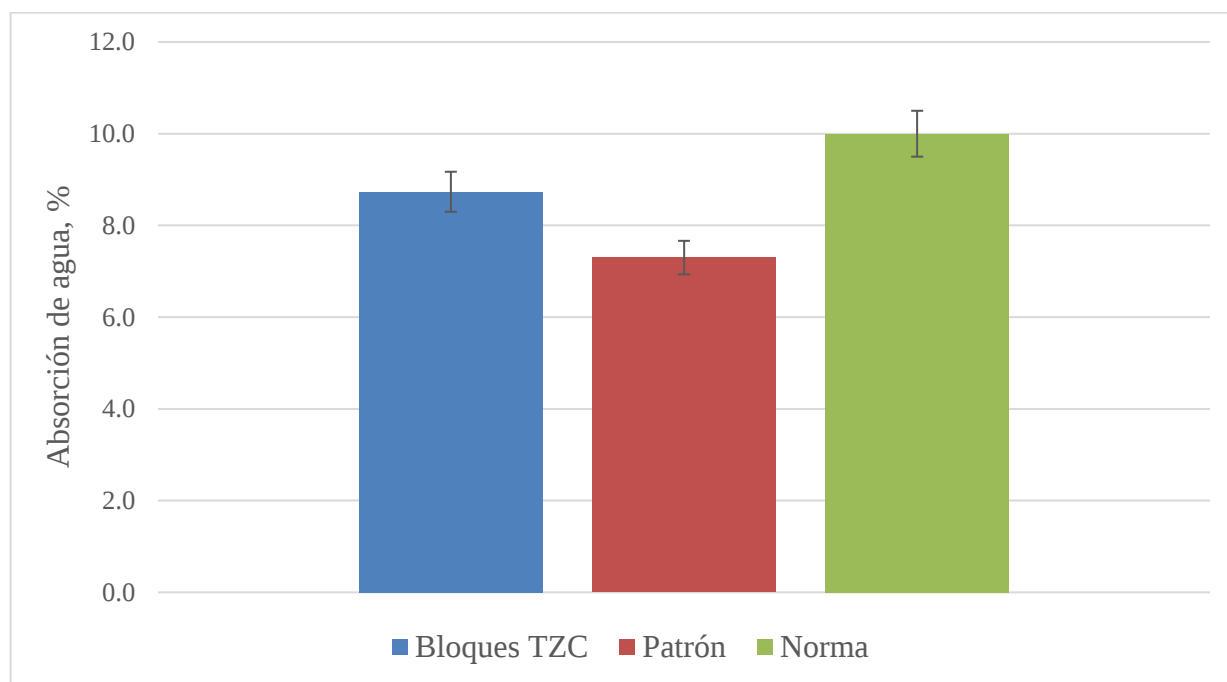


Figura 3.2. Comparación de la absorción de agua de los bloques elaborados con respecto al patrón y la norma.

3.3. Alternativa para la producción de bloques huecos de hormigón a partir de tobas zeolitizadas activadas térmicamente

Aunque el empleo de MCS como extensores de cemento es una alternativa empleada en Cuba, esta ha estado centrada solamente en el uso de tobas zeolitizadas debido a sus propiedades puzolánicas (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). Las tobas zeolitizadas 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 1340:2021 (NC/CTN22, 2021); cantidades superiores pueden provocar el detrimento de las propiedades mecánicas (Poon et al., 1999). Por ello, la variante de activación térmica puede incrementar los niveles de sustitución.

De acuerdo con la investigación de realizada por Mejías (Mejías Paumier, 2020), se proponen alternativas para incrementar la producción de cemento. Dentro de las propuestas alcanzables a corto plazo se destacan:

- Disminución de la cantidad de cemento Portland con 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.
- Selección de materias primas, sobre la base de criterios técnicos y socioeconómicos, evitando competencia de mercado para otras aplicaciones ya establecidas y valorando la explotación racional de los recursos naturales.
- La producción local de cementos mezclados posibilita incrementar los volúmenes de producción con el propósito de satisfacer la demanda.

Esta última propuesta, se basa precisamente en la búsqueda de soluciones locales que permitan incrementar los volúmenes de aglomerante. Si existen facilidades e instalaciones previstas para otras aplicaciones, pero están hoy subutilizadas y pueden trabajar con los parámetros similares a la de obtención de materiales cementicios suplementarios, es aún más fácil concretar soluciones a más corto plazo.

