



Facultad Metalurgia - Electromecánica
Departamento de Metalurgia - Química

EMPLEO DE TOBAS EN LA PRODUCCIÓN DE BLOQUES HUECOS DE HORMIGÓN

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
EN METALURGIA Y MATERIALES**

Autor: Alain Morales Serrano

Firma.....

Tutores: Ms.C. Roger Samuel Almenares Reyes

Firma.....

Dr. C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez

Firma.....

Ing. Yudilainis Urrutia Pérez

Firma.....

Moa, 2017

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todos los que de una forma u otra tuvieron fe de que mi sueño se hiciera realidad en especial a:

....A mi querida madre Marlenis Serrano Pérez por su amor, su confianza y sacrificio durante todos estos años de estudios.

....A mi novia Adriana Guerrero Fonseca por su apoyo, por su amor y entera confianza en que yo si podía realizar mi sueño.

....A mis suegros y mi cuñado, por el apoyo y la confianza que ha depositado en mí para la realización del trabajo.

....A mi hermana Lisbeth Morales Serrano por depositar en mi toda su confianza y ayudarme a seguir adelante.

....A mis sobrinos Leyanis Ramírez Morales y Leandro Ramírez Morales que fueron la mayor motivación para la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente:

A la revolución cubana por darme la oportunidad de formarme como un profesional.

A mi tutor Ms.C. Roger Samuel Almenares Reyes por su constancia, por haber sido la fuente de donde surgió este trabajo y por la confianza que ha depositado en mí para la realización del mismo.

A mi novia por su atención, consejos, apoyo y comprensión.

A mis padres, a mi abuela, a mi hermana, a mis tíos, a mis sobrinos, a mis primos. A mi gran familia en general.

A mis suegros y mi cuñado, por sus consejos, sus regaños y por dejar a un lado lo suyo para apoyarme y ayudarme.

Por la orientación y apoyo que me brindaron.

A todos aquellos que han hecho posible la culminación de este trabajo.

Muchas gracias.

PENSAMIENTO

“Todos poseemos más poderes de los que hemos soñado tener. Podemos hacer cosas que nunca imaginamos llegar a realizar. No existen limitaciones excepto las que tenemos en nuestras mentes que nos impiden hacerla. No piense que usted no puede. Piense que sí puede”

Darwin Kingsley

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluaron las propiedades físico – mecánicas de bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye 15 % de cemento por materiales tobáceos para su utilización en la industria de materiales de la construcción en Moa. Las tobas vítreas y zeolitizadas fueron caracterizadas desde el punto de vista químico y mineralógico mediante fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X, respectivamente. Se determinó la resistencia a la compresión y la absorción de agua en bloques huecos de hormigón de tipo II y III. Desde el punto de vista químico y mineralógico los materiales tobáceos empleados en la sustitución de aglomerantes en los bloques huecos de hormigón reúnen las condiciones para ser considerados potencialmente materiales puzolánicos. La suma del contenido de óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, es superior al 70 % que se establece como valor mínimo en la norma NC TS 528:2013 para las puzolanas naturales en Cuba. La sustitución de 15 % de cemento Portland P-35, por tobas vítreas o zeolitizadas, en la producción de bloques huecos de hormigón muestra un excelente potencial por la adecuada resistencia a la compresión y la absorción de agua, constituyendo así una alternativa alentadora para la industria de la construcción local.

ABSTRACT

In the present work the physic-mechanical properties of concrete hollow blocks made with binders were evaluated, where 15 % of cement is replaced by tuff materials for use in the construction materials industry. The vitreous and zeolitized tuff were chemically and mineralogical characterized by X-ray fluorescence and X-ray diffraction, respectively. The compressive strength and the water absorption were determined in concrete blocks type II and III. From the chemical and mineralogical point of view, the tuff materials used in the substitution of blend in the hollow blocks of concrete meet the conditions to be considered potentially pozzolanic materials. The sum of the content of silicon oxide, aluminum oxide and iron oxide is more than 70 % which is established as a minimum value in the standard NC TS 528:2013 for natural pozzolans. The substitution of 15 % of Portland cement P-35 by vitreous and zeolitized tuffs in the production of concrete hollow blocks shows an excellent potential for the adequate compressive strength and the water absorption, thus constituting an encouraging alternative for the local construction industry.

ÍNDICE	PÁG.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	5
1.1 Contexto actual de la producción de cemento Portland y Hormigón.....	5
1.2 Materiales cementicios suplementarios	7
1.2.1 Clasificación de los MCS	7
1.2.2 Ventajas, limitaciones y disponibilidad.....	8
1.3. Tobas vítreas y zeolitizadas en Cuba	10
1.3.1 Tobas vítreas.....	10
1.3.2 Tobas zeolitizadas	10
1.4 Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas como adición al cemento y hormigón.....	11
1.5 Los bloques huecos de hormigón. Generalidades.	14
1.5.1 Características de los hormigones para la producción de bloques	15
Conclusiones parciales	16
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
2.1 Selección de los depósitos de materiales tobáceos de la provincia Holguín.....	17
2.1.1 Tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo.....	17
2.1.2 Tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes	18
2.2 Toma y preparación de la muestra	18
2.3 Determinación de la composición granulométrica.....	20
2.4 Determinación de la composición química.....	20
2.5 Determinación de la composición mineralógica	21
2.6 Caracterización de las materias primas para la producción de los bloques huecos de hormigón.....	21
2.7 Fabricación de bloques huecos de hormigón.....	24

2.8 Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón	25
2.8.1 Ensayo de resistencia a la compresión	26
2.8.2 Ensayo de absorción de agua	27
3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	30
3.1 Resultados de la caracterización granulométrica del material obtenido en el proceso de molienda	30
3.2 Resultados de la caracterización química.....	31
3.3 Composición mineralógica	32
3.4 Análisis de los resultados obtenidos en bloques huecos de hormigón	33
3.4.1 Análisis de los resultados del ensayo de absorción de agua.....	33
3.4.2 Resultados del ensayo de resistencia a compresión	35
3.5 Valoración socioeconómica preliminar	37
CONCLUSIONES	40
RECOMENDACIONES	41
REFERENCIAS BLIOGRÁFICAS	42

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad las necesidades del hombre y las inventivas de este para darle solución a los problemas constructivos, siempre han estado presentes en el devenir de los tiempos; siendo una de las más importantes la actividad constructiva, con vistas a dar mayor seguridad y confort al seno familiar. Unido a esto están los niveles sorprendentes en el desarrollo científico – técnico que ha alcanzado la humanidad en los últimos tiempos, lo cual repercute directamente en todas las esferas de la vida económica, política y social de los países. La población mundial crece anualmente, por lo que se incrementa la demanda de vivienda y otras necesidades.

En Cuba, la situación de la vivienda, junto a la necesidad de desarrollar otras obras sociales es una problemática que crece gradualmente; visto principalmente por el deterioro constante de las existentes y el azote de fenómenos naturales que sin duda, han puesto en desventaja las posibilidades de una respuesta rápida a tal problema, debido a la notable escasez de materiales de construcción a partir de diversas fuentes. Una manera de compensar este déficit es mediante el aprovechamiento de potencialidades nacionales para el incremento de los volúmenes de material, que permitan aumentar las producciones y en la medida de lo posible la calidad de los productos (Almenares-Reyes, 2011).

Es práctica actual el empleo de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) en diversas aplicaciones para la producción de cemento y adiciones al hormigón. Entre los principales MCS para estas aplicaciones se encuentran las cenizas volantes, escorias granuladas de alto horno, residuos orgánicos, arcillas calcinadas y puzolanas naturales (Snellings, 2011 ; Ramezaniapour, 2014 ; ACI, 2001a, 2001b).

Dentro de las estrategias para suplir el esperado crecimiento de la demanda de cemento en nuestro país, se reconoce la importancia de analizar el potencial empleo de materiales tobáceos localmente disponibles como materiales puzolánicos, especialmente las tobas vítreas y zeolitizadas.

De acuerdo a las características geológicas de Cuba, existe una amplia disponibilidad en el país y particularmente en la provincia Holguín de materiales tobáceos entre los que se encuentra las tobas vítreas y zeolitizadas (Batista, 2011 ; Batista, Coutin, 2013 ; Batista, 2007), las cuales han sido previamente estudiadas como materiales puzolánicos con resultados satisfactorios (Rosell, 2010 ; Rosell et al., 2006 ; Costafreda et al., 2011 ; Almenares-Reyes, 2011). En la mayoría de los casos, su utilización ha estado limitada, en parte, por el bajo grado de los estudios que avalen su utilización y por otro lado la baja reactividad puzolánica no permite elevados niveles de sustitución en el aglomerante. Sin embargo, se han obtenido resultados satisfactorios cuando se aplica a nivel local y/o territorial.

En trabajos previos relacionados con la evaluación de puzolanas en la provincia de Holguín (Almenares-Reyes, 2011; González Verdecia, 2015; Guerra González, 2015), se ha demostrado que con la sustitución de hasta un 15 % de tobas vítreas y/o zeolitizadas se obtienen aglomerantes donde no se compromete la resistencia de los morteros, según se establece en la NC 96 (NC 96: 2011, 2011). Sin embargo, este tipo de aglomerante, donde se sustituye el 15 % por material tobáceo no ha sido utilizado en aplicaciones estructurales ni de albañilería.

