



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO**

“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE LOS BLOQUES HUECOS DE
HORMIGÓN CON DIFERENTES DOSIFICACIONES
DE MATERIALES CEMENTICIOS
SUPLEMENTARIOS**

Tesis en opción al título de ingeniero en Metalurgia y Materiales

Mairelys Ramírez Silvera

**Moa, 2018
“Año 60 de la Revolución”**



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO**

“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUÍMICA

EVALUACIÓN DE LOS BLOQUES HUECOS DE HORMIGÓN CON DIFERENTES DOSIFICACIONES DE MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS

Tesis en opción al título de ingeniero en metalurgia y materiales

Autora: Mairelys Ramírez Silvera

Firma.....

Tutora: Ms.C. Lisandra Poll Legrá

Firma.....

**Moa, 2018
“Año 60 de la Revolución”**

Yo: Mairelys Ramírez Silvera

Autor de este trabajo, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Mairelys Ramírez Silvera

Autor

Ms.C Lisandra Poll Legrá

Tutor

DEDICATORIA

Con mucho amor le dedico esta tesis a:

Mi abuelita que aunque no está presente para apreciar la realización de sus sueños hechos realidad, sé que donde quiera que se encuentre está muy orgullosa de mí.

Mi mamá por confiar todo el tiempo en que sí podía lograrlo y ser mi ejemplo de superación a seguir.

Mi papá por todo el sacrificio que ha hecho a lo largo de su vida y que aún lo está haciendo.

A mi hermana por estar a mi lado y apoyarme siempre.

A mi novio Leonardo porque ha sido mi sostén, mi amigo y mi guía en los momentos más difíciles de mi vida.

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar agradecerle a Dios por darme la fuerza de resistir y mantenerme en pie aún cuando me decían que no podía.

A mis padres y mi hermana que siempre confiaron en mí.

A toda mi familia que de una forma u otra me brindaron su amor y ayuda.

A mi novio Leonardo y a toda su familia.

A mis amigos en general, pero en lo particular a:

Aylen ,Anabell ,Katia ,Wuendí ,Las mellisas,Lizandra,Annelis,Yannys ,Caros ,Arletty ,Virgen ,Rachel, Osiel ,Amable ,Daíron y Yoísel .

A mi amiga, profesora y confidente Mirna Maunteca.

Al profesor Varisnaga por aguantarme todos estos años.

A mi tutora Lisandra por la paciencia y el apoyo.

A mi amigo el profesor Roger por ayudarme en todo durante este tiempo.

A todos muchas gracias por ayudar a ser realidad mi sueño.

PENSAMIENTO

Otros ven sólo el pincel caído, cuando lo que ha de verse es el esfuerzo.

José Martí



RESUMEN

En el presente trabajo se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye un 30 y 50 % de cemento por materiales arcillosos para su utilización en la industria del cemento en Moa. La arcilla calcinada fue caracterizada desde el punto de vista químico, mineralógico y granulométrico 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 III. Desde el punto de vista químico y mineralógico los materiales arcillosos empleados en la sustitución de aglomerantes en los bloques huecos de hormigón reúnen las condiciones para ser considerados potencialmente como 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 30 y 50 % de cemento LC³, por arcillas calcinadas, 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.

Palabras claves:

Materiales Cementicios Suplementarios

Propiedades

Potencial

Resistencia

Sustitución

ABSTRACT

In the present work, the physical-mechanical properties of hollow concrete blocks made with binders were evaluated, where 30 and 50% of cement was replaced by clay materials for use in the cement industry in Moa. The calcined clay was characterized from the chemical, mineralogical and granulometric point of view by means of X-ray fluorescence and X-ray diffraction, respectively. The compressive strength and water absorption in hollow concrete blocks of type III were determined. From the chemical and mineralogical point of view, the clayey materials used in the substitution of binders in hollow concrete blocks meet the conditions to be considered potentially as pozzolanic materials. The sum of the content of silicon oxide, aluminum oxide and iron oxide, is higher than the 70% established as a minimum value in the norm NC TS 528: 2013 for natural pozzolans in Cuba. The replacement of 30 and 50% of cement LC³, by calcined clays, in the production of hollow blocks of concrete shows an excellent potential, by the adequate resistance to compression and water absorption, constituting an encouraging alternative for the local construction industry.

Keywords:

Supplementary Cementitious Materials

Properties

Potential

Resistance

Substitution

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.....	6
1.1 Cemento Portland. Generalidades.....	6
1.1.1 Características del cemento LC ³	7
1.1.2 Efecto de la adición de puzolanas al cemento Portland.....	8
1.2.1 Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).....	10
1.2.2 Clasificación de MCS.....	10
1.3 Arcillas .Generalidades.....	11
1.3.1 Clasificación de las arcillas	12
1.3.2 Características de los yacimientos de arcillas.....	12
1.3.3 Arcillas como fuente de MCS	13
1.3.4 Activación térmica de las arcillas	13
1.3.5 Reactividad puzolánica en sistemas de arcillas calcinadas. Técnicas de evaluación	16
1.4 Generalidades de los bloques huecos de hormigón	18
1.4.1 Características de los hormigones para la producción de bloques.....	19
Antecedentes de la investigación	20
Conclusiones parciales.....	22
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.1 Características generales del yacimiento de arcilla de Cayo Guam.....	23
2.2.1 Toma y preparación de la muestra de arcilla	24
2.3 Preparación y formulación del cemento LC ³	26
2.4 Caracterización de la materia prima para la producción de los bloques huecos de hormigón	27
2.5 Determinación de la composición granulométrica	29
2.6 Determinación de la composición química	29
2.7 Determinación de la composición mineralógica	30
2.8 Fabricación de los bloques huecos de hormigón	31
2.9 Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón.....	33

2.9.1 Ensayo de resistencia a la compresión	33
2.9.2 Ensayo de absorción de agua	35
Conclusiones parciales	37
Capítulo 3 Análisis y discusión de los resultados	38
3.1 Resultados de la composición química	38
3.2 Composición mineralógica de la muestra natural	39
3.3 Caracterización granulométrica de los productos de la molienda.....	40
3.4.1 Análisis de los resultados del ensayo de absorción de agua.....	42
3.4.2 Resultados del ensayo de resistencia a la compresión.....	43
3.5 Ventajas de la utilización de arcilla calcinada como adición en la fabricación de los bloques huecos de hormigón en Moa.....	44
Conclusiones parciales	46
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS	56

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad las necesidades del hombre y las inventivas de este para darle solución a los problemas constructivos, siempre han estado presente en el devenir de los tiempos, siendo una de las más importantes la actividad constructiva, con vista a dar mayor seguridad y confort al seno familiar. A esto se une los niveles sorprendentes en el desarrollo científico-técnico que ha alcanzado la humanidad en estos últimos años, lo cual repercute directamente en todas las esfera de la vida económica, política y sociales de los países. La población mundial va en aumento cada año, lo que incrementa las demandas de la vivienda y otras necesidades.

El cemento es uno de los materiales más utilizados en la construcción de estructuras, este se fábrica aproximadamente en 150 países, principalmente, Asia, Europa y el Medio Oriente, por lo que el volumen de producción del mismo para el 2020 aumentará en un 120 - 180 % (Vanderwerf.P, 2012). Este creciente aumento de su producción hace que sea el responsable del 7 % de las emisiones de CO₂ y del 5 % del consumo de energía del sector industrial. A pesar de ser uno de los elementos que ha contribuido al desarrollo de la humanidad, es de los elementos que ha dado paso a la degradación del medio ambiente en nuestro planeta, ya que el proceso de producción de este se basa en la explotación de los recursos no renovables, y en el cual se emite grandes volúmenes de gases de efecto invernadero (Martairena, 2003) (C.A, 1998) (Vanderwerf.P, 2012).

La industria del cemento ha definido como medidas fundamentales para reducir las emisiones directas de CO₂ a la atmósfera; el mejoramiento de la eficiencia energética en la producción de clínquer, el uso de combustibles alternativos, reciclaje de materias primas y la reducción de la relación clínquer/cemento con el empleo de materiales cementicios suplementarios (Schneider, 2011); (Rances, 2011).

Han sido varias las alternativas estudiadas con el enfoque de minimizar tales impactos y entre las soluciones más extendidas a este problema, se encuentra el empleo de adiciones minerales con carácter puzolánicos, o puzolanas, como sustitutos parciales del clínquer (Sabir, 2001); (Martairena, 2003); (Samet, 2007); (Habert G. , 2009) que además incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad en los hormigones (Martirena, 2003). Al mismo tiempo, la utilización de materiales

cementicios suplementarios, favorece la disminución en el empleo de energías no renovables y contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por cantidad de aglomerante (Habert G. , 2009).

El desarrollo y aplicación de los materiales puzolánicos en la fabricación de cemento Portland ha sido hasta ahora una estrategia desarrollada sobre todo a partir de las características propias de los países industrializados. Sin embargo, el consumo del aglomerante, en los últimos años, se ha desplazado hacia las naciones menos industrializadas. Esto implica el desarrollo de tecnologías y estrategias que permitan la obtención y empleo de materiales puzolánicos bajo las condiciones propias de los países en vías de desarrollo (Alujas, 2010).

En nuestro país, la situación de la vivienda junto a la necesidad de desarrollar obras sociales, es una problemática que crece gradualmente, visto por el deterioro constante de las existentes y el azote de fenómenos naturales, que sin duda han puesto en desventajas la posibilidad de una respuesta rápida a tales problemas debido a la escases de estos materiales de construcción a partir de diversas fuentes. .Este déficit se puede compensar mediante el aprovechamiento de potencialidades nacionales para el incremento de los volúmenes del material, que permitan aumentar las producciones y la calidad de los producto (Reyes, 2011).

Dentro de las estrategias para suplir el esperado crecimiento de la demanda de cemento, se reconoce la importancia de analizar el potencial empleo de materiales arcillosos localmente disponibles como materiales puzolánicos, especialmente las arcillas calcinadas (Alain, 2017). Ante la necesidad de potenciar estas investigaciones destinadas a desplegar nuevas fuentes de materiales puzolánicos, que permitan la producción de aglomerantes en cantidades suficientes y a un costo asequible desde el punto de vista económico, energético y medioambiental, debe centrarse la atención en el estudio y empleo de fuentes de materiales localmente disponibles.

De acuerdo a las características geológicas de Cuba, existe una amplia disponibilidad en el país y particularmente en la provincia Holguín de materiales arcillosos (Batista, 2011; Batista & Coutin, 2013; Batista, 2007), los cuales han sido previamente estudiados como materiales puzolánicos. En la mayoría de los casos,

su utilización ha estado limitada, en parte, por el bajo grado de estudios que avalen su utilización. Sin embargo, se han obtenido resultados satisfactorios cuando se aplica a nivel local y/o territorial.

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

Problema de la investigación

El uso de materiales arcillosos de la región de Moa como materiales cementicios suplementarios en la producción de prefabricado de hormigón, está limitado, en parte por el insuficiente conocimiento de las propiedades físico- mecánicas de los bloques huecos de hormigón.

