



INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALÚRGICO DE MOA
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

Departamento de Geología
Facultad: Geología y Minería

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

Ingeniero Geólogo

**Título: Características Geológicas y Evaluación de las
tobas vítreas del Yacimiento Sagua de Tánamo para
su utilización como aditivo puzolánico.**

Autor: Rubiel Guillen Delgado

Tutor: Dr. Carlos A. Leyva Rodríguez

Msc. Roger Samuel Almenares

Moa, 2013

“Año 55 de la Revolución”



DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado muy especialmente a las dos personas más importantes en mi vida, y las principales responsables de que haya sido posible mi paso por la universidad. Ellos son Celia Delgado Pérez y Evangelio Guillen Tamayo, mi **MAMA** y mi **PAPA**.*

*También lo dedico a una persona que durante estos 5 años se sacrificó a pesar de las dificultades y supo salir siempre adelante, sin importar la magnitud de los problemas, esa persona soy **YO**.*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda incondicional de una serie de personas a las que siempre les voy a estar muy agradecido, por eso no puedo dejar de agradecerles a:

Toda mi familia, mis padres, mis hermanas a todos en general.

Mis tutores, el MsC Roger Almenares Reyes y el Dr Carlos Leyva Rodríguez.

Todos los profesores del departamento de geología y aquellos que no lo son que de una forma u otra contribuyeron a mi formación como profesional y a ser mejor persona.

Mis compañeros de grupo Antonio, Yoel, Lázaro, Dany, Oyanna, Daimara, la flaka, Novela, Iron, Ibn, Cristian, Mailen, Yaneli, Cesar, Maiky, Reinier en fin a todos los que de una forma u otra tuvieron algo que ver en que yo pudiera llegar al fin de esta etapa de mi vida.

A TODOS MUCHAS GRACIAS

FRASE

“Es preferible arriesgar cosas grandiosas, alcanzar triunfos y glorias, igualmente exponerse a la derrota, que formar filas con los pobres de espíritu, que no gozan, ni sufren mucho, porque viven en la penumbra oscura y cenicienta de los que no conocen la victoria, ni la derrota”

Paulo Nogueira de Camargo y Ody Silva, 1975.

RESUMEN

En el presente trabajo se determinaron las propiedades puzolánicas de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo, los cuales fueron calcinados a las temperaturas de 450, 600 y 750 °C para evaluar las perspectivas de su utilización como adición mineral activa al cemento Pórtland, según los parámetros de calidad normalizados, al sustituir el cemento Pórtland con 30 % del material tobáceo calcinado. Se realizó una caracterización, basada en la determinación de la granulometría, mediante un analizador de tamaño de partículas y 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. Además se realizó una comparación entre los resultados obtenidos al emplear material tobáceo calcinado y natural, lo que permitió determinar que estos materiales, poseen perspectivas para su utilización como aditivo puzolánico activo. Los mejores resultados fueron alcanzados, por las tobas calcinadas a 750 °C.

ABSTRAT

In the present study determined the pozzolanic properties of vitreous tuffs reservoir Sagua de Tánamo, which were calcined at temperatures of 450, 600 and 750 ° C to evaluate the prospects of their use as active mineral addition to Portland cement, according to standardized quality parameters, replacing Portland cement with 30 % of calcined tuffaceous material. Were realized a characterization, based on the determination of the particle size through a particle size analyzer and determination of the pozzolanic activity by testing the compressive strength using the method indicated in the standards for such specifications. Moreover carried out a comparison between the results obtained at employing calcined tuffaceous material and natural, what allowing determining that these materials, possess prospects for it utilization as active pozzolanic additive. The best results were reached, for the tuffs calcined at 750 ° C.

INDICE

Introducción	1
Estado del Arte:	5
Conceptualización de la investigación	8
Clasificación de los cementos	8
Cemento Pórtland Puzolánico.....	14
Puzolanas	14
Principales tipos de puzolanas.....	14
Actividad y reacción puzolánica	15
Efecto de la adición de puzolanas al cemento Pórtland.....	17
Utilización de las puzolanas	19
Capitulo: I. Caracterización Físico-Geográfica y geológica del área de estudio.	20
1.1 Ubicación geográfica del área de estudio	20
1.2 Características Físico-Geográficas del área de estudio.....	21
1.2.1 Clima.....	21
1.2.2 Relieve	22
1.2.3 Vegetación	22
1.3 Características Geológicas Regionales.	22
1.3.1 Geología Regional	23
1.3.2 Tectónica	24
1.3.3 Geología de Sagua-Moa.....	26
1.4 Características de los materiales tobaceos presentes en el yacimiento de Sagua de Tánamo.....	37
1.4.1 Yacimiento Sagua de Tánamo	37
Capitulo: II. Materiales, Metodología y volumen de los trabajos realizados.	39
2.1 Caracterización de las muestras.....	39
2.1.1 Caracterización química.....	39
2.1.2 Caracterización mineralógica.....	41
2.2 Recopilación y revisión de la información existente.	43
2.3 Toma y preparación de la muestra.....	43

2.4 Preparación de los materiales para la conformación de los morteros.....	45
2.5 Determinación de la composición granulométrica.....	48
2.6 Determinación de la resistencia a la flexión y compresión.....	49
2.8 Ensayo de resistencia a la compresión.....	51
2.9 Determinación del índice de actividad puzolánica con cemento Pórtland....	52
Capítulo III. Resultados Obtenidos.....	54
3.1 Resultados experimentales y su análisis.	54
3.1.1 Caracterización granulométrica.....	54
3.2 Análisis e interpretación de los resultados obtenidos de las resistencias mecánicas.	55
3.2.1 Resistencias mecánicas.....	55
3.2 Resistencia a la flexión.	56
3.3 Resistencia a la compresión.	58
3.4 Resultados del índice de actividad puzolánica.....	60
Valoración socioeconómica y ambiental	62
Conclusiones	67
Recomendaciones	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
Anexos	

Introducción

El cemento Pórtland, 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).

Sin embargo, aunque se le reconoce haber sido uno de los elementos que más ha contribuido al desarrollo de la humanidad, y hoy incluso se asocia con el nivel de desarrollo de un país (Aitcin, 2000 y Vanderley, 2002), también ha resultado ser, de forma paradójica, uno de los principales responsables de la degradación ambiental del planeta, debido a que su proceso productivo en lo fundamental está montado sobre la base de la explotación intensiva de recursos no renovables (materias primas y combustibles), y se emiten en él significativos volúmenes de gases de efecto invernadero (Martirena, 2003).