Lo anteriormente expuesto da lugar a la **situación problemática** de la investigación, expresada como la necesidad de aprovechar las potencialidades los materiales tobáceos del territorio en la producción de materiales de la construcción, unido a la necesidad de suplir el déficit de aglomerante en la industria del prefabricado como principal consumidor de la producción nacional de cemento.

Problema de la investigación

El uso de materiales tobáceos de la región de Moa como materiales cementicios suplementarios en la producción de prefabricados de hormigón

está limitado, en parte, por el insuficiente conocimiento de las propiedades físico – mecánicas de los bloques huecos de hormigón.

Objeto de estudio

Formulación de bloques huecos de hormigón a partir de la sustitución de 15 % de material tobáceo por cemento.

Campo de acción

Propiedades físico – mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados con un 15 % de sustitución de tobas por cemento.

Objetivo general

Evaluar las propiedades físico – mecánicas de bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye 15 % de cemento por materiales tobáceos para su utilización en la industria de materiales de la construcción en Moa.

Hipótesis

Si las propiedades físico – mecánicas de los de bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye 15 % de cemento por materiales tobáceos 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.

Objetivos específicos

- Caracterizar desde el punto de vista químico y mineralógico las tobas vítreas del depósito Sagua de Tánamo y las tobas zeolitizadas del depósito Caimanes.
- Determinar la absorción de agua de los bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye 15 % de cemento por materiales tobáceos.
- Determinar la resistencia a la compresión de los bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye 15 % de cemento por materiales tobáceos.

Tareas de la investigación

- Recopilación y análisis de los trabajos relacionados con los materiales de construcción y puzolánicos, así como la exploración de la problemática mundial, nacional y local de los materiales de construcción.
- Preparación de las muestras; apoyado en la trituración, homogenización, molienda y cribado de las mismas.
- Caracterización de la materia prima desde el punto de vista granulométrico, químico y mineralógico y su comparación con los parámetros normalizados.
- Dosificación de las tobas vítreas y zeolitizadas en el cemento mezclado para la elaboración de bloque hueco de hormigón.
- Formulación de bloques huecos de hormigón del tipo II (40 cm de largo x 20 cm de alto x 15 cm de ancho) y del tipo III (40 cm de largo x 20 cm de alto x 10 cm de ancho) elaborados con aglomerantes donde se sustituye 15 % de cemento por materiales tobáceos.
- Determinación de la resistencia a la compresión de los bloques huecos de hormigón con sustitución de un 15 % de cemento por tobas vítreas y zeolitizadas a los 7 y 28 días.
- Determinación de la absorción de agua en bloques huecos de hormigón con sustitución de un 15 % de cemento por tobas vítreas y zeolitizadas.

1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1 Contexto actual de la producción de cemento Portland y Hormigón

Las puzolanas se emplean como adiciones al hormigón y principalmente como reemplazo de cemento con el objetivo de elevar las prestaciones a largo plazo. El uso de estos materiales reduce los costos de producción de hormigón. El hormigón es un material compuesto que consiste principalmente de agregados (áridos) dispersos en una matriz cementicia. El uso del hormigón en la construcción es relativamente nuevo comparado con el uso del acero y las rocas.

En la industria de la construcción el hormigón es el material más empleado debido a su bajo costo de producción. La contribución del hormigón a la construcción de edificaciones hace que su producción sea reflejo del desarrollo global (Tironi, 2013 ; Albornoz Muñoz, 2015). El hormigón es el segundo material más usado por el hombre, después del agua. Se estima que por cada habitante del planeta se producen como promedio 3 toneladas de hormigón cada año (Aylard, Hawson, 2002); esto representa el 57 % de todas las producciones antropogénicas, excluyendo los combustibles fósiles y los flujos de desechos (Purnell, 2013). Debido a su relativo bajo costo de producción y versatilidad, no se visualiza en el futuro cercano el remplazo del concreto por ningún otro material.

Al igual que otros productos hechos por el hombre, la fabricación de hormigón lleva asociada una huella ecológica inherente a sus procesos de manufactura. Si se compara con otros materiales de construcción como el acero y la madera, el impacto ambiental que genera es menor en términos de unidad de producción, pero los volúmenes masivos en que es fabricado, lo hacen responsable de cerca del 9 % de las emisiones globales de CO₂ (Purnell, 2013).

Las emisiones de CO₂ relativas al hormigón, corresponden fundamentalmente a las emisiones asociadas al cemento, su principal constituyente (Scrivener, 2014 ; Albornoz Muñoz, 2015). La mayor contribución de la industria del cemento a la huella ecológica del hormigón es a través de la generación de uno de los gases de efecto invernadero más importante, el CO₂. La emisión de CO₂ ocurre a través de la descarbonatación de las materias primas utilizadas en el proceso de manufactura del cemento y el uso de combustibles fósiles como fuentes de energía directa e indirecta. Sobre la base del modelo estándar de producción de cemento usado actualmente y las tecnologías disponibles, se estima que por cada tonelada de cemento producida se emiten entre 0.65 – 0.90 toneladas de CO₂ (Gartner, 2004 ; Damtoft et al., 2008 ; Habert et al., 2010), lo que llevado a los datos de producción anual, sitúan a la industria del cemento como responsable de la emisión de entre 5 – 8 % del CO₂ a escala global (WBCD - CSI, 2012 ; Flatt et al., 2012 ; Müller, Harnisch, 2008).

El incremento de la demanda de los últimos años tiene su fundamento en el desarrollo y crecimiento de las llamadas “economías emergentes” que necesitan construir la infraestructura de base para la industrialización y urbanización en sus países. Solamente en 2010, países de Suramérica, África y Asia generaron el 85 % de la producción anual de cemento (John, 2002 ; CEMBUREAU, 2010). Las predicciones para el 2050 de la World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) indican que en un escenario de alta demanda el incremento de la producción alcanzará los 4400 millones de toneladas de cemento, otros pronósticos sitúan la demanda por encima de los 5000 millones (Taylor et al., 2006 ; Müller, Harnisch, 2008). El mencionado incremento elevará de manera consecuente los niveles de emisiones de CO₂, si se mantienen las condiciones de producción actuales (Vizcaíno, 2014).

Ante las preocupaciones existentes con respecto al cambio climático, diversos países y corporaciones reconocen la necesidad de implementar políticas que contribuyan a mitigar el impacto ambiental y crear un modelo sostenible para la producción de cemento. Una de las tendencias actuales es la reducción del factor de clínquer mediante el empleo de materiales cementicios suplementarios (WBCSD/IEA, 2009 ; Hendriks et al., 1998 ; WBCSD, 2015).

El escenario futuro donde los MCS comenzarán a ser explotados con más intensidad y las reservas y potencial producción de los productos tradicionalmente más empleados como puzolanas no podrán suplir su creciente demanda, es necesario potenciar el desarrollo de investigaciones destinadas a encontrar, caracterizar y desarrollar nuevas fuentes de materiales puzolánicos, basadas principalmente en el aprovechamiento de los recursos disponibles en cada región o país, en concordancia con una política de desarrollo sustentable (Alujas, 2010).

1.2 Materiales cementicios suplementarios

Los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) se definen como materiales que contribuyen a las propiedades físico-químicas del hormigón endurecido.

Actualmente en la sustitución del clínquer la mayor parte de los materiales puzolánicos empleados a escala industrial lo constituyen subproductos del sector industrial como las cenizas volantes (subproducto de la quema del carbón en las plantas de generación eléctrica) y el humo de sílice (subproducto de la producción de silicio y ferrosilicio). No obstante debe destacarse que a largo plazo la existencia de subproductos no satisface la creciente demanda de materiales cementicios suplementarios que estará asociada al aumento en la producción de cemento en los próximos años (Martirena, 2004). Sin embargo, existen otras fuentes de reservas de materiales puzolánicos, como las puzolanas naturales, que presentan perspectivas para ser empleadas como MCS.

1.2.1 Clasificación de los MCS

Los materiales cementicios suplementarios se clasifican en aglomerantes hidráulicos y materiales puzolánicos:

Los aglomerantes hidráulicos se caracterizan por reaccionar con agua formando productos de hidratación que aportan propiedades cementantes y aglomerantes puzolánicos.

Las puzolanas son materiales silíceos o aluminio-silíceos que por sí mismo poseen poco o ningún valor cementicio pero que finamente molido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el Ca(OH)_2 a temperatura

ordinaria y forma compuestos de propiedades cementantes. Las puzolanas pueden ser de origen natural o de origen artificial (Massazza, 1993). De acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM C 618-08 del 2008 (ASTM, 2008) para puzolanas naturales o artificiales y su empleo en hormigones, la composición química debe ser tal que la suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 expresados como por ciento en masa, sea superior al 70 %. Las características estructurales y morfológicas también influyen en el potencial carácter puzolánico. La presencia de fases aluminosilíceas con un alto grado de desorden estructural (criterio estructural) y con una elevada superficie específica (criterio morfológico), son características que, actuando de manera combinada, determinan de forma directa la capacidad de reacción puzolánica de un material dado (Alujas, 2010).