En el Centro de Investigación del Níquel existe una planta piloto, que está constituida por varios equipos que pueden emplearse para tales producciones. En el caso particular de este trabajo, la idea se centra en el aprovechamiento del horno de tambor rotario para el secado (Figura 3.3), el cual

trabaja a una temperatura superior de 300 °C, por lo que a partir de estudios técnicos preliminares se plantea que es posible activar térmicamente las tobas zeolitizadas.

La materia prima tobácea se extrae del depósito y serán transportadas hasta la plazoleta de homogenización de mineral de la Planta Piloto. El material será sometido a la reducción de tamaño de partículas mediante un triturador de mandíbulas y luego sometido al proceso de activación térmica en el horno de tambor rotatorio. El material activado será enviado mediante un transportador hasta el molino de bolas, el cual reducirá a un tamaño de partículas de 90 % por debajo de 0,09 mm y el 70 % debe estar por debajo de la clase 0,045 mm.

Posteriormente, el material activado y molido se enviará a los silos para ser distribuidos como material cementicio suplementario, el cual será enviado a la planta de Prefabricados de la UEB de Prefabricado y Premezclado de Moa para realizar las diferentes formulaciones de materiales para la construcción. A continuación, se presenta el flujo tecnológico propuesto (figura 3.3).

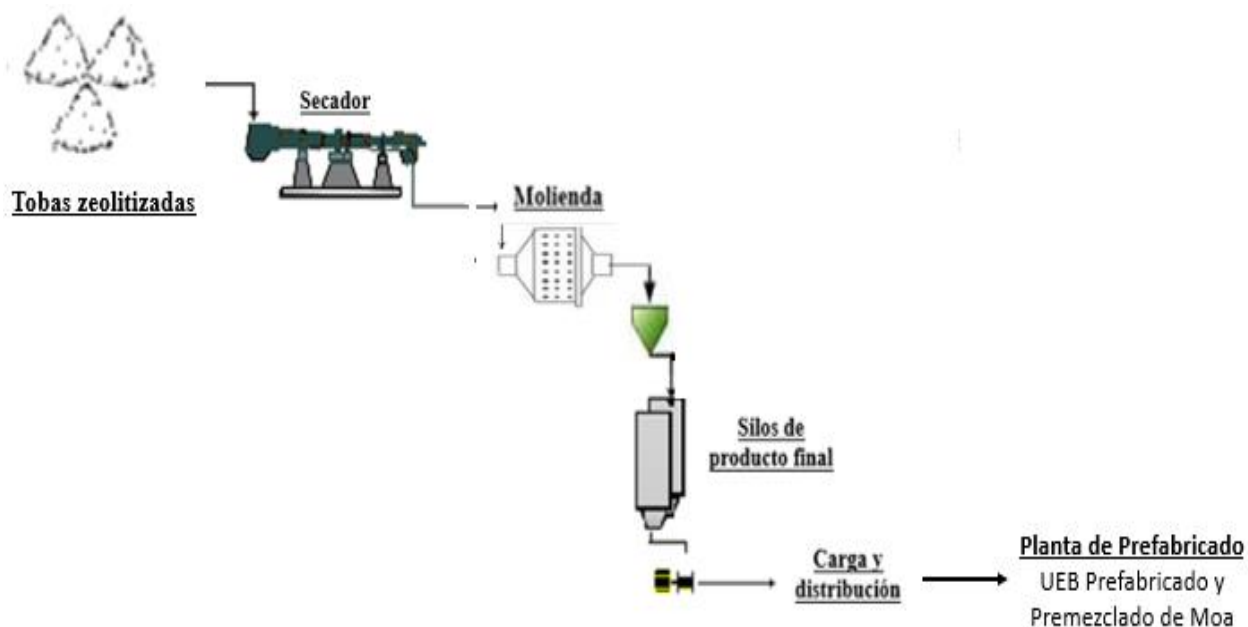


Figura 3.3. Flujo de la planta piloto del CEDINIQ adaptado para la activación térmica de tobas zeolitizadas

Con esta tecnología es posible producir material para sustituir el 50 % de material aglomerante que se emplea en la actualidad para producir bloques huecos de hormigón, los cuales pueden impulsar el programa de la vivienda en el municipio y favorecería a sustentar la creciente demanda de prefabricados, especialmente, cuando la principal dificultad que presenta la producción de estos materiales es el déficit del cemento.