Objeto de estudio

Bloques huecos de hormigón.

Campo de acción

Propiedades físico-mecánicas de los bloques huecos de hormigón.

Objetivo general

- Evaluar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes, a partir de la sustitución de un 30 y 50% de cemento por materiales arcillosos, para su utilización en la industria de materiales de la construcción en Moa.

Hipótesis

Si las propiedades físico-mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye el 30 y 50 % de cemento por materiales arcillosos, 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

- Formular bloques huecos de hormigón con cemento base clínquer, carbonato de calcio y arcilla del depósito Cayo Guam calcinada.
- Determinar la resistencia a la compresión de los bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes a partir de la sustitución de un 30 y 50% de cemento por materiales arcillosos.
- Determinar la absorción de agua en los bloques huecos de hormigón elaborados con aglomerantes donde se sustituye un 30 y 50% de cemento por materiales arcilloso.

Tareas de la investigación

- Búsqueda y análisis de la información bibliográfica relacionada con el empleo de arcillas calcinadas como fuente de material cementicio suplementario. Aglomerantes ternarios.
- Preparación de las muestras; apoyado en la trituración, homogeneización, 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 arcillas en el cemento mezclado para la elaboración de los bloques huecos de hormigón.
- Formulación de bloques huecos de hormigón del tipo III (40 cm de largo x 20 cm de alto x 10 cm de ancho) elaborados con aglomerantes donde se sustituye 30 y 50 % de cemento por materiales arcillosos.



- Determinación de la resistencia a la compresión de los bloques huecos de hormigón con sustitución de un 30 y 50 % respectivamente de cemento por arcillas a los 7 y 28 días.
- Determinación de la absorción de agua en bloques huecos de hormigón con sustitución de un 30 y 50 % de cemento por arcillas.
- Análisis y discusión de los resultados.

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hace una sistematización de las bases del cemento Portland y de las variaciones del mismo que han surgido con el desarrollo de la industria cementera; así como de la necesidad de la búsqueda de nuevas alternativas de cementos para el desarrollo en países de menor infraestructura económica, enfocándonos en la alternativa de las adiciones puzolánicas y la reacciones que estas causan en el cemento portland, abarcando principalmente la producción del LC³ como una alternativa ambientalista con potencialidad de uso en países en vías de desarrollo como el nuestro.

1.1 Cemento Portland. Generalidades

En 1824 el albañil inglés Joseph Aspdin patentó un producto bajo el nombre de cemento Portland. Su nombre se debe a la semejanza en aspecto con las rocas que se encuentran en la isla de Portland, en el condado de Dorset. En 1850 surge en Norteamérica la industria cementera dando inicio al uso extensivo del cemento Portland hasta convertirse en el material de construcción más utilizado en el mundo. Actualmente la aplicación casi generalizada del Portland, su producción de forma masiva, su costo relativamente bajo con respecto a otros aglomerantes y los buenos resultados obtenidos en su empleo, han logrado que los aglomerantes que le antecedieron quedaran desplazados por el mismo, alcanzando este una creciente demanda a escala internacional como se muestra en la figura 1.1

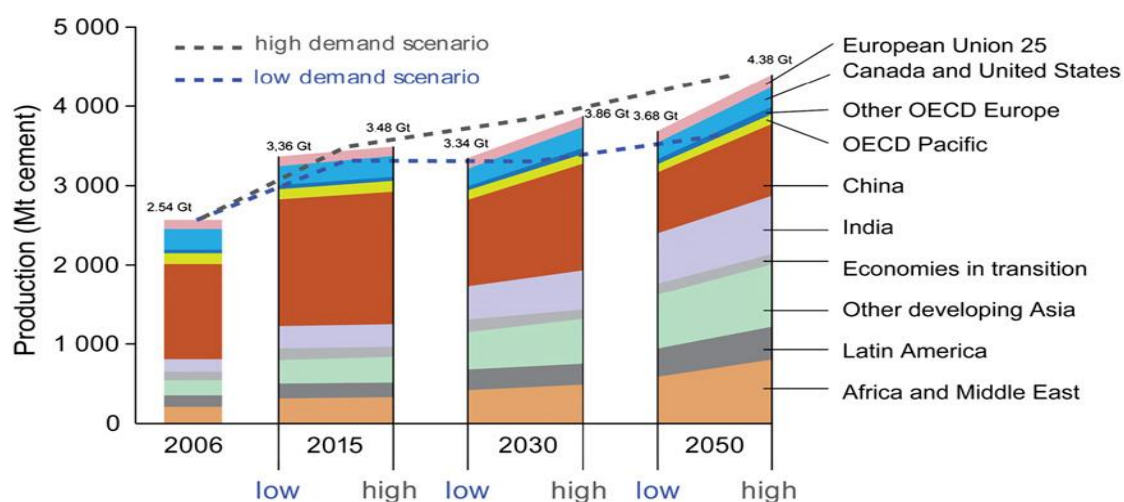


Figura 1.1 Producción global de cemento. Fuente: Macphee, 2010

El Portland es un conglomerante hidráulico, obtenido a partir de la pulverización del clínquer y la adición de piedra de yeso natural para retrasar el fraguado, aunque esta última no debe superar el 5 %. Hay 4 compuestos principales en el cemento portland que totalizan el 90 % o más del peso del cemento portland: (40-60 %) Silicato tricálcico, (20-30 %) Silicato dicálcico; (7-14 %) Aluminato tricálcico; (5-12%) Ferritoaluminato tetracálcico; aunque presenta algunas otras como ciertos sulfatos de álcalis y óxido de calcio que se encuentra en menores proporciones. La energía necesaria para producir el clínquer es de unos 1,700 J/g, pero a causa de las pérdidas de calor el valor es considerablemente más elevado. Esto trae consigo una gran demanda de energía para la producción del cemento y, por tanto, la liberación de gran cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera, un gas de efecto invernadero. El color gris del Portland depende de la cantidad de óxido férrico. Cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón. Las materias primas para la producción del portland son minerales que contienen:

Óxido de calcio..... (44 %).

Óxido de silicio..... (14,5 %).

Óxido de aluminio..... (3,5 %).

Óxido de hierro..... (3 %).

Óxido de manganeso..... (1,6 %).

1.1.1 Características del cemento LC³

En el caso del cemento LC³ al sustituir un gran porcentaje del componente clínquer por el componente Metakaolín, arcilla calcinada a temperaturas de 700-800 °C se logra reducir el consumo de combustible y por consiguiente se reduce la emisión de CO₂ de forma notable. Por otro lado, se aumenta el porcentaje de carbonato de calcio sin cocinar, lo cual contribuye también a la baja emisión de CO₂. Como resultado se obtiene una tecnología de producción de cemento con mucha más baja emisión de CO₂ que la tecnología de producción de cemento Portland. Se estima una reducción entre un 20-30 % las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

1.1.2 Efecto de la adición de puzolanas al cemento Portland

El primer criterio que apoyó la producción de cementos puzolánicos fue corregir el cemento Portland tipos I y II, al fijar la cal libre, generada durante la formación de los silicatos bicálcicos y tricálcicos, la cual es inestable a pH menores de 12, para formar compuestos estables que no son vulnerables a la acción lixiviante de las aguas ácidas. Pero adicionalmente estos materiales tienen otros efectos sobre el cemento y el concreto.

- Reemplazan una buena porción del cemento Portland del 15 al 40 %, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clínquer y más económica de moler.
- Reduce el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción exotérmica.
- Evita el agrietamiento del concreto por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse.
- Rebajan en cierto porcentaje los aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente entran a reaccionar de manera perjudicial con los agregados del concreto.
- Aligera las mezclas, debido a la disminución de su densidad. A partir del análisis de los efectos que las puzolanas provocan sobre el cemento se puede utilizar en:
 - Morteros de albañilería (colocación de ladrillos, bloques, entre otros).
 - Estabilización de suelo en bloques prensados.
 - Producción de prefabricados ligeros de hormigón (bloques, adoquines, entre otros).
 - Fundición de hormigón masivo de baja resistencia.

El resultado del remplazo parcial de un por ciento de clínquer por un material puzolánico puede ser descrito como la combinación lineal de varios efectos físicos y químicos (Zhang *et al.*, 2000; Paya *et al.*, 2001). Uno de los efectos físicos que ocurren producto de la adición de una puzolana al CP, es el aumento de la compacidad por efecto filler y la nucleación heterogénea por el aporte de las

puzolanas de una superficie adicional que favorece la nucleación y crecimiento a edades tempranas de los productos de hidratación del CP. Estos efectos no dependen de la reactividad química de la adición mineral, sino de la cantidad de superficie disponible y del por ciento de sustitución. Otro efecto muy importante, es el de dilución, debido al cual se produce un mayor espacio para la formación y crecimiento de las fases hidratadas, lo que favorece la reacción de hidratación (Cyr *et al.*, 2006) El efecto químico fundamental está dado por la reactividad puzolánica de la adición mineral. Las puzolanas pueden reaccionar con parte del Ca(OH)_2 , también denominado portlandita (CH), presente en la pasta hidratada, densificando la microestructura de la pasta y refinando la estructura de poros, con la disminución de la permeabilidad y el aumento de la resistencia mecánica. Al mismo tiempo, como la CH presente en la pasta es susceptible a formar fases con potencial expansivo al reaccionar con agentes externos como los sulfatos, su reducción favorece la resistencia al ataque químico (Frías *et al.*, 2000; Kadri El-H. Ezzjane, Siddique R., De Schutter G., 2008).

Para el caso de sistemas con altos volúmenes de sustitución por puzolanas muy reactivas también pueden manifestarse fenómenos asociados al agotamiento de la CH, con la consiguiente desestabilización de las fases hidratadas ricas en Ca y, para el caso de hormigones reforzados, la desestabilización de la capa pasiva que protege al acero como consecuencia de la disminución del pH (Martirena, 2003).

Puede afirmarse que con la sustitución del CP por materiales puzolánicos, se mantienen o mejoran las propiedades físicas y de durabilidad, sin embargo las principales desventajas reportadas para el empleo de puzolanas son las bajas resistencias mecánicas alcanzadas a edades tempranas y la necesidad del empleo de superplastificantes o de relaciones agua/aglomerante mayores que para la pasta que contiene solo CP, si se quiere mantener una laborabilidad constante de la mezcla (Castillo *et al.*, 2010b). Los resultados de varias investigaciones mostraron que las arcillas calcinadas superan las resistencias mecánicas a edades tempranas comparadas con los materiales de origen natural donde el silicio es la fase principal reactiva (Fernandez, 2009) (Alujas, 2010) (Castillo, 2010).

1.2.1 Materiales Cementicios Suplementarios (MCS)

La tecnología del hormigón ha presentado grandes avances en los últimos años. Entre los cambios más relevantes en este período está el desarrollo de nuevos aditivos químicos para modificar las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido y el uso de materiales cementicios suplementarios o adiciones minerales como apoyo y complemento al cemento portland. Estos materiales se definen como materiales que contribuyen a las propiedades físico- químicas del hormigón endurecido.

1.2.2 Clasificación de MCS

Los materiales cementicios suplementarios se clasifican en aglomerantes hidráulicos y materiales puzolámicos.

- **Los aglomerantes hidráulicos** se caracterizan por reaccionar con agua formando productos de hidratación que aportan propiedades cementantes y aglomerantes puzolámicos.
- **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 puzolánicos. 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 1.2.

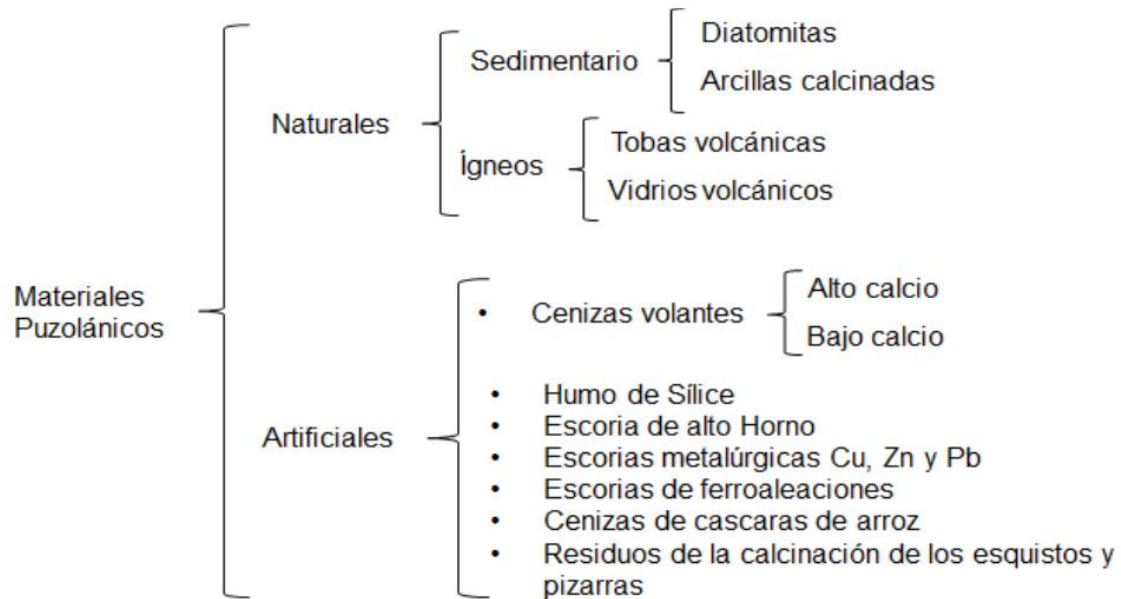


Figura 1.2. Clasificación de las puzolanas. Fuentes: (Guerra González, 2015)

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, 2003), (Alujas, 2010). Sin embargo, existen otras fuentes de reservas de materiales puzolánicos, como las puzolanas naturales y las arcillas, que presentan una alta reactividad puzolánica una vez activadas térmicamente.

1.3 Arcillas .Generalidades

En la búsqueda y desarrollo de nuevas fuentes de materiales puzolánicos, existe creciente interés en el empleo de las arcillas activadas. Por su amplia disponibilidad, relativa facilidad de tratamiento y demostradas propiedades puzolánicas una vez que son estructuralmente modificadas, estas representan una atractiva alternativa como fuente de puzolanas (Alujas, 2010). Las arcillas constituyen una numerosa familia de minerales que pertenecen al grupo de los

silicatos, junto a diversas impurezas en forma de partículas cristalinas extremadamente pequeñas y en proporciones variables. Desde el punto de vista químico son aluminio – silicatos hidratados de hierro, magnesio, metales alcalinos y otros cationes, cuyas propiedades físico-químicas derivan de su composición y de su particular estructura interna en forma de capas (Sagar Naya & Singh, 2007). Es su particular estructura en forma de láminas, los principales minerales y los compuestos acompañantes, así como su gran área específica, lo que define su comportamiento y reactividad (Alujas, 2010).

1.3.1 Clasificación de las arcillas

Tomando en cuenta las fases minerales presentes en las materias primas arcillosas, estas se pueden clasificar en los siguientes grupos: (Brigatti.G.E, 20006), (I.G.P, 2010):

Grupo caolinita: incluye los minerales caolinita, dickita, halloysita y nacrita. Algunas fuentes incluyen al grupo serpentinas por sus similitudes estructurales.

Grupo smectita: incluye pirofilita, talco, vermiculita, sauconita, saponita, nontronita, montmorillonita, hectorita.

Grupo illita: incluye a las micas arcillosas y estos minerales generalmente provienen de la alteración hidrotermal de las rocas ígneas, es por eso que su composición química es tan diferente.

Grupo clorita: incluye una amplia variedad de minerales similares con considerable variación química.

1.3.2 Características de los yacimientos de arcillas

Para el estudio de las arcillas, es necesario enmarcarlas de acuerdo con las características particulares que tienen los yacimientos donde se encuentran, estos pueden ser de tres tipos: yacimientos sedimentarios (secundarios), residuales (primarios), e hidrotermales. Según las referencias consultadas (Snellings, 2010) (Galen, 2006), las características que distinguen estos tipos de yacimientos son los siguientes:

- Sedimentario (secundarios): Forman parte de los depósitos aluviales indiferenciados, asociándose a distintas terrazas del cauce inferior de los ríos. Estos depósitos están formados por rocas que han sido transportadas,

sedimentadas y erosionadas, por lo que pueden formarse grandes depósitos con un alto valor comercial (Galen, 2006).

- Residuales (primarios): Se asocian a las cortezas de intemperismo, por lo tanto son productos residuales del desgaste de las rocas. Las arcillas formadas bajo estas características, sufren alteraciones in situ en su estructura de aluminosilicatos, por lo que a menudo tienen baja calidad. Generalmente los minerales que se encuentran presentes en estos yacimientos son los feldespatos, los ferromagnesio y las micas. Durante estos procesos de desgaste, la caolinización ocurre ante pH ácidos y moderada presencia de Silicio (Galen, 2006).
- Hidrotermales: Está estrechamente relacionado con los principios de formación de los yacimientos primarios y se asocian a las lavas y tobas andesítica alterada hidrotermal e hipergénicamente (Galen, 2006) (Snellings, 2010).

1.3.3 Arcillas como fuente de MCS

Ante la perspectiva de un incremento en la explotación a gran escala de los materiales de carácter puzolánicos, las reservas y los potenciales de producción de los productos tradicionalmente empleados no podrán suplir su creciente demanda. En este contexto, existe un marcado interés en el empleo de las arcillas activadas térmicamente por constituir una potencial reserva natural de materiales puzolánicos, con amplia disponibilidad en casi todas las regiones, independientemente del grado de desarrollo económico (Alujas, 2010).

1.3.4 Activación térmica de las arcillas

Los minerales arcillosos no pueden ser empleados como puzolanas en su estado natural. La presencia de estructuras cristalinas estables impide la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica. Por lo tanto, las arcillas deben modificarse estructuralmente para ser empleadas como materiales puzolánicos. La activación de un mineral arcilloso se refiere al proceso de lograr, a partir de la remoción de los OH⁻ estructurales, la ruptura de los enlaces químicos y la desestabilización resultante de la estructura cristalina, en un material con una reactividad química tal que le permita ser

empleado como puzolana (Alujas, 2010). El proceso de activación puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales es la activación térmica la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas y alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica (Alujas, 2010) (Bergaya, 2006).

El carácter puzolánico de una arcilla calcinada no está determinado solamente por el desorden estructural. A medida que se incrementa la temperatura ocurren también importantes cambios en la morfología del sistema, producto de los fenómenos asociados al crecimiento del grano, lo que provoca una disminución en la capacidad de reacción. La temperatura de calcinación de la caolinita y la illita, no siempre se corresponde con el máximo grado de desorden estructural y con la mayor reactividad puzolánica, pues a medida que aumenta la temperatura de calcinación, se establece un compromiso entre el aumento del desorden estructural y el desplazamiento de la distribución granulométrica hacia tamaños de partícula superiores, conllevando a la disminución de la superficie específica. Sin embargo en el caso de la montmorillonita, sí se ve favorecida significativamente su actividad puzolánica por el incremento de la temperatura (Fernández López, Martirena Fernández, & Scrivener, 2011).

La activación térmica o calcinación de arcillas, es una importante vía para la producción de puzolanas y este proceso ocurre cuando se le entrega calor al material, con el objetivo de eliminar el agua estructural que contiene, modificándose la estructura cristalina original y provocando que se vuelva muy reactivo (Bergaya, Handbook of clay science. General Introduction: clays ; clays minerals and clay science, 2006). Este proceso es conocido como deshidroxilación y consiste en la eliminación de los grupos hidróxilos para crear un material meta estable. Durante la calcinación de las arcillas pueden distinguirse varias etapas. Con el calentamiento desde la temperatura ambiente hasta 250 °C ocurre la pérdida (reversible en algunos casos) del agua adsorbida y almacenada en las superficies externas e internas de la arcilla (deshidratación) (Heller-Kallai, 2006). Entre los 400 °C y los 950 °C ocurre la remoción de los OH⁻ estructurales (desoxhidrilación) acompañada por el desorden parcial de la estructura cristalina y la formación de fases meta estables, caracterizadas por una alta reactividad química (Alujas, 2010).

La pérdida de los OH^- desestabiliza eléctricamente la estructura, especialmente en la zona de la capa octaédrica. Es por eso que en las arcillas calcinadas las fases de alúmina juegan un papel muy importante en la reactividad puzolánica, pues son estas zonas las primeras en desestabilizarse estructuralmente durante el proceso de deshidroxilación (Heller-Kallai, 2006). La desestabilización de cargas eléctricas y la ruptura de los enlaces químicos por el calentamiento provocan el colapso parcial de la estructura, sobre todo en la dirección perpendicular a las láminas que forman la estructura. El intervalo de temperatura para el cual ocurre la desoxhidrilación de la arcilla y el grado de desorden estructural resultante depende del tipo de arcilla, de su grado de cristalinidad, su distribución granulométrica, el alcance y tipo sustituciones isomórficas en su estructura (Todor, 1976).

La presencia de impurezas de tipo no arcilloso como cuarzo y feldespatos tienden a reducir la temperatura a la cual ocurre este fenómeno, acortando el intervalo para el cual es posible la activación térmica de la arcilla (Shvarzman, 2003). 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 desoxhidrilación y el inicio de la recristalización, fenómenos que delimitan, desde el punto de vista estructural, el intervalo dentro del cual una fase arcillosa puede ser convertida en un material puzolánico mediante activación térmica (Alujas, 2010), sin embargo la presencia de otras fases no arcillosas con carácter refractario elevará el consumo energético durante la calcinación del material, sin comprometer un aumento de la reactividad puzolánica He et al, (2000).

Cuando la arcilla es sometida a tratamientos térmicos adecuados, se forman en ella compuestos puzolánicos activos en virtud de las reacciones y las transformaciones en las que, junto a la estructura, constitución mineralógica de partida y a la composición química, juegan importantísimo papel como variables la temperatura y el tiempo de tratamiento (Alujas, 2010).

En síntesis, la reactividad puzolánica de las arcillas está altamente relacionada con la naturaleza de la materia prima, composición mineralógica y grado de cristalinidad de los minerales que la forman, las condiciones del proceso térmico (temperatura y tiempo de deshidroxilación) y sus características propias, tales como morfología y tamaño de las partículas, entre otras (Alujas, 2010).

1.3.5 Reactividad puzolánica en sistemas de arcillas calcinadas. Técnicas de evaluación

La reactividad puzolánica de materiales provenientes de la activación térmica de las arcillas, dependen casi en su totalidad del tamaño de la partícula, el área de superficie específica y la mineralogía de las fases arcillosas. Se han empleado diferentes métodos para la medición de la reactividad de las puzolanas, clasificándolos como métodos directos e indirectos. Los métodos indirectos son aquellas técnicas que detectan los cambios de volumen y de porosidad del material así como la solubilidad de las puzolanas relacionadas con la cuantificación de los productos de hidratación, por ello la conductimetría, sorptividad, pruebas mecánicas, entre otras han sido las principales técnicas utilizadas para estos estudios. A diferencia de estos métodos, los directos están relacionados con el consumo de portlandita, entre ellas la técnica de termo gravimetría, análisis de difracción de rayos X y análisis de calorimetría isotérmica. En dependencia de las propiedades a evaluar o de los tiempos de ensayo requeridos, pueden ser empleados sistemas CPO-Puzolana, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Puzolana, bajo la forma de pastas, morteros u hormigones (Alujas A. , 2012).

De gran importancia son los ensayos de resistencia mecánica, pues los datos que brindan están relacionados con las características del material y muestran cómo influyen las puzolanas como material cementicio suplementario en la práctica. Sin embargo por la poca información que ofrecen estos métodos, no pueden ser utilizados como la única manera de evaluar la reactividad puzolánica, motivo por el cual modernas técnicas de caracterización han ido ganando importancia en el estudio de las reacciones puzolánicas, Paya *et al*, (2001).

La ensayos de consumo de Ca^{2+} en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por espectroscopia de absorción atómica se define como un método analítico basado en la absorción de energía radiante por átomos no combinados químicamente (átomos neutros) del elemento que se analiza, y en la correlación cuantitativa entre esta absorción y la concentración de los iones originalmente presentes en la disolución de la muestra en cuestión. El empleo de esta técnica ha sido reportado para la caracterización de soluciones de poros en el cemento, y en diferentes ensayos para monitorear reacciones de hidratación, incluyendo ensayos de reactividad puzolánica.

También ha cobrado mucha importancia en los estudios de la hidratación del CPO, la calorimetría isotérmica. Esta es una técnica de análisis térmico que se basa en la medición de la velocidad de liberación de calor en función del tiempo bajo un régimen isotérmico, aprovechando el carácter altamente exotérmico de las reacciones de hidratación del CPO y de las reacciones puzolánicas (Pane and Hansen, 2005). De esta forma, la cantidad de calor total acumulado es directamente proporcional a la cantidad de productos de hidratación generados y puede tomarse como una medida del grado de reacción alcanzado por el sistema. La velocidad o flujo de liberación de calor provee información acerca de la cinética y los mecanismos de hidratación (Sha and Pereira, 2001).

Otros métodos como conductividad y contracción química también son muy empleadas para la evaluación de la reactividad puzolánica, y a pesar de cada uno ofrezcan información sobre el potencial carácter de las puzolanas, la intensa búsqueda por explorar en otras técnicas, parece ser incansable (Guerra, 2013). El espectro de imágenes de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) constituye una huella digital para cada mineral. Ofrece información acerca de la estructura molecular a partir de los modos de vibración de los enlaces, teniendo en cuenta las características de los grupos de minerales a los que pertenece, la regularidad dentro de la estructura y la presencia de impurezas cristalinas y no cristalinas. Esta técnica fundamentalmente ha sido estudiada en arcillas puras y los intentos por tratar de monitorear el proceso de deshidroxilación han demostrado que a temperaturas cerca de los 500 °C la intensidad de las bandas OH⁻ desaparecen, sin llegar a alcanzar el sistema la completa deshidroxilación y por tanto la máxima reactividad puzolánica (Frost and Vassallo, 1996).

Los estudios por microscopía electrónica de barrido (MEB) son muy útiles para identificar y evaluar la estructura de los hidratos formados en las pastas de CPO y de CPO con adiciones puzolánicas (Andersen *et al.*, 2003; Nayak and Singh, 2007). Los recientes avances reportados por Scrivener (Scrivener, 2004) en el estudio de la microestructura de pastas y morteros mediante MEB en su modo de electrones de retro dispersión permiten no solo la identificación y descripción de los productos de hidratación, sino también su cuantificación, haciendo uso de modernos software para el análisis y procesamiento estadísticos de las imágenes.

Son varias las técnicas para evaluar la reactividad puzolánica, la mayoría basadas en la medición, durante un intervalo de tiempo, de distintas propiedades físicas o químicas relacionadas directamente con la reacción puzolánica. Por ello el uso combinado de estas técnicas daría una información más completa del fenómeno de actividad puzolánica.

1.4 Generalidades de los bloques huecos de hormigón

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), 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.

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 (Yohn, 2002).

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, 2006; Müller, 2008). El mencionado incremento elevará de manera consecuente los niveles de emisiones de CO₂, si se mantienen las condiciones de producción actuales (Vizcaino, 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, 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).

1.4.1 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 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. 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 arcillas calcinadas con caliza.

Antecedentes de la investigación

En años recientes, investigadores del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) y la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), en Suiza, han trabajado en el desarrollo e introducción de un nuevo tipo de cemento de bajas emisiones al medio ambiente.

Los resultados demuestran que hasta el 45 % de sustitución se obtienen resistencias mecánicas superiores al CP desde edades tempranas como los 7 días e incluso para sustituciones del 60 % se logra el 93 % del rendimiento con respecto al CP (Antoni 2013; Vizcaíno 2014).

El principio del nuevo cemento se basa en el mismo principio de De Weerd (De Weerd y Justnes 2008; De Weerd, Kjellsen, et al. 2011; De Weerd, Haha, et al. 2011), aprovechando la reacción sinérgica entre la alúmina presente en el metacaolín y el carbonato de calcio contenido en la caliza (Antoni M. e., 2012) (Vizcaíno, 2014).

El cemento producido ha mostrado excelentes propiedades hasta el momento. En pruebas de resistencia alcanza valores similares a la de los cementos comerciales P-35 y PP-35. Una investigación importante desarrollada en la Universidad Central de Las Villas se centró en evaluar la reacción de la industria de la construcción con relación al nuevo aglomerante.

Para ello, el cemento producido fue distribuido entre constructores y productores de materiales de construcción, adscritos al Grupo Empresarial de la Construcción de Villa Clara (GECONS V.C) y su empleo monitoreado por parte del equipo investigador, de conjunto con la ENIA V.C (Vizcaíno, 2014).

La prueba piloto de producción de hormigón en condiciones industriales fue concentrada en dos aplicaciones fundamentales:

- a) la fabricación de bloques huecos de hormigón de 500 x 200 x 150 mm.
- b) la fabricación de elementos de prefabricado de gran formato de calidad 25 MPa.

En la tabla 1.1 se presentan las dosificaciones usadas habitualmente para la fabricación de bloques huecos de hormigón.

Tabla 1.1 Dosificación usada en la fabricación de bloques huecos de hormigón de 500 x 200 x 150 mm

Materiales	Tipo de hormigón
	Bloques
Cemento ternario (kg)	226
Arena (m ³)	195
Granito 5-13 mm cantera (m ³)	955
Agua (L)	79
R a/c amasada	0,35

Se produjeron un total de 10 938 bloques huecos de hormigón. Los resultados del control realizado a las producciones son presentados en la Tabla 1.2. Todos los elementos fabricados alcanzaron resistencias mayores a la de diseño a los 28 días, y los bloques cumplieron los requerimientos en cuanto a la absorción.

Tabla 1.2 Resultados de resistencia a la compresión y absorción en bloques huecos de hormigón

Dimensiones bloques (mm)	Consumo de cemento (kg/m ³)	Resistencia media a 7d (MPa)	Resistencia media a 28d (MPa)	Rendimiento	Absorción %
500 x 200 x 150	300	3,3	5,9	2,0	5,6
Especificación	-	4,0	5,0	-	≤10

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

En los últimos años, se han llevado a cabo varios trabajos para la evaluación de materias primas arcillosas de la región de Moa, para la producción de cementos ternarios de tipo LC³ (GonzálezVerdecia, 2015) (Almenares-Reyes, 2011). Esto ha abierto el camino para poner en práctica las bondades que brinda este cemento.

Por otra parte en algunos trabajos realizados en Moa se reporta el empleo de arcilla calcinada como adición activa y de otras adiciones de puzolanas naturales como otra alternativa de empleo de estas fuentes de materiales cementicios suplementarios (Silot Reyes 2015; Morales Serrano 2017). Sin embargo, los niveles de adición al cemento son muy bajos, por lo que desde el punto de vista económico no justifica su utilización. De esta forma, la presente investigación pretende utilizar una adición de aglomerante con altos volúmenes de sustitución.

Conclusiones parciales

- ✓ Los factores económicos y regionales hacen necesario la búsqueda y desarrollo de fuentes de materiales que permitan el reemplazo parcial de significativas porciones del contenido de cemento. La utilización de arcillas calcinadas como sustituto del contenido de clínquer en el cemento Portland favorece el incremento de las propiedades físico-mecánicas en hormigones en cuanto a permeabilidad, resistencia y durabilidad.
- ✓ Los bloques huecos de hormigón son unos de los materiales modernos más utilizados 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 arcillosos.
- ✓ 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 de un 30 y 50% respectivamente de cemento por arcillas calcinadas.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder evaluar las arcillas y tobas vítreas para la fabricación de bloques huecos 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 Características generales del yacimiento de arcilla de Cayo Guam

El afloramiento está ubicado al sureste de la localidad de Moa, específicamente en la región de Cayo Guam a un lado del camino de la comunidad la Melba, a unos 4 km de la carretera Moa – Baracoa.

El afloramiento tiene grandes taludes, posee alrededor de 10 000 m² de extensión y una potencia promedio de 20 m donde se puede apreciar un material bastante homogéneo con una coloración de rosado a rojo intenso como se muestra en la figura 2.1. Es un afloramiento producto de la alteración de los feldespatos producto del intemperismo de los gabroides. Se considera un yacimiento "residual" que es el tipo genético también de las lateritas níquelíferas que está a su alrededor, lo que lo diferencia es la roca madre.