Las puzolanas se pueden clasificar en dos grandes grupos: naturales (calcinadas o no) y artificiales (subproductos industriales) como se puede observar en la figura 1.1.

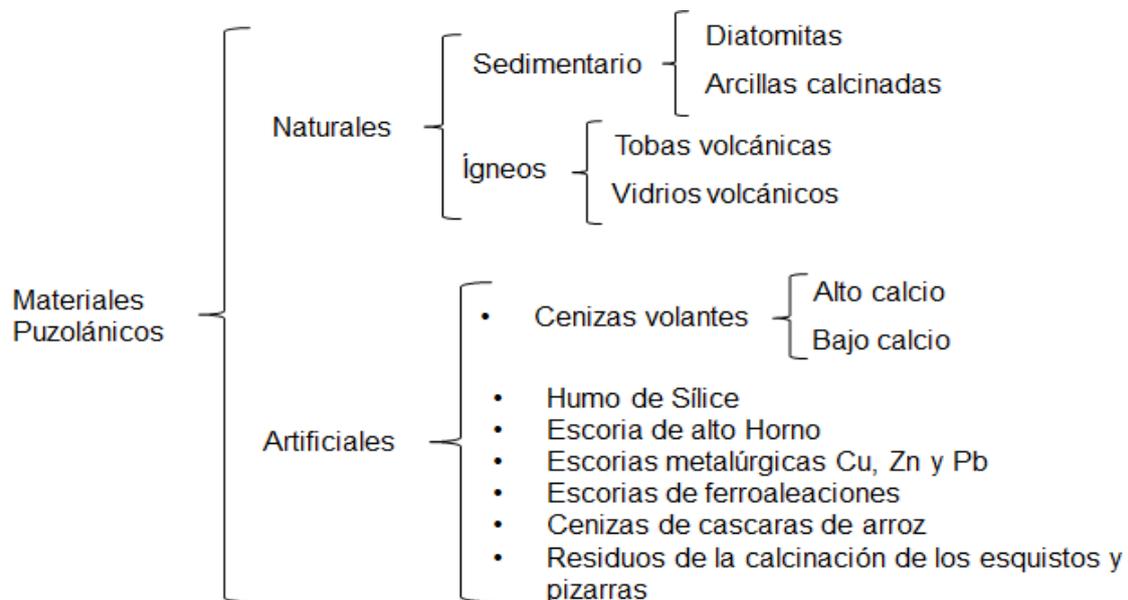


Figura 1.1. Clasificación de las puzolanas. Fuentes: (Guerra González, 2015)

1.2.2 Ventajas, limitaciones y disponibilidad

A continuación se hace un resumen de los materiales cementicios suplementarios más empleados, ventajas y limitaciones de su uso, y su disponibilidad a nivel mundial (Tabla 1.2). En la tabla se muestra que uno de los materiales de mayor disponibilidad son las puzolanas naturales. En Cuba el estudio de las fuentes de MCS se ha centrado, casi exclusivamente, en el uso

de materiales tobáceos que, con mayor o menor grado de zeolitización, abundan en el territorio nacional (Rabilero, 1988). Nuestro país presenta amplios recursos prospectados de tobas zeolitizadas, que se estiman en el orden de los 360 MMt de recursos demostrados y hasta 500 MMt de recursos inferidos (Batista, Coutin, 2013).

Tabla 1.1. Materiales cementicios suplementarios. Ventajas, limitaciones y disponibilidad

Material cementicio suplementario (Fuente)	Ventajas	Limitaciones	Disponibilidad (Reservas o producción anual año 2014*, 2015**)
Cenizas volantes (Cenizas de los hornos de carbón)	Baja demanda de agua. Mejora la trabajabilidad. Altas resistencias a largo plazo, mejora la durabilidad (depende del uso)	Baja resistencia a edades tempranas, la disponibilidad puede reducirse por el cambio en fuentes del combustible por el sector de la energía	*900 millones de toneladas. Tiende a reducirse la producción.
Escorias de alto horno (Producción de hierro)	Alta resistencia a largo plazo y mejorada la resistencia al ataque químico	Baja resistencia a edades tempranas y alta demanda de energía eléctrica para la molienda	**300 a 360 millones de toneladas. Varía en dependencia de la producción de hierro.
Puzolanas naturales (Rocas volcánicas y algunas sedimentarias)	Contribuye al desarrollo de resistencia a largo plazo y mejorar la resistencia al ataque químico	Baja resistencia a edades tempranas reducida. Las características del cemento pueden variar perceptiblemente	Variable regionalmente. Grandes > 1000 millones de toneladas en recursos.
Metacaolín o arcillas calcinadas (Calcinación de arcillas caoliníticas puras)	Alta resistencia a edades tempranas y avanzadas, mejora de la resistencia al ataque químico	Requiere energía adicional para la calcinación	Amplia disponibilidad, diseminados por todo el mundo.
Caliza (Explotación minera de piedra caliza)	Mejora de la laborabilidad. Aumenta la resistencia a edades tempranas.	Para mantener la resistencia puede requerir mayor energía en la molienda de clínquer	Fácilmente disponible.

1.3. Tobas vítreas y zeolitizadas en Cuba

1.3.1 Tobas vítreas

Las tobas vítreas en nuestro país son de origen volcano-sedimentario, son tobas de composición ácida y media, gris o cremosa, muy porosa, predominan las tobas de grano fino y medio, en ocasiones algo alteradas a montmorillonita, o a carbonato, e interestratificadas con calizas silicificadas. Han sido probadas para su utilización como:

1. Aislante térmico en la industria cerámica y en otras industrias como el níquel
2. Material filtrante en la purificación de acetileno
3. Lozas antiácidas
4. Medio filtrante en la planta de cloro sosa
5. Relleno de plástico
6. Filtrante de cerveza, jugo de henequén, ron y vino
7. Decapado de metales
8. Medio filtrante en la industria azucarera
9. Floculante en la potabilización de aguas superficiales
10. Limpiador doméstico
11. Como material puzolánico para cemento romano

Sólo cuatro depósitos han sido llevados al máximo grado de estudio en Guantánamo, Granma, Holguín y Matanzas. No obstante por su comportamiento físico - químico y por la extensa área que ocupan estos objetos, se consideran de interés otras 21 acumulaciones (Rodríguez González et al., 2009).

1.3.2 Tobas zeolitizadas

Las tobas zeolitizadas son también de origen volcano-sedimentario. Tienen composición predominante mordenítica-clinoptilítica con variables contenidos de celadonita, montmorillonita, feldespató 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 hasta centenares de metros de potencia, alcanzando gran desarrollo territorial.

Existen más de 50 objetos de tobas zeolitizadas, 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).

1.4 Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas como adición al cemento y hormigón.

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; semi-industriales 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 aditivo 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 sus 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 la 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 tobas 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).

1.5 Los bloques huecos de hormigón. Generalidades.

Los bloques huecos de hormigón es el material moderno más popular para construir todo tipo de edificaciones, 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.

La experiencia internacional en construcción de bloques de hormigón han 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 (NC/CTN37, 2010), 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/m^3 y 2200 kg/m^3 .

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.

1.5.1 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 bloquera 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 la compresión bruta a los 28 días de fraguado 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 (ACI, 2000) 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 Portland 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 puzolanas con cemento.

Conclusiones parciales

- Los factores económicos y regionales hacen necesario la búsqueda y desarrollo de fuentes de materiales puzolánicos que permitan el reemplazo parcial de significativas porciones del contenido de cemento. Las tobas vítreas y tobas zeolitizadas como sustituto del 15 % en el cemento Portland se comporta con buenas propiedades puzolánicas.
- Los bloques huecos de hormigón son unos de los materiales modernos más populares para la construcción, 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 cemento por materiales tobáceos.
- Mediante la verificación de los requisitos establecido en la NC 247: 2010 — Bloques huecos de hormigón — Especificaciones, se puede verificar el posible uso de los bloques huecos de hormigón producidos con sustitución del 15 % de cemento por tobas vítreas y zeolitizadas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder evaluar las tobas vítreas y zeolitizadas como bloque hueco de hormigón se realizaron los ensayos físicos y físico-mecánicos; que establecen los parámetros de calidad para ser empleados en edificaciones y obras de construcción.

Los estudios de caracterización de los yacimientos de los cuales fueron extraídos las muestras y los métodos utilizados para la evaluación de las materias primas se describen en los siguientes acápite.

2.1 Selección de los depósitos de materiales tobáceos de la provincia Holguín

En la provincia de Holguín existen más de 6 depósitos de materiales tobáceos entre los cuales se encuentran el yacimiento Sagua de Tánamo, en la localidad “El Picao”; el yacimiento Caimanes ubicado cerca del poblado Farallones; el yacimiento Guaramanao que se encuentra ubicado a 9 km, al suroeste del poblado de San Andrés; el yacimiento San Andrés que está situado aproximadamente a 3 km al sur del poblado San Andrés, en el asentamiento poblacional conocido por Loma Blanca y los yacimientos de Sagua de Tánamo de Amansa Guapo y el Lireal. La realización de este trabajo se centra en el estudio de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo y las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes.

En el presente acápite se describen las características generales de los yacimientos de tobas vítreas y zeolitizadas objeto de estudio, a partir de los reportes de investigaciones geológicas realizadas.

2.1.1 Tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo

El yacimiento Sagua de Tánamo se localiza a 15 km al Este de la cabecera municipal de Sagua de Tánamo, en la localidad “El Picao”. Este material tobáceo, se caracteriza por ser vitroclástico y vitrocristalocástico, de color

blanco grisáceo, y granulometría fina a media, generalmente, abrasivo al tacto, poroso y ácido por su alto contenido de óxido de silicio. Contiene alrededor de 80 % de vidrio volcánico como promedio, y un 30 % aproximadamente de montmorillonita (Banderas et al., 1997).

2.1.2 Tobas zeolitizadas del yacimiento 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 Noroeste del municipio Moa. 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).

2.2 Toma y preparación de la muestra

Para la realización de la investigación las muestras fueron tomadas en las regiones de Caimanes (Farallones) y Sagua de Tánamo (El Picao).

La muestra de tobas vítreas de Sagua de Tánamo (El Picao) y de tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes de la región de Farallones se tomaron mediante el método por puntos, que consistió en la toma de trozos típicos de la materia prima, con la ayuda de un martillo geológico. El método en cuestión es sencillo y confiable.

Las muestras fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño mediante tres etapas de trituración, cada una por separado. Donde en la primera etapa se utilizó la trituración por impacto de forma manual con un mazo de 2 kg hasta lograr obtener fragmentos de 100 mm aproximadamente. La segunda y la tercera se llevan a cabo en trituradoras de mandíbulas (Figura 2.1 y 2.2); las cuales tienen un diámetro de alimentación de 100 y 25 mm y de descarga de 25 y 5 mm, respectivamente. En la descarga de la tercera etapa del proceso de trituración se realizó la operación de cribado de control con un tamiz de 5 mm. El material retenido en el tamiz es recirculado en la tercera etapa de trituración,

y el cernido, con tamaño inferior a 5 mm, fue trasladado para el Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) y sometido a un proceso de secado en una estufa (Figura 2.3) durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C. El proceso de molienda se realizó en un molino de disco de 30 cm de diámetro (Figura 2.4) situado en el CEDINIQ, para obtener un material con aproximadamente un 66 % de cernido con el tamiz de 0,045 mm; esta fracción se utilizó para realizar los bloques huecos de hormigón.



Figura 2.1. Trituradora de mandíbula TQ (320x165).



Figura 2.2. Trituradora de mandíbula TQ (150x75).



Figura 2.3. Estufa



Figura 2.4. Molino de disco

2.3 Determinación de la composición granulométrica

El análisis granulométrico, de las tobas y el cemento, se llevó a cabo en un analizador de tamaño de partículas; HORIBA LA – 910, con una velocidad de circulación de 6 mL/s y agitación de 6 rps y forma de distribución estándar. Todos los datos quedaron registrados en el sistema instalado en la computadora acoplada al analizador de tamaño de partículas, del cual se obtuvieron las curvas características de tamaño de los materiales.

2.4 Determinación de la composición química

La determinación de la composición química de las muestras de tobas vítreas y zeolitizadas se realizó mediante de fluorescencia de rayos X (FRX) en un equipo de la marca Axios, previamente calibrado y bajo una atmósfera de vacío, el cual se muestra en la figura 2.5. El método consiste en hacer incidir un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al pasar al estado normal emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento, y la intensidad de su fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento en la muestra.



Figura 2.5. Equipo de fluorescencia de rayos X, Axios.

2.5 Determinación de la composición mineralógica

El análisis mineralógico se realizó mediante difracción de rayos X (DRX). El mismo consiste en hacer incidir un haz de rayos X sobre la muestra, y mediante un detector montado en un goniómetro se mide el ángulo donde aparecen los rayos difractados, así como la intensidad de los mismos, basado en la ley de Bragg. Las muestras fueron leídas en un difractómetro de rayos X Phillips X'Pert (Figura 2.6), desde 5 hasta 80 grados 2θ , paso de $0,04^\circ$ en un tiempo de 3 segundos y radiación de Cu. La temperatura se fijó a 25°C .



Figura 2.6. Difractómetro Philips X'Pert

2.6 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 árido grueso (granito 3/8 y árido fino procedentes de Cayo Guam) y polvo de piedra procedente de la cantera Pión en Mayarí). El cemento Portland P-35 fue suministrado por la empresa de cemento de Cienfuegos S.A.

Las características de los materiales mencionados en el párrafo anterior, se muestran en las tablas 2.1 a la 2.5. Todos los materiales se consideran conforme según Norma Cubana NC 251 (NC 251:2013, 2013).

Tabla 2.1. 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 2.2. 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	$\leq 3,00$

Tabla 2.3. 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. 4. Características físico – mecánicas del polvo de piedra

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones
Material más fino que el tamiz 200	%	6,58	$\leq 7,00$
Partículas de arcilla	%	1,50	$\leq 1,00$
Peso específico corriente	g/cm ³	2,77	$\geq 2,50$
Absorción	%	1,80	$\leq 3,00$

Tabla 2.5. Composición granulométrica del polvo de piedra

Diámetro del tamiz, mm	% pasado	Especificaciones
9,52	100	100
4,76	99	90 – 100
2,38	70	70 – 100
1,19	46	45 – 80
0,59	28	25 – 60
0,297	18	10 – 30
0,149	10	2 – 10
0,074	7	5-7

En la tabla 2.6 se presentan los ensayos realizados en la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de la provincia Holguín.

Tabla 2.6. Ensayos realizados por la ENIA - Holguín correspondientes al granito.

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	$\leq 3,00$

2.7 Fabricación de bloques huecos de hormigón

Se realizó la producción de los bloques huecos de hormigón en la bloquera de La Veguita, perteneciente a la empresa de materiales de la construcción de Moa. Se utilizó las materias primas caracterizadas anteriormente, con una dosificación utilizada en su producción, pero con sustitución de un 15 % de cemento P-35 por tobas vítreas para una primera producción y por tobas zeolitizadas para una segunda producción. El volumen de material utilizado se muestra en las tablas 2.7 y 2.8 y la producción de bloques se muestra en la figura 2.7.

En el taller se utiliza una máquina estacionaria de hacer bloques de tecnología Mexicana compuesta por una hormigonera, una banda transportadora y una tolva de vertido de hormigón, todos estos elementos unidos entre sí con estructura metálica de vigas y angulares, así como los elementos, moldes y mecanismos que permiten el vertido, el zarandeo 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, luego se vertió en la banda transportadora que deposita la mezcla en la tolva de vertido situada encima de la cajuela de la máquina para la producción de los diferentes tipos de bloques según sus dimensiones de 40 cm de largo x 20 cm de alto x 15 cm de ancho (tipo II) y 40 cm de largo x 20 cm de alto x 10 cm de ancho (tipo III) a los cuales se les va a realizar ensayos físico -mecánicos. Los bloques una vez terminado el proceso de producción se retiran encima de palets 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, regándolos con una manguera.

Tabla 2.7. Dosificación utilizada para bloques con tobas vítreas

Materiales	Volumen, cm ³	Representación, %
Arena	179708,52	100
Grava 3/8	44927,13	100
Cemento P-35	25458,70	85
Tobas vítreas	4492,71	15

Tabla 2.8. Dosificación utilizada para bloques con tobas zeolitizadas

Materiales	Volumen, cm ³	Representación, %
Arena	179708,52	100
Grava 3/8	44927,13	100
Cemento P-35	25458,70	85
Tobas zeolitizadas	4492,71	15



Figura 2.7. Producción de los bloques huecos de hormigón

2.8 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 y 28 días.
- Absorción de agua.

2.8.1 Ensayo de resistencia a la compresión

En el ensayo de resistencia a la compresión cada bloque se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales de la misma en una prensa hidráulica de 100 toneladas (Figura 2.8).

Para ello se cortó el bloque en dos partes y se recubrió sus bordes con una capa de cemento P-35 (Figura 2.9) de manera que se logran dos caras planas para asegurar la compresión en la mayor área posible en el bloque. El bloque se colocó entre los platos de 30x30 cm de la prensa, cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión. Los platos se guiaron sin fricción apreciable durante el ensayo para poder mantener siempre la misma proyección horizontal. Uno de los platos se mantuvo ligeramente inclinado con el objetivo de obtener un perfecto contacto con el bloque.

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

$$R'i = F_j / a_j$$

Donde:

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

F_j carga de rotura

a_j área de la sección bruta del bloque



Figura 2.8. Prensa Hidráulica de 100 t



Figura 2.9. Recubrimiento de los bordes del bloque con una capa de cemento P-35

2.8.2 Ensayo de 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 (Figura 2.10) durante 24 horas a una temperatura aproximadamente de 110°C y luego pesándolos, después se sumergen en un recipiente lleno de agua (Figura 2.11) por 24 horas para determinar el peso húmedo y la diferencia de ambos pesos muestra el porcentaje de absorción que es capaz de absorber cada bloque, que se calcula por medio de la ecuación siguiente:

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

A_i: absorción de la muestra (%)

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

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



Figura 2.10. Estufa donde permanecieron los bloques durante 24 horas



Figura 2.11. Bloques sumergidos en agua

Conclusiones parciales

- Las muestras de tobas vítreas y zeolitizadas se seleccionaron a partir del conocimiento de su reactividad puzolánica con un porcentaje de sustitución de 15 %.

- 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 normas cubanas.
- Los materiales tobáceos tienen presencia de montmorillonita, lo que provoca que demande mayor cantidad de agua pero su finura rellena eficientemente los poros en el hormigón.

3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se presentan los resultados de la caracterización química y mineralógica del material tobáceo de los yacimientos Caimanes y Sagua de Tánamo en su estado natural y las propiedades físico-mecánicas de los bloques huecos de hormigón, donde se sustituye un 15 % de cemento por tobas zeolitizadas y tobas vítreas.

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

En la figura 3.1 se presenta las características de tamaño de las muestras de tobas vítreas del depósito Sagua de Tánamo y las muestras de tobas zeolitizadas del depósito Caimanes.

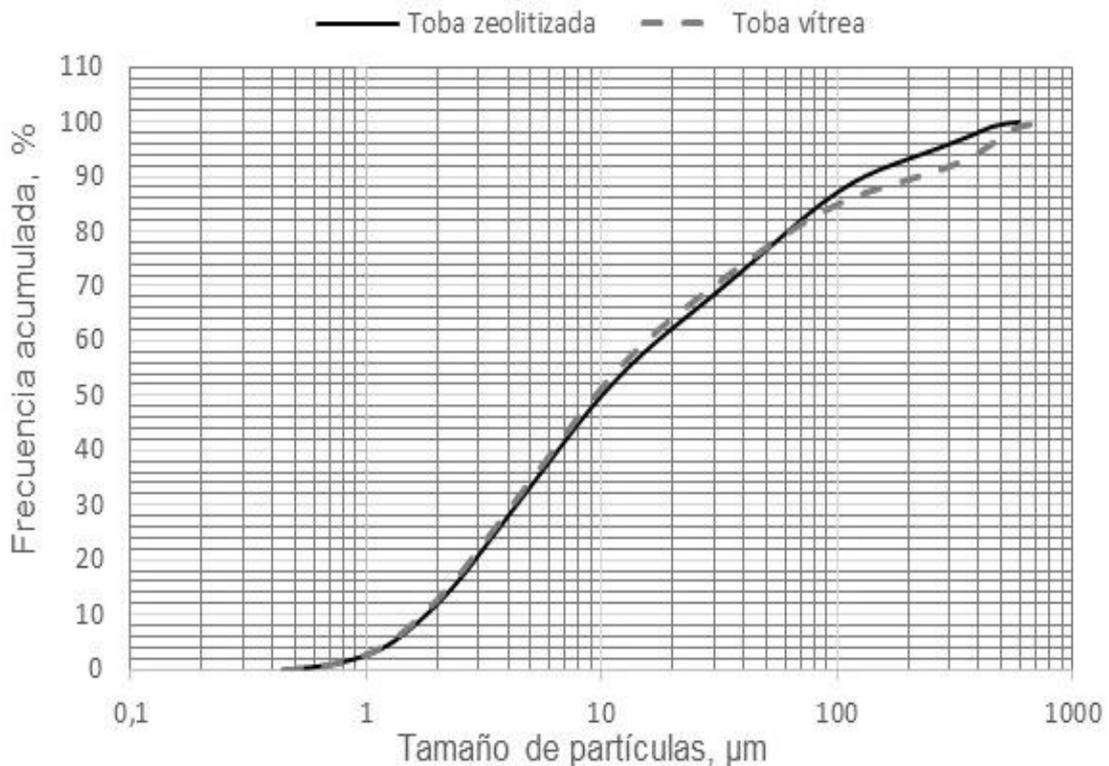


Figura 3.1. Característica de tamaño de las muestras de tobas vítreas

Las curvas correspondientes a cada material están prácticamente superpuestas, lo que indica que la composición granulométrica de ambas muestras es similar. En ambos casos, el 80 % del material cernido se encuentra en el tamiz de diámetro 67 μm , con un diámetro medio de partículas de 47,44 y 63,64 μm para las tobas zeolitizadas y tobas vítreas, respectivamente.

En comparación con el valor máximo de 34 % retenido en el tamiz 45 μm , establecido por la norma NC TS 528:2013 para su utilización como puzolana natural se puede plantear, que ambos materiales analizados presentan características granulométricas adecuadas, que le confieren perspectivas para ser empleados como aditivos puzolánicos al cemento, dado que el retenido en el tamiz 45 μm es igual 24,32 y 25,15 % para las tobas vítreas de Sagua de Tánamo y las tobas zeolitizadas de Caimanes, respectivamente.

3.2 Resultados de la caracterización química

La composición química de la muestra de tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes y de la muestra tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo se presenta en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición química de las muestras de tobas

Compuestos	Caimanes	Sagua de Tánamo
SiO ₂	63,32	61,99
Al ₂ O ₃	12,62	11,65
MnO	0,05	0,08
MgO	2,71	2,83
Na ₂ O	1,85	1,59
CaO	4,01	5,42
TiO ₂	0,47	0,23
P ₂ O ₅	0,06	0,04
K ₂ O	1,92	2,83
Fe ₂ O ₃	2,85	3,70
SO ₃	0,08	0,05
PPI	8,73	9,54

En la tabla 3.1 se aprecia que los compuestos que aparecen como constituyentes son: en mayores cantidades óxido de silicio y óxido de aluminio, con composición media el óxido de hierro III, óxido de calcio y en menores cantidades óxidos de sodio, magnesio, potasio y manganeso.

De acuerdo a los resultados se observa, de forma general, que cumple con las exigencias para ser empleadas como puzolanas naturales, debido a que la suma del contenido SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 es de 78,79 % y 77,34 % para las tobas zeolitizadas y vítreas, respectivamente, lo cual supera el 70 % que se establece como mínimo en la norma NC TS 528:2013 para las puzolanas naturales en Cuba. Este es un indicador preliminar de reactividad de estos materiales tobáceos.

La composición promedio de las muestras de tobas analizadas se corresponde con la exigida para su utilización como puzolana, y corrobora además, los resultados obtenidos por investigaciones previas (Almenares-Reyes, 2011 ; González Verdecia, 2015 ; Banderas et al., 1997), que mostraron las perspectivas de utilización de estos materiales como puzolanas naturales.

3.3 Composición mineralógica

En la tabla 3.2 se muestran las principales fases mineralógicas cristalinas encontradas. Se observa que las tobas de Caimanes y de Sagua de Tánamo poseen características similares a probadas por otros autores (Almenares-Reyes, 2011 ; González Verdecia, 2015 ; Guerra González, 2015).

Tabla 3.2. Características mineralógicas de los materiales tobáceos estudiados

Material puzolánico	Principales fases cristalinas	*Contenido de arcilla, %
Tobas zeolitizadas	Clinoptilolita - heulandita y mordenita, cuarzo, montmorillonita, hematita, calcita, albita, anortita.	13 – 14
Tobas vítreas	Calcita, montmorillonita, hematita, cuarzo, albita, anortita.	16 - 39

* Tomado de Almenares-Reyes (Almenares-Reyes, 2011)

Para las tobas zeolitizadas, los componentes cristalinos mayoritarios, están determinados principalmente clinoptilolita, heulandita y mordenita, en menores cantidades se encuentra cuarzo, montmorillonita, hematita, calcita, anortita y albita, lo cual está en correspondencia con la composición química de las muestras analizadas.

Para las tobas vítreas no se identifica fases zeolitizadas, pero si se observa calcita y montmorillonita, lo cual es un indicativo que se ha producido alteración a estas fases y menos a fases zeolitizadas. La presencia de calcita puede favorecer la hidraulicidad de las muestras pero la presencia de minerales arcillosos puede aumentar la demanda de agua.

3.4 Análisis de los resultados obtenidos en bloques huecos de hormigón

3.4.1 Análisis de los resultados del ensayo de absorción de agua

El ensayo de absorción de los bloques huecos de hormigón se les realizó a 18 bloques producidos con la dosificación antes mencionada en el capítulo anterior con sustitución de 15 % de cemento por tobas vítreas y/o tobas zeolitizadas para ver si con el mismo la fabricación a escala industrial de bloques huecos de hormigón cumple con lo establecido. Este ensayo de absorción de agua y el ensayo de resistencia a la compresión se realizó en el laboratorio perteneciente a la Empresa de Construcción Integral - 3 (ECI – 3).

En la tabla 3.3 se muestran los resultados de los ensayos de absorción a los bloques huecos de hormigón de tipo II con sustitución de un 15 % de cemento por tobas vítreas y de tipo II muestran patrón. De igual forma, se muestran en la tabla 3.4 los resultados de los ensayos de absorción a los bloques huecos de hormigón de tipo II con sustitución de un 15 % de cemento por tobas zeolitizadas.

Como se puede apreciar, en ambos casos, la muestra ensayada cumple con lo establecido en la NC 247: 2010 — Bloques huecos de hormigón — Especificaciones, la cual indica que para los bloques tipo II el porcentaje de absorción debe ser menor de 10 %. Este resultado muestra que el uso de puzolanas permite el diseño de mezclas de hormigón más impermeables, cuyo período de deterioro se reduce.

Tabla 3.3. Absorción de los bloques huecos de hormigón de tipo II con tobas vítreas y bloques patrones

Tipo de bloque	Masa del boque seco promedio, kg	Masa del boque húmedo promedio, kg	Absorción, %
II, tobas vítreas	15,34	16,43	7,08
II, muestra patrón	12,80	14,00	8,57

Tabla 3.4. Absorción de los bloques huecos de hormigón de tipo II con tobas zeolitizadas y bloques patrones

Tipo de bloque	Masa del boque seco promedio, kg	Masa del boque húmedo promedio, kg	Absorción, %
II, tobas zeolitizadas	16,13	17,13	6,18
II, muestra patrón	12,80	14,00	8,57

Por otro lado, se observa que los valores de absorción de los bloques donde adiciona tobas zeolitizadas en lugar del cemento es menor que el porcentaje de absorción de los bloques de referencia, lo que está relacionado refinamiento eficiente de la estructura de poros debido al efecto físico y a la reacción puzolánica; característica de este tipo de materiales puzolánicos.

Las tablas 3.5 y 3.6 muestran los resultados de los ensayos de absorción a los bloques huecos de hormigón de tipo III con sustitución de un 15 % de cemento por tobas vítreas (Tabla 3.5) y zeolitizadas (Tabla 3.6), respectivamente, y los boques de referencia tipo III.

Tabla 3.5. Absorción de los bloques huecos de hormigón de tipo III con tobas vítreas y bloques patrones

Tipo de bloque	Masa del boque seco promedio, kg	Masa del boque húmedo promedio, kg	Absorción, %
III, tobas vítreas	12,83	13,74	7,20
III, muestra patrón	12,28	13,10	6,68

Tabla 3.6. Absorción de los bloques huecos de hormigón de tipo III con tobas zeolitizadas y bloques patrones

Tipo de bloque	Masa del bloque seco promedio, kg	Masa del bloque húmedo promedio, kg	Absorción, %
III, tobas zeolitizadas	12,57	13,44	6,95
III, muestra patrón	12,28	13,10	6,68

Como se puede observar los bloques ensayados cumplen con lo establecido en la NC 247: 2010 — Bloques huecos de hormigón — Especificaciones, la cual indica que para los bloques tipo III el porcentaje de absorción no tiene limitaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos para los diferentes tipos de bloques, se observa que existe una relación entre la composición mineralógica de los materiales tobáceos con la absorción de agua, lo que se fundamenta en que las tobas vítreas presentan relativamente elevado contenido de montmorillonita con capacidad de absorber mayor cantidad de agua que las tobas zeolitizadas con menor contenido de arcilla de este tipo. Tal como se mostró en las tablas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6, la cantidad de agua absorbida por los bloques huecos de hormigón donde se sustituye 15 % de cemento por tobas vítreas es superior al porcentaje de agua absorbida por los bloques con 15 % de sustitución de cemento por tobas zeolitizadas.

3.4.2 Resultados del ensayo de resistencia a compresión

Se ensayaron 36 bloques huecos de hormigón. Fueron ensayados 6 bloques de tipo II con sustitución del 15 % cemento por tobas vítreas, 6 de tipo II con sustitución del 15 % cemento tobas zeolitizadas y 6 patrones de tipo II. De igual forma se procedió a ensayar la misma cantidad de bloques de tipo III para bloques con tobas vítreas y zeolitizadas y bloques de referencia.

Se puede ver en la figura 3.2 y figura 3.3 que todos los bloques ensayados cumplen satisfactoriamente con la resistencia mínima establecida en la NC 247: 2010, la cual especifica que para los bloques tipo II el valor mínimo de resistencia a la compresión a la edad de 7 días es de 4,0 MPa y a la edad 28 días es de 5 MPa. Par el caso de los bloques tipo III, el valor mínimo de

resistencia a la compresión a la edad de 7 días es de 2,0 MPa y a la edad 28 días es de 2,5 MPa.

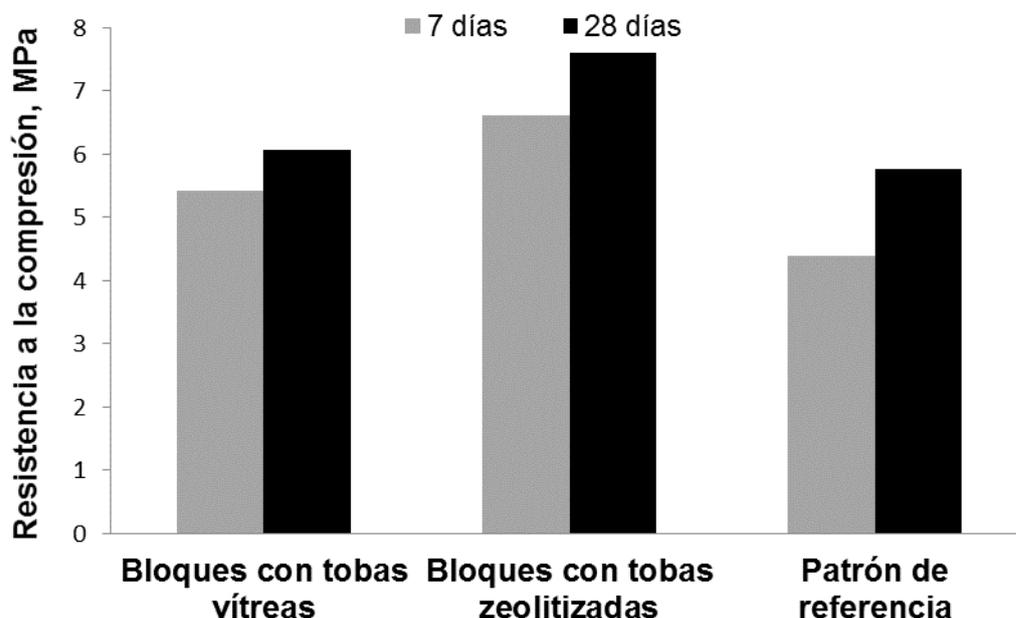


Figura 3.2. Resistencia a la compresión de los bloques de tipo II

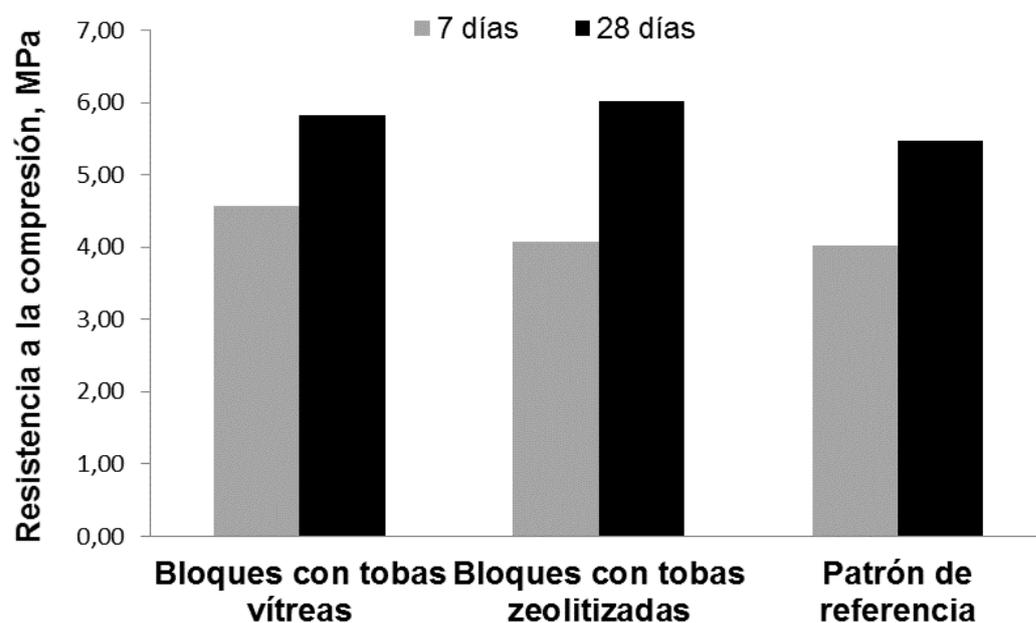


Figura 3.3. Resistencia a la compresión de los bloques de tipo III

En ambos casos, la resistencia mostrada por los bloques es superior a la resistencia de los patrones de referencia. Estos son resultados alentadores, y sería una base sólida para la producción de bloques con sustitución de 15 % de tobas vítreas y zeolitizadas por cemento P-35.

3.5 Valoración socioeconómica preliminar

El presente trabajo constituye un paso muy importante para el desarrollo de nuevos materiales, que a pesar de haber sido estudiados con anterioridad, no obedecen a un trabajo de valoración que permita orientar su desarrollo de acuerdo con las condiciones establecidas para su uso.

Se ha podido constatar de manera particular para los materiales analizados que en el municipio de Moa existen posibilidades de explotar recursos minerales para la construcción debido a que la valoración técnica ha resultado positiva. En muchos otros casos, analizados en el país, bajo una valoración de su consumo local, se ha obtenido un impacto importante desde el punto de vista económico.

Con los resultados obtenidos del trabajo y con el objetivo de tener una idea acerca de los aportes económicos de estos, por concepto de sustitución de cemento por tobas, se desarrolla a continuación una valoración económica preliminar.

Basado en la capacidad de producción de bloques huecos de hormigón del taller localizado en La Veguita, se presenta en la tabla 3.7 el consumo de cemento Portland P-35 plano y cuando se sustituye 15 % de aglomerante por tobas.

A partir del análisis del consumo de cemento representado en la tabla 3.7, se puede concluir que si se sustituye el 15 % de cemento por tobas es posible ahorrar 16802,7 kg cemento para la producción de bloques huecos de hormigón de tipo II y 24003,9 kg para la producción de bloques huecos de hormigón de tipo III. Por otro lado, también se podría incrementar la producción de bloques huecos de hormigón en 30 240 bloques de tipo II y 43 200 bloques de tipo III.

Teniendo en cuenta que la entidad compra el cemento a un precio de 201,47006 pesos en moneda nacional (CUP). Si se sustituye 15 % de cemento por tobas en la producción anual de bloques de tipo II se ahorraría 3385,25 CUP y en la producción de bloques de tipo III 4836,07 CUP.

Tabla 3.7. Consumo de aglomerante para la producción de bloques huecos de hormigón

Producción de bloques huecos de hormigón con cemento Portland P-35		
Tipo de bloque	Capacidad de producción, U/año	Cantidad de cemento necesaria, kg
Bloque tipo II	201 600	112 018
Bloque tipo III	288 000	160 026
Producción de bloques huecos de hormigón con sustitución de 15 % cemento Portland P-35 por tobas		
Tipo de bloque	Capacidad de producción, U/año	Cantidad de cemento necesaria, kg
Bloque tipo II	201 600	95 216
Bloque tipo III	288 000	136 022

De forma general los resultados son alentadores, y proporcionan una alternativa para dar respuesta a la creciente demanda de producción de bloques huecos de hormigón que existe en el Municipio de Moa, con el ahorro sustancial de 15 % de cemento Portland en la producción de estos prefabricados y el incremento de la producción, especialmente, cuando la principal dificultad que presenta la producción de bloques en el municipio es el déficit del cemento.

La posibilidad de efectuar una producción descentralizada, en zonas alejadas de los grandes centros industriales y de las grandes ciudades, contribuye al desarrollo de nuevas producciones de la Industria Local, a obtener bajos costos de producción en comparación con la producción de cemento Portland y propiciar el comercio local del producto.

Conclusiones parciales

- La composición química de las tobas analizadas demuestran que presentan alto contenido de óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, que es superior al 75 %, con contenidos bajos de componentes alcalinos y alcalinos térreos.

- Los bloques huecos de hormigón fabricados con sustitución del 15 % de cemento por materiales tobáceos presentan un excelente comportamiento en cuanto a resistencia a la compresión y absorción de agua, cumpliendo con los parámetros normalizados.
- Las puzolanas como aditivos son de capital importancia dentro de la industria del cemento, ya que intervienen en la calidad del producto final, aumentan la eficiencia del proceso de fabricación, y reducen los costos de producción y las emisiones al medio ambiente.
- Las perspectivas de utilización de los materiales tobáceos muestra resultados alentadores para los programas de construcción de viviendas y otras obras sociales, lo cual permite influir positivamente en el desarrollo local.

CONCLUSIONES

Se evaluaron las propiedades físico–mecánicas de los bloques huecos de hormigón, elaborados con sustitución del 15 % de cemento por materiales tobáceos para su utilización en la industria de materiales de la construcción en Moa de lo que se concluye que:

- Desde el punto de vista químico y mineralógico se predice que los materiales reúnen las condiciones para ser considerados potencialmente materiales puzolánicos. La suma del contenido de óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, es superior al 70 % que se establece como valor mínimo en la norma NC TS 528:2013 para las puzolanas naturales en Cuba.
- La absorción de agua de los bloques huecos de hormigón con tobas vítreas y zeolitizadas que sustituyen en 15 % el cemento P-35, cumplen con los requisitos establecidos en las especificaciones para su uso. Su valor es inferior en todos los casos al 10 %, valor máximo admisible establecido en las normas.
- La sustitución del 15 % de cemento por tobas vítreas y tobas zeolitizadas en la producción de bloques huecos de hormigón muestra un excelente potencial por la adecuada resistencia a la compresión desarrollada a los 7 y 28 días, superior en todos los casos a la resistencia desarrollada por los bloques patrón.
- El empleo de bloques huecos de hormigón con tobas vítreas y zeolitizadas se considera una alternativa favorable para la industria de materiales de construcción del municipio de Moa.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos y su valoración se recomienda:

- Ampliar el estudio a otros prefabricados de pequeño formato de acuerdo a los ensayos establecidos para su empleo en la construcción de obras sociales en el municipio Moa.
- Presentar los resultados del trabajo al gobierno y a las empresas constructoras del municipio que permita la proyección futura del empleo de la sustitución de cemento Portland por tobas vítreas y zeolitizadas en la producción de bloques y otros elementos de pequeño formato.
- Estudiar el procesamiento de las tobas vítreas y zeolitizadas para garantizar la granulometría adecuada para su utilización como adición puzolánica en el hormigón.

REFERENCIAS BLIOGRÁFICAS

- ACI, 2000. Cement and concrete terminology. ACI-116R. Detroit, USA : American Concrete Institute.
- ACI, 2001a. ACI Committee Report 232.1R-00 Use of raw or processed natural pozzolans in concrete. S.I.
- ACI, 2001b. Cementitious materials for concrete. ACI Educational Bulletin E3-01. Farmington Hills, Michigan, USA. Committe E-701, American Concrete Institute.
- ALBORNOZ MUÑOZ, Fernando Juan, 2015. Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile. Tesis de ingeniería. Santiago de Chile, Chile : Universidad de Chile.
- ALMENARES-REYES, Roger Samuel, 2011. Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como adiciones puzolánicas. Tesis de Maestría. Moa, Cuba : Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- ALUJAS, Adrián, 2010. Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente. Tesis Doctoral. Santa Clara, Cuba : Universidad Central « Marta Abreu » de las Villas.
- ASTM, 2008. ASTM C 618 08 Standard specification for coal fly ahs and raw or calcined pozzolan for in concret. 2008. www.astm.org : ASTM C 618 03.
- AYLARD, Richard et HAWSON, Louise, 2002. Our agenda for action. ISBN 2-940. www.wbcds.org. World Business Council for Sustainable Development and Cement Sustainability Initiative (WBCSD-CSI).
- BANDERAS, D., NARANJO, V., RODRÍGUEZ, J. et ROJAS, J., 1997. Informe

prospección preliminar y detallada vidrio volcánico « Sagua de Tánamo »,
Provincia Holguín. Cálculo de Reservas. La Habana, Cuba.

BATISTA, Rolando, 2007. Valoración del Potencial de Los Recursos Minerales
para la Industria del Cemento en Cuba. Pinar del Río, Cuba : Universidad de
Pinar del Río.

BATISTA, Rolando, 2011. Rocas y minerales industriales de la República de
Cuba. La Habana, Cuba.

BATISTA, Rolando et COUTIN, Donis, 2013. Potencialidades de las puzolanas
naturales y arcillas caoliníticas como aglomerantes en Cuba. In : 10mo
Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de
Construcción. Cayo Santa María, Santa Clara, Cuba : s.n. octubre 2013.

CAMACHO CASADO, Ledys, 2014. Zeolita, un mineral que no deja de
sorprendernos. In : Opciones - Semanario económico y financiero de Cuba.
La Habana, Cuba, 5 décembre 2014.

CASADO CAMACHO, Ledys, 2014. Zeolitas naturales de utilidad en la práctica
médica. In : Opciones - Semanario económico y financiero [en ligne]. Digital.
22 février 2014. Disponible à l'adresse :
http://bvs.sld.cu/revistas/ang/vol_11_2_11/ang09211.htm.

CASALS CORELLA, Cosme, 1988. La zeolita, mineral del siglo XX. S.I. :
Publicigraf.

CEMBUREAU, 2010. Activity report [en ligne]. www.cembureau.eu. Disponible
à l'adresse : <http://www.cembureau.eu/about-cement/key-facts-figures>.

COSTAFREDA, J. L, 2011. Granulometría y reacción puzolánica. In : IV
Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS' 2011. La
Habana, Cuba : Sociedad Cubana de Geología. 2011.

COSTAFREDA, J L, DÍAZ, J J et CALVO, B, 2011. Propiedades físicas,
mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México,
Cuba y España. In : IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra-
Geociencias 2011 [en ligne]. S.I. : s.n. 2011. Disponible à l'adresse :
<http://oa.upm.es/cgi/oai2>.

- DAMTOFT, J S, LUKASIK, J, HERFORT, D et SORRENTINO, D, 2008. Sustainable development and climate change initiatives. In : Cement and Concrete Research. 2008. Vol. 38, p. 115-127. DOI 10.1016/j.cemconres.2007.09.008.
- FLATT, Robert J, ROUSSEL, Nicolas et CHEESEMAN, Christopher R, 2012. Concrete: An eco material that needs to be improved. In : Journal of the European Ceramic Society [en ligne]. 2012. Vol. 32, n° 11, p. 2787-2798. DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.11.012. Disponible à l'adresse : www.elsevier.com/locate/jeurceramsoc.
- FRAZAO-NDUMBA, Mafefe et COELLO-VELÁZQUEZ, Alfredo 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. In : . 2007. p. 1-18.
- GARTNER, Ellis, 2004. Industrially interesting approaches to “low-CO2” cements. In : Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34, p. 1489-1498.
- GONZÁLEZ VERDECIA, Rafael Alberto, 2015. Evaluación de materiales puzolánicos como fuente de materia prima para la producción de cemento de bajo carbono. Trabajo de diploma. Moa, Cuba : Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- GROGG, Patricia, 2016. CUBA: Zeolita, el mineral de los mil usos. In : IPS Agencia de Noticias [en ligne]. 22 février 2016. Disponible à l'adresse : <http://www.ipsnoticias.net/2010/01/cuba-zeolita-el-mineral-de-los-mil-usos/>.
- GUERRA GONZÁLEZ, Yosbel, 2015. EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CALCINACIÓN DE LAS TOBAS ZEOLITIZADAS DEL YACIMIENTO CAIMANES COMO MATERIAL PUZOLÁNICO. Moa, Cuba : Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- HABERT, G, BILLARD, C, ROSSI, P, CHEN, C et ROUSSEL, N, 2010. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. In : Cement and Concrete Research. 2010. n° 40, p. 820–826.

- HECHAVARRÍA, Héctor Carballo, 2012. Exportan zeolita holguinera a países de la región. In : Juventud Rebelde - Diario de la juventud cubana [en ligne]. Digital. 22 février 2012. ISBN 1563-8340. Disponible à l'adresse : <http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2012-03-30/exportan-zeolita-holguinera-a-paises-de-la-region/>.
- HENDRIKS, C A, WORRELL, E, DE JAGER, D, BLOK, K et RIEMER, P, 1998. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In : Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies [en ligne]. Interlaken : s.n. 1998. p. 939-944. Disponible à l'adresse : <http://www.ieagreen.org.uk/prghgt42.htm>.
- JOHN, Vanderley M, 2002. On the sustainability of the Concrete. In : UNEP Journal Industry and Environment. 2002. p. 7.
- JUVENTUD REBELDE, 2008. Uso de zeolitas cubanas mejoran rendimientos agrícolas. In : Juventud Rebelde - Diario de la juventud cubana [en ligne]. 22 février 2008. Disponible à l'adresse : <http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2011-08-06/uso-de-zeolitas-cubanas-mejoran-rendimientos-agricolas/>.
- JUVENTUD REBELDE, 2011. Zeolita: ¿Dónde está el mineral del siglo? In : Juventud Rebelde - Diario de la juventud cubana [en ligne]. La Habana, 11 novembre 2011. Disponible à l'adresse : <http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2007-11-11/zeolita-donde-esta-el-mineral-del-siglo//>.
- JUVENTUD REBELDE, 2016. Zeolita natural y sus aplicaciones a debate en Cuba. In : Juventud Rebelde - Diario de la juventud cubana SE - Ciencia y Técnica [en ligne]. 22 février 2016. Disponible à l'adresse : <file:///G:/Doctorado/Bibliografía/Zeolita natural y sus aplicaciones a debate en Cuba - Ciencia y Técnica - Juventud Rebelde - Diario de la juventud cubana.htm>.
- MARTIRENA, J F, 2004. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. Tesis Doctoral de

- Segundo Grado. Santa Clara, Cuba : Universidad Central « Marta Abreu » de Las Villas.
- MASSAZZA, Franco, 1993. Pozzolanic cements. In : Cement and Concrete Composites. 1993. Vol. 15, n° 4, p. 185-214.
- MÜLLER, Nicolas et HARNISCH, Jochen, 2008. A blueprint for a climate friendly cement industry. Report for the World Wild Fund for Nature –Lafarge Conservation Partnership [en ligne]. Gland, Switzerland. Disponible à l'adresse : www.panda.org/climatesavers.
- NC/CTN37, 2010. NC 247:2010 Bloques huecos de hormigón - Especificaciones. 2010. Impreso en Cuba : Oficina Nacional de Normalización.
- NC 251:2013, 2013. Áridos para hormigones hidráulicos—Requisitos. In : . La Habana, Cuba. 2013.
- NC 96: 2011, 2011. Cemento con adición activa. Especificaciones. In : [en ligne]. La Habana, Cuba. 2011. Disponible à l'adresse : www.nc.cubaindustria.cu.
- PURNELL, Phil, 2013. The carbon footprint of reinforced concrete. In : Advances in Cement Research. 2013. Vol. 25, n° 1, p. 1–7. DOI <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.13.00013>.
- RABILERO, A, 1988. Las Puzolanas. Cinética de las reacciones. Santiago de Cuba, Cuba : Editorial Oriente.
- RABILERO, A, 1992. Empleo de los aglomerantes de cal-puzolana en la construcción. 1992. La Habana, Cuba : s.n.
- RABILERO, A. C, 2005. Mineralogía de las puzolanas. In : VI Congreso de Geología. Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GOCIENCIAS'2005. La Habana, Cuba : Sociedad Cubana de Geología. 2005.
- RAMEZANIANPOUR, Ali Akbar, 2014. Cement Replacement Materials. Properties, Durability, Sustainability. Heidelberg/ New York/ Dordrecht/

London, Netherlands : Springer-Verlag Berlin Heidel. ISBN 978-3-642-36721-2.

RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Esther María, GONZÁLEZ ACOSTA, Virginia, GÓMEZ NARBONA, Luís et GONZÁLEZ CASTELLANO, Domingo, 2009. Sobre las perspectivas actuales de desarrollo de cinco materias primas minerales no metálicas en Cuba. In : III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias'2009. La Habana, Cuba : Sociedad Cubana de Geología. avril 2009. p. 1-10.

ROSELL, Ing Mercedes, REGINO, Arq, BLANCO, Gayoso, BENJAMÍN, Ing et PÉREZ, Calvo, 1997. Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones . In : . 1997. n° 9, p. 1-11.

ROSELL, M., 2007. Influencia del tamaño de partícula de zeolita en su actividad puzolánica. In : II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2007. La Habana, Cuba : Sociedad Cubana de Geología. mars 2007. p. 7.

ROSELL, M., GAYOSO, R.; et CALVO, B, 2006. Zeolita como aditivo mineral active en hormigones de altas prestaciones. In : Boletín Geológico Minero. 2006. Vol. 117, n° 4, p. 783-792.

ROSELL, Mercedes, 2010. Zeolita Natural Cubana del Tipo Clinoptilolita-Heulandita como Material Cementicio Suplementario en Hormigones. Tesis Doctoral. Santa Clara, Cuba : Universidad Central « Marta Abreu » de Las Villas.

SANTOS, Nelson García, 2008. Nuestra zeolita prospera afuera. In : Juventud Rebelde - Diario de la juventud cubana [en ligne]. Digital. 22 février 2008. Disponible à l'adresse : <http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2008-05-28/nuestra-zeolita-prospera-afuera/>.

SCRIVENER, Karen L, 2014. Options for the future of cement. In : The Indian Concrete Journal. 2014. Vol. 88, n° 7, p. 11-21.

SERSALE, R, 1993. Zeolite tuff as a pozzolanic addition in manufacturing blended cements. In : 4th International Zeolite Congress. S.I. : Boise Idaho.

1993. p. 183-186.

SNELLINGS, Ruben, 2011. Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites. Chapter 2- Supplementary cementitious materials. Section 2.3.2.1- Burned clays and shales. Heverlee, Belgie : Katholieke Universiteit Leuven.

TAYLOR, Michael, TAM, Cecilia et DOLF, Gielen, 2006. Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry. In : Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry. Paris, Francia : IEA-WBCSD. 2006. p. 12.

TIRONI, Alejandra, 2013. Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica. Tesis doctoral. La Plata, Argentina : Universidad Nacional de la Plata.

VIZCAÍNO, Leng Maday, 2014. Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer - arcilla calcinada - caliza. Tesis Doctoral. Santa Clara, Cuba : Universidad Central « Marta Abreu » de Las Villas.

WBCD - CSI, 2012. Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry. Emissions Monitoring and Reporting_Version 2.0 [en ligne]. Brussels, Bélgica. Disponible à l'adresse : www.wbcscement.org.

WBCSD, 2015. Low carbon technology partnerships initiative (LCTPi) [en ligne]. Geneve, Suiza. Disponible à l'adresse : <http://www.lctpi.wbcscservers.org/>.

WBCSD/IEA, 2009. Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050 [en ligne]. Paris, France. IEA Publications. Disponible à l'adresse : <http://www.iea.org/papers/2009/>.