Conclusiones del capítulo 3

- Los bloques huecos de hormigón fabricados con sustitución de tobas activadas térmicamente por cemento P-35 cumplen con los parámetros normalizados para su tipo.
- La propuesta de utilización de las facilidades del Centro de Investigaciones del Níquel para la activación térmica y la producción de materiales cementicios suplementarios a partir de tobas zeolitizadas puede constituir una alternativa alentadora para los programas de construcción de viviendas y otras obras sociales en el territorio.

CONCLUSIONES

Se evaluaron las prestaciones de bloques huecos de hormigón elaborados con 50 % de tobas zeolitizadas activadas térmicamente a 350 °C, 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 tobas zeolitizadas tratadas a 350 °C en la producción de bloques huecos de hormigón muestra un escenario alentador para la producción de materiales de construcción en Moa, con resistencia a la compresión a los 7 días y absorción de agua dentro de los límites establecidos en la norma.
- La activación de tobas zeolitizadas en el sistema de secado de la planta de piloto del Centro de Investigaciones del Níquel constituye una alternativa promisorio para incrementar los volúmenes productivos de materiales cementicios suplementarios para su aplicación en el programa de la vivienda.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de este trabajo se presentan a continuación:

- Realizar una completa evaluación de los bloques huecos de hormigón para corregir la formulación.
- Evaluar la tecnología de secado existente en la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel para la activación de las tobas zeolitizadas y lograr una producción piloto de bloques para el programa de la vivienda en Moa.

.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almenares-Reyes, R. S. (2011). *Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como adiciones puzolánicas* [Tesis de Maestría]. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Almenares-Reyes, R. S. (2017). *Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Batista, R. (2007). *Valoración del Potencial de Los Recursos Minerales para la Industria del Cemento en Cuba*. UCLV: Marta Abreu de Las Villas.
- 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*.
- CEMBUREAU. (2013). *The role of cement in the 2050 low carbon economy*.
- CEMBUREAU. (2014). *Activity Report 2014*. www.cembureau.eu
- 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>
- Figueredo Reinaldo, O., Fuentes Puebla, T., Fariñas Acosta, L., Fonseca Sosa, C., & Zamora Oria, O. (2023). ¿Cuál es la situación actual y perspectivas de la producción de materiales de la construcción? *Cubadebate*. <http://www.cubadebate.cu/noticias/2023/06/01/cual-es-la-situacion-actual-y-perspectivas-de-la-produccion-de-materiales-de-la-construccion/>
- Frazao-Ndumba, M., & Coello-velázquez, A. L. (2007). *Caracterización mineralógica de tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes para su beneficio por molienda diferencial* *Mineralogical characterization of zeolitic tuffs from Caimanes deposit for its beneficiation by differential mill*. 1–18.
- 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]. In *Metalurgia y Electromecánica*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Guerra González, Y. (2015). *EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CALCINACIÓN DE LAS TOBAS ZEOLITIZADAS DEL YACIMIENTO CAIMANES COMO MATERIAL PUZOLÁNICO*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- 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
- Juenger, M. C. G., & Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78(CEMCON-04938), 10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
- 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.
- Mejías Paumier, Y. (2020). *Evaluación de las prestaciones de bloques huecos de hormigón producidos con cemento LC³*. Universidad de Moa.
- NC/CTN22. (2021). *NC 1340: 2021. Cement — Specifications*. Oficina Nacional de Normalización (NC).
- NC 247. (2010). *Bloques huecos de hormigón - Especificaciones*. Oficina Nacional de Normalización (NC). www.nconline.cubaindustria.cu
- NC 251. (2013). *Áridos para hormigones hidráulicos—Requisitos*. Oficina Nacional de Normalización (NC). www.nconline.cubaindustria.cu
- NC TS 528:2013. (2013). *Cemento hidráulico - Puzolanas- Especificaciones*. Oficina Nacional de Normalización (NC).
- 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.
- 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.
- Rosell, M. ., Gayoso, R. ., & Calvo, B. (2006). Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones. *Boletín Geológico Minero*, 117(4), 783–792. www.igme.es/internet/boletin/2006/117_4_2006/Art.14.pdf
- Sánchez Sanrregré, R. (2023). *Cinética de Molienda de las Tobas Zeolitizadas del Yacimiento Caimanes Tratadas Térmicamente*. Universidad de Moa.
- 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. (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>
- U.S. Geological Survey. (2024). *Mineral commodity summaries 2023: U.S. Geological Survey*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3133/mcs2024>
- 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.wbcscement.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.wbcscservers.org/>
- 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.