Figura 2.1 Afloramiento de arcilla del yacimiento de Cayo Guam

2.2 Selección de la materia prima

El archipiélago cubano, por sus condiciones de formación geológica, no presenta grandes reservas de rocas con un alto contenido de arcillas caoliníticas, a pesar de que la formación de esta fase mineral se favorece en las condiciones de intemperismo características de zonas tropicales (Bergaya, 2006). Se encuentran depósitos de arcillas de bajo grado de caolinita, contaminadas con otras fases minerales, por lo que su uso se ve limitado para las aplicaciones tradicionales, pero que podrían ser aprovechadas en la obtención de puzolanas de alta reactividad (Alujas, 2010).

Este afloramiento presenta diferentes grados de estudio desde el punto de vista geológico y en la mayoría de los casos no se ha reportado su evaluación como fuente de adiciones activas al cemento. Sin embargo, un proyectado incremento de la producción de cementos con altos volúmenes de sustitución de clínquer demanda de una profundización en el estudio de los yacimientos cubanos como fuente de materiales puzolánicos, tomando como principales criterios de selección el contenido de minerales arcillosos (principalmente caolinita), su disponibilidad y en la medida de lo posible la cercanía a las fábricas de cemento actuales y a las futuras inversiones.

Otro elemento importante, es que desde el punto de vista científico, estos sectores son considerados por su génesis, los únicos de su tipo en el país y su estudio contribuiría a aportar nuevos conocimientos.

2.2.1 Toma y preparación de la muestra de arcilla

La selección de la materia prima se produjo con la asesoría de especialistas del departamento de Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Se seleccionó un corte del afloramiento con el objetivo de obtener una muestra representativa a todo lo largo de los perfiles de meteorización.

El método empleado fue el muestreo por surcos, desde la base hasta la superficie, ya que a partir de este tipo de muestreo se abarca toda la potencia del afloramiento. Se realizaron cinco surcos, las muestras de éstos fueron mezcladas para constituir una muestra compuesta homogénea de 100 kg. El total de muestras acumuladas se trasladó hasta el laboratorio de beneficio del Instituto Superior Minero

Metalúrgico de Moa (ISMMM) para ser preparada para los posteriores ensayos previstos.

El material arcilloso en su estado natural se calcinó en una mufla de laboratorio a 850 °C, por un período de una hora. Esta temperatura es a la que se alcanza la mayor reactividad de estas arcillas, posteriormente fue sometido a un proceso de molienda en el molino de bolas hasta lograr valores de finura en el rango de 90-95% de pasado por el tamiz de 90 μm .

Las muestras de caliza procedentes de la cantera Pilón fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño de partículas, hasta alcanzar una granulometría del 90 % por debajo del tamiz 90 μm . El cemento P-35 utilizado fue elaborado en la fábrica de cemento Siguaney con una granulometría del 92 % pasado por el tamiz de 90 μm .

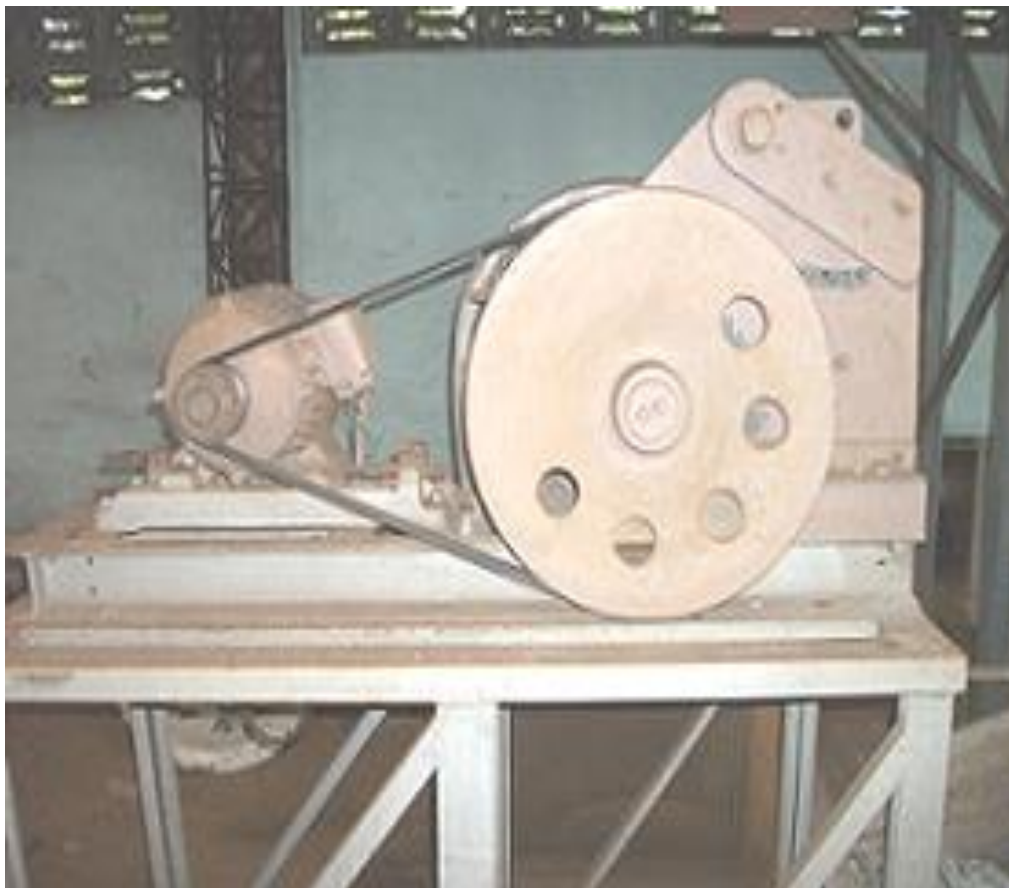


Figura 2.2: Trituradora de mandíbula TQ(320 x165)



Figura 2.3: Trituradora de mandíbula TQ(150x15)



Figura 2.4 Molino de bola MB-600

2.3 Preparación y formulación del cemento LC³

Las muestras de caliza y la arcilla calcinada fueron sometidas a un proceso de molienda, cada uno por separado, en un molino de bolas MB-600 hasta lograr una finura de alrededor de 66 % cernido por el tamiz de 45 μm . Para preparar los

aglomerantes de base cemento – arcilla calcinada – caliza, los componentes fueron mezclados durante 5 minutos en el molino de bolas en las proporciones reportadas por (Vizcaino, 2014). De esta forma se obtuvo un aglomerante, con la composición que se presenta en la Tabla 2.1. Estos aglomerantes fueron empleados en la elaboración de bloques huecos de hormigón con una sustitución de 30 y 50 % de cemento Portland P-35.

Tabla 2.1. Nomenclatura de las series de aglomerantes, componentes y composición

Aglomerante	Composición, %		
	Cemento P-35	Arcilla	Caliza
LC ³ – 50	50	30	20
LC ³ – 70	70	20	10

2.4 Caracterización de la materia prima 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 Pilón en Mayarí). El cemento Portland P-35 fue suministrado por la Empresa de la Construcción del Poder Popular (ECOPP).

Las características de los materiales mencionados en el párrafo anterior, se muestran en las tablas 2.2 a la 2.7. Todos los materiales se consideran conforme según Norma Cubana NC– (NC -251, 2013).

Tabla 2.2. Composición granulométrica del árido grueso

Diámetro del tamiz ,mm	Pasado, %	Especificaciones
17,2	100	100
9,52	96	85-100
4,76	32	15-35
2,38	6	0-10
1,19	0	0-5

Tabla 2.3 Características físico- mecánicas de los áridos finos

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

Tabla 2.4 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

Tabla 2.5 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 arcillas	%	1,50	$\leq 1,00$
Peso específico	g/cm ³	2,77	$\geq 2,50$
Absorción	%	1,80	$\leq 3,00$

Tabla 2.6 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
0,298	18	10-30
0,149	10	2-10
0,071	7	5-7

Tabla 2.7 Ensayos realizados por la Empresa Nacional de Investigación de Ciencias Aplicada –Holguín (ENIA)

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones
Material más fino que el tamiz 200	%	0,69	$\leq 1,00$
Partículas de arcillas	%	0,03	$\leq 0,25$
Partículas plano alargadas	%	1,30	≤ 10
Peso específico	g/cm ³	2,54	$\leq 2,56$
Absorción	%	1,60	$\leq 3,00$

2.5 Determinación de la composición granulométrica

El análisis granulométrico de la arcilla calcinada 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.

2.6 Determinación de la composición química

La determinación de la composición química de las muestras de arcillas 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 2.6.

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

2.7 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

2.8 Fabricación de los 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 30 y 50 % de cemento P-35 por arcillas calcinadas.

El volumen de material utilizado se muestra en las tablas 2.8 y 2.9 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 bloques de tipo III (40 cm de largo x 20 cm de alto x 10 cm de ancho) según sus dimensiones de a los cuales se les va a realizar ensayos físico -mecánicos.

Los bloques una vez terminado el proceso de producción se retiran encima de pelets 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 2.8 Dosificaciones utilizadas para la sustitución de un 30 % de MCS

Material	Cantidad	Unidad
Arcilla calcinada	4	Kg
Carbonato de calcio	2	Kg
Cemento P-35	14	Kg

Tabla 2.9 Dosificaciones utilizadas para la sustitución de un 50 % de MCS

Material	Cantidad	Unidad
Arcilla calcinada	4	kg
Carbonato de calcio	2,6	kg
Cemento P-35	6,4	kg



Figura 2.7 Producción de los bloques huecos de hormigón.

2.9 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.

2.9.1 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 logaran 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:

$$R'i = Fj / a_j$$

Donde:

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

Fj : carga de rotura

a_j : área de la sección bruta del bloque



Figura 2.8 Prensa Hidráulica de 100 t



Figura 2.8 Recubrimiento de los bordes del bloque con una capa de cemento P-35

2.9.2 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 2.9) durante 24 horas a una temperatura aproximadamente de 110 °C y luego pesándolos, después se sumergen en un recipiente lleno de agua (Figura 2.10) 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:

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

Ai: 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 2.9 Estufa donde permanecieron los bloques durante 24 horas

Conclusiones parciales

- ✓ Las muestras de arcillas calcinadas se seleccionaron a partir del conocimiento de su reactividad puzolánica con un porcentaje de sustitución de 30 y 50 %.
- ✓ Las técnicas analíticas y experimentales aplicadas en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos según las normas cubanas.
- ✓ La metodología empleada en la investigación permite conocer la posibilidad de empleo como fuente de material cementicio suplementario para la elaboración de aglomerantes base clínquer – arcilla calcinada y caliza.

Capítulo 3 Análisis y discusión de los resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados de la caracterización química, mineralógica y granulométrica del material arcilloso del yacimiento de Cayo Guam en su estado natural y una vez calcinado las propiedades físico-mecánicas de los bloques huecos de hormigón, donde se sustituye un 30 y 50 % de cemento por arcillas calcinadas.

3.1 Resultados de la composición química

El espectro de la composición química cualitativa superficial determinada por microscopía electrónica de barrido con rayos X acoplado se muestra en la figura 3.1, que indica la presencia de aluminio, silicio, hierro, oxígeno, magnesio, potasio, sodio, titanio, azufre y carbono.

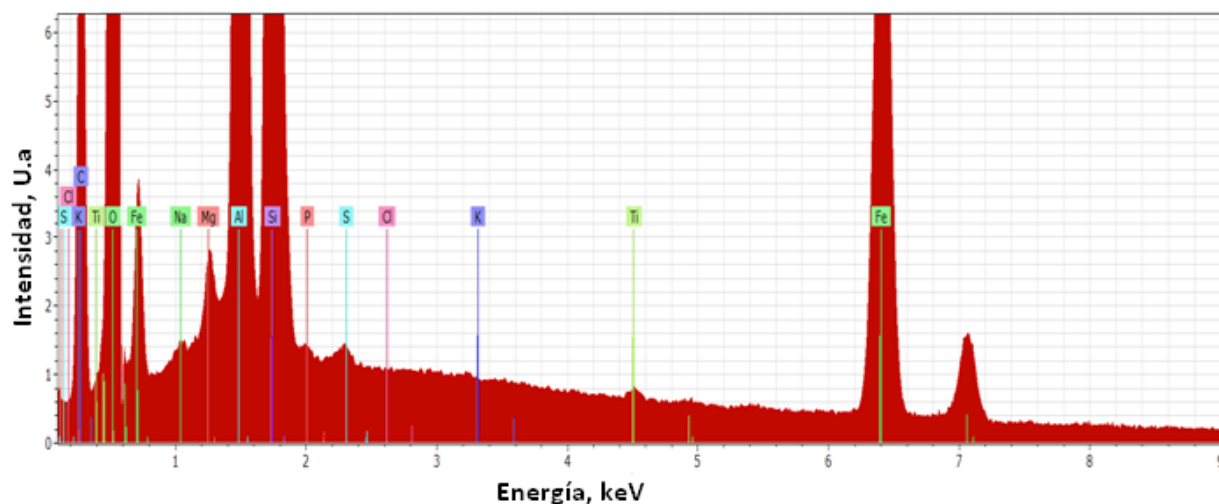


Figura 3.1. Espectro MEB - EDS de la composición química cualitativa superficial

En la tabla 3.1 se muestra la composición química cuantitativa por Espectrometría de Absorción Atómica de la arcilla del yacimiento Cayo Guam en su estado natural. Se aprecia que los compuestos que aparecen como constituyentes en mayores cantidades son óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, superando el 70 %, lo que permite asegurar que los materiales caracterizados cumplen con las recomendaciones expresadas en la ASTM C 618 (ASTM, 2005b) y NC TS 528

(NC/CTN22, 2011d) para materiales cementicios suplementarios y en menores cantidades óxidos de sodio, magnesio y potasio.

Tabla 3.1 Composición química de la muestra de arcilla natural

Compuestos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Contenido, %	43,30	24,92	11,76	0,13	0,04	0,01

Los relativamente bajos niveles de óxido de potasio en la composición química de la materia prima, pueden justificar la no presencia de minerales como la illita, de igual forma los bajos contenidos de óxido de sodio, óxido de magnesio pueden limitar la presencia de sus fases asociadas como la montmorillonita y los feldespatos. Es necesario destacar además los altos niveles de hierro, que pueden encontrarse como sustituciones isomórficas en cualquiera de las estructuras arcillosas presentes, y bajo la forma estructural de óxidos o hidróxidos, que son en gran medida los responsables del color rojizo de la arcilla.

Por otro lado esta composición es similar a las obtenidas por (OROZCO, 1995), para muestras del depósito de Cayo Guam, esto demuestra la similitud de la composición de los afloramientos de la región.

3.2 Composición mineralógica de la muestra natural

Las principales fases minerales identificadas por DRX en la arcilla natural son la caolinita $[\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4]$, halloysita $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$, nacrita $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$, gibbsita $[\text{Al}(\text{OH})_3]$, dickita $[\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4]$, hematita $[\text{Fe}_2\text{O}_3]$ y cuarzo $[\text{SiO}_2]$.

En la figura 3.2 se muestra el Difractograma de las fases presentes en la muestra. Hay picos correspondientes a minerales del grupo de la caolinita que se solapan en un mismo pico una fase con otra. Para el material arcilloso estudiado se reporta como fase arcillosa la caolinita, que corresponde al grupo estructural 1:1 y como fases no arcillosas o acompañantes cuarzo y gibbsita. Las fases correspondientes al grupo estructural 1:1 son la principal fuente de material puzolánico (Fernández López &

Scrivener, 2011), porque es la que aporta la mayor cantidad de alúmina reactiva y alcanza el mayor desorden estructural durante la activación por la liberación de los grupos OH.

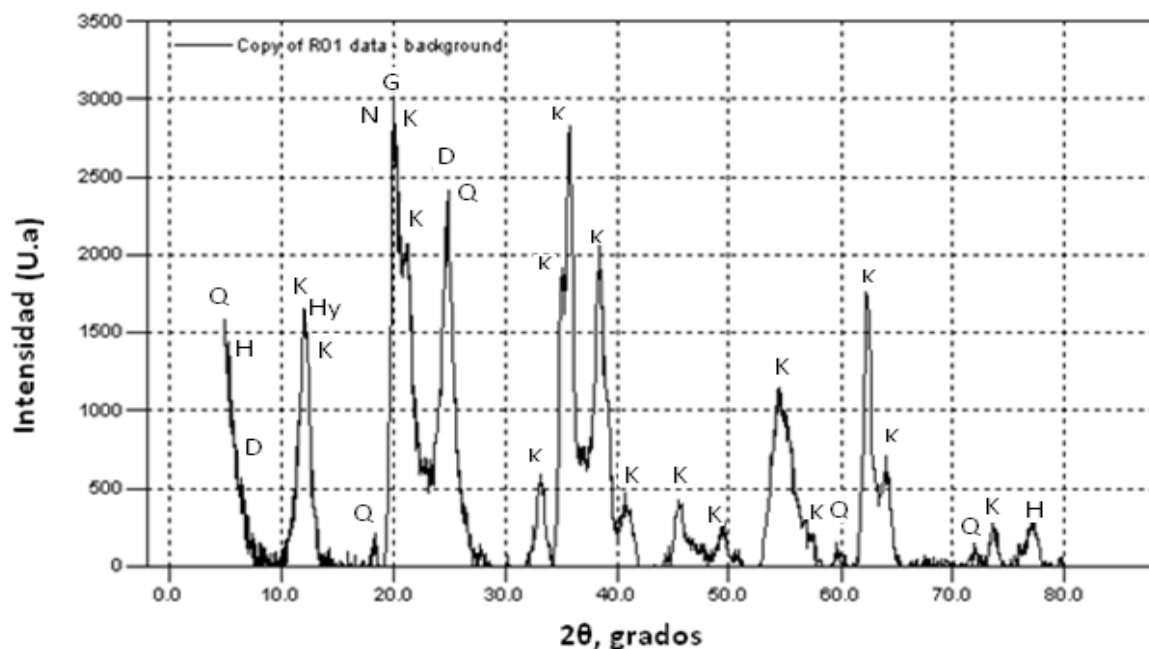


Figura 3.2 Difractograma de la muestra de arcilla natural

3.3 Caracterización granulométrica de los productos de la molienda

En la figura 3.3 se muestra la curva característica de tamaño de partículas del cemento empleado, el 99 % de este material pasa por el tamiz 90 μm , con diámetro medio de partículas de 20 μm donde la superficie específica (2749,25 cm^2/g) y la finura se corresponden con las características de los cementos Portland ordinarios (Aitcin 2016).

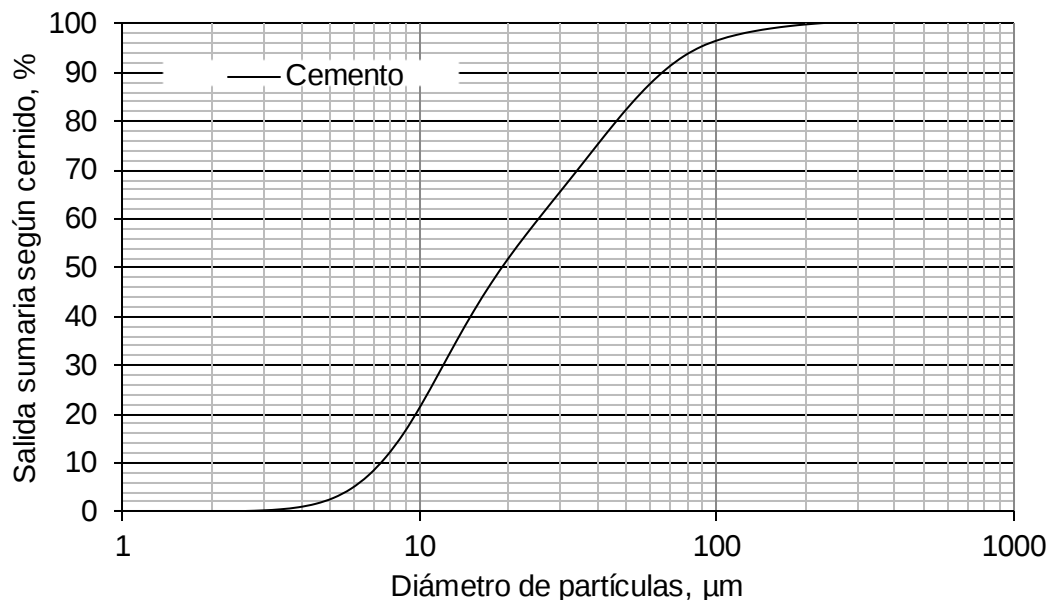


Figura 3.3 Curva granulométrica del cemento empleado en la elaboración de los bloques huecos de hormigón

El carácter reactivo de las adiciones activas al cemento Portland, se incrementa en la medida en que lo hace el grado de finura, por lo que el tamaño de las partículas, como regla general, influye en la velocidad de reacción. Las partículas finas, en particular, aquellas con mayor superficie específica actúan como centro de nucleación para los productos de hidratación y favorece el crecimiento a edades tempranas de los productos de hidratación del cemento Portland (SCRIVENER, 2014).

En la figura 3.4 se muestra la curva característica de tamaño de partículas de la arcilla calcinada, donde el 51,37 % de este material pasa por el tamiz de 45 μm .

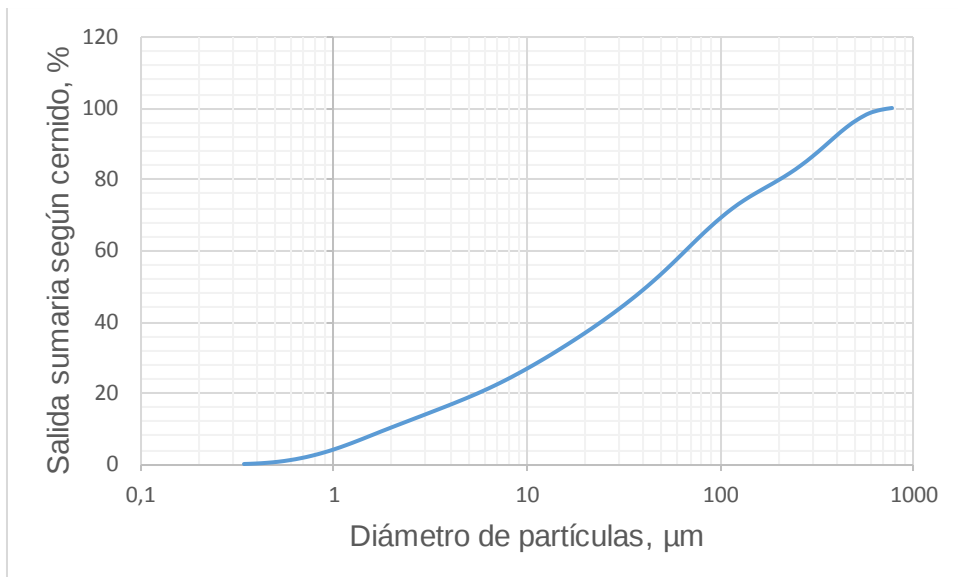


Figura 3.4 Curva granulométrica de la arcilla empleada en la elaboración de los bloques huecos de hormigón.

3.4 Análisis de los resultados obtenidos en los 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 16 bloques producidos con la dosificación mencionada en el epígrafe 2.3 del capítulo anterior con una sustitución de 30 y 50 % de cemento por arcillas calcinadas a 850 °C para evaluar si con estas dosificaciones la fabricación a escala industrial de bloques huecos de hormigón cumple con lo establecido según la norma cubana NC 247:2010. 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 figura 3.5 se muestran los resultados de los ensayos de absorción a los bloques huecos de hormigón de tipo III con sustitución de un 30 y 50 % de cemento por arcillas calcinadas. Actualmente no existe norma que establezca el porcentaje de absorción de agua que deben cumplir los bloques de tipo III, sin embargo la norma cubana plantea que para los bloques de tipo II el porcentaje de agua debe ser menor del 10 %. Como se puede apreciar en la figura 3.5 se muestra que los ensayos presentan un porcentaje de absorción de agua menor del 10 %. Este resultado muestra que el uso de

en la elaboración de mezclas para la producción de hormigón sean más impermeables, garantizando que el período de deterioro se reduzca.

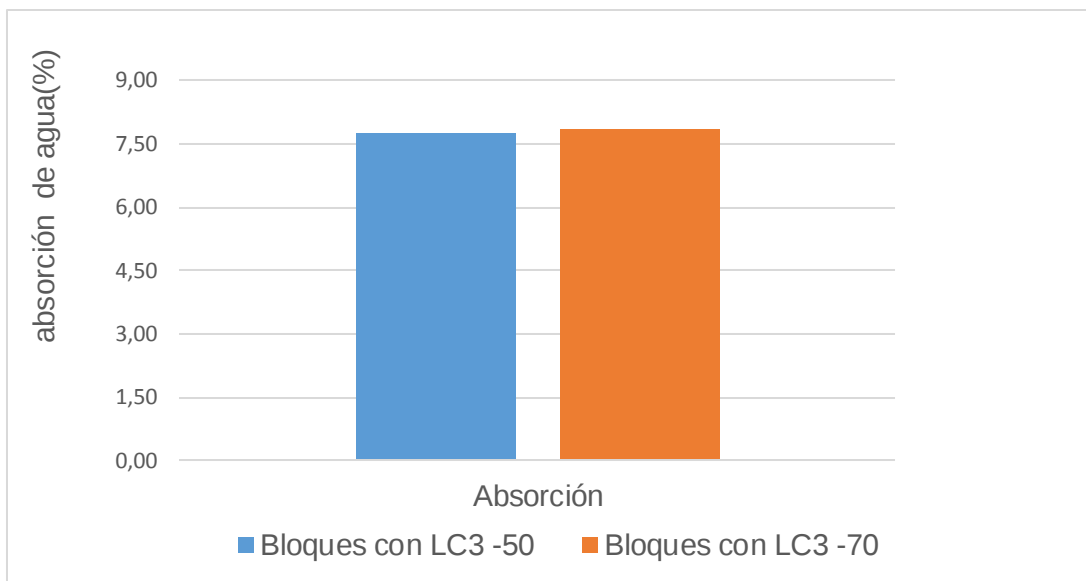


Figura 3.5 Resultados de los ensayos de absorción de agua

3.4.2 Resultados del ensayo de resistencia a la compresión

Se ensayaron 24 bloques huecos de hormigón, donde fueron experimentados 12 bloques del tipo III, donde 6 de ellos fueron ensayados con 30 y 50% de cemento por arcilla calcinada y 12 ensayos de las muestras patrones del tipo III.

Como se muestra en la figura 3.4 y 3.5 todos los bloques ensayados cumplen satisfactoriamente con la resistencia mínima establecida en la norma cubana NC- (NC - 247, 2010), donde para, los bloques tipo III con una sustitución de un 30 % de arcillas calcinadas, el valor mínimo de resistencia a la compresión a los 7 días es de 2,4 MPa, para una sustitución de 50 % de arcillas calcinadas a los 7 días es de 2,2 MPa. Cuando analizamos la resistencia a la compresión a los 28 días, con una sustitución de un 30 % de arcilla calcinada es de 3,0 MPa y de 2,8 MPa con una sustitución del 50 % de arcillas calcinadas. Estos son resultados alentadores, y sería una base sólida para la producción de bloques con una sustitución de 30 y 50 % de arcillas calcinadas por cemento P-35. En ambos casos, la resistencia mostrada por los

bloques es superior a la resistencia de los patrones de referencia, aún cuando los requisitos de granulometría de la arcilla calcinada no cumplen con lo establecido para su uso como materiales cementicios suplementarios.

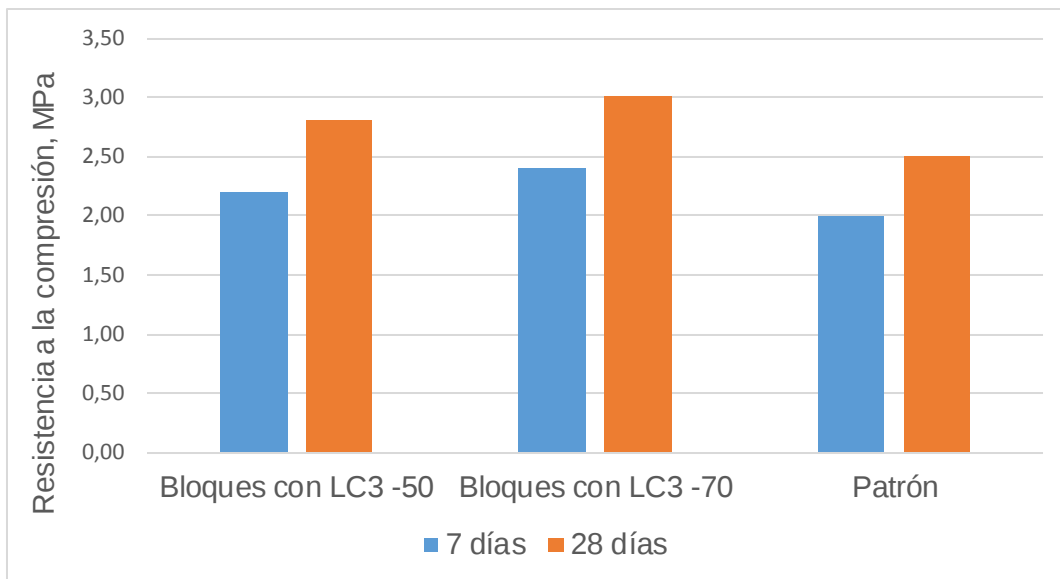


Figura 3.5 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión

3.5 Ventajas de la utilización de arcilla calcinada como adición en la fabricación de los bloques huecos de hormigón en Moa

La aplicación de aglomerante cal-puzolana influye de manera positiva en la reducción de los costos y consumo energético inherentes al proceso de fabricación de cemento y disminución de los índices de contaminación medioambiental. Como adición al cemento, permite acortar los plazos de endurecimiento y alcanzar mayores resistencias en los morteros que se elaboran con estas mezclas. Además, permite la retención de agua evitando las fisuras por retracción y secado, contribuyendo a una mayor trabajabilidad de los morteros (Martirena, 2003)

El presente trabajo constituye un paso 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 la provincia de Holguín existen posibilidades de explotar recursos minerales para la construcción debido a que la valoración técnica ha resultado positiva. En muchos otros casos, bajo una valoración de su consumo local, se ha obtenido un impacto importante desde el punto de vista económico. A partir de los resultados obtenidos y con el objetivo de tener mayor conocimiento acerca de los aportes económicos de estos, por concepto de sustitución de cemento por aglomerante cal-puzolana, se desarrolla a continuación una valoración preliminar.

El consumo de cemento Portland P-35, para una empresa de producción de bloques según se presenta en la tabla 3.2, es de aproximadamente 270 t para la fabricación de 489 600 bloques. Si se sustituye el 30 % de cemento por aglomerante LC³ es posible reducir 81 t de cemento o incrementar la producción de bloques en 150 mil unidades, manteniendo el mismo consumo de cemento P-35. En el caso de utilizar una formulación de 50 % de cemento P-35 y 50 % de LC³, se podría reducir la cantidad de cemento ordinario 135 t, o producir unos 244 800 bloques adicionales, lo cual se traduce en la posibilidad de construir 204 viviendas de 8x6 m.

Estos resultados son promisorios, y proporcionan una alternativa para dar respuesta a la creciente demanda de prefabricados, especialmente, cuando la principal dificultad que presenta la producción de estos materiales es el déficit del cemento. La posibilidad de efectuar una producción a nivel local, contribuye al desarrollo y a obtener menores costos de producción en comparación con la producción de cemento Portland y propiciar el comercio local del producto.

Tabla 3.2 Consumo de aglomerante para la producción de bloques huecos de hormigón

Tipo prefabricado	Capacidad de producción (U/año)	Cantidad de cemento necesario (t)
Disminución del consumo de cemento		
Bloque con cemento P-35	489 600	270
Bloque con 30 % de LC ³		189
Bloque con 50 % de LC ³		135
Incremento de la capacidad de producción		

Bloque con 30 % de LC ³	639 600	270
Bloque con 50 % de LC ³	734 400	

Conclusiones parciales

- ✓ Los bloques huecos de hormigón fabricados con una sustitución del 30 y 50 % de cemento por materiales arcillosos presentan un excelente comportamiento en cuanto a resistencia a la compresión y absorción de agua, cumpliendo con los parámetros normalizados.
- ✓ Las perspectivas de utilización de los materiales arcillosos muestra resultados alentadores para los programas de construcción de viviendas y otras obras sociales, lo cual permite influir positivamente en el desarrollo local.
- ✓ Las arcillas calcinadas como aditivo son de vital 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 de CO₂ al medio ambiente.

CONCLUSIONES

Se evaluaron las propiedades físico – mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados con cemento LC³ a partir de su formulación con adición de cemento P-35, caliza, y arcilla del depósito Cayo Guam calcinada, 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 los materiales reúnen las condiciones para ser considerados con potencial para ser utilizados como materiales cementicios suplementarios. 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 cubana NC TS 528:2013 para las puzolanas naturales en Cuba.
- La absorción de agua de los bloques huecos de hormigón fabricados con arcillas calcinadas donde se sustituye un 30 y 50 % en el cemento P-35, muestran valores respectivos cumpliendo con los requisitos establecidos en las especificaciones para su uso.
- La sustitución de 30 y 50 % de cemento por arcillas calcinadas 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, con valores de 2,4 y 2,2 respectivamente a los 7 días y a los 28 días con valores de 3,0 y 2,8 respectivamente, superior en todos los casos a la resistencia manifestada por los patrones de referencia.
- El empleo de bloques huecos de hormigón con arcilla calcinada se considera una alternativa favorable para la industria de materiales de construcción del municipio de Moa.



RECOMENDACIONES

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 a las empresas constructoras del municipio que permita la proyección futura del empleo de la sustitución de arcillas calcinadas por cemento Portland en la producción de bloques y otros elementos de pequeño formato.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI. (2001). *ACI Committee Report 232.1R-00 Use of raw or processed natural pozzolans in concrete*. S.I.
2. Alain. (2017). *Empleo de Tobas en la produccion de bloques huecos de homigon*.
3. Almenares-Reyes. (2011). *Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como adiciones puzolánicas*. Moa: Tesis de Maestría Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
4. Alujas. (2010). *Obtencion de un material puzolanico de alta reactividad a partir de la activacion termica de una fraccion arcillosa multicomponente*. Las VILLAS, Santa Clara, Cuba.
5. Alujas. (2010). *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*. Tesis Doctoral. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. 106 p.
6. Alujas. (2010). *Rapid methods to assess puzzolanic*. UCLV: Marta Abreu Las Villas.
7. ALUJAS, A. (2012). *Rapid methods to assess pozzolanic reactivity*. UCLV. Marta Abreu de Las Villas.
8. Ambroise, J. S. (1994). *Properties of metacaolín blended cements*. Advanced Cement Based Materials. 1(4): 161 -168 p.
9. Antoni, M. (2013). *"Cement substitution by a combination of metacaolín and limestone"*. Cement and Concrete Research 42(12): 1579-1589 p.
10. Antoni, M. e. (2012). *Cement substitution by a combination of metacaolín and limestone*. Cement and Concrete Research 42(12): 1579-1589 p.
11. ASTM. (2008). *Standard specification for coal fly ahs and raw or calcined pozzolan for in concret*. www.astm.org : ASTM C 618 03.

12. Aylard, & Hawson. (2002). *Our agenda for action*. ISBN 2-940. www.wbcasd.org.
World Business Council for Sustainable Development and Cement Sustainability Initiative (WBCSD-CSI).
13. Batista, R. (2007). *Valoración del Potencial de Los Recursos Minerales para la Industria del Cemento en Cuba*. Universidad de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba.
14. Batista, R. (2011). *Rocas y minerales industriales de la República de Cuba*. Habana, Cuba.
15. Batista, R., & Coutin, D. (2013). *Potencialidades de las puzolanas naturales y arcillas caoliníticas como aglomerantes en Cuba*. In : *10mo Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción*. Cayo Santa María, Santa Clara, Cuba.
16. BERGAYA. (2006). *Handbook of clay science. General Introduction: clays ; clays minerals and clay science*.
17. Bergaya. (2006). *Handbook of clay science. General Introduction : clays; clays minerals and clay science*.
18. Brigatti, G.E. (2006). *Handbook of clay science Structure and mineralogy of clay minerals*.
19. C.A, H. (1998). *Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control*.
20. Castillo. (2010). *Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas*. Revista Ingeniería de Construcción, 25(3), 329-352 p.
21. Castillo. (2010). *Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas*. Revista Ingeniería de Construcción, 25(3), 329-352 p.
22. Costafreda. (2011). *Granulometría y reacción puzolánica*. La Habana, Cuba: In : *IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS' 2011*. Sociedad Cubana de Geología. 2011.

23. FERNÁNDEZ LÓPEZ, R. M., & SCRIVENER, K. (2011). *The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals A comparison*. Cement & Concrete Research.
24. FERNÁNDEZ LÓPEZ, R., MARTIRENA FERNÁNDEZ, J. F., & SCRIVENER, K. (2011). *The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite*. Cement y Concrete Research.
25. Fernandez, L. (2009). *Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries*. in Faculté Sciences et Techniques de L'Ingenieur., École Polytechnique Federale de Lausanne. Lausanne. 178 p.
26. Galen. (2006). *Handbook of Clay Science Genesis of clay minerals*.
27. GonzálezVerdecia. (2015). *Evaluación de materiales puzolánicos como fuente de materia prima para la producción de cemento de bajo carbono*. Moa, Cuba: Trabajo de diploma Instituto Superior Minero de Moa.
28. Habert, G. (2009). *Clay content of argillites: Influence on cement based mortars*. Applied Clay Science, 43, 322-330 p.
29. HABERT, G. (2009). Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science*, 322-330.
30. HE, C., MAKOVICKY, E., & OSBÆCK, B. (2000). Thermal stability and pozzolanic activity of raw and calcined mixed-layer mica / smectite. *Applied Clay Science*, 17, 141 -161 p.
31. HELLER-KALLAI, L. (2006). *Handbook of clay science*. Elsevier Ltd.
32. I.G.P. (2010). *Arcillas caoliniticas cubanas. Estado actual*.
33. Lara, C. (2010). *Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas*. Revista Ingeniería de Construcción, 25(3), 329-352 p.

34. Martirena, J. (2003). *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínquer de cemento Pórtland: el aglomerante calpuzolana como adición mineral activa*,. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.: in Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central de Las Villas:.
35. MARTIRENA, J. (2003). *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clínquer de cemento Portland :el aglomerante calpuzolana como adición mineral activa ,in Departamento de Ingeniería Civil ,Facultad de Construcción Universidad Central . Las Villas ,Santa Clara, Cuba.*
36. MASSAZZA, F. (1993). Pozzolanic cements. *In : Cement and Concrete Composites*, Vol. 15, nº 4, p. 185-214.
37. Muller, & Harnish. (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.
38. Müller, N. e. (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.
39. NC - 247. (2010). *Bloques huecos de hormigón Especificaciones*. Impreso en Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
40. NC - 96. (2011). *Cemento con adición activa. Especificaciones*. La Habana, Cuba: In :Disponible à l'adresse : www.nc.cubaindustria.cu.
41. NC -251. (2013). *Áridos para hormigones hidráulicos—Requisitos*. Habana, Cuba.
42. OROZCO, G. (1995). *Caracterización de las arcillas de Cayo Guam*. Moa: Informe técnico.

43. PAYA, J. M. (2001). Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. *Cement and Concrete Research*, 31, 227-231 p.
44. Poll, L. (2016). *Evaluacion de la actividad puzolanica de arcilla del sector La Delta para su utilizacion como materiales cementicios suplementarios*. Moa ,Holguin: Tesis en opcion Titulo de Maestria.
45. Purnell, P. (2013). *The carbon footprint of reinforced concrete*. In : *Advances in Cement Research*.
46. RANCES, C. L. (2011). Estudio de la adicion de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigon. *Ingenieria de Construccion* , 25-40.
47. Reyes, A. (2011). *Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como aditivo puzolánico*. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.
48. Romero, Y. (2014). *CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE ARCILLAS DE LA REGIÓN DE CAYO GUAM PARA SU UTILIZACIÓN COMO MATERIAL CEMENTICIO SUPLEMENTARIO*. Moa ,Holgin: Tesis en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales.
49. Rosell. (2006). *Zeolita como aditivo mineral active en hormigones de altas prestaciones*. In : Boletín Geológico Minero.
50. Rosell. (2007). *Influencia del tamaño de partícula de zeolita en su actividad puzolánica*. La Habana, Cuba: In : II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2007 Sociedad Cubana de Geología.
51. Rosell. (2010). *Zeolita Natural Cubana del Tipo Clinoptilolita Heulandita como Material Cementicio Suplementario en Hormigones*. . Santa Clara, Cuba: Tesis Doctoral. Universidad Central « Marta Abreu » de Las Villas.
52. SABIR. (2001). Metacaolin and calcinad clays as pozzolas for concret :a revi. *Cement and Concrete Compositir*, 441-454.

53. SAGAR NAYA, P., & SINGH, B. K. (2007). *Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR Bulletin of Materials. Science*, 30, 235-238 p.
54. SAMET. (2007). Use of kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: formulation of blended cement. *Cement Concret Composition*, 729-741.
55. SCHNEIDER. (2011). Sustainable cement production and future. *Cement and Concret Research*, 642-650.
56. SCRIVENER, K. L. (2014). Options for the future of cement. In : *The Indian Concrete Journal*, Vol. 88, nº 7, p. 11 -21.
57. Serrano, A. M. (2017). *Empleo de tobas en la producción de bloques huecos de hormigón. Tutores Roger Samuel Almenares Reyes y Carlos Alberto Leyva R. Moa*.
58. SHVARZMAN, L. A. (2003). The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. *Cement and Concrete Research*, 33 p.
59. Snellings. (2010). *Sustainable cement production present and future*.
60. Taylor, M. (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.
61. Tironi, A. (2013). *Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad pozoalánica*. La Plata, Argentina: Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata.
62. TODOR, D. (1976). Thermal Analysis of Minerals. *Kent Abacuss Press*, 256 p.
63. Vanderwerf. (2012). *Cement for severe environments new cement chemistry creates concrete that withstands chemical attack and high temperatures*.

64. VANDERWERF, P. (2012). *Cement for severe environments new cement chemistry creates concrete that withstands chemical attack and high temperatures.*
65. Verdecia, G. (2015). *Evaluación de materiales puzolánicos como fuente de materia prima para la producción de cemento de bajo carbono.* . Moa, Holguín: Trabajo de diploma. Moa, Cuba : Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
66. Vizcaino, L. M. (2014). *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer - arcilla calcinada - caliza.* Santa Clara, Cuba: Tesis Doctoral. Universidad Central « Marta Abreu » de Las Villas.
67. Vizcaíno, L. M. (2014). *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer - arcilla calcinada - caliza.* Santa Clara, Cuba: Tesis Doctoral. Universidad Central « Marta Abreu » de Las Villas.
68. WBCSD. (2015). Low carbon technology partnerships initiative (LCTPi) [en ligne]. Geneve, Suiza. Disponible à l'adresse : <http://www.lctpi.wbcsdservers.org/>.
69. Yohn, V. M. (2002). *On the sustainability of the Concrete.* In : *UNEP Journal Industry and Environment.* 7p.

ANEXOS



ANEXO 1 CONCRETERA



ANEXO 2 BANDA TRANSPORTADORA



ANEXO 3 TOLVA



ANEXO 4 EQUIPO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS BLOQUES