En los últimos años la producción de cemento Pórtland considerada en sus inicios como una producción de países industrializados se ha abierto paso en los países en vías de desarrollo, con crecimientos de más de un 55 % entre 1999 y 2000, mientras que en los países desarrollados solo creció un 3 % (Vanderley, 2002). Las razones son claras: los países en vías de desarrollo están en proceso de construir su infraestructura, y para esto necesitan inmensas cantidades de cemento Pórtland. Esto es también un resultado de la tendencia mundial de los países industrializados a desplazar las producciones contaminantes hacia los países en vías de desarrollo (Martirena, 2003). Cuba se destaca entre los primeros países en vías de desarrollo que asumió un crecimiento de su industria del cemento, actualmente distribuida en 6 grandes plantas productoras distribuidas en 5 provincias (ver anexo 1).

El alto consumo energético y los grandes volúmenes de emisiones de gases de invernadero se convierten en amenazas a la sostenibilidad de la producción de este aglomerante en los próximos años. El sostenido incremento del precio de los combustibles fósiles a corto plazo, el previsible reforzamiento a escala global de las políticas impositivas a productos o producciones que contribuyan al calentamiento global (impuestos ecológicos), harán que el incremento de costos de la producción llegue a niveles prohibitivos para la industria. Se precisa entonces delinear estrategias para poder contribuir a resolver este problema a mediano plazo. (Von, 1998 y Martirena, 2003).

Las medidas principales tomadas para disminuir, o al menos detener el incremento de las emisiones de CO₂ por la producción de cemento pueden ser clasificadas en dos grandes grupos: a) Las orientadas a aumentar la eficiencia del proceso, disminuyendo el consumo de combustibles, y b) Las orientadas a extender el clinker usando adiciones activas o inertes, que son añadidas en fábrica o a la hora de utilizar el cemento. (Price, 1999; Vanderley, 2002).

El desarrollo reciente de las adiciones activas al cemento, se han venido incrementando cada vez más. Su empleo en hormigones presenta elevados beneficios para la economía, reducción del consumo de energía e incremento de la protección ambiental y conservación de recursos naturales. En términos técnicos, los beneficios más importantes se presentan en forma de aumento de resistencia a edades tempranas, disminuyendo la permeabilidad y por tanto aumento de la durabilidad.

En Cuba, con el desarrollo vertiginoso de las obras constructivas, la producción de cemento con mejor comportamiento ante las diferentes condiciones, la resistencia, la gran compacidad y durabilidad de estos, es de suma importancia.

Estas razones, han estimulado la búsqueda de materias primas nacionales, con posibilidades de utilización como adición mineral activa, para obtener hormigones

de altas resistencias. Además se puede lograr una reducción del consumo de cemento, lo cual representa un resultado económico y ambiental considerable.

Dentro de la gama de minerales industriales presentes en el país, teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, uno de los de mayores perspectivas son los materiales puzolánicos naturales, que para estas aplicaciones se consideran de interés las tobas zeolitizadas, las tobas vítreas y las arcillas.

Por su gran disponibilidad y distribución a lo largo de todo el país, las tobas vítreas encuentran aquí un excelente campo de aplicación, tanto a nivel nacional como regional y local. Por tal razón en el presente trabajo se requiere una valoración de las potencialidades que poseen las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo para su empleo como aditivo puzolánico activo en la industria de la construcción, lo cual constituye la **situación problémica** de la presente investigación.

Problema:

El Insuficiente conocimiento acerca de las propiedades puzolánicas de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo limita su utilización como adición mineral activa en la industria de la construcción.

Hipótesis:

Si las propiedades puzolánicas de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo, al ser activadas térmicamente, son mejoradas y compatibles con las exigencias establecidas para ser empleadas en carácter de adición mineral activa, entonces se podrá contribuir a la disminución de los consumos energéticos y a la mitigación del impacto negativo al medio ambiente de la industria del cemento e incidir sobre el desarrollo local.

Objeto de estudio:

Las tobas vítreas de Sagua de Tánamo.

Campo de acción:

Propiedades puzolánicas de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo, activadas térmicamente.

Objetivo General:

Valorar las potencialidades de las tobas vítreas del Yacimiento Sagua de Tánamo, al ser activadas térmicamente para establecer su posible utilización como adición mineral activa en la industria de la construcción.

Objetivos específicos:

- Caracterizar las tobas vítreas de Sagua de Tánamo desde el punto de vista de su composición química, mineralógica, físico – mecánica y granulométrica.
- Determinar las propiedades puzolánicas de la materia prima en su forma natural y activada térmicamente.

Tareas:

- Recopilación y análisis de los trabajos relacionados con los materiales de construcción y puzolánicos, así como la exploración de la problemática mundial, nacional, regional y local de los materiales de construcción.
- Establecimiento de las características geológicas regionales y locales.
- Toma y preparación de las muestras.
- Caracterización de la materia prima desde el punto de vista de su composición química, mineralógica, físico – mecánica y granulométrica.
- Fabricación de morteros con porcentajes de sustitución de 30 % de material tobáceo en lugar del cemento.
- Comparación de los resultados obtenidos al emplear puzolana natural y calcinada.

Estado del Arte:

Las puzolanas se conocen desde hace más de 2500 años, algunos autores plantean que la Grecia clásica conocía y utilizaba los aglomerantes del tipo cal – puzolanas, pero estos alcanzan su máximo esplendor en la Roma clásica, dando fe de ello las numerosas construcciones ejecutadas durante este periodo que en la actualidad sobreviven.

Con el surgimiento del cemento Pórtland (patentado en 1824 por Apsdin) fueron desplazados de la práctica habitual de construir. En la actualidad a partir de los elevados precios de los combustibles y fuertes medidas medio ambientales, el uso de las puzolanas naturales y artificiales comienza a retomarse, pues estos aglomerantes son objeto de una gran atención hoy día, no solo en los países en vías de desarrollo sino también en aquellos industrializados.

Le Chatelier en 1897 había ya notado que cuando el cemento Portland se hidrata se libera cierta cantidad de óxido de calcio (cal hidratada) que daña la resistencia y puede ser removida por el agua. Los materiales silíceos, como la puzolana, al ser finamente pulverizados reaccionan con dicho hidróxido de calcio forman silicato de calcio hidratado. Este elemento brinda las propiedades hidráulicas señaladas. Como expresa Bogue, la físico-química de las puzolanas, requiere de permanentes estudios para resolver sus problemas fundamentales.

Saricimen et al. (1992), a través de la realización de estudios de campo y de laboratorio en zonas de los países árabes del golfo donde las condiciones ambientales son agresivas y seriamente corrosivas, demostraron que el concreto en esta región se debe diseñar no solamente para alcanzar alta resistencia sino también para que posea mayor durabilidad. Para esto probaron el uso de las puzolanas naturales, y con ello se logró extender la vida de servicio de las estructuras.

La finura del cemento es un factor importante que afecta el índice de desarrollo de la resistencia, para ello, Day y Shi (1994), estudiaron la influencia de la finura de la puzolana en la resistencia de las pastas de cemento cal - puzolana natural. Los

resultados demostraron que la resistencia a la compresión aumenta cuando el material es más fino, y la finura de la puzolana natural tiene su efecto más significativo en el desarrollo temprano de la resistencia.

Day y Shi (1994), también analizaron el efecto del agua inicial de curado en la hidratación de los cementos que contienen puzolana natural. Como resultado obtuvieron, que las pastas de cemento Pórtland son más sensibles en el período inicial de curado que las de cemento Portland Puzolánico (contenido de puzolana 30 %) porque ocurre la hidratación del cemento Pórtland más rápidamente que la reacción puzolánica en pastas de cemento Pórtland Puzolánico. La hidratación del cemento Pórtland y la reacción puzolánica continúan después que las probetas se extraen a un ambiente seco (humedad relativa de 20 %, aproximadamente). La presencia de puzolanas naturales retarda la hidratación normal del cemento Pórtland en las primeras horas, pero la acelera después de un día.

Shannag y Yeginobali (1995), recomiendan la adición de puzolana natural al cemento Pórtland y al hormigón por separado, ya que reduce el calor de hidratación, prolonga el tiempo de fraguado y mejora la consistencia del cemento.

Calvo et al. (2005), determinan las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España, a través de estudios de las características composicionales, ensayos mecánicos y químicos de puzolanidad.

He. C. E. Makovicky, and B. Osbaeck, determinaron que el punto final del proceso de desoxhidrilación revelado para la caolinita por las curvas de ATD es de 650 °C; 730 °C para la Ca -Montmorillonita, y 740 °C para la Na-Montmorillonita, mientras que las temperaturas de calcinación a las cuales se alcanzó la mayor resistencia mecánica en morteros fueron de 650 °C para la caolinita y 830 °C para la Montmorillonita.

Tabla 1. Temperaturas de activación térmica para diferentes minerales arcillosos.

	700 °C	750 °C	800 °C	850 °C	900 °C
caolinita					
montmorillonita					
illita					

Los materiales puzolánicos son muy conocidos actualmente, así como sus ventajas en la mejora de gran número de cementos. Costafreda et al. (2011), mostraron resultados prácticos, obtenidos de recientes investigaciones de tobas de composición dacítica, capaces de sustituir al cemento Pórtland de alta resistencia inicial en morteros y hormigones. Los contenidos apreciables en sílice y en alúmina, los bajos contenidos en sulfato y materias orgánicas, y una molienda adecuada, entre otros, son las causas, al parecer, de la eficacia de este material a la hora de aportar valores apreciables de resistencias mecánicas a edades cercanas y superiores a los 28 días.

En nuestro país a lo largo de los años se han venido efectuando diferentes investigaciones sobre la materia. Desde la década de los 70 del siglo XX, con la elevación del conocimiento geológico del territorio nacional y las investigaciones a nivel de laboratorio; semi-industriales e industriales en Cuba, se han validado las puzolanas naturales como las tobas, especialmente las zeolitizadas para producir aglomerantes tales como el cemento romano y adiciones o mezclas al cemento Pórtland (Batista González, R. et al 2000, 2002; Coutin Correa, D. et al, 1975; Gener Rizo, M. et al. 2002, 2005, 2006, González Acosta, V. et al. 2004, Harben, Peter W. 1996, 1999; Rabilero Bouza, A. et al.1992, 1998,1999, 2005, Ruiz Carre, B. et al. 1999, Rosell, 2001, 2006, 2007, 2011, Martirena, 2003, López, 2006, de Armas, 2008, Muxlanga, 2009, Cabrera, 2010, Solís, 2011, Almenares, 2011 y Justo, 2012).

Varios autores como López 2006; De Armas 2008; Muxlanga 2009; Cabrera, 2010; Solís, 2011 y Almenares, 2011 han estudiado estos materiales, como es el yacimiento de tobas vítreas Sagua de Tánamo para su utilización como puzolana natural. En estas investigaciones se evaluó la sustitución de 15 y 30 % de tobas

por cemento, con la obtención de resultados favorables; sin embargo, estos se consideran preliminares, lo cual no ha permitido su empleo, permitiendo continuar con nuevas investigaciones.

La evaluación entonces de materiales puzolánicos consiste obviamente en encontrar materiales que por sus características químicas, mineralógicas y petrológicas, incluso morfológicas hagan suponer la posibilidad de actividad puzolánica. Las tobas de origen volcánico, tanto vitroclásticas como zeolitizadas, tan abundante a todo lo largo y ancho de nuestro país, constituyen una fuente prácticamente inagotable de puzolanas.

Por lo que se puede considerar que el empleo actual de materiales puzolánicos es una aplicación innovadora de una tecnología antigua para depósitos de materiales con características adecuadas que permitan su utilización para estos fines (Almenares, 2011). Es por ello que se reafirma la necesidad de conocer las propiedades puzolánicas de las tobas del yacimiento Sagua de Tánamo.

Conceptualización de la investigación

Cemento

Definición

La norma cubana define el cemento como un material pulverizado, que con la adición de una cantidad apropiada de agua forma una pasta más o menos fluida, capaz de endurecerse, tanto bajo el aire como el agua y de aglomerar materiales adecuados.

Clasificación de los cementos

Los cementos que se producen alrededor del mundo son elaborados a base de clínker Pórtland, por cuyo motivo se justifica centrar el interés en éste y en los cementos a que da lugar, entre ellos se pueden mencionar los cementos Pórtland simples, mezclados y expansivos.

Teniendo en cuenta las diferencias de la composición química, características mecánicas, comportamiento durante la hidratación, el fraguado y endurecimiento;

ellos se clasifican en, cemento Pórtland ordinario, cemento puzolánico, cemento aluminoso y cemento siderúrgico.

El nombre de cemento Pórtland está dado por su semejanza, una vez fraguado, con la famosa piedra caliza blanco-plateada que se extraía de unas canteras existentes en la pequeña península de Pórtland, en la costa sur del Condado de Dorset, en Inglaterra (Toraya, 1999). El cual se describe como un cemento hidráulico producido al pulverizar el clinker, constituido esencialmente por silicatos del calcio hidratados, y contiene, generalmente, una o más de las formas de sulfato de calcio.

El cemento Pórtland se obtiene al calcinar a unos 1500 °C mezclas preparadas artificialmente de calizas y arcillas. El producto resultante, llamado clinker, se muele conjuntamente con una cantidad adecuada de regulador de fraguado, que suele ser piedra de yeso natural.

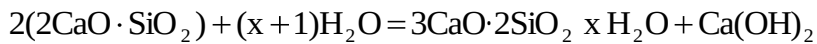
La composición química media de un cemento Portland, según Calleja (1974), está formada por un 62,5 % de CaO (cal combinada), un 21 % de SiO₂ (sílice), un 6,5 % de Al₂O₃ (alúmina), un 2,5 % de Fe₂O₃ (hierro) y otros minoritarios. Estos son los cuatro componentes principales del cemento, de carácter básico la cal y de carácter ácido los otros tres. Estos componentes no se encuentran libres en el cemento, sino en forma de silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, que son los componentes hidráulicos del mismo o componentes potenciales. Un clinker de cemento Pórtland de tipo medio contiene:

- Silicato tricálcico (3CaO·SiO₂)40% a 50%
- Silicato bicálcico (2CaO·SiO₂)20% a 30%
- Aluminato tricálcico (3CaO·Al₂O₃)10% a 15%
- Aluminatoferrito tetracálcico (4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃) 5% a 10%

Las dos principales reacciones de hidratación, que originan el proceso de fraguado y endurecimiento son (Jiménez, 1982):



(I)



(II)

El silicato tricálcico (C_3S) es el compuesto activo por excelencia del cemento pues desarrolla una resistencia inicial elevada y un calor de hidratación también elevado. Fragua lentamente y tiene un endurecimiento bastante rápido. En los cementos de endurecimiento rápido y en los de alta resistencia aparece en una proporción superior a la habitual.

El silicato bicálcico (C_2S) es el que desarrolla en el cemento la resistencia a largo plazo, es lento en su fraguado y en su endurecimiento. Su estabilidad química es mayor que la del silicato tricálcico, por ello los cementos resistentes a los sulfatos llevan un alto contenido de silicato bicálcico.

El aluminato tricálcico (C_3A) es el compuesto que gobierna el fraguado y las resistencias a corto plazo. Su estabilidad química es buena frente al agua de mar pero muy débil a los sulfatos. Para retardar la rápida reacción del aluminato tricálcico con el agua y regular el tiempo de fraguado del cemento se añade al clinker piedra de yeso.

El aluminato ferrito tetracálcico (C_3AF) no participa en la resistencia mecánica, su presencia es necesaria por el aporte de fundentes de hierro en la fabricación del clinker.

El cemento se caracteriza por su finura, tiempo de fraguado, consistencia, resistencia, gravedad específica, calor de hidratación y pérdidas por ignición, entre otros. Propiedades que se relacionan en lo adelante.

Finura

La finura es una medida del tamaño de partículas del cemento. La finura de los cementos producidos es generalmente evaluada a través del área superficial de Blaine (ASTM), la cantidad retenida en el tamiz 45 μm o a través de la determinación de la distribución de tamaño de partículas con difracción láser. El método de Blaine puede arrojar valores alterados, especialmente para los materiales porosos (Ravina, 1980). Además, en este método, solamente las trayectorias continuas a través de la cama de cemento contribuyen a la medición del área superficial.

Por otra parte, la determinación de la cantidad retenida en el tamiz 45 μm puede ser insuficiente para evaluar la finura dado que el método proporciona un solo valor y no suministra información sobre el tamaño de los granos más pequeños que el tamiz 45 μm . Un método más informativo es la determinación de la distribución del tamaño de partículas por difracción láser.

La finura del cemento Pórtland afecta la velocidad de hidratación y de esta manera, la resistencia aumenta. La relación área superficial - volumen, y como consecuencia, el área disponible para la interacción agua – cemento por unidad de volumen, se incrementa con el aumento en la finura del cemento. Los efectos de la finura sobre la resistencia se consideran, generalmente, durante los primeros siete días (<http://aboutcement2.cement.ca>).

Tiempo de fraguado

El endurecimiento de la pasta de cemento (cemento + agua) se le llama fraguado. El tiempo en que comienza a mezclarse el cemento y el agua hasta que la pasta de cemento se fija se llama tiempo de fraguado (Erdogan, 1997).

El tiempo de fraguado de la pasta cementicia es afectada por varios factores, tales como, finura, relación agua/cemento, y la composición química. Existen dos importantes tiempos de fraguado definidos: fraguado inicial (tiempo que dura hasta que a la pasta de cemento comienza a endurecerse considerablemente) y el

tiempo de fraguado final (el tiempo en el que el cemento ha endurecido al punto que puede sostener una cierta carga). La pasta de cemento es solamente deformable durante el tiempo de fraguado. De esta forma, el tiempo de fraguado inicial debe ser suficientemente largo, y el tiempo de fraguado final debe ser bastante corto.

Consistencia

Al referirse al cemento Pórtland, la "consistencia" representa la capacidad de una pasta endurecida de cemento de conservar su volumen después de fraguado sin experimentar la expansión destructiva. Esta expansión es causada por la hidratación lenta (u otra reacción) de algunos compuestos presentes en el cemento endurecido tal como cantidades excesivas de la cal libre (CaO) u óxido de magnesio (MgO).

Según la prueba típica de expansión, una barra pequeña de pasta de cemento se coloca en una autoclave. La autoclave se regula a una presión aproximada de 2 MPa, y después se mantiene a esa presión por tres horas. Posteriormente se regulará hasta poner la autoclave lentamente a temperatura ambiente y presión atmosférica. Luego se mide el cambio de longitud del espécimen.

Resistencia

Las pruebas de resistencia del cemento se llevan a cabo con una muestra de morteros. De acuerdo con la ASTM, para preparar el mortero se mezcla 1 parte de cemento, 2,75 partes de arena con suficiente agua para obtener un flujo adecuado de la mezcla. (Otras normas requieren diferente combinación de estos materiales).

La resistencia del cemento es normalmente definida en tres formas: compresión, tensión y flexión. Existen varios factores que afectan estas resistencias, en los que se incluyen: relación agua/cemento, relación agregado fino/cemento, tipo y clasificación del agregado fino, método de mezclado y de moldeado de los morteros, condiciones de curado, tamaño y forma del mortero, contenido de

humedad durante el tiempo de prueba, condiciones de carga y la edad (Erdogan, 2003).

Puesto que el cemento gana resistencia en cierto plazo, el tiempo en el cual se realiza una prueba de resistencia debe ser especificada. Usualmente los tiempos de ensayo son 1, 3, 7, 28 y 90 días. Debe considerarse que los ensayos de resistencia en morteros de cemento no están relacionados directamente con la resistencia del concreto, sin embargo, generalmente se emplean como medida de control de calidad.

Gravedad específica

La gravedad específica del cemento Pórtland es aproximadamente de 3,15. Las gravedades específicas de los cementos Pórtland de escoria de alto horno y los cementos Pórtland puzolánicos pueden ser más bajos, con valores de 2,90.

Calor de hidratación

La reacción de hidratación del cemento Pórtland es exotérmica. El calor generado durante la reacción de hidratación es llamado calor de hidratación. El calor de hidratación es afectado por varios factores. Dentro de los más importantes, se pueden mencionar, la composición química y la finura del cemento, la relación agua/cemento, la temperatura de curado, y el tiempo.

Pérdida por ignición

La pérdida por ignición se determina a través de la pérdida de peso de una muestra de cemento después de calentada hasta una temperatura constante. Una alta pérdida por ignición indica generalmente, prehidratación y carbonatación, que pueden ser causa del incorrecto almacenaje y transporte de la muestra.

Por la importancia que se le confiere en la investigación y su estrecha relación con la misma, en el próximo acápite se caracteriza el cemento Pórtland Puzolánico.

Cemento Pórtland Puzolánico

El cemento Pórtland Puzolánico se definen como un cemento hidráulico compuesto de una mezcla íntima y uniforme de cemento Pórtland y un material puzolánico fino, producido cada uno por una molienda íntima de clinker y el material puzolánico o por la mezcla de cemento Pórtland 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.

Puzolanas

Definición

El código ASTM (1992), en la definición 618-78, define: "las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos que por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han molido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

Principales tipos de puzolanas

Puzolanas naturales: provienen principalmente de materiales rocosos como las cenizas volcánicas, tufas o tobas volcánicas, piedra pómez, escorias y obsidiana, tierras de diatomeas (diatomitas), etc., donde predomina la sílice amorfa, es decir, vidrio volcánico producido por enfriamiento brusco de la lava. Por ejemplo las cenizas volcánicas, rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos de lo cual son ejemplos las tierras de diatomeas, o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

Puzolanas artificiales: Sus fuentes principales son los subproductos industriales y materiales tratados térmicamente, ejemplo: cenizas provenientes de la combustión de carbones, bitúmenes e hidrocarburos, en centrales térmicas, eléctricas, etc. Cenizas producidas por la quema de materia orgánica ejemplo: cáscara de arroz, bagazo de caña de azúcar y arcillas activadas térmicamente, las denominadas Microsílice (o el anglicismo "silica fume") etc. Las cualidades

puzolánicas de estos materiales se encuentran en la porción amorfa o vítrea y también en los minerales alterados o fase de descomposición.

De todas las puzolanas artificiales las más utilizadas y estudiadas a nivel mundial son las cenizas volantes. Se obtienen como un subproducto de centrales termoeléctricas que utilizan carbón pulverizado como combustible. Estas cenizas se caracterizan por ser un polvo muy fino constituido esencialmente de partículas esféricas. La Norma ASTM C 618 define dos clases de cenizas volantes: Clase F, que se obtienen por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso y son cenizas que poseen propiedades puzolánicas; y la Clase C, que se obtienen de la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito, esta clase de cenizas, además de tener propiedades puzolánicas, también tienen propiedades cementicias.

Actividad y reacción puzolánica

La actividad puzolánica se refiere a la capacidad y a la velocidad de reacción entre los aluminosilicatos de la puzolana y el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento para formar productos cementantes. La reacción principal que tiene lugar en estos sistemas es la que se describe en la reacción (III), donde se obtiene como producto el hidróxido de calcio hidratado, también comúnmente formulado en esta rama con las siglas C-S-H:



La reacción puzolánica consiste en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina amorfos, o débilmente cristalizados en un medio altamente alcalino como el creado por una solución de hidróxido de calcio, con la formación de aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento Pórtland (Quintana, 2005).

La actividad puzolánica no se ha podido comprender con claridad debido a la estructura heterogénea de las puzolanas y a la compleja naturaleza de la hidratación (Erdogdu, 1996), no obstante, los principales factores que intervienen en su actividad se pueden ilustrar a continuación (Erdogan, 2002):

- La actividad puzolánica es mayor cuando el contenido de óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) o el contenido de material activo es alto.
- Una puzolana para ser químicamente activa, debe tener una estructura amorfa.
- Las partículas puzolánicas deben ser suficientemente finas para reaccionar con el hidróxido de calcio.

Por lo tanto, para evaluar una puzolana, se debe tener en cuenta su área superficial, composición química y mineralógica.

Las bases para el empleo de los materiales puzolánicos como sustitutos parciales del clínker en el al cemento Pórtland (CPO) o como materiales mezclados con el propio CPO, se fundamentan en la reacciones ácido-base en su concepción más general. El ataque químico de los iones OH^- que provienen de la disolución del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y de los iones alcalinos liberados en la hidratación del CPO (componentes básicos) a las redes aluminosilíceas (componentes ácidos) que se encuentran en un estado de alto desorden estructural dentro de las puzolanas, provoca la ruptura de los enlaces Si-O y Al-O y la liberación de oxianiones a la solución. Ya que la solución de poros del cemento es esencialmente alcalina, el producto inmediato de la reacción es un gel amorfo donde el K^+ y el Na^+ son los cationes dominantes. Sin embargo, la abundante presencia de Ca^{2+} y la baja solubilidad de los CaO , SiO_2 , H_2O (CSH) y de las fases AFt y AFm aseguran que este gel sea solo un producto intermedio. Los nuevos productos de hidratación, formados a partir de la reacción de las puzolanas con la portlandita (CH) generada durante la hidratación del CPO, son los responsables de la mejora en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón (Taylor, H.F.W. ed. 1990).

La composición de los CSH formados durante la reacción puzolánica es similar a la de los CSH formados durante la reacción de hidratación del cemento, pero con una relación Ca/Si generalmente más baja. Si existen apreciables cantidades de alúmina reactiva en la puzolana, tal y como es el caso de las arcillas calcinadas,

esta tiende a favorecer no solo la formación de fases de aluminato de calcio, sino también la sustitución parcial del Si por Al en la estructura de los CSH, incrementando así la relación Al/Ca en los CSH, en cuyo caso se refiere a estas fases como $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (CASH) (Fernández, L.R. Taylor, H.F.W. ed. 1990). Al igual que las principales reacciones de hidratación del CPO, las reacciones puzolánicas son exotérmicas, pero como se verifican bajo una cinética más lenta, su aporte al calor de hidratación para un instante determinado es menor, aunque la contribución al calor total acumulado puede llegar a ser significativa (Ramachandran, V.S. et al).

Efecto de la adición de puzolanas al cemento Pórtland

El resultado del remplazo parcial del CPO por un material puzolánico puede ser descrito como la combinación lineal de varios efectos físicos y químicos. Dentro de los efectos físicos, el efecto de dilución implica, para una misma relación $\text{VH}_2\text{O} / \text{VAglomerante}$, un mayor espacio para la formación y crecimiento de las fases hidratadas y un aumento de la relación $\text{VH}_2\text{O} / \text{VCPO}$, lo cual favorece además la reacción de hidratación. También se incluyen el aumento de la compacidad por efecto filler y la nucleación heterogénea por el aporte de las puzolanas de una superficie adicional que favorece la nucleación y crecimiento a edades tempranas de los productos de hidratación del CPO. Estos efectos no dependen de la reactividad química de la adición mineral, sino de la cantidad de superficie disponible y del por ciento de sustitución. Son efectos muy importantes a edades tempranas y pueden ser cuantificados a partir de las diferencias entre los valores de resistencia de morteros con adiciones puzolánicas y morteros con el mismo por ciento de sustitución por un material inerte de similar granulometría (Cyr, M. P. Lawrence, and E. Ringot).

El efecto químico fundamental está dado por la reactividad puzolánica de la adición mineral. La CH aportada durante la hidratación del CPO puede representar en una pasta completamente hidratada hasta un 28% en masa respecto a la masa inicial de CPO. La CH no contribuye a la resistencia mecánica y puede ser

extraída de la masa del hormigón en sucesivos ciclos de humedecimiento y secado, aumentando la porosidad e incrementando la permeabilidad y la susceptibilidad al ataque de agentes químicos externos como las aguas de ambientes marinos saturadas de cloruros, o las aguas subterráneas ricas en sulfatos (Taylor, H.F.W. ed.1990). La alta concentración de grandes cristales de CH alineados a lo largo de la zona de transición interfacial localizada entre el agregado y la pasta, conducen a la aparición de zonas con alta porosidad y baja resistencia mecánica que son el camino usual de fractura en el hormigón (Justice, J.M. et al).

Las puzolanas pueden reaccionar con parte de la CH presente en la pasta hidratada, densificando la microestructura de la pasta y refinando la estructura de poros, con el consiguiente incremento de la impermeabilidad y la resistencia mecánica (Zhang, Y.M. W. Sun, and H.D. Yan. 2000). Al mismo tiempo, como la CH presente en la pasta es susceptible a formar fases con potencial expansivo al reaccionar con agentes externos como los sulfatos, su reducción favorece la resistencia al ataque químico. También se ha reportado la disminución en la aparición de grietas por retracción (Souza, P.S.L. and D.C.C. Dal Molin. 2005). Puede afirmarse que con la sustitución del CPO por materiales puzolánicos, se mantienen o mejoran las propiedades físicas y de durabilidad.

Las principales desventajas reportadas para el empleo de puzolanas son las bajas resistencias mecánicas alcanzadas a edades tempranas y la necesidad del empleo de superplastificantes o de relaciones agua / aglomerante mayores que para la pasta que contiene solo CPO, si se quiere mantener una laborabilidad constante de la mezcla. Para el caso de sistemas con altos volúmenes de sustitución por puzolanas muy reactivas también pueden manifestarse fenómenos asociados al agotamiento de la CH, con la consiguiente desestabilización de las fases hidratadas ricas en Ca y, para el caso de hormigones reforzados, la desestabilización de la capa pasiva que protege al acero como consecuencia de la disminución del pH (Martirena, J.F. 2009).

Utilización de las puzolanas

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

- Reemplazan una buena porción del cemento Pórtland del 15 al 40 %, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clinker y más económica de moler.
- Reduce el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción exotérmica.
- Evita el agrietamiento del concreto por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse.
- Rebajan en cierto porcentaje los aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente entran a reaccionar de manera perjudicial con los agregados del concreto.
- Aligera las mezclas, debido a la disminución de su densidad.

A partir del análisis de los efectos que las puzolanas provocan sobre el cemento se puede utilizar en:

- Morteros de albañilería (colocación de ladrillos, bloques, entre otros).
- Estabilización de suelo en bloques prensados.
- Producción de prefabricados ligeros de hormigón (bloques, adoquines, entre otros).
- Fundición de hormigón masivo de baja resistencia.

El uso de las puzolanas mejora la durabilidad de los hormigones por lo que las construcciones tienen una vida útil mayor (Howland et al. 2006).

Capítulo: I. Caracterización Físico-Geográfica y geológica del área de estudio.

1.1 Ubicación geográfica del área de estudio

La región de estudio está comprendida entre las cuencas de los ríos Sagua de Tánamo por el Oeste y Jiguaní por el Este, de Norte a Sur abarca desde la línea de costa hasta las inmediaciones del sistema montañoso Sagua – Baracoa. Puede definirse por las coordenadas de Lambert siguientes:

X: 660 000 – 724 000

Y: 200 000 – 239 000

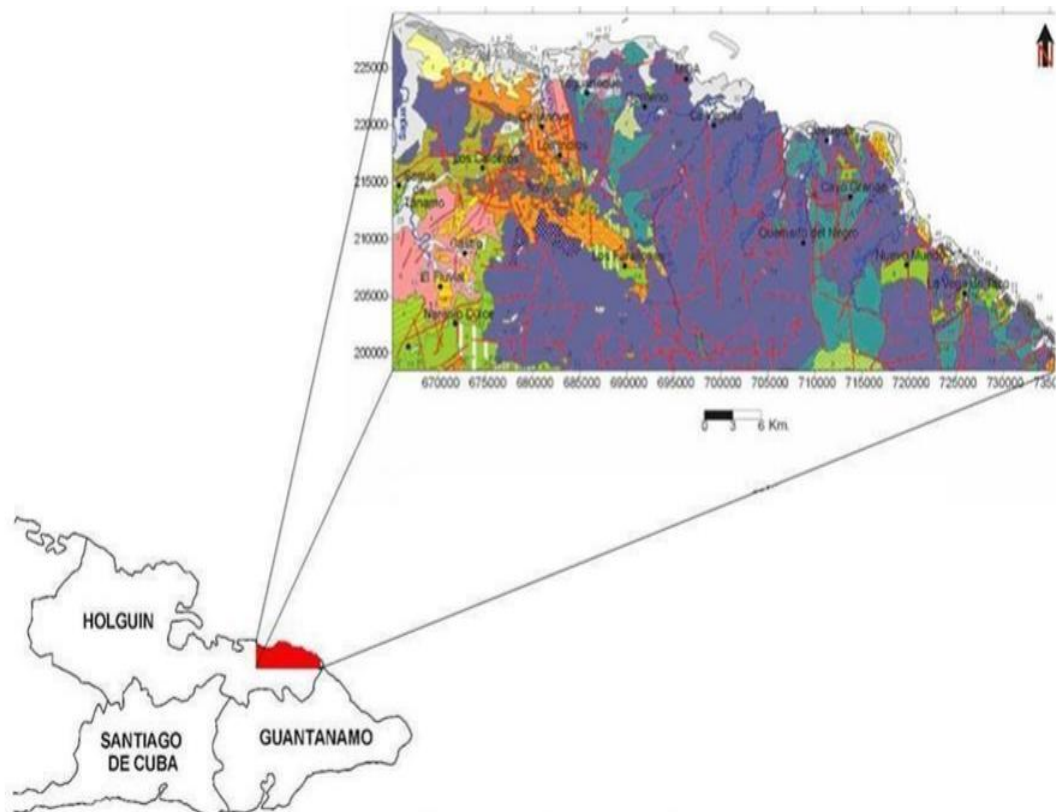


Figura 1.1 Mapa de Ubicación Geográfica

1.2 Características Físico-Geográficas del área de estudio

1.2.1 Clima

El clima, constituye un factor de obligada utilización en la evaluación del medio físico para la planificación territorial de las actividades en condiciones de montaña por la fragilidad de estos ecosistemas.

Los factores climáticos predeterminan la influencia de las lluvias, las variaciones de temperatura y la acción de los vientos, sobre la erosión, activación de los deslizamientos, torrentes de lodos, cambio en las propiedades de las rocas, traslado de polvo y desechos hacia los poblados, así como es importante en la elaboración de modelos racionales de lucha contra fenómenos desfavorables que puedan surgir (López Peña 2006).

Atendiendo a la ubicación geográfica de nuestro país y a su posición altimétrica, la variable climática que mayor incidencia tiene sobre las afectaciones que se producen en los suelos de las montañas, son las lluvias, pues las oscilaciones de temperatura, tanto a nivel de las estaciones del año como en función de la altura, no son significativas en comparación con la influencia de estas.

El clima, además de constituir uno de los principales componentes del paisaje físico – geográfico, influye de forma favorable o no en numerosas actividades socioeconómicas. Esta influencia, en primer lugar, se caracteriza por su carácter complejo, dado por la simultaneidad de la acción de los diferentes elementos climáticos, lo que tiene aplicación particular en la agricultura y en general en las condiciones de vida de la población. Una de las limitaciones más serias para las explotaciones agrícolas corresponde a factores climáticos, tales como períodos de sequía prolongada y precipitaciones de gran intensidad mal distribuidas (Álvarez *et al.* 1978).

Según la clasificación de Köppen modificada por Trewartha (Finch *et al.* 1957 citado por Wilsie, 1970) la zona presenta un clima Tropical húmedo, con lluvias todo el año.

1.2.2 Relieve

En el relieve son notables las montañas de cimas aplanadas, esencialmente en el área de propagación de las ultrabasitas, separadas por llanuras y son el resultado de ascensos geotectónicos moderados e intensos con amplitudes que denotan claramente escalones morfoestructurales que en la zona es de montañas pequeñas (300-500m).

Estos levantamientos posteriores al mioceno inferior involucran a fragmentos de la cobertura neotectónica.

1.2.3 Vegetación

La vegetación en la mayor parte del territorio es bastante densa, en general está representada por bosques subtropicales compuestos por distintos tipos de árboles, matorrales y pinares.

1.3 Características Geológicas Regionales.

Desde el punto de vista geológico el área se encuentra dentro de los límites del denominado Bloque Oriental Cubano, el cual es el más oriental de los tres grandes bloques que constituyen la estructura geológica cubana, con límites muy bien definidos por los siguientes sistemas de fallas regionales (figura 1.2):

- Sistema de fallas Cauto-Nipe al oeste-noroeste.
- Falla transformante de Bartlet al sur.
- Falla de Sobrecorrimiento Sabana al norte.

Estas fallas se cortan formando un triángulo. Además el Bloque Oriental Cubano está muy cerca del límite entre las Placas Norte Americana y Caribe, posición esta que lo hace muy vulnerable a movimientos sísmicos.

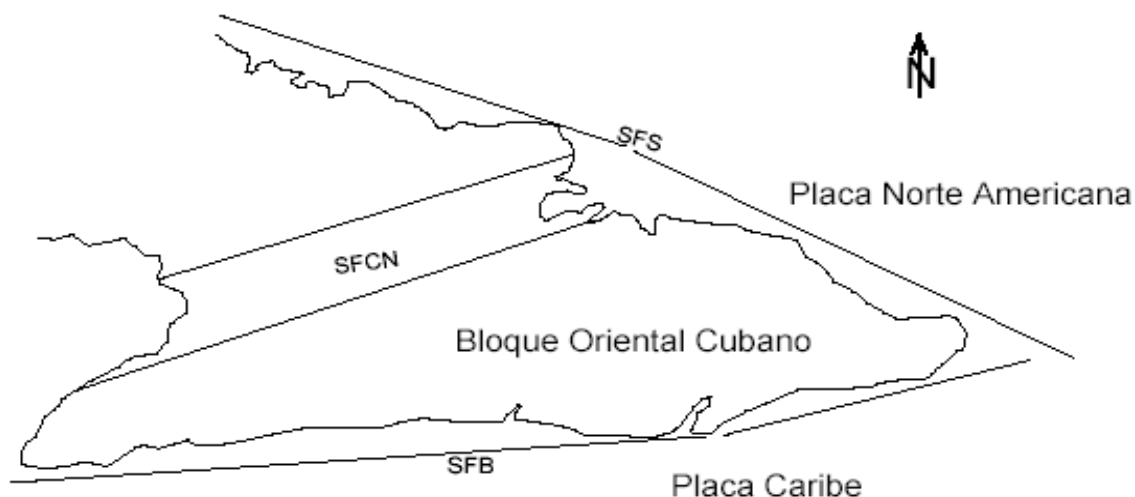


Figura 1.2 Mapa de Ubicación Geológica. Nombre de los Sistemas de Fallas: SFS, Sistema de Falla Sabana; SFB, Sistema de falla Bartlett; SFCN, Sistema de Fallas Cauto-Nipe.

1.3.1 Geología Regional

En 1996, Iturralde Vinent, reconoce en la constitución geológica del archipiélago cubano dos elementos estructurales que la integran: el cinturón plegado y el neoautóctono.

El cinturón plegado, está constituido por terrenos oceánicos y continentales deformados y metamorizados de edad pre-Eoceno Medio, que ocupan en la actualidad una posición muy diferente a la original, representando grandes entidades paleogeográficas que marcaron la evolución del Caribe Noroccidental. El autor divide al cinturón plegado en unidades continentales y unidades oceánicas.

En Cuba Oriental las unidades continentales están representadas por el Terrero Asunción, compuesto por dos unidades litoestratigráficas bien diferenciadas, la Fm. Sierra Verde y la Fm. La Asunción, constituidas por materiales metaterrígenos y metacarbonatados respectivamente, del Jurásico Superior – Cretácico Inferior.

Las unidades oceánicas están constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánicas del Cretácico (Paleoarco), las secuencias de las

cuencas de piggy back del Campaniense Tardío- Daniense, el arco de islas volcánico del Paleógeno y las rocas de las cuencas de piggy back del Eoceno Medio- Oligoceno. El Neoautóctono está constituido por materiales terrígenos carbonatado poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado.

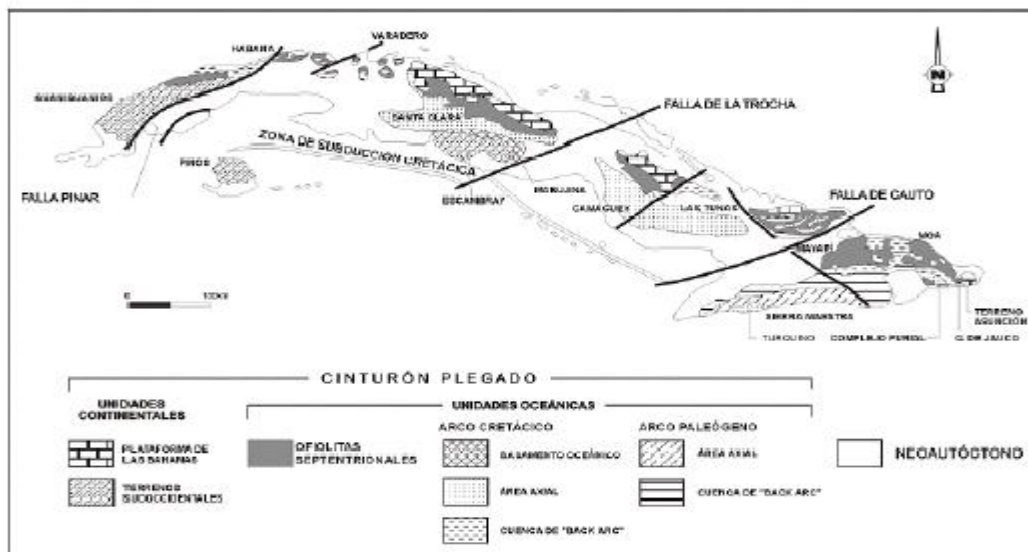


Figura 1.3 Mapa geológico Esquemático de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoautóctono (adaptado de Iturralde-Vinent, 1996a).

Esta última concepción es la más generalizadora de todas las empleadas hasta el momento, incluyendo en ellas las anteriores realizadas. Hay que destacar que dentro de las unidades oceánicas del cinturón plegado se enmarca nuestra investigación.

1.3.2 Tectónica

El Bloque Oriental Cubano (ver figura 1.2), comprendido desde la falla Cauto- Nipe hasta el extremo oriental de la isla, presenta una tectónica caracterizada por su alta complejidad, dado por la ocurrencia de eventos de diferentes índoles que se han superpuesto en el tiempo y que han generado estructuras que se manifiestan con variada intensidad e indicios en la superficie (Rodríguez, A. 1998).

Este bloque se caracteriza por el amplio desarrollo de la tectónica de cabalgamiento que afecta las secuencias más antiguas (Campos, 1983).

Localmente esta complejidad en la región de estudio se pone de manifiesto a través de estructuras fundamentalmente de tipo disyuntivas con dirección noreste y noroeste, que se cortan y desplazan entre sí, formando un enrejado de bloques y microbloques con movimientos verticales diferenciales, que se desplazan también en la componente horizontal y en ocasiones llegan a rotar por la acción de las fuerzas tangenciales que los afectan como resultado de la compresión (Campos, 1983, 1990, Rodríguez, A.1998). También se observan dislocaciones de plegamientos complejos, sobre todo en la cercanía de los contactos tectónicos (Campos, 1983, 1990).

En las secuencias más antiguas (rocas metamórficas y volcánicas), de edad mesozoica, existen tres direcciones fundamentales de plegamientos: noreste-suroeste; noroeste- sureste y norte- sur, esta última, característica para las vulcanitas de la parte central del área. Las deformaciones más complejas se observan en las rocas metamórficas, en la cual en algunas zonas aparecen fases superpuestas de plegamientos (Campos, 1983, 1990).

A fines del Campaniano Superior – Mastrichtiano ocurre la extinción del arco volcánico Cretácico Cubano, iniciándose la compresión de sur a norte que origina, a través de un proceso de acreción, el emplazamiento del complejo ofiolítico según un sistema de escamas de sobrecorrimiento con mantos tectónicos altamente dislocados de espesor y composición variada. Los movimientos de compresión hacia el norte culminaron con la probable colisión y obducción de las paleounidades tectónicas del Bloque Oriental Cubano sobre el borde pasivo de la Plataforma de Bahamas.

En las rocas paleogénicas y eocénicas la dirección de plegamiento es este- oeste, mientras que las secuencias del Neógeno poseen yacencia monoclinal u horizontal (Campos, 1983, 1990).

Los movimientos verticales son los responsables de la formación del sistema de Horts y Grabens que caracterizan los movimientos tectónicos recientes, pero hay que tener en cuenta la influencia que tienen sobre Cuba Oriental los desplazamientos horizontales que ocurren a través de la falla Oriente (Bartlett-Caimán) desde el Eoceno Medio-Superior (Draper y Barros, 1994), que limita la Placa Norteamericana con la Placa del Caribe, generándose un campo de empuje con componentes fundamentales en las direcciones norte y noreste (Rodríguez, A. 1999), que a su vez provocan desplazamientos horizontales de reajuste en todo el Bloque Oriental Cubano.

1.3.3 Geología de Sagua-Moa

En la región Sagua-Moa afloran las secuencias rocosas pertenecientes al cinturón plegado cubano y las rocas del “neoa autóctono” (Iturralde-Vinent, 1996, 1998, Proenza, 1997, Proenza y otros, 1999, 2000) En la Figura 1.4 se presenta el mapa geológico de esta región y sus áreas aledañas.

El cinturón plegado está constituido por terrenos oceánicos y continentales deformados y metamorfizados de edad pre-Eoceno Medio, que ocupan en la actualidad una posición muy diferente a la original, representando las unidades geológicas que lo integran, grandes entidades paleogeográficas que marcaron la evolución del Caribe noroccidental (Iturralde-Vinent, 1996, 1998).

En la región de estudio están bien representadas las unidades oceánicas, constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánicas del Cretácico (Paleoarco), las secuencias de las cuencas de *piggy back* del Campaniense Tardío-Daniense, el arco de islas volcánico del Paleógeno y las rocas de las cuencas de *piggy back* del Eoceno Medio-Oligoceno.

El neoa autóctono está constituido por materiales terrígenos carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado.

A continuación se describen los rasgos más importantes de dichas secuencias.

Ofiolitas septentrionales

Las rocas típicