



Instituto Superior Minero
Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez

**Departamento de Geología
Facultad: Geología y Minería**

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de
Ingeniero Geólogo

**Título: Potencialidades de las arcillas del municipio de
Baracoa para la obtención de cemento de bajo carbono (LC3).**

Autor: Rafael López Elías.

Moa 2016

Año 58 de la Revolución





Instituto Superior Minero
Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez

**Departamento de Geología
Facultad: Geología y Minería**

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de
Ingeniero Geólogo

Título: Potencialidades de las arcillas de Baracoa para la
obtención de cemento de bajo carbono (LC3).

Autor: Rafael López Elías.

Tutor: Dr. C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez.

Ing. Reinier Hernández Guilarte

Moa 2016

Año 58 de la Revolución

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo: **Rafael López Elías**, autor de este Trabajo de Diploma que tiene como tema **“Potencialidades de las arcillas de Baracoa para la obtención de cemento de bajo carbono.”** Y los tutores: *Dr. Carlos Alberto Leyva Rodríguez* y el *Ing. Reinier Hernández Guilarte*, declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que el mismo disponga de su uso cuando estime conveniente.

Para que así conste el presente a los ____ días del mes de _____ de 2016.

Diplomante: Rafael López Elías

Dr. Carlos A. Leyva Rodríguez

Ing. Reinier Hernandez Guilarte

PENSAMIENTO

No debes añorar una doctrina perfecta, sino la perfección de ti mismo, la divinidad está en ti, no en conceptos y libros.



Hermann Karl Hesse

Dedicatoria

De manera muy especial dedico esta tesis al ser máspreciado y querido que tengo en la vida, al motivo que me ha impulsado y me ha dado fuerzas para llegar hasta este punto por su amor incondicional, confianza y sacrificio durante todos estos años de estudios, a mi querida madre Milagros Elías Elías.

...A mi padre Rafael López Nápoles por ayudarme y brindarme su apoyo en los momentos difíciles.

...A todos mis hermanos Ángel Emilio, Yeinier, Yanibeisy, y en especial a mi hermana Briceida que estuvo siempre a mi lado.

...A mis tipos Marco Antonio y Yuri por estar siempre tan atentos conmigo.

...A mi cuñado Joel Fajardo por brindarme su apoyo.

...A mis amigos que estuvieron presentes todos estos años

Agradecimientos

Los resultados del presente trabajo han sido fruto del esfuerzo conjunto dedicación, apoyo y la colaboración de varias personas, las cuales me sirvieron de mucho apoyo para que se cumpliera este sueño en realidad. Por esta razón es necesario agradecer a quienes de alguna manera contribuyeron al feliz término de la misma y a quienes estuvieron presentes en estos arduos años de estudio.

- ❖ Especial agradecimiento a mi madre Milagros Elías Elías y mi padre Rafael López Nápoles por su esfuerzo y apoyo en todo momento y por la simple razón de darme la vida.*
- ❖ A mis tutores el Dr. Carlos Leyva Rodríguez por transmitirme sus conocimientos y al Ing. Reinier Hernández Guilarte por dedicarme su tiempo cuando lo necesité.*
- ❖ Al claustro de profesores del Departamento de Geología por su entrega y dedicación en cada una de las materias impartidas en el transcurso de todos estos años.*
- ❖ A todos mis amigos y mis compañeros que me extendieron su mano, gracias por sus consejos sabios, su apoyo, comprensión, su ayuda en los momentos precisos.*
- ❖ Mis más profundos agradecimientos a todas esas personas que me quieren bien y me subieron comprender a lo largo de estos años.*

A Todos, MUCHAS GRACIAS.

Resumen

En el presente trabajo se evaluaron los productos de calcinación de las arcillas de Baracoa y residuos de ladrillos (rasillas) como fuente de material puzolánico para la producción de aglomerantes de base clínquer–arcilla calcinada–caliza en la industria del cemento. Los aglomerantes fabricados presentan una sustitución del 50% del cemento P-35 por un 30% de arcillas calcinadas y residuos de ladrillos (rasillas) con un 20% de caliza. Se realizó una caracterización, basada en la determinación del índice de actividad puzolánica a través de los ensayos de resistencia a la compresión a partir del método indicado en las normas para tales especificaciones. Mostrando que todos los materiales ensayados se comportan como material puzolánico, al obtenerse un índice de actividad resistente superior a 75 % a los 28 días. Lo que permitió determinar que estos materiales, poseen perspectivas para su utilización como aditivo puzolánico. La activación de la arcilla a 800°C constituye la mejor variante, pues contribuye a la obtención de mayores resistencias a edades tempranas.

Abstract

In the present work evaluated the products of calcination of Baracoa's clays and residues of bricks (fine wool cloths) like source of pozzolanic material for the production of base binding materials clinker – clay reduced to ashes – calcareous at cement's industry. The manufactured binding materials present a substitution of 50 % of the cement P 35 for 30 % of clays reduced to ashes and residues of bricks (fine wool cloths) with 20 % of limestone. A characterization came true, based in the determination of the index of activity pozzolanic through the essays of compression strength as from the method indicated in the standards for such specifications. Showing that all tested materials put up with like pozzolanic material themselves, when resistant superior activity obtain to the 28 days an index to 75 %. It allowed what determining than these materials, perspectives for his utilization like additive possess pozzolanic. The activation of the clay to 800 the C constitutes the best variant, because you contribute to the obtaining of bigger resistances to youths.

Índice

Introducción	11
Marco teórico conceptual	14
Conceptos básicos	15
Hormigón.....	15
Producción de cemento en Cuba	16
Estrategias para disminuir las afectaciones al medio ambiente en la producción de cemento.	17
Materiales Cementicios Suplementarios	19
Puzolanas.....	19
Reacciones puzolánicas	20
Cemento Portland Puzolánico	21
Producción local de cemento LC3 a pequeña escala	21
Arcillas. Generalidades	22
Propiedades físico-químicas de las arcillas.....	24
Activación térmica de arcillas.....	24
Capítulo 1: Caracterización físico-geográfica y geológica de la región y área de estudio	27
1.1. Características físico- geográficas	27
Ubicación geográfica	27
1.1.1. Principales características físico geográficas del entorno	28
Flora	28
Fauna	28
Relieve	29
Hidrografía.....	30
Suelo	31
Geomorfología.....	31
Clima	32
Precipitaciones	32
Temperatura.....	33
1.2. Geología.....	34
Tectónica y sismicidad	36
Capítulo 2. Materiales y métodos utilizados en la investigación	39

2.1 Metodología de la investigación	40
2.1.1 Selección de la materia prima	41
2.1.2 Toma y preparación de la muestra.....	42
2.2 Activación térmica de la arcilla.	43
2.2.1 Preparación de los materiales para la conformación de los morteros.	44
2.3 Descripción de los ensayos realizados a los cementos	46
2.3.1 Ensayo de Sedimentación.....	46
2.3.2 Ensayo Visual- Táctil.....	47
2.4 Procedimientos para los ensayos de resistencia mecánica	47
2.5. Ensayo para determinar la resistencia a la compresión.	49
3.1 Resistencias mecánicas.....	51
3.1.1 Resistencia a la flexotracción	51
3.1.2 Resistencia a la compresión.....	52
3.1.3 Índice de actividad resistente	53
3.2 Análisis de los ensayos realizados a los cementos.....	54
3.2.1 Ensayos de Sedimentación	54
3.2.2 Ensayo Visual- Táctil.....	55
3.3. Valoración socioeconómica y ambiental.....	56
3.3.1. Perspectivas de utilización de los aglomerantes cemento portland-arcilla calcinada-caliza	59
Conclusiones.....	60
Recomendaciones.....	61
Referencias bibliográficas	62
Anexos	67
Anexo 1. Producción mundial de CPO (Wikipedia,2016)	67
Anexo 2. Requerimientos químicos para las puzolanas según la norma cubana NC TS 528: 2007	68
Anexo 3. Requerimientos físicos para las puzolanas según la norma cubana NC TS 528: 2007	69

Introducción

El cemento Portland, resultado innegable del desarrollo histórico de la humanidad, es hoy día uno de los materiales más empleados en la vida moderna. Su uso universal en prácticamente todos los trabajos de la construcción, su costo relativamente bajo, la posibilidad de su producción industrial masiva y los buenos resultados obtenidos en sus aplicaciones han sido la causa de que hoy en día este aglomerante haya desplazado a todos los que le antecedieron, que han quedado relegados a aplicaciones menores en trabajos de albañilería (Martirena, 2003).

Desde su surgimiento en 1824 por Joseph Aspdin en Inglaterra el cemento Portland ha constituido uno de los materiales de construcción más utilizados a escala mundial por sus amplias propiedades y usos; más se encuentra asociado también a una alta influencia negativa para la sostenibilidad ambiental debido a su elevado consumo energético y las emisiones de grandes volúmenes de CO₂ durante su producción, principalmente durante la elaboración del clínker (Alujas, 2010). Por lo tanto constituye un reto ingenieril la búsqueda de soluciones para disminuir el impacto ambiental negativo de esta producción sin afectar las propiedades y demanda de este producto.

Entre las soluciones más extendidas a este problema se encuentra el empleo de adiciones minerales con carácter puzolánico, o puzolanas, al cemento Portland, con lo cual se incrementa en general su resistencia mecánica y durabilidad frente a un determinado número de agentes ambientales (Agency, 2013). Además esta solución permite disminuir la cantidad de clínker a producir, por lo que también se minimiza el impacto ambiental negativo que se genera durante la producción del Cemento Portland Ordinario (CPO) a la vez que se obtienen beneficios en el ámbito económico, ambiental e ingenieril.

El empleo de materiales puzolánicos como sustitutos parciales del CPO es una solución que ha alcanzado gran demanda a escala internacional principalmente en los países desarrollados en los que los desechos del sector industrial constituyen la fuente principal de materiales puzolánicos; llegando a surgir nuevas variantes del Portland como los cementos puzolánicos y los cementos de mezcla. Sin embargo en los países de menor desarrollo industrial aún constituye un reto el desarrollo de alternativas y tecnologías para la obtención y empleo de materiales puzolánicos bajo sus propias condiciones (Rodríguez, 2014.)

Si bien las cenizas volantes, las escorias de altos hornos y el humo de sílice se encuentran dentro de las puzolanas de más amplia utilización, todos estos materiales derivan de procesos y tecnologías industriales no siempre disponibles y su producción y calidad escapan al control de la industria cementera. Además, debido a su creciente demanda actual, a largo plazo sus reservas no serán suficientes para abastecer la producción de cemento.

Ante este contexto actual se ha convertido en un punto importante de la rama ingenieril la búsqueda de nuevas fuentes de materiales puzolánicos y el desarrollo de tecnologías que permitan una producción de grandes volúmenes de cemento a un menor costo energético, económico y ambiental (Aguilar, 2014). Constituye un punto crucial potenciar y explotar las fuentes localmente disponibles sobre todo de materiales puzolánicos principalmente en los países en vía de desarrollo como el nuestro.

Esta alternativa ha sido parte esencial del trabajo de investigación de numerosos ingenieros cubanos como los Doctores en Ciencias Técnicas José F. Martirena Hernández y Adrián Alujas Díaz tanto en el sector de la construcción como en varias universidades del país, que entre la gran variedad de materiales que han empleado como adiciones puzolánicas han mostrado un creciente interés en las arcillas térmicamente activadas llegando a producir en Villa Clara a partir de los residuos de ladrillos molidos el Cemento de Bajo Carbono (LC3) mostrando la factibilidad y disponibilidad de este material como material puzolánico en el territorio nacional.

La presente investigación pretende aplicar los conocimientos aplicados con anterioridad en Villa Clara, para evaluar la potencialidad de las arcillas y residuos de ladrillos (rasillas) localmente disponibles en Guantánamo provenientes de las producciones de ladrillos del municipio Baracoa como fuente de material puzolánico para la producción del Cemento de Bajo Carbono en nuestro territorio.

En consecuencia se plantea como **problema de la investigación** la siguiente pregunta ¿En qué medida se pueden emplear las arcillas y residuos de ladrillos (rasillas) de Baracoa para la elaboración del Cemento de Bajo Carbono (LC3) artesanal en el municipio de Baracoa? y como **objeto de la investigación**: las arcillas y residuos de ladrillos (rasillas) del municipio de

Baracoa. Este tema se encuentra enmarcado en el **campo de acción**: propiedades puzolánicas de las arcillas y residuos de ladrillos (rasillas) del municipio de Baracoa.

Para dar solución al problema planteado, se proponen los siguientes objetivos:

Objetivo general: Evaluar la potencialidad de las arcillas y residuos de ladrillos (rasillas) para su empleo como sustituto parcial del Cemento Portland Ordinario CPO en la producción local de cemento de bajo carbono en el municipio de Baracoa a partir de los resultados de los ensayos realizados a los morteros elaborados con dicho aglomerante.

Objetivos específicos:

- Obtener un material puzolánico de alta reactividad a partir de la calcinación de una arcilla de bajo grado de pureza.
- Determinar las características físico- mecánicas de los productos elaborados.
- Evaluar las potencialidades de las aplicaciones de estas arcillas como fuente de materiales puzolánicos para la elaboración del cemento de bajo carbono en el municipio.

Se asume la siguiente **hipótesis**: Si se determina la potencialidad puzolánica de las arcillas y residuos de ladrillos (rasillas) del municipio de Baracoa entonces será posible emplear estos materiales para la elaboración del cemento de bajo carbono (LC3) artesanal en la región de estudio.

Marco teórico conceptual

Cemento Portland. Generalidades

El cemento "Portland" tiene sus orígenes en la cal u óxido de calcio, a partir del cual y luego de cientos de años de estudios empíricos y científicos, se llega a lo que hoy se conoce como cemento. En 1824, un albañil Inglés llamado Joseph Aspdin, patentó un producto que él llamó cemento Portland, pues al endurecerse adquiría un color semejante al de una piedra caliza blanco-plateada que se extraía de unas canteras existentes en la pequeña península de Portland, en la costa sur del Condado de Dorset, en Inglaterra. En 1838, este cemento se utilizó por primera vez en una construcción de importancia, en uno de los túneles construidos bajo el río Támesis en Londres. Un técnico norteamericano llamado David Saylor, fue el primero en fabricar cemento en América, dando lugar en 1850 al nacimiento de la industria cementera en Norteamérica. El uso del cemento Portland continuó extendiéndose hasta convertirse en el material de construcción más utilizado en el mundo (Artega, 2009).

En el 2012 la producción global de cemento alcanzó los 3,6 billones de toneladas, lo que se traduce en un incremento del 3 % en comparación al año anterior (Cembureau, 2012). 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 (Cembureau, 2011).

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 el anexo (Wikipedia, 2016.)

El cemento Portland se obtiene al calcinar a unos 1500 °C mezclas preparadas artificialmente de calizas y arcillas. El producto resultante, llamado clínker, se muele conjuntamente con una

cantidad adecuada de regulador de fraguado, que suele ser piedra de yeso natural (Lara, 2010.)

Conceptos básicos

Cemento: Es un aglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcillas calcinadas, que posteriormente molidas tiene la propiedad de endurecer al estar en contacto con el agua.

Mortero: Es una combinación de aglomerantes y aglomerados. Los más comunes son los morteros de cemento y están compuestos por cemento, agregado fino y agua. Generalmente, se utilizan para obras de albañilería, como material de agarre y revestimiento de paredes. Se nombran según el tipo de aglomerante que los componen: morteros de cal, morteros de cemento Portland, morteros de cemento de aluminato de calcio y morteros bastardos (NC 175: 2002).

Hormigón

También denominado **concreto** en algunos países, es el material resultante de la mezcla de cemento (u otro aglomerante) con áridos (grava, gravilla, arena) y agua.

Los **áridos** son aquellos materiales granulares adecuados para su uso en hormigones y morteros. Pueden ser naturales, artificiales o reciclados a partir de materiales previamente utilizados en la construcción.

Los áridos se dividen en dos tipos fundamentales, el árido grueso o grava y el árido fino o arena, los cuales, aunque no contribuyen de manera activa al endurecimiento del mortero deben poseer por lo menos la misma resistencia y durabilidad que se exija al hormigón. El árido que tiene mayor responsabilidad en el conjunto es la arena.

Existen tres factores que intervienen en una granulometría adecuada de los áridos: el tamaño máximo del árido, la compactación y el contenido de granos finos. Cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido, menores serán las necesidades de cemento y de agua, aunque el tamaño máximo está limitado por otros factores. En cuanto al contenido de granos finos, estos hacen la mezcla más trabajable pero precisan más agua de amasado y de cemento.

Producción de cemento en Cuba

La producción de cemento en Cuba data del año 1895, cuando se inauguró en La Habana la primera fábrica de cemento gris de Iberoamérica y hasta el triunfo de la Revolución en el año 1959 existían tres fábricas, para una capacidad instalada de 771 millones de toneladas por año. Asociadas al programa de obras sociales impulsado por la nueva Revolución Cubana se produjeron inversiones importantes que condujeron a la apertura de nuevas fábricas y la modernización de las existentes, lo que en pocos años elevó la capacidad instalada a 4 270 millones de toneladas por año. La producción de cemento alcanza su pico máximo en 1989 donde se reportaron volúmenes cercanos a las 4000 Mt, luego de lo cual, debido al derrumbe del campo socialista, sufrió un súbito descenso de más de 2 700 Mt en un período de 3 años que se mantuvo estable hasta finales de la década del 90 (De las Cuevas, 1993). Actualmente el país cuenta con seis plantas de cemento (Tabla 1.1), con una capacidad disponible de aproximadamente 2869 millones de toneladas de clínquer por año, según datos suministrados por la Dirección técnica del Grupo Empresarial de cemento en Cuba (GECEM). (Guerra. 2015.)

Tabla 1.1 Fábricas de cemento en operación en Cuba (tomado de anuario estadístico de GECEM)

Fabrica	Ubicación
Mártires de Artemisa	Artemisa
Rene Arcay	Mariel, Artemisa
Karl Marx	Guabairo, Cienfuegos
Siguaney	Siguaney, Sancti Espíritus
26 de Julio	Nuevitas, Camagüey
José Merceron	Santiago de Cuba

Estrategias para disminuir las afectaciones al medio ambiente en la producción de cemento.

En la elaboración del cemento Portland, la producción de clínquer representa el mayor consumo de energía y es responsable también de los mayores volúmenes de emisiones de CO₂, ya que más del 50% del CO₂ liberado se debe a la descomposición de la caliza durante el proceso de fabricación del clínquer (Alujas, 2010). Se estima que por cada tonelada de cemento producida se emite entre 0.65 – 0.90 toneladas de CO₂ (Habert, 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 (WBCSD -CSI, 2012)

Según la World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) para el 2050 habrá un incremento de la producción que alcanzará los 4400 millones de toneladas de cemento y otros pronósticos sitúan la demanda por encima de los 5000 millones. Este incremento elevará a su vez los niveles de emisiones de CO₂, si se mantienen las condiciones de producción actuales (Vizcaíno, 2014). Debido a las emisiones de CO₂ y las grandes cantidades de energía que demanda la fabricación de cemento que influyen significativamente en sus costos de producción y sostenibilidad ambiental se hace necesario poner en práctica estrategias que contribuyan al crecimiento de su producción de manera sustentable. Entre estas se encuentra la mejora en la eficiencia de los procesos, el uso de fuentes alternativas de combustibles y la reducción del factor de clínquer (Castillo, 2010) (Fernández, 2013).

Como se mencionó anteriormente una de las nuevas estrategias que se vienen desarrollando es la mejora en la eficiencia de los procesos de producción de cemento. Con la transición tecnológica del proceso húmedo al semi-húmedo, semi-seco o seco, se puede lograr una reducción considerable en los consumos energéticos requeridos durante la combustión de las materias primas. Se estima que los procesos húmedos consumen como promedio entre 5.3 – 7.1 GJ/t de clínquer y el proceso seco consume entre 3.2 – 3.5 GJ/t de clínquer. En el proceso de molienda también se han evidenciado algunas innovaciones como son el desarrollo e implementación de nuevos tipos de molinos como el de rodillos de alta presión y el de rodillos horizontales donde se emplea de un 20 – 50 % menos de energía eléctrica que con los tradicionales molinos de bolas (Vizcaíno , 2014).

Otra de las medidas que se han puesto en práctica en la industria del cemento es el uso de combustibles alternativos ya que más del 90 % de la energía usada en la producción de cemento procede originalmente de la quema de combustibles. La fuente energética más usada para la producción de cemento la constituye el carbón, que por su composición es muy contaminante, por lo que al reducir el contenido de carbón de los combustibles se logra reducir las emisiones de CO₂. Una práctica de ello es el empleo de gas natural, pero los precios de este último se han elevado de manera sostenida en el mercado internacional y no son competitivos con los precios del carbón, además de ser una fuente altamente demandada por otros sectores (CSI, 2010) (Cembureau & Oficemen, 2012). La utilización de productos de desecho provenientes de otras industrias como combustibles alternativos ofrece una gran oportunidad ante esta problemática. Estos pueden ser gaseosos como lo son los gases de refinería, los gases del proceso de craqueado del petróleo, pueden ser líquidos como los solventes libres de halógeno, aceites minerales o pueden ser sólidos como los residuos de la agricultura, neumáticos y plásticos. El uso de estos combustibles no solo es menos costoso, sino que puede reducir las emisiones de CO₂ de 0.1 – 0.5 toneladas por tonelada de cemento, comparado con los combustibles fósiles, además de contribuir al reciclaje de residuales industriales (Vizcaíno , 2014).

La reducción del factor de clínquer en el cemento a través del empleo de otros productos reactivos constituye una de las líneas de trabajo establecidas por la industria del cemento en su camino hacia la sostenibilidad ambiental. Del total de emisiones de CO₂, aproximadamente el 40 % proviene de la quema de combustibles y el consumo de energía eléctrica, mientras que el 60 % restante es causado por la descarbonatación de las materias primas durante el proceso de fabricación del clínquer (CSI, 2010). Los materiales que se emplean como sustitutos del clínquer y que reaccionan con hidróxido de calcio son llamados comúnmente Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).

El factor de reducción de clínquer es limitado por la reducción de la resistencia, sobre todo a edades tempranas y algunos MCS provocan un incremento en la demanda de agua, que tiene un efecto negativo en la reología. De acuerdo a las especificaciones de la ASTM C618-03 para cenizas volantes y puzolanas naturales o artificiales y su empleo en hormigones, la composición química debe ser tal que la suma de los óxidos de Si, Al y Fe expresados como

por ciento en masa, sea superior al 70% (Alujas, 2010). A pesar de los efectos mencionados anteriormente, el impacto que causa la utilización de estos materiales con respecto a la reducción de las emisiones de CO₂ y la posibilidad de aumentar los volúmenes de producción de cemento sin grandes costos de inversión asociados, el empleo de MCS como sustitutos del clínquer en la producción de cementos mezclados constituye una de las mejores alternativas para contrarrestar el daño al medio ambiente en nuestro país (Martirena, 2011).

Materiales Cementicios Suplementarios

Puzolanas

Las puzolanas son materiales naturales o artificiales de composición fundamentalmente silíceos o sílico-aluminosos que por sí mismos poseen poca o ninguna actividad hidráulica, pero que finamente divididos y en presencia de agua pueden reaccionar con hidróxido de calcio o portlandita (Ca (OH)₂) a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. Las mismas se pueden clasificar en dos grandes grupos: naturales (calcinadas o no) y artificiales (subproductos industriales) (Guerra, 2015).

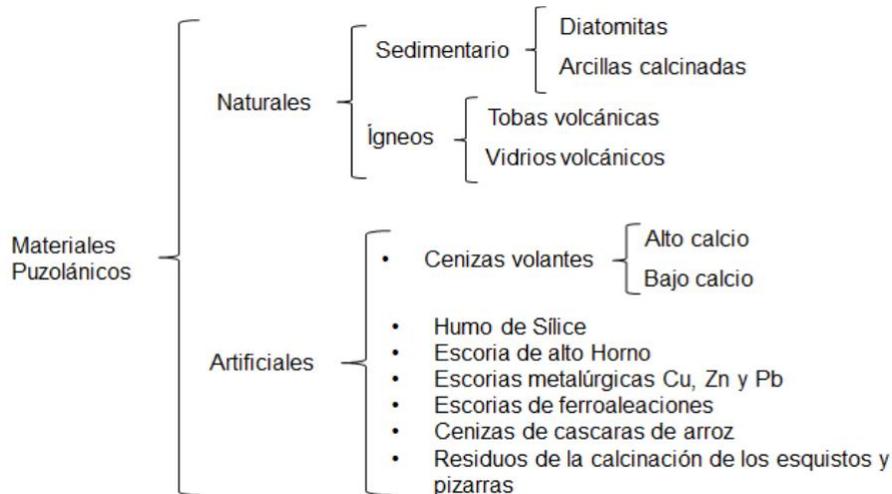


Figura 1.1 Clasificación de las puzolanas.

Puzolanas Naturales: Son productos minerales con características composicionales (sílico-aluminosos), estructurales (estructura imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento ya sea de forma natural o alteradas (activación química, mecánica o térmica) (Guerra, 2015).

Puzolanas Artificiales: Son materiales que deben su condición puzolánica a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta denominación se incluyen los subproductos de determinadas operaciones industriales; tales como, residuos de bauxita, polvos de chimeneas de altos hornos, cenizas volantes, etc. Las de mayor uso en la actualidad, en el mundo, son las cenizas volantes en función de las ventajas económicas y técnicas que ofrecen, ya que es un material residual y los cementos aumentan la trabajabilidad y disminuyen el calor de hidratación por sus excelentes propiedades puzolánicas (Guerra, 2015).

La norma cubana NC TS 528: 2007 reconoce tres clases de puzolanas:

- **Clase N:** puzolanas naturales calcinadas y sin calcinar que cumplen con los requerimientos aplicables dados aquí para esta clase, tales como, algunas tierras de diatomeas, esquistos opalinos, tobas, cenizas volcánicas o pumíticas, calcinadas o no; y varios materiales que requieren calcinación para obtener propiedades satisfactorias, tales como las arcillas y pizarras.
- **Clase F:** Cenizas volantes producidas por la combustión de la antracita y carbón bituminoso que poseen los requerimientos aplicables dados aquí para esta clase. Este tipo de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.
- **Clase C:** Cenizas volantes normalmente producidas del lignito o carbón bituminoso que poseen los requerimientos aplicables dados aquí para esta clase. Este tipo de ceniza además de la propiedad puzolánica, tiene también alguna propiedad cementante. Algunas cenizas volantes de esta clase pueden contener contenidos de cal superiores al 10%.

La norma cubana establece los requerimientos químicos y físicos (Anexos 2 y 3) que debe cumplir cada clase de puzolana para ser empleada como adición al cemento, para el caso de las puzolanas de clase N en composición química la suma de la sílice (SiO_2), la alúmina (Al_2O_3) y el óxido férrico (Fe_2O_3) debe representar más del 70 por ciento de su composición global y su contenido de sulfatos no debe ser mayor que el 4 por ciento (Guerra, 2015).

Reacciones puzolánicas

Las reacciones puzolánicas, al igual que los procesos de hidratación del cemento, transcurren de acuerdo con las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido, con presencia de fenómenos difusivos y marcada influencia de factores de tipo interno y externo de las puzolanas. La reacción principal de cualquier material puzolánico es un ataque a las

estructuras de silicatos o aluminosilicatos por parte de iones OH^- , para así formar productos similares a aquellos formados por la hidratación del cemento Portland (Aguilar, 2015).

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. Si el material posee mayor superficie específica o finura provoca que aumente la velocidad de reacción cal-puzolana (Castillo, 2010).

A partir de la reacción de las puzolanas con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento se forman nuevos productos de hidratación que son los responsables de la mejora en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón (Alujas, 2010).

Cemento Portland Puzolánico

El cemento Portland Puzolánico se define como un cemento hidráulico compuesto de una mezcla íntima y uniforme de cemento Portland y un material puzolánico fino, producido cada uno por una molienda íntima de clínker y el material puzolánico o por la mezcla de cemento Portland y un material puzolánico finamente dividido, o una combinación de las dos, donde la puzolana constituye entre un 15 y 40 %, de acuerdo a lo establecido en la ASTM C 595.

Este aglomerante le concede baja resistencia mecánica, y su fraguado es algo más lento que el del cemento Portland ordinario. Por esta razón, puede ser considerado como un cemento para aplicaciones de albañilería. Aunque en los últimos años ha adquirido aplicación en la fabricación de hormigones, y en especial los ligeros. La adición de materiales puzolánicos le confiere propiedades ventajosas a los cementos, tales como mayor resistencia a mayor edad, menor calor de hidratación, durabilidad, entre otras (Guerra, 2015).

Producción local de cemento LC3 a pequeña escala

Según estudios realizados por Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), perteneciente a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas se ha demostrado que es posible producir a pequeña escala, un cemento ternario de bajo carbono. Este cemento llamado LC3, se produce mezclando cemento P-35, polvo obtenido a partir de residuos de la producción de cerámica roja y piedra caliza. La proporción es de 50% de cemento P-35, 30% de arcilla calcinada o polvo de cerámica roja y 20 % de caliza. La sinergia entre la arcilla

calcinada y la caliza permite aumentar la actividad puzolánica y estas reaccionan con el hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento Portland (Castillo, 2010).

Tanto la arcilla calcinada como la caliza deben tener las condiciones idóneas para su utilización en la producción de este cemento, las arcillas calcinadas que provienen de la quema de piezas de cerámica roja en hornos que alcanzan una temperatura de 700°C a 900°C debe tener la mayor pureza posible para lograr una adecuada reactividad puzolánica, la caliza o el polvo de piedra debe presentar como componente principal, el carbonato de calcio. Ambas con una humedad inferior al 9% y después de molidas una finura menor o igual al 10% retenido en el tamiz de 90µm. La finura es una de las propiedades más importantes de estos cementos y está ligada a su valor hidráulico ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado del cemento, por lo tanto al aumentar finura también aumenta la resistencia mecánica (Aguilar,2015).

El cemento LC3 producido artesanalmente puede alcanzar prestaciones similares al cemento PP-25 y este es idóneo para el uso en aplicaciones de albañilería, la producción de hormigones para pisos, cimentaciones y la producción de una variada gama de elementos prefabricados de pequeño formato como bloques, baldosas hidráulicas y tejas de micro-concreto (Martirena, 2015).

La producción del LC3 de forma local trae consigo grandes ventajas ya que esta se puede llevar a cabo con bajos índices de consumo de energía, es una producción descentralizada que se puede desarrollar en cualquier lugar y posee bajos costos de inversión inicial (Aguilar,2015).

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. Bajo el término arcillas se engloba un vasto grupo de minerales cuyos elementos predominantes son el Si, el Al y el O, y cuyas propiedades fisicoquímicas derivan de su composición química, de su particular estructura interna en forma de capas (filosilicatos) y de su tamaño de grano muy fino. El término arcilla puede ser también empleado para expresar un criterio granulométrico que

designa a los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 μm (Ramos, 2002). Este criterio no es adecuado desde el punto de vista mineralógico, pues presupone que incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos como cuarzos y feldespatos podrían ser considerados arcillas cuando sus tamaños son lo suficientemente pequeños. Si bien la distribución granulométrica juega un importante papel en algunas propiedades de las arcillas como su capacidad para formar suspensiones coloidales y manifestar un comportamiento plástico cuando son mezcladas con agua, es su particular estructura en forma de láminas lo que define su comportamiento y reactividad (Figueiral, 2010).

Las arcillas están ampliamente distribuidas como constituyente esencial de los suelos y sedimentos, debido a que son mayoritariamente los productos finales de los distintos procesos de degradación de los aluminosilicatos formados a mayores presiones y temperaturas y que constituyen más del 70% de la corteza terrestre. Cuando están presentes en gran cantidad se presentan bajo la forma de rocas arcillosas (Orozco, 1995).

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados.

- Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físicas-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 μm).
- Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas.
- Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 μm .
- Para un ceramista una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica.
- Desde el punto de vista económico las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones (Rodríguez, 2013).

Propiedades físico-químicas de las arcillas

Las arcillas tienen capacidad de intercambio catiónico, es decir son capaces de cambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras (García, 2002).

La capacidad de absorción es otra de las propiedades de las arcillas ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminares o en los canales estructurales. Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. Su elevada plasticidad se debe a su morfología laminar, tamaño de partícula muy pequeño y a su alta capacidad de hinchamiento (Moreira, 2015).

La plasticidad de las arcillas, determinadas por el método de Casagrande, se caracteriza por los valores mostrados en tabla 1.2 (Figueiral, 2010).

Tabla 1.2. Clasificación de las arcillas según su plasticidad

Arcillas	Plasticidad
De alta plasticidad	>17
Plásticas	7 - 17
De baja plasticidad	0 - 7

Activación térmica de 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. Su estructura en forma de capas propensas al deslizamiento y al agrietamiento, y la capacidad para inmovilizar grandes cantidades de moléculas de agua en su superficie son factores que pueden afectar de forma negativa la resistencia mecánica y la reología en un material cementicio, mientras que su alta capacidad de adsorción de iones puede modificar la composición química de las soluciones

acuosas, afectando las propiedades tecnológicas del hormigón. Por lo tanto, las arcillas deben modificarse estructuralmente para ser empleadas como materiales puzolánicos (Ávila, 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.

Las arcillas, de comprobadas propiedades puzolánicas una vez calcinadas bajo condiciones específicas, representan, por su amplia disponibilidad y relativa facilidad de tratamiento, una atractiva fuente de puzolanas en regiones donde otros recursos no están disponibles (Alujas, 2010).

Durante la calcinación de las arcillas pueden distinguirse varias etapas. Con el calentamiento desde temperatura ambiente hasta 250 °C ocurre la pérdida (reversible en algunos casos) del agua adsorbida y absorbida en las superficies externas e internas de la arcilla (deshidratación). Entre los 400 °C y los 950 °C ocurre la remoción de los OH - estructurales (desoxhidrilación) acompañada por el desorden parcial de la estructura cristalina y la formación de fases meta estables, caracterizadas por una alta reactividad química (Aguilar, 2015).

Estudios demostraron que la arcilla cubana, con sólo un 40% de caolinita, mostró una excelente reactividad puzolánica y el mayor potencial de activación, cuando estuvo calcinada entre 600°C y 800°C. El tiempo requerido para que la reacción puzolánica comience a ser significativa parece depender del contenido de caolinita de la arcilla y puede variar entre 1 y 7 días (Pérez, 2006).

En resumen, 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 desoxhidroxilación) y sus características propias, tales como morfología, forma y tamaño de las partículas, entre otras.

Roca caliza

La roca caliza se ha convertido en un material de gran interés para ser empleada en su estado natural finamente molida como un sustituto parcial del clínquer. La misma tiene la ventaja de

ser abundante, barata, y sin el costo ambiental asociado a la producción de clínquer. La producción de cementos con la incorporación de la piedra caliza como extensor del clínquer se ha diseminado de forma internacional. Europa y Canadá muestran una amplia producción desde la última década del pasado siglo (Kirk, 2013).

Investigaciones precedentes han estudiado el efecto de la calidad de la caliza sobre la hidratación del cemento Portland además de la influencia en las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y la porosidad. Los resultados de las investigaciones concluyen que no existe influencia significativa en el grado de hidratación y la porosidad, y se obtienen resistencias similares a las del cemento portland ordinario tanto para calizas de alta calidad como para calizas dolomíticas con bajos niveles de sustitución (Blanco, 2012).

La caliza ha sido evaluada con arcillas cubanas de baja pureza de caolinita mostrando comportamientos similares. Las propiedades de los cementos producidos en presencia de sustituciones de clínquer por la combinación de las mismas son muy similares a las de los cementos ternarios donde se utiliza metacaolín (Martirena, 2013). Por lo tanto, el empleo de caliza junto a un material puzolánico incrementa sus posibilidades de aplicación para la obtención de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer.

Capítulo 1: Caracterización físico-geográfica y geológica de la región y área de estudio

Introducción

En el presente capítulo se exponen las principales características de la región y área en estudio, tanto físico-geográficas como geológicas, de acuerdo a los trabajos, artículos, informes y otros documentos consultados para la realización de este trabajo.

1.1. Características físico- geográficas

Ubicación geográfica

Baracoa se encuentra situada al norte de la provincia de Guantánamo, muy próximo al extremo Oriental de la isla de Cuba. Limita con otros municipios: al sureste con Maisí, al suroeste con Imías y San Antonio del Sur, y al oeste con Yateras y Moa, este último perteneciente a la provincia de Holguín (Jústiz, 2014).

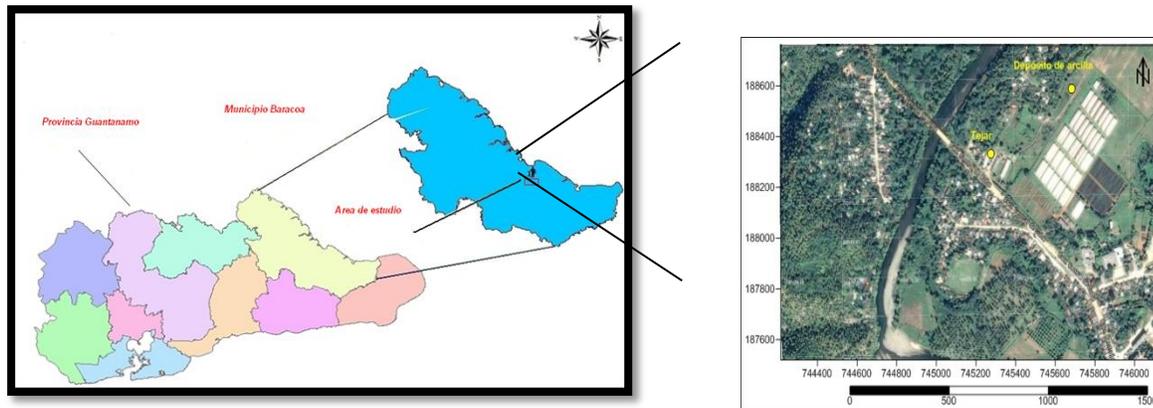


Figura 1.2 Esquema de ubicación geográfica.

El territorio ocupa un área de 976,6 km² y alcanza su mayor extensión de este a oeste entre la desembocadura de los ríos Yumurí, al Oriente, y Jiguaní, al Occidente. Es el mayor municipio de la provincia de Guantánamo; ocupa el 15,3% del territorio provincial.

A partir de 1976, como parte de la división político-administrativa, se crea Baracoa, perteneciente a la Oriental provincia de Guantánamo, el cual queda estructurado por 15 consejos populares enumerados de oeste a este para conformar el municipio número cuatro del territorio (Jústiz, 2014).

El municipio se enfrenta a un gran reto natural y geográfico, el predominio de áreas montañosas con un 95% y una inclinación del terreno de más de 15.0%, lo que limita lograr un desarrollo tecnológico, no es posible la mecanización en la agricultura, se mantiene para la producción fundamentalmente los métodos tradicionales de laboreo de las tierras, las cuales por el lavado periódico producto a las fuertes lluvias que se producen en el territorio pierden parte de la capa vegetal, se exige el uso de balizas o terrazas para su contención (Jústiz, 2014).

1.1.1. Principales características físico geográficas del entorno

Flora

La flora de Baracoa es variada y peculiar. Se pueden encontrar áreas extensas cultivadas de pinos y otras de árboles de distintas calidad, de maderas duras. Sin faltar los Helechos arborescentes o las formaciones puras de Najesíes. Existen varias especies florísticas endémicas, muchas en peligro de extinción: Ácana, Cuyá, Azulejo, Varía, Caoba, Cagueirán, jiquí, Roble Incienso (Jústiz, 2014).

Se reconoce también por su riqueza faunística, caracterizada por variedad y alto endemismo. Varias de esas especies hoy corren un grave riesgo y sólo se les puede ver en escaso número, en zonas apartadas, entre ellas algunas que sólo pueden encontrarse en esta zona del país como el almiquí, el tocororo, la jutía conga, el majá de santa maría y la polymita.

Sitio representativo de la riqueza de la flora y la fauna local es el Parque Nacional Alejandro de Humboldt, con valores naturales entre los cuales se destacan los geológicos de gran complejidad, los que van desde tobas de origen volcánico y las ofiolitas, hasta los sedimentos indiferenciados del reciente geológico (Jústiz, 2014).

Fauna

La fauna como es lógico, tiene rasgos afines con la del resto del territorio nacional. Se destaca en el parque un extremo endemismo y diversificación de formas animales donde resaltan el Almiquí, las bellas polymitas, únicas en el mundo por su hermoso colorido; las manitas, muy abundantes en el área pero muy significativas por su reducido tamaño. La riqueza y abundancia de la fauna es tal, que es casi imposible marchar un metro por dentro del bosque, sin que apreciemos una bella e interesante especie animal (Jústiz, 2014).

Desarrollo económico de la región

La economía baracoense es eminentemente agrícola, sustentada en tres renglones fundamentales: el coco, el cacao y el café.

Baracoa es el mayor productor de coco y cacao del país; las industrias de aceite de coco y carbón activado, son únicas en el país.

Existen plantadas 9 455 hectáreas de cocoteros, lo que representa el 32,2% de la tierra agrícola, y se alcanzan volúmenes de producción de más de 282 000 quintales al año.

Seis mil 216 hectáreas de tierra están sembradas de cacao, para un volumen del 21,2% de la superficie agrícola total, con una producción anual de unos 26 000 quintales.

El 10,4 % de las tierras agrícolas del municipio, 3 mil 49 hectáreas, lo ocupa el cultivo del café, con una producción anual de casi 50 mil latas y el nivel de electrificación del territorio se eleva a más del 95%.

Baracoa tiene un total de 65 entidades económicas. La producción material del municipio se estructura en seis sectores, entre los cuales el de mayor peso es el industrial. Otros renglones que aportan son la construcción, mantenimiento de la red de viales y la actividad científico técnica. En la esfera de los servicios sobresale el turismo, con una significación creciente por su aporte a la producción mercantil (Jústiz, 2014).

Relieve

Baracoa es conocida como la tierra de las cuchillas, las Terrazas Marinas, los Tibaracones y el Yunque. Tiene una topografía abrupta, con muy pocas zonas llanas. Cerca del 95% del área total del municipio tiene un relieve de alturas clasificado como premontañoso, de montañas pequeñas y bajas. Caracteriza el relieve la existencia de cuchillas con pendientes mayores del 15%, así como la formación de diferentes e. El 5% restante lo conforma una pequeña franja costera de 2 km de ancho (Jústiz, 2014).

Hacia el este de la Sierra de Moa se encuentra el majestuoso Yunque, montaña de 575 m de altura. Se distingue por su forma peculiar, semeja una gran meseta aislada de superficie horizontal y laderas casi verticales. Constituye el símbolo natural de la ciudad de Baracoa y fue declarado Monumento de la Naturaleza.

El rasgo distintivo de la morfología litoral lo constituyen los Tibaracones, camellón conformado por una gran barra o cortina de arena, palizadas y sedimentos que el oleaje vivo del mar levanta en la boca de los ríos, paralela a las playas. Al romper las lluvias los ríos descienden en avenidas cuyas aguas son temporalmente represadas por la cortina (Jústiz, 2014).

Características del relieve presente en el área de estudio.

El área que abarca el Consejo Popular Cabacú presenta un relieve variado con alturas que oscilan entre 0 – 849 m snm. Las características actuales obedecen a los movimientos de ascensos débiles y de descensos, a la acción progresiva de los factores modeladores del terreno (exogenéticos); así como a la continua acción antrópica (Ecured, 2016)

El principal proceso modelador del relieve en esta área es el fluvial, condicionado por las corrientes de aguas superficiales de carácter permanente (red hidrográfica del río Miel), que dieron lugar a formas como: valles fluviales, llanuras de inundación y terrazas fluviales. La acumulación de sedimentos ocurre simultáneamente con la erosión y el transporte, condicionado por las corrientes permanentes que mantienen un caudal estable durante todo el año.

Hidrografía

Baracoa está rodeada de ríos. Al oeste el Macaguaniguas, que entra en el pueblo bordeando la bahía donde desemboca. Más allá el Duaba, de mayor caudal. Varios kilómetros más al oeste el Toa, grande y hermoso, con sus orillas de una vegetación espesa. Hacia el este el Miel, toda una leyenda a la entrada de la ciudad; y en los límites por el oriente el Yumurí.

Las playas son otros de los recursos naturales bien conservados de la zona. Algunas presentan pendientes fuertes y sedimentos gruesos oscuros, de origen predominantemente fluvial, aunque hay otras de arenas blancas y finas, y pendientes suaves. Las principales son Yumurí, Barigua, Manglito, Cajuajo, Miel, Duaba, Toa, Maguana, Cayo Santo, Mapurísí, Nibujón y El Cayo (Jústiz, 2014).

Suelo

Se describen dos tipos de suelos: fersialítico pardo rojizo y fluvisol, caracterizados sobre la base de su génesis y evolución.

Fersialítico pardo rojizo: evoluciona a partir de distintos materiales de origen eluvial sobre rocas granitoides o sobre la corteza de la misma, producto de su meteorización. Presentan acumulación de Fe_2O_3 en el perfil, lo que le da una coloración rojiza o la presencia de un horizonte rojizo, su profundidad varía de poca a mediana (Jústiz, 2014).

El fluvisol se originó sobre la llanura de inundación del río Miel, el ph varía entre amplios rangos dadas las características de los materiales de origen aluvial. Presenta una textura loam – arenoso - arcilloso, color carmelita claro. La profundidad varía de 0,20 a 0,40 m, aunque está siempre expuesto a la erosión. Muestra una velocidad de infiltración alta.

De acuerdo con la Norma Cubana 46: 1999 Construcciones Sismo resistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción, estos se caracterizan por ser depósitos estables de suelos no cohesivos, arenas, gravas o arcillas duras, tener textura areno - arcillosa y profundidad variable, cuando su profundidad hasta la base rocosa es superior a 60 m este material puede lograr velocidades de propagación para una onda de cortante entre 240 m/s y 450 m/s, sus períodos están comprendidos entre 0,5 s y 0,8 s. Su contenido de materia orgánica varía, condicionado por los materiales de arrastre y la deposición de los mismos. En períodos de intensas lluvias, sufre de inundaciones que podrían causar daños a las edificaciones presentes en el área (Jústiz, 2014).

Geomorfología

Según la regionalización del relieve en el Nuevo Atlas Nacional de Cuba, 1989, el área está asociada a la Llanura de Moa – Baracoa. Pertenece específicamente a una llanura aluvial acumulativa baja de edad Cuaternario (Q_{IV}), originada producto al arrastre de sedimentos y la acumulación de estos, causada por la pérdida del poder de transporte del río en la parte baja de la cuenca del río Miel y la falta de capacidad para acarrear todo el material que le aportan sus afluentes.

Clima

En el municipio de Baracoa el comportamiento de algunas variables meteorológicas tienen un comportamiento característico, debido a la influencia orogénica del macizo montañoso Sagua – Baracoa que sirve de barrera al paso de los vientos Alisios; o sea que las nubes cargadas de agua provenientes desde el océano Atlántico, precipitan desde el parte agua central hacia el N. Esta relación provoca que en la zona donde se enmarca el área de investigación, las condiciones sean muy especiales, diferenciándolas en todo el país, el clima se cataloga como Tropical Lluvioso (Af) (Jústiz, 2014).

Precipitaciones

La precipitación media anual es de 2 723 mm, todos los meses son lluviosos, el mes menos lluvioso es julio con una media de 93,5 mm. Los meses más lluviosos son octubre y noviembre con más de 300 mm.

Las lluvias intensas no están asociadas precisamente a ciclones tropicales, están relacionadas con eventos sinópticos tales como: ondas tropicales, hondonadas, bajas presiones y frentes fríos estacionarios. Estas ocurren con mayor frecuencia en los períodos correspondientes al comienzo y al final del ciclo poco lluvioso del año, periodos de transición, aunque pueden ocurrir en otros momentos.

El histograma de la figura 1.3 muestra la frecuencia de ocurrencia de estos eventos por meses. Se puede apreciar claramente que existen dos picos de máxima frecuencia, uno en mayo y otro en los meses de octubre, noviembre y diciembre (Jústiz, 2014).

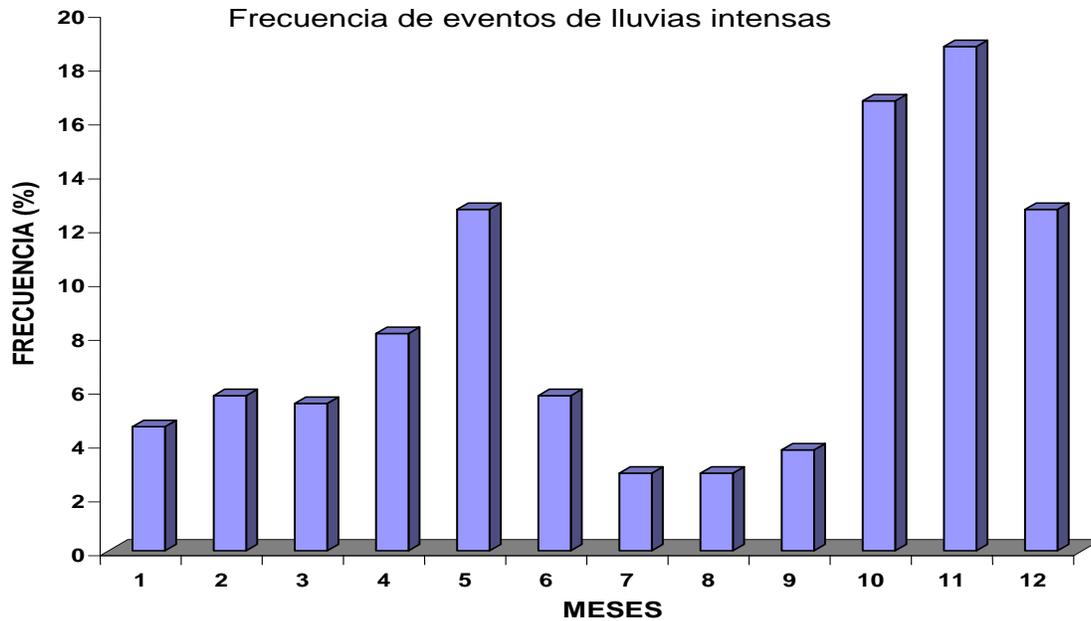


Figura. 1.3 Histograma de frecuencia de ocurrencia de eventos de lluvias intensas (Jústiz, 2014).

Temperatura

La temperatura media anual es de 25,4 °C. Los meses más cálidos son julio y agosto con 27,5 °C y los más frescos enero y febrero con 23,0 y 23,3 °C respectivamente. La temperatura máxima media es de 29,8 °C, en tanto que la mínima media es de 22,0 °C. Se han registrado temperaturas máximas superiores a 35,0 °C en los meses de mayo, junio, julio y septiembre. La temperatura máxima absoluta es de 36,4 °C registrada el 23 de mayo de 1990 (serie 1970 – 2004). La mínima absoluta para este mismo período es de 12,1 °C registrada el 8 de febrero de 1998. Estos valores absolutos corresponden a las zonas próximas a la costa y de bajas alturas. Las zonas altas, lógicamente, presentan temperaturas más frescas (Jústiz, 2014).

Aguas terrestres, superficiales y subterráneas

Las aguas superficiales están representadas por el río Miel; donde se encuentra el acueducto del mismo nombre (aún en fase constructiva), este permite disponer del líquido con buena calidad, para el beneficio de los pobladores del consejo popular Cabacú.

Desde el punto de vista mineralógico, aporta a estas aguas elementos carbonatados y magnesianos, lo que confieren una buena calidad y su aptitud para el consumo humano (Jústiz, 2014).

1.2. Geología

Regionalmente el área de estudio se ubica en la depresión Paleogénica Mata – Baracoa, rellena por sedimentos del paleógeno, de forma triangular, siendo una de las puntas la ciudad de Baracoa.

Las formaciones geológicas existentes (figura 1.4), se agrupan en tres períodos de desarrollo estructural, los que son:

- Períodos de las fases subhercinianas y larámicas, caracterizado por los cuerpos ultramáficos y las formaciones del Cretácico (subyacente).
- Período de las fases cubanas, pirenaica y estírica, caracterizada por las formaciones del Paleógeno tardío.

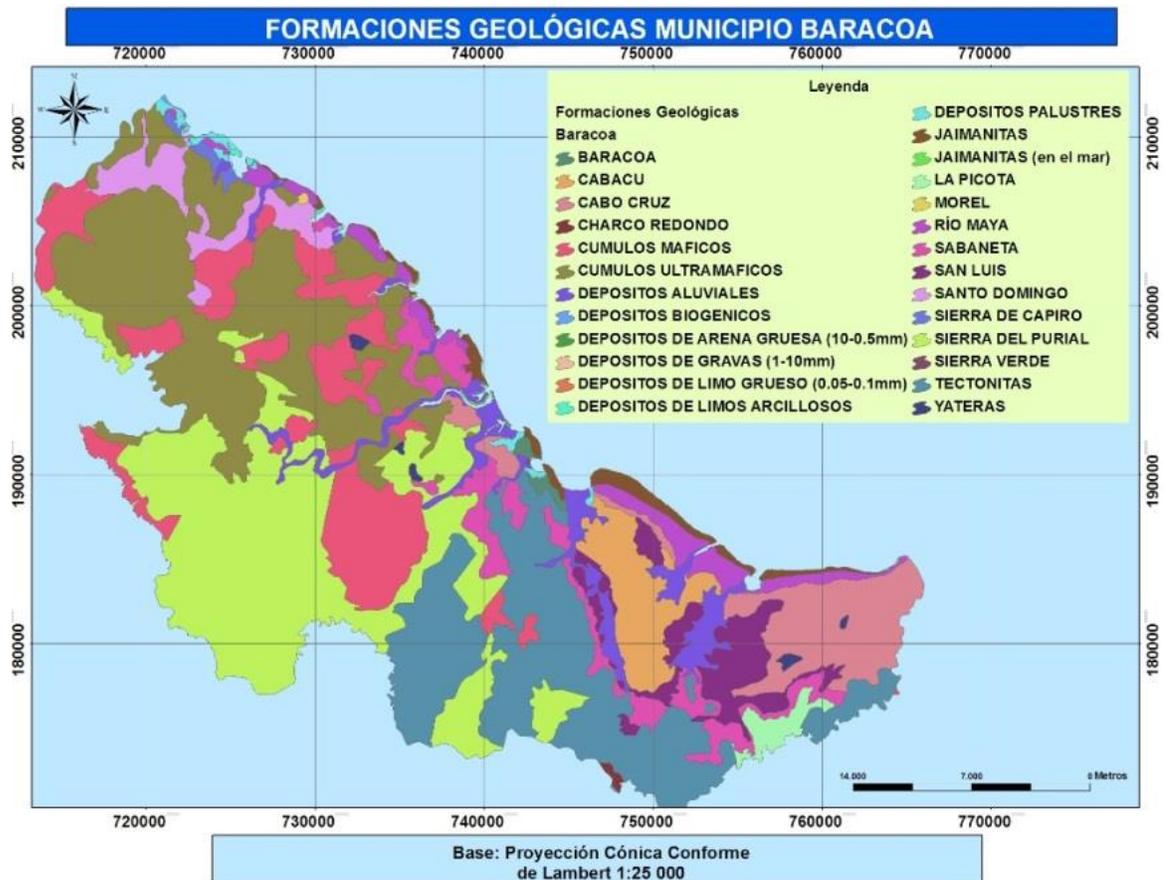


Figura 1.4. Esquema Geológico del Municipio de Baracoa a escala 1: 25 000 (Jústiz, 2014).

Formación Baracoa (bc): Calizas biodetríticas arenáceas de grano grueso, duras y algo porosas. Ocasionalmente contienen gravas finas polimícticas de volcanitas, metavolcanitas y ultramafias, que forman intercalaciones con arcillas calcáreo-limosas con contenidos de gravas finas y nódulos algáceos ocasionales, calcarenitas, margas, areniscas, así como gravas finas polimícticas en estratos, predominantemente de medianos a gruesos, fosilíferos y decoloración amarillo-pardusca a pardo-amarillenta, parcialmente abigarrada (Colectivo de autores, 2013).

Formación Cabacú (cbc): representada por gravelitas, areniscas y limonitas polimícticas (provenientes principalmente de ultramafitas y volcanitas), de cemento débilmente arcilloso – calcáreo y ocasionales lentes de margas arcillosas en la parte inferior. La estratificación es lenticular y a veces cruzada. Colores grisáceos, verdosos y oscuros. De edad Mioceno Medio parte alta (N11) (Colectivo de autores, 2013).

Formación San Luis (sl): Está compuesta por una secuencia terrígena flyschoides, finamente estratificada, de rocas clásticas y terrígeno-carbonatadas, de granulometría variada desde

arcillas hasta conglomerados. También contiene areniscas polimícticas de grano medio a fino, de color gris, que en ocasiones aparecen en capas gruesas (Colectivo de autores, 2013).

Formación Charco Redondo (chr): Tobas medias y básicas, litoclásticas a vitroclásticas, con lavas en forma de sills y diques de andesitas y andesito-basaltos, calizas, areniscas, limolitas, pedernales y tufitas. Estos depósitos están muy tectonizados y se presentan en forma de escamas tectónicas independientes, o incluidos dentro de las serpentinitas (Colectivo de autores, 2013).

Formación Rio Maya (rm): El contenido de arcilla es muy variable. Hay abundantes clastos de material terrígeno, provenientes de las rocas de las zonas vecinas emergidas; su granulometría varía entre arenas y cantos. En ocasiones existen intercalaciones de conglomerados polimícticos de granulometría variable y cemento calcáreo (Colectivo de autores, 2013).

Formación Sabaneta (sn): Tobas de ácidas a medias, de colores claros, vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobáceas, calizas, conglomerados tobáceos, limolitas, margas, gravelitas, conglomerados vulcanomícticos y ocasionalmente pequeños cuerpos de basaltos, andesitas, andesito-basaltos y andesito-dacitas (Colectivo de autores, 2013).

Formación Santo Domingo (sd): Se caracteriza por el dominio del componente piroclástico en el corte, con intercalaciones de litofacies terrígenas finas, silicitas, tufitas, efusivos principalmente de composición andesítica-basáltica y andesítica, raramente hasta dacíticas, con la presencia de cuerpos de dioritas, dioritas cuarcíferas, gabrodioritas, gabrodiabas y diabasas, con desarrollo limitado de rocas esquistosas calcáreas, calizas y corneanas (Colectivo de autores, 2013).

Tectónica y sismicidad

La sismicidad de la región de Guantánamo presenta como característica significativa y que al mismo tiempo hace que su evaluación sea compleja para algunas áreas, el hecho de que en este territorio se presentan dos formas de génesis de sismos: la de entre placas y la de interior de placas. Por estas razones, es que se considera este territorio como uno de los de mayor peligrosidad sísmica del país.

La zona sismogénica de Cuba (figura 1.5) y el Caribe Noroccidental, comprende el límite entre la placa de Norteamérica y la microplaca de CONAVE. Ambas se mueven una con respecto a la otra, con velocidad de 17 mm/año como promedio. Lo antes mencionado, provoca sismos en toda su longitud. Esta actividad es conocida como movimientos entre placas, a su vez dichos desplazamientos se vinculan a la estructura de Bartlett - Caimán (Zona Sismogénica de Oriente) con alta frecuencia de terremotos de elevadas magnitud e intensidad. Además pueden existir sismos generados en las zonas Cauto – Nipe, Santiago – Bayamo y Baconao 1 (Jústiz, 2014).

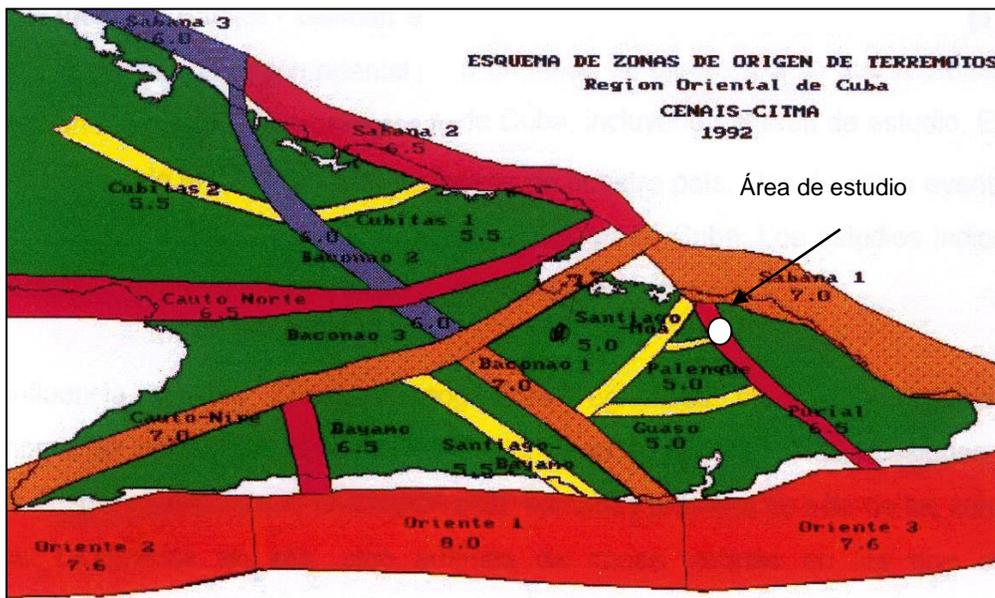


Figura.1.5. Zonas Sismogénicas de la Región Oriental de Cuba tomado de (Jústiz, 2014).

La región oriental de Cuba se caracteriza por su actividad tectónica moderna vinculada a la última etapa de evolución geológica de la Isla, en la cual permanecen con un grado de actividad significativa los movimientos verticales y horizontales, cuya génesis está relacionada con su ubicación en las proximidades de la zona de fallas Bartlett – Caimán, principal estructura tectónica activa, límite transformante entre las placas litosféricas Caribeña y Norteamericana (Jústiz, 2014).

En el área no existen estudios sísmicos puntuales. Dadas las características geológicas y el tipo de obra, se asumen las generalidades del comportamiento de macrozonación sísmica y de respuesta dinámica del suelo. La distribución espacial de los terremotos con magnitudes

Capítulo 2. Materiales y métodos utilizados en la investigación

Introducción

El desarrollo y el éxito de toda investigación están basados en la fiabilidad de los resultados, herramienta fundamental para su validación. La adecuada selección de los métodos y materiales merece una especial atención. En este capítulo se expondrá un resumen de las características de las materias primas que se emplearon para la elaboración tanto del Cemento de Bajo Carbono artesanal como de los morteros realizados. Así mismo se describirán los ensayos que se le realizaron a ambos y se expondrá un resumen de los resultados de los mismos arribándose en un final al análisis y discusión de la potencialidad que suponen las arcillas y residuos de ladrillos (rasillas) de Baracoa para la producción local del LC3 a través de la caracterización de los productos elaborados.

Previo a la elaboración de los morteros se realizaron operaciones de muestreo, molienda y calcinación de las materias primas; estas operaciones y los materiales, equipos y utensilios empleados en cada una de ellas se exponen en este capítulo.

2.1 Metodología de la investigación



Figura.2.1 Esquema de la metodología empleada.

Recopilación y revisión de la información existente.

En esta etapa se realizó el análisis de la bibliografía existente de la región y área de estudio, de la cual se revisó y recopiló la información útil para la investigación. Se realizaron búsquedas en el centro de información del ISMM, donde se tuvo acceso a libros, revistas, trabajos de diploma, tesis de maestría y doctorales, además de búsquedas en Internet. Como resultados se obtuvo información referente a la descripción regional desde el punto de vista geológico, tectónico y geomorfológico. En esta etapa se confeccionó el marco teórico conceptual de la investigación.

Materiales y Métodos

El primer y más importante paso en una investigación de este tipo es la correcta selección de la materia prima, una buena toma y preparación de la muestra y la completa caracterización química y mineralógica del yacimiento a evaluar.

En la determinación del carácter puzolánico de un material, los diversos métodos existentes basados en el consumo de Ca(OH)_2 en sistemas cemento portland ordinario -Puzolana o Ca(OH)_2 -Puzolana, aunque son un claro indicio de la ocurrencia de la reacción puzolánica, no siempre manifiestan una relación directa e inequívoca con el aporte de estos materiales a la resistencia mecánica y la durabilidad, algo que se ha señalado por otros autores (Alujas 2010, Fernández 2009, Caputo 2008). Por lo tanto, los ensayos de resistencia mecánica y durabilidad en morteros son aún insustituibles, pues representan el aporte de todos los factores relacionados con la reacción puzolánica y las características del material.

2.1.1 Selección de la materia prima

Como materia prima para esta investigación se utilizaron arcillas naturales (figura 2.2) y arcilla calcinada proveniente de la molturación de rasillas de un tejar (desechos de la producción de rasillas de barro) que se encuentra ubicado en el municipio de Baracoa perteneciente al consejo popular Cabacú.



Figura 2.2 Zona donde fue tomada la muestras de arcillas.

2.1.2 Toma y preparación de la muestra.

Las muestras de arcillas de Baracoa se tomaron mediante el método por surco punteado, que consistió en la toma de trozos típicos de la materia prima, con la ayuda de un martillo geológico. Para determinar la cantidad de material utilizado se tuvo en cuenta la norma cubana correspondiente (NC 178 2002). Las muestras de 3 puntos fueron mezcladas para constituir una muestra compuesta homogénea de 3 kg. Las mismas fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño mediante dos etapas de trituración, cada una por separado. En la primera etapa se utilizó la trituración por impacto de forma manual con una mandarina hasta lograr obtener fragmentos de 100 mm aproximadamente. Después de la trituración manual en que se obtienen tamaños máximos de 100 mm, se llevan a cabo dos etapas de trituración en trituradoras de mandíbulas, (figura 2.3 y 2.4), las cuales tienen un diámetro de alimentación de 100 y 25 mm y de descarga de 25 y 4,76 mm, respectivamente.

Luego de finalizada esta etapa de trituración estos desechos de rasillas fueron sometidos a un proceso de molienda en un molino de bolas (figura 2.5) de 19,5 cm de diámetro interior y 24 cm de longitud, durante 10 min , y la arcilla en estado natural fueron calcinadas en un horno eléctrico a 800°C.

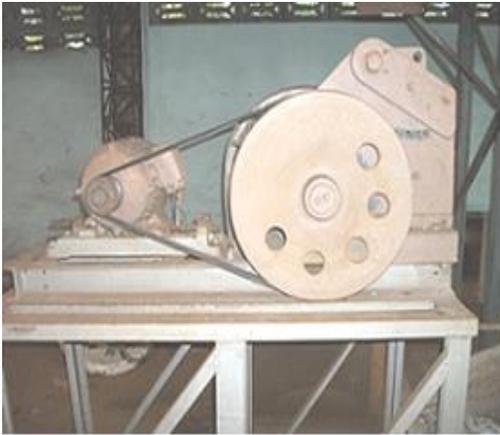


Figura 2.3. Trituradora de mandíbulas TQ (320x165)



Figura 2.4. Trituradora de mandíbulas TQ (150x75)

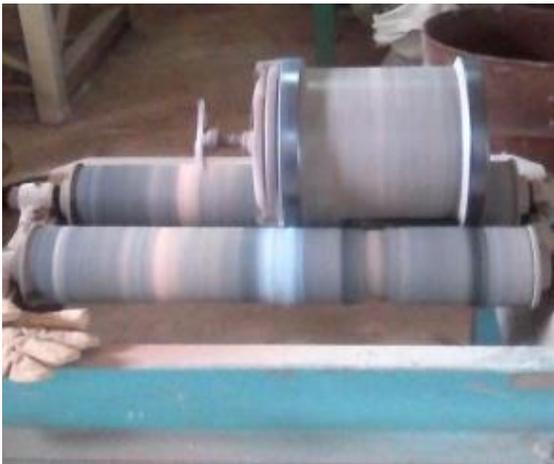


Figura 2.5 Molino de bolas

2.2 Activación térmica de la arcilla.

La activación constituye el único método para alcanzar un material más reactivo, logrando con esto una mayor superficie específica, desorden estructural y cambios en la composición química. El proceso de activación puede realizarse a través de métodos mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales, la activación térmica es la forma más empleada y efectiva, desde el punto de vista técnico – económico, para alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica (Alujas, 2010). Es por ello que el trabajo se centra en la obtención de un material puzolánico a partir de la activación térmica de las arcillas de Baracoa.

El proceso de activación térmica de las arcillas se realizó en un horno eléctrico J.P Selecta 2000 de fabricación española (figura 2.6) a una temperatura de 800 grados. En cada tanda de calcinación se utilizó un recipiente de acero con capacidad para 400 g de arcilla. Una vez que el horno alcanzaba la temperatura de calcinación deseada, las muestras eran introducidas en este y retiradas después de los 60 min, esparciéndolas sobre una superficie metálica para que alcanzaran rápidamente la temperatura ambiente y así lograr la conservación del desorden estructural logrado durante la calcinación. El material arcilloso calcinado fue sometido, al mismo proceso de molienda que el material natural (Guerra, 2015).



Figura 2.6 Horno eléctrico J.P Selecta 2000

2.2.1 Preparación de los materiales para la conformación de los morteros.

Para la confección de los morteros las materias primas empleadas son: arcilla calcinada, desechos de rasillas, caliza, arena normalizada, cemento Portland P-35 y agua.

Se elaboraron 6 probetas (morteros), dos de ellas con arcillas calcinadas, dos con los desechos de rasillas, y dos últimos sin la adicción de arcillas (patrones de referencia).

Para la elaboración de los morteros primeramente se realizó el mezclado de los materiales. Para ello inicialmente se vertió el agua previamente medida con una probeta graduada en correspondencia con la cantidad a utilizar en cada una de las mezclas diseñadas que aparecen en la tabla 2.1.

Morteros	Aglomerante				Arena (g)	Agua (ml)	Relación agua/aglomerante
	Cemento (g)	Calizas (g)	Arcilla calcinada a 800°C	Residuos de rasillas			
Patrón	450	-	-	-	1350	225	0,5
Arcilla 800°C	225	90	135	-	1350	270	0,6
Residuo	225	90	-	135	1350	270	0,6

Tabla 2.1 Dosificación para la conformación de los morteros.

Posteriormente se realizó la adición del cemento en las cantidades previamente calculadas, según las sustituciones (30 % de arcilla calcinada y desechos de rasillas, y un 20 % de caliza) y con el 100 % para la elaboración de los morteros de referencia, finalmente se vertió la arena. El mezclado de los materiales se realizó durante 90 segundos hasta lograr una buena homogenización.

El material mezclado se vertió en dos capas en el molde (figura 2.7). La primera capa permite que a los 60 segundos se expulse el aire atrapado en el material y la humedad suba a la superficie. La segunda capa permite emparejar y enrasar los moldes.



Figura 2.7 Moldes para morteros



Figura 2.8 Compactadora eléctrica

Estos moldes se colocaron en el equipo que se muestra en la figura 2.8, para ser compactados. Luego fueron situados en un local donde se garantizaba buena conservación de los mismos, y pasadas 24 horas se extrajeron los morteros y se colocaron en el área de curado hasta las edades correspondientes a los ensayos de resistencia aplicados a los 7 y 28 días.

2.3 Descripción de los ensayos realizados a los cementos

Los ensayos de campo que se realizaron fueron el de Sedimentación, para evaluar la finura del LC3 mediante la velocidad de asentamiento de las partículas en agua, el ensayo Visual-Táctil.

2.3.1 Ensayo de Sedimentación

Para la realización de este ensayo primero se vierten en una probeta de 250ml de capacidad, 160ml de agua y 10g de LC3, luego se agita con giros de hasta 180 grados por un tiempo de 10 segundos y se deja reposar. A partir del estado de reposo se mide el tiempo en que la turbulencia alcanza la altura de 80mm (t_1), el tiempo en que la turbulencia marca 30 mm (t_2) y el tiempo en que la mezcla se aclara totalmente (t_3). Si $t_1 > 3$ minutos y $t_2 > 5$ minutos el material cumple los requisitos de finura. (Figura 2.9)

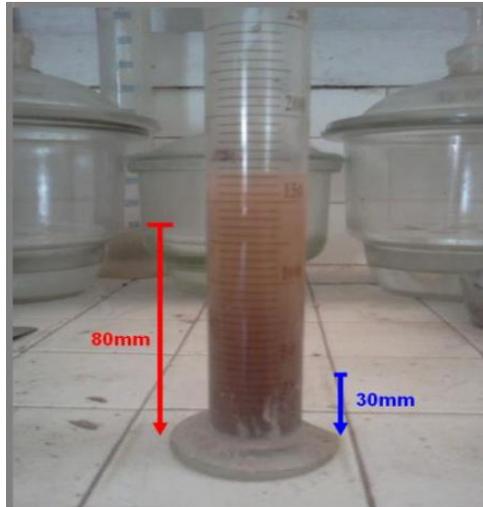


Figura 2.9. Probeta de 250 ml.

2.3.2 Ensayo Visual- Táctil

Para este ensayo se toman 250ml de cemento LC3 y 250ml de cemento P-35 y se vierten en una bandeja, luego mediante la observación directa y la percepción al tacto de las partículas de las muestras se hace una comparación entre ellas en cuanto a su finura. Figura 2.10.



Figura 2.10. Ensayo Visual-Táctil

2.4 Procedimientos para los ensayos de resistencia mecánica

De acuerdo con la literatura consultada, la principal prueba que determina la actividad puzolánica de las arcillas calcinadas es la resistencia a la compresión a edades de 7 y 28 días, siendo esta la de mayor importancia a la hora de analizar el índice de actividad resistente y es la que más se acerca al comportamiento del cemento en la práctica. La determinación de la

resistencia a la flexotracción y a la compresión de las arcillas se realizó a través de pruebas de morteros, con una prensa hidráulica de 10 t (Figura 2.11).



Figura 2.11 Prensa hidráulica de 10 t.

Ensayo de resistencia a la flexotracción

El ensayo de la resistencia a la flexotracción, se realizó con la ayuda de tres cilindros de acero de 10 mm de diámetro; dos de ellos, sobre los cuales se apoya el mortero, situados en un mismo plano y paralelos a la distancia de 100 mm, el tercero equidista de los dos primeros y se apoya sobre la cara opuesta de la probeta. Uno de los cilindros de soporte y el cilindro de carga serán capaces de oscilar ligeramente con relación a sus centros para mantener una distribución uniforme de la carga a todo lo ancho del mortero sin someterlo a esfuerzos de torsión.

El mortero se colocó sobre los cilindros de soportes, de forma que su eje longitudinal sea perpendicular a los ejes de estos y su eje transversal y el del cilindro de carga se encuentren en el mismo plano y paralelos entre sí.

La carga P será aplicada verticalmente por el cilindro de carga sobre la cara lateral de la probeta y deberá crecer progresivamente a razón de $(5 \pm 1 \text{ kgf} / \text{s} [49 \pm 10] \text{ N} / \text{s})$. El módulo de rotura R , está dado por la ecuación (1).

$$R = \frac{6 \cdot M}{b^3} = \frac{1,5 \cdot P \cdot l}{b^3} \quad (1)$$

donde:

b: lado de la sección cuadrada de la probeta

M: momento flector que es hallado por la fórmula siguiente:

$$M = \frac{P \cdot l}{4}$$

donde:

P : carga de rotura aplicada en el medio del mortero

l: distancia entre los cilindros de soporte

Si *l* y *P* se expresan en cm, la fórmula se transforma en:

$$R = 0,234 \cdot P \text{ para } l = 10 \text{ cm}$$

$$R = 0,250 \cdot P \text{ para } l = 10,67 \text{ cm}$$

R se expresa en kgf/cm², cuando *P* está en kgf o en kN/cm² cuando *P* está en kN

2.5. Ensayo para determinar la resistencia a la compresión.

En el ensayo de resistencia a la compresión cada probeta se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales de la misma. Para ello se utilizaron dos placas de acero de dureza no inferior a HRC 60, de 40 ± 0,1 mm de ancho y largo, y de espesor mínimo de 10 mm, las cuales son planas con un error menor de 0,02 mm. El conjunto se colocó entre los platos de 10x10 cm de la prensa que aparece en la figura 2.13, cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión.

La resistencia a la compresión *R* se calculó mediante la ecuación (2):

$$R = \frac{P}{S} = \frac{P}{l \cdot b} \quad (2)$$

donde

P: carga aplicada a la probeta.

S: superficie de la sección transversal de la probeta, cm²

R: se expresará en kgf/cm^2 cuando P esté en kgf o en kN/cm^2 , cuando P esté en kN.

Los ensayos de resistencia a la flexotracción y compresión se realizaron a las edades de rotura de 7 y 28 días.



Figura 2.13 Aditamento para la compresión.

Determinación de la actividad puzolánica.

Para la determinación de este índice de actividad se tomaron los resultados de los ensayos de compresión simple a los 7 y 28 días, tanto de los morteros con adición como de los morteros de referencia. El índice se calcula a partir de la siguiente ecuación:

donde:

$$IAR = \frac{A}{B} \times 100$$

IAR: índice de actividad resistente

A: promedio de la resistencia a la compresión de los morteros de ensayo (puzolana y cemento), MPa.

B: Promedio de la resistencia a la compresión de los morteros patrones (100 % cemento Portland), MPa.

El método se recoge en la ASTM C 311 y la norma cubana NC TS 527:2011. Dado que para determinar el índice de puzolanidad se necesita conocer la resistencia a la compresión de las probetas tanto de los morteros con adición como de los morteros de referencia. Se realizaron pruebas de resistencias mecánicas que tributan a su determinación. Capítulo 3. Análisis y discusión de los resultados.

La utilización de las arcillas de Baracoa como material cementicio suplementario está íntimamente relacionada con el grado de reactividad que puedan alcanzar estas, lo cual condiciona los niveles de adición al cemento Portland. La reactividad puzolánica de las arcillas depende de varios factores, como la composición química, mineralógica, granulométrica y el orden estructural de las fases activas, los cuales se analizan en los ensayos de resistencia a la compresión en morteros. Mostrar y analizar los resultados de estos factores sobre la resistencia mecánica que permita conocer las perspectivas de utilización de estos materiales es el objetivo fundamental de este capítulo.

3.1 Resistencias mecánicas

Se ofrecen los resultados de los ensayos mecánicos a la flexotracción y a la compresión de las muestras de arcillas y residuos de ladrillos (rasillas) y muestras patrones, a las edades de 7 y 28 días.

Los resultados de las pruebas de las resistencias mecánicas son de gran importancia para las posibles aplicaciones y control de la calidad de cementos, morteros y hormigones, principalmente la resistencia a la compresión, la cual puede ser utilizada como criterio principal para seleccionar el tipo de mortero, ya que es relativamente fácil de medir y comúnmente se relaciona con otras propiedades, como la adherencia y absorción del mortero. En el trabajo se emplea precisamente, para determinar el índice de puzolanidad de los materiales con adición de arcillas y residuos de ladrillos (rasillas).

3.1.1 Resistencia a la flexotracción

Las resistencias a la flexotracción de los morteros analizados, hasta las edades en que se practicaron los ensayos, nunca llegan a superar las del patrón. El mejor resultado, en términos absolutos lo obtuvo el mortero preparado con arcilla calcinada a 800°C que alcanzó valores de 0,70 y 0,90 MPa a los 7 y 28 días respectivamente. Las resistencias más bajas fueron alcanzadas por el mortero preparado con residuo.

La resistencia a la flexotracción de todos los morteros a los 28 días es superior a la de los 7 días; el mayor incremento, que fue de 0,20 MPa, lo percibió el mortero elaborado con arcilla calcinada a 800°C; mientras que la mezcla que se preparó con los residuos fue la que menos incrementó su resistencia, con una diferencia de 0,16 MPa entre los 7 y 28 días. (Figura 3.1).

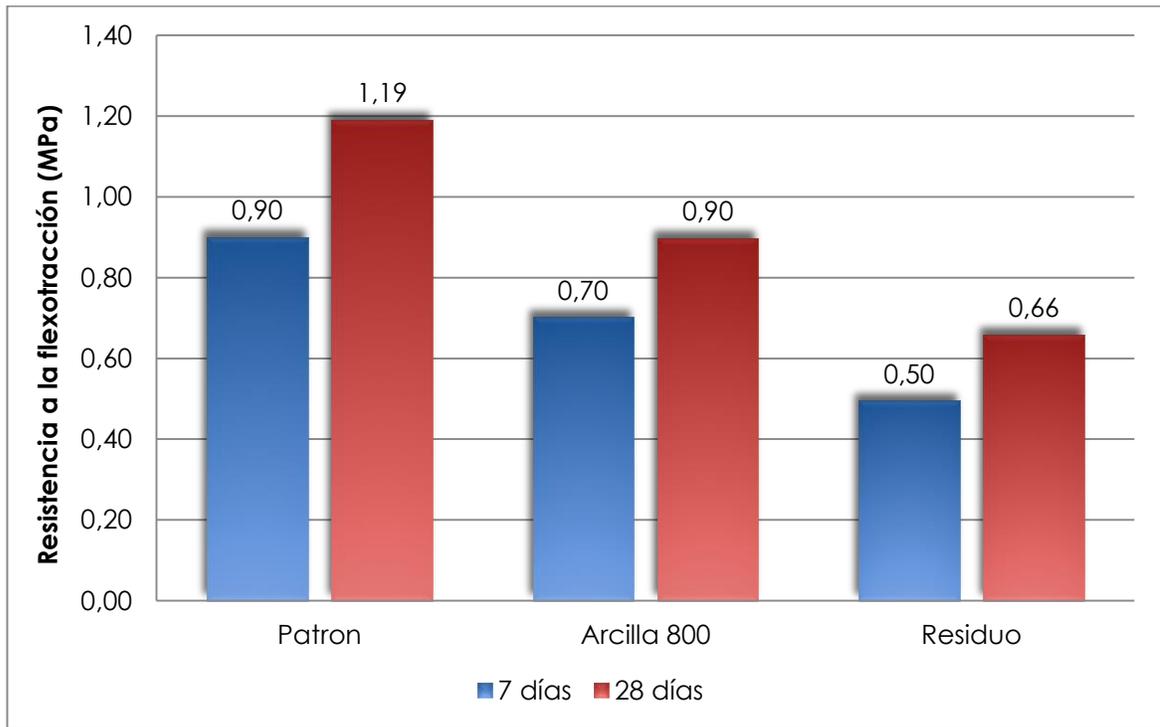


Figura 3.1. Resistencia a la flexotracción de los morteros a edades de 7 y 28 días.

3.1.2 Resistencia a la compresión

En la figura 3.2 se puede observar el desarrollo de la resistencia a la compresión de los morteros con adición de arcillas calcinadas y residuos.

Todos los morteros muestran incrementos en su resistencia a la compresión para el período entre los 7 y 28 días; el mayor aumento fue de 7,93 MPa y lo obtuvo el mortero preparado con residuo; mientras que el menor incremento, que fue de 3,45 MPa, fue logrado por el mortero elaborado con arcilla calcinada a 800°C. (Figura 3.2).

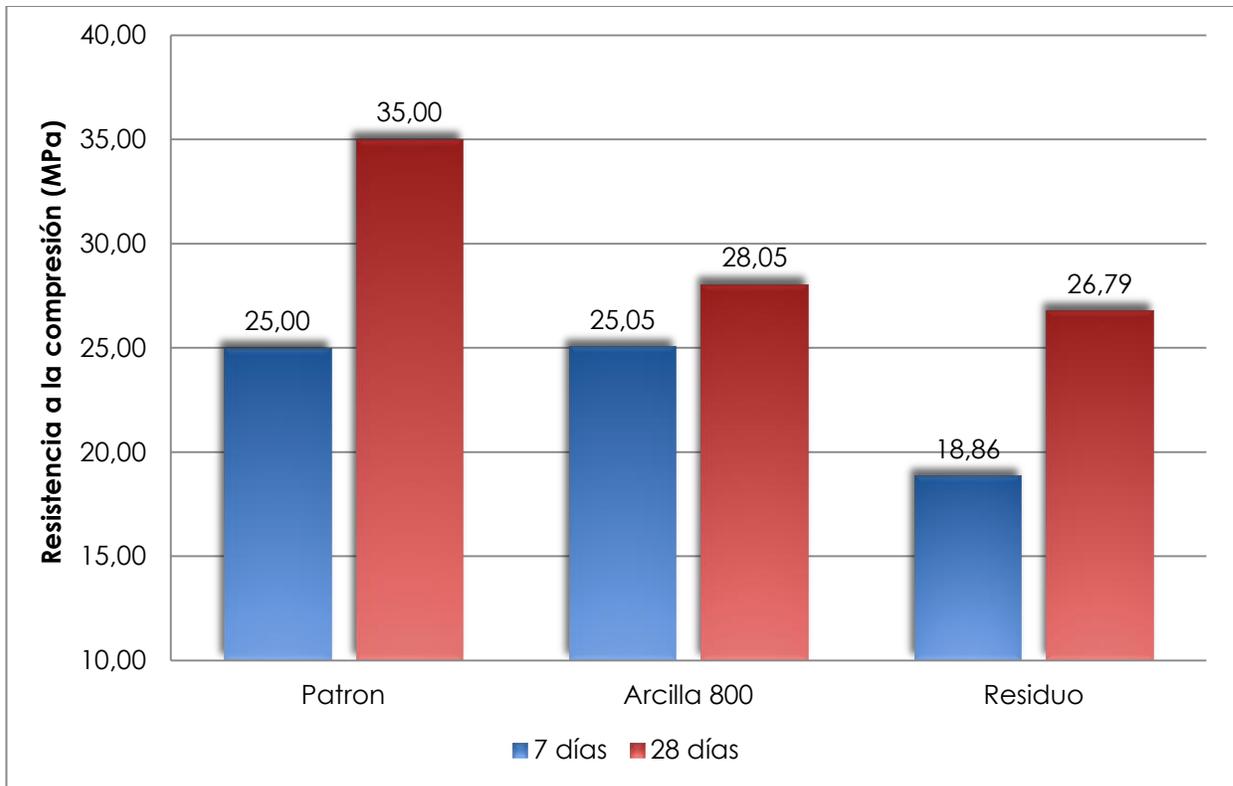


Figura 3.2. Resistencia a la compresión de los morteros a edades de 7 y 28 días.

A los 7 días el mejor comportamiento lo obtuvo el mortero elaborado con arcilla calcinada a 800°C, con un valor de resistencia a la compresión de 25,05 MPa incluso superando al patrón; mientras que el que logró la menor resistencia, con un valor de 18,86 MPa, fue el mortero elaborado con residuo que se quedó muy por debajo del patrón de referencia. La mejor resistencia a los 28 días fue lograda por el mortero elaborado con arcilla calcinada a 800°C, la misma obtuvo un valor de 28,05MPa; mientras que el de peor resultado fue el mortero elaborado con residuo con una resistencia de solo 26,79 MPa.

3.1.3 Índice de actividad resistente

Morteros	Índice de Puzolanidad	
	7 días	28 días
Arcillas 800 °C	100,22	80,14
Residuo	75,43	76,43

Tabla 3.1. Índice de actividad puzolánica de la arcilla calcinada a 800 °C y de los residuos.

En la tabla 3.1 se representan los valores de los diferentes índices de actividad resistente para cada material analizado. Entonces puede considerarse que la arcilla calcinada a 800 °C y los residuos, aquí analizados, tienen buena reactividad en el aglomerante ternario cemento portland-arcilla calcinada-caliza, dado que el índice de actividad resistente es superior a 75 % a los 28 días de fraguado, valor mínimo que exige la norma NC TS 527:2011, para que un material sea considerado puzolánico por tal razón se considera que son poseedores de propiedades puzolánicas. A la edad de 7 y 28 días se destaca la arcilla calcinada a 800 °C con valores de 100,22 y 80,14 %. Por otro lado, los materiales con resultados más discretos pero dentro de la exigencia de la norma fueron los ensayos realizados a los residuos con valores de 75,43 y 76,43% a 7 y 28 días respectivamente.

3.2 Análisis de los ensayos realizados a los cementos.

A los cementos fabricados con adiciones de arcillas calcinadas a 800°C y con residuos de ladrillo (rasillas), se les realizaron los ensayos de campo especificados en el “Manual de Calidad del Cemento de Bajo Carbono LC3” (manual creado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales en el año 2015 para brindar a los productores que emplean la tecnología de fabricación de cemento LC3 a pequeña escala un aseguramiento de la calidad de producción).

3.2.1 Ensayos de Sedimentación

Este ensayo se le realizó a los cementos LC3 elaborados a partir de la base clínquer-arcilla calcinada-caliza y a una muestra de cemento P-35 para tenerlo como referencia. Para obtener los tiempos t_1 , t_2 y t_3 en el proceso que fue descrito en el capítulo anterior, se repitió el ensayo tres veces para cada uno de los cementos y se promediaron los tiempos, los resultados se muestran en la continuación en la Tabla 3.2.

Tiempos (minutos)	Cemento elaborado con residuo LC3	Cemento elaborado con arcillas 800°C LC3	Cemento P-35
t1	1:06	1:50	0:46
t2	2:05	3:55	1:24
t3	2:30	5:54	1:38

Tabla 3.2: Resultados del ensayo de sedimentación

Según los tiempos obtenidos para cada uno de los cementos se puede observar como los cementos LC3 poseen menor velocidad de asentamiento de las partículas en agua que el cemento P-35, debido en gran medida al aporte de las arcillas calcinadas a la superficie específica. De los dos cementos artesanales el cemento LC3 con adiciones de arcillas calcinadas es el de menor velocidad de asentamiento, lo que evidencia mayor finura.

Como se puede apreciar para los tres cementos los tiempos t1 son menores que 3 minutos y los t2 son menores que 5 minutos, por lo que según el “Manual de calidad para el cemento de bajo carbono LC3” no cumplen los requisitos de finura.

3.2.2 Ensayo Visual- Táctil

En la comparación del cemento LC3 con adiciones de residuos de ladrillos (rasillas) con el cemento P-35, al palpar ambas muestras con las manos, no existen grandes diferencias en la finura entre un cemento y otro, pero en el cemento LC3 se percibe la presencia de algunas partículas gruesas, que al observarlas se comprueba que estas provienen de la piedra caliza.

Con el cemento LC3 con adiciones de arcillas calcinadas a 800°C al palpar ambas muestras con las manos, no existen diferencias en la finura entre un cemento y otro y ambos son imperceptibles al tacto, lo que presupone una buena finura.

3.3. Valoración socioeconómica y ambiental

El presente trabajo constituye un paso muy importante para el desarrollo de nuevos materiales. Todo esto, unido al déficit de materiales de construcción para acometer los diferentes programas de construcción de viviendas y obras sociales, llevó a la realización de esta investigación.

Se ha podido constatar de manera particular que en la provincia de Guantánamo existen, en varios municipios como Baracoa, posibilidades de explotar recursos minerales para la construcción, donde la valoración técnica ha resultado positiva. En muchos casos, bajo una valoración de su consumo local, esto puede resultar de un impacto importante para estas comunidades.

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.

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 arcillas calcinadas y la reducción de gases nocivos a la atmósfera se tiene en cuenta lo siguiente:

La industria cubana de cemento presenta altos consumos de energía, tanto eléctricas como de portadores energéticos (combustibles), el consumo anual de las seis fábricas con las que cuenta el país, están en alrededor de 240 000 MW·h y 250 000 t de combustible. De acuerdo a las operaciones y procesos involucrados en la obtención de cemento se establece el balance de consumo energético que se muestra en la tabla 3.3 (Almenares, 2011.)

Tabla 3.3 Balance de consumo de energía eléctrica de las empresas cubanas de cemento. Fuente: Inspección estatal energética, 2000.

Operaciones y procesos	Consumo, %
Extracción, preparación de la materia prima y transporte a la fábrica	3
Prehomogenización y molienda de crudo	18
Homogenización y clinkerización	29
Molienda de Clinker	24
Servicios generales y auxiliares	23
Iluminación	3

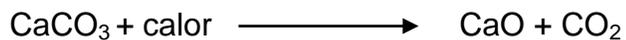
En la actualidad el consumo de combustible y energía eléctrica se ha incrementado debido a las transformaciones de expansión que se ha llevado a cabo en estas empresas cementeras. Se han incrementado los costos del petróleo y la importación de insumos y materiales auxiliares, unido a la lejanía y escasez de recursos minerales que se emplean como materia prima para la producción de cemento.

La planificación de una pequeña industria para la producción de materiales puzolánicos de los analizados en este trabajo, por sólo requerir la activación física, sería necesario únicamente, las operaciones de preparación mecánica inicial, cuyo esquema de tratamiento, en un principio, constaría de las siguientes etapas: extracción de la materia prima, trituración, molienda y clasificación, y, de concebirse la mezcla del cemento con la puzolana, una etapa de homogeneización o mezclado.

Por otro lado, el empleo de las arcillas calcinadas y residuos de ladrillos (rasillas) estudiadas en la presente investigación contribuye al desarrollo de nuevos materiales de construcción y permite con ello, ahorrar un volumen importante de recursos minerales. La cercanía de las extracciones y su procesamiento hace posible que se economice considerablemente el combustible.

Además fundamenta la creación de nuevas fuentes de empleo, con oportunidades para la ocupación de fuerza de trabajo de poca calificación. El incremento sustancial de la construcción de nuevas viviendas y otras obras sociales, con indicadores económicos de racionalidad. Basado a la capacidad que tienen las materias primas estudiadas de comportarse como aislantes térmicos y acústicos, contribuiría al mejoramiento de la calidad de vida de las personas.

El empleo de las puzolanas como aditivos minerales al cemento Portland trae consigo beneficios ambientales. Se conoce que la fabricación del clínker de cemento, se despiden a la atmósfera, grandes cantidades de gases, entre ellos CO₂ y uno de los responsables del efecto invernadero. Para producir un millón de toneladas de clínker se necesitan calcinar cerca de dos millones de toneladas de calizas o margas portadoras de CaCO₃, por lo que se emitirán a la atmósfera un aproximado de medio millón de toneladas de CO₂, al descomponerse el CaCO₃. Ver fórmula.



Otro de los gases nocivos que se emiten a la atmósfera durante la fabricación del clínker es el SO₂ responsable de las lluvias ácidas, este gas es un producto de la quema de combustibles con determinados por cientos de azufre (S).

De lo anterior se deduce que es vital desde el punto de vista económico y medio ambiental para la industria del cemento, reducir los volúmenes de producción de clínker y una de las formas de lograrlo es localizando y fomentando el uso de puzolanas de alta calidad, lo cual elevaría los por cientos de adición o mezclas, sin afectar la calidad y el posterior uso de los cementos producidos.

3.3.1. Perspectivas de utilización de los aglomerantes cemento portland-arcilla calcinada-caliza

A partir de los resultados alcanzados en los ensayos realizados a los morteros elaborados a partir del LC3 artesanal se establecieron consideraciones acerca de la potencialidad de las arcillas calcinadas a 800°C y los residuos de ladrillos (rasillas) de Baracoa como materia prima para la elaboración artesanal del cemento de Bajo Carbono.

Este cemento puede ser utilizado para la fabricación de bloque huecos de hormigón, además para la producción de elementos prefabricados, y en otros elementos constructivos de baja resistencia como las baldosas y en morteros de albañilería.

Conclusiones

La evaluación de los productos de calcinación de las arcillas y residuos de ladrillos (rasillas) del municipio de Baracoa, situado en un tejar perteneciente al consejo popular Cabacú poseen perspectivas para su utilización como aditivo puzolánico, lo que se fundamenta en los siguientes argumentos:

- El material arcilloso calcinado a 800°C posee actividad puzolánica. El índice de actividad resistente es superior, en todos los casos, a 75 %, valor mínimo exigido por la norma NC-TS 528: 2007 a los 28 días. En orden de reactividad se presenta arcilla calcinada a 800°C seguido de los desechos de ladrillos (rasillas).
- El material con mayor potencial de utilización como fuente de material puzolánico, lo posee las arcillas calcinadas a 800 °C, pues desarrolla mejor resistencia a edades tempranas.
- Al sustituir el 30 % de cemento con material arcilloso, y un 20 % de caliza se obtienen morteros cuyas resistencias son suficientes para su utilización en aplicaciones de albañilería.
- El Cemento de bajo carbono (LC3) es una alternativa ambientalista que propicia bajos costos e incrementa la producción del cemento satisfaciendo la demanda y necesidades actuales de nuestro país, por lo que se debe continuar la búsqueda de materia prima disponible para la elaboración del mismo en nuestra provincia.
- 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.

Recomendaciones

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

- Determinar las características químicas, mineralógicas y granulométricas de las arcillas de Baracoa.
- Investigar acerca de la temperatura de calcinación de estos residuos utilizados.
- Elaborar LC3 artesanal a partir de arcillas calcinadas y residuos de ladrillos proveniente de otras producciones dentro de la provincia.
- Desarrollar el proyecto de reconocimiento geológico de las arcillas de Baracoa para ser empleadas como material puzolánico.

Referencias bibliográficas

1. AGENCY, E., 2013. International energy outlook
2. AGUILAR, C.Y. 2015. Cementos de bajo carbono LC3 producidos en condiciones de pequeña escala, para la fabricación de bloques huecos de hormigón hidráulico y hormigones de hasta 20 MPa. Tesis de Diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
3. AGUILAR, P.A. 2014. Evaluación de las propiedades físico - mecánicas de morteros de albañilería y prefabricados de pequeño formato a base de Cemento de Bajo Carbono. Tesis de Diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
4. ALMENARES, R. 2011. Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como aditivo puzolánico. Carlos Alberto Leyva Rodríguez (Tutor). Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
5. ALUJAS, A., 2010. "Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente." Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
6. "ARCILLA." Retrieved <http://www.ecured.cu/index.php/>
7. ARTEGA, J. C., 2009. Comportamiento mecánico y caracterización de morteros elaborados con cemento portland ultrafinos.
8. ASTM C – 311, 2008: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Portland-Cement.
9. ASTM C-595 Standard Specifications for Blended Hydraulic Cements. Especificaciones estándar para cementos hidráulicos mezclados. United State.
10. ASTM C-618 Standard Specifications for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. United State.
11. ÁVILA M.D. 2010. Caracterización mineralógica y tecnológica de materiales arcillosos del territorio de Moa para su empleo en la Industria Local. ISMM. Moa. Trabajo de Diploma. 82p.
12. BLANCO, F. 2012. Polímeros y Materiales Compuestos. *In*: Oviedo, L.D.C. U. D. España.
13. "CABACU" Retrieved, http://www.ecured.cu/Cabac%C3%BA_%28Baracoa%29

14. CAPUTO, D., B. Liguori, and Colella,C.2008.Someadvancesin understanding, the pozzolanic activity of zeolites: Thee effect of zeolites tructure.Cement and Concrete Composites, 30(5): p. 455 -462.
- 15.CASTILLO, R. 2010. Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza. . Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- 16.GARCÍA. 2002. Prospección y Exploración de Arcilla para Cerámica Roja en los Sectores Sagua de Tánamo, Centeno y Alcarraza, Municipios Sagua de Tánamo y Moa, Provincia Holguín. Empresa Explomat. MICONS.
17. CEMBUREAU, 2011. Activity report. Disponible en:www.cembureau.eu
- 18.CEMBUREAU, 2012. Strategic Contributor to Europe's Future. The European Cement Association.
- 19.CEMBUREAU &OFICEMEN, 2012. La recuperación de residuos como combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera.
- 20.COLECTIVO DE AUTORES. 2013. Léxico estratigráfico de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología. 3ra edición. La Habana, Cuba.
- 21.CSI, 2010. Cement Industry Energy and CO2 Performance. Getting the Numbers Right. Disponible en: www.wbcdcement.org.
- 22.DE LAS CUEVAS,T.J.1993.LaIndustria Cubana de Materiales de Construcción., Ministerio de la Industria de Materiales de la Construcción: La Habana.
- 23.FERNANDEZ, L. R. 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. p. 178.
- 24.FERNÁNDEZ, L., 2013. "Obtención de cementos ternarios con altos niveles de sustitución del clínker a partir de la utilización de fuentes de materias primas nacionales". Tesis de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" De Las Villas.
25. FIGUEIRAL S. C. (2010). Valoración de mezclas de arcillas de la región de Centeno para su utilización en la Industria de Materiales Locales. Tesis de Diploma, Instituto Superior Minero Metalúrgico.

26. GUERRA, Y.G., 2015. Evaluación de los productos de calcinación de las tobas zeolitizadas del yacimiento caimanes como material puzolánico. Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
27. HABERT, G., 2010. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. Cement and Concrete Research.
28. JÚSTIZ G. E. 2014. Estudio de riesgo para situaciones de desastres para la construcción de viviendas en el asentamiento Van – Van. Baracoa. GEOCUBA Agencia Guantánamo
29. KIRK, V., MATTHEW, A., TANDRE, O., GAURAV, S. Y NARAYANAN, N. 2013. Hydration and strength development in intermarry Portland cement blends containing limestone and flyash or metakaolín. Cement & Concrete Composites.
30. LARA, R. C. 2010. Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza. Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
31. MARTIRENA, F. 2003. "Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa". Tesis en opción del grado de Doctor en Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central de Las Villas.
32. MARTIRENA, F. 2011. Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones. Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 26, No.1.
33. MARTIRENA, F. 2013. Activación de Arcillas de Bajo Grado para la Producción y Uso de Puzolanas como Sustitutos de clínker en Sistemas Cementicios Ternarios clínker-Metakaolín-Carbonato. In: VILLAS, U. C. D. L. (ed.). Santa Clara, Cuba.
34. MARTIRENA, F., 2015. La producción local del cemento de bajo carbono LC3. Primer taller regional de capacitación en la producción local del cemento de bajo carbono LC3. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
35. MOREIRA, M. 2015. Evaluación de mezclas de materiales arcillosos de la zona de Cayo Guam y arena sílice residual para su utilización en la industria cerámica. Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
36. NC-TS 528: 2007. 1ra edición. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
37. NC 175: 2002 Morteros de Albañilería. Especificaciones.
38. NC 178 - 2002: Áridos. Análisis granulométrico.

39. NC TS 527 - 2007: Cemento hidráulico. Método de ensayo. Evaluación de las puzolanas.
40. OROZCO G. 1995. Caracterización de las arcillas de Cayo Guam. Informe técnico. ISMM.
41. PÉREZ, R. Y. 2006: Características geológicas y perspectivas de utilización como material de construcción del vidrio volcánico del sector Guaramanao, San Andrés, Municipio Calixto García. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 62 p.
42. RAMOS Q. M. 2002. Caracterización físico mecánica de las arcillas de Moa para su utilización en la industria de cerámicas. Trabajo de diploma. ISMM.
43. RODRÍGUEZ. M. 2014. Evaluación de propiedades físico-mecánicas en morteros de albañilería a partir de cementos con sustituciones de clínquer por arcillas calcinadas y caliza. Tesis de Diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
44. RODRÍGUEZ R, I. 2013. Caracterización de materiales arcillosos del depósito Cayo Guam para su posible empleo como material cementicio suplementario. Trabajo de diploma. ISMM.
45. VIZCAÍNO, L. M., 2014. Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer- arcilla calcinada- caliza. Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
46. WBCD -CSI, 2012. Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry. Emissions Monitoring and Reporting 2012. Disponible en: www.wbcscement.org
47. WIKIPEDIA, http://wikipedia.uho.edu.cu/wikipedia_es_all_11_2013/A/html/C/i/n/Clinker_portland.html.

Anexos

Anexo 1. Producción mundial de CPO (Wikipedia,2016) .

Producción mundial de clínker (miles de toneladas)			
País	2005	2006	2007
China	950.000	1.000.000	1.100.000
India	150.000	150.000	160.000
USA	104.000	101.000	102.000
Japón	74.000	70.000	70.000
Rusia	65.000	65.000	65.000
Rep. Corea	62.000	62.000	62.000
España	42.000	54.000	50.000
Italia	46.000	46.000	46.000
Brasil	45.000	45.000	45.000
México	40.000	40.000	40.000
Total mundial	2.200.000	2.400.000	2.500.000

*Los datos de 2007 son estimados

Anexo 2. Requerimientos químicos para las puzolanas según la norma cubana NC TS 528: 2007

	Clase de Aditivo Mineral		
	N	F	C
Dióxido de Silicio (SiO ₂)+Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)+Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃), min. %	70,0	70,0	50,0
Trióxido de Azufre (SO ₃), máx. %	4,0	5,0	5,0
Contenido de Humedad, máx. %	3,0	3,0	3,0
Pérdida por Ignición, máx. %	10,0 ^a	6,0 ^b	6,0
<p>^a: Para el caso de puzolanas naturales que contengan en su composición mineralógica contenidos de zeolitas se excluye este requisito, tal es el caso de las tobas zeolitizadas que se emplean como puzolanas y que han demostrado una buena actividad tanto con el cemento como con la cal.</p> <p>^b: El uso de puzolanas clase F que contienen una pérdida por ignición mayor que 12,0 % pueden ser aprobadas por el consumidor si los reportes de cumplimiento de aceptación o los resultados de los ensayos de laboratorio la hacen utilizable.</p>			

Anexo 3. Requerimientos físicos para las puzolanas según la norma cubana NC TS 528: 2007

	Clase de Aditivo Mineral		
	N	F	C
Finura: Cantidad retenida con tamizado húmedo sobre el tamiz 45 μm (No. 325), máx. % ^a	34	34	34
Índice de Actividad de Resistencia: ^b Con cemento Pórtland, 28 días min. % del mortero control.	75 ^c	75 ^c	75 ^c
Requerimiento de agua, máx. % de control	115	105	105
Requerimientos de Uniformidad La densidad y la finura de muestras individuales no podrán variar del promedio establecido para los 10 ensayos precedentes o para todos los ensayos precedentes si el número es menor que 10, por más que:			
<ul style="list-style-type: none"> • Densidad, variación máxima del promedio, % • Retenido en % sobre 45 μm (No. 325), máx. variación, porcentaje de puntos del promedio 	5	5	5
	5	5	5
^a : Tener cuidado para evitar la aglomeración del material extremadamente fino. ^b : El índice de actividad de resistencia con el cemento Pórtland no debe ser considerado como una medida de la resistencia a la compresión del hormigón que contiene el aditivo mineral. La cantidad de aditivo mineral especificada para el índice de ensayo de actividad de resistencia con el cemento Pórtland no es considerada como la cantidad recomendada para el hormigón que será usado en el trabajo. La cantidad óptima de aditivo mineral para cualquier proyecto específico se determina de acuerdo a las propiedades requeridas del hormigón y los otros constituyentes, y deberá ser establecida mediante ensayos. El índice de actividad con cemento Pórtland es una medida de la reactividad con el cemento dado y puede variar con la procedencia del aditivo mineral y del cemento. ^c : Se conoce que el método de actividad de resistencia a los 28 días, indicará una especificación de confianza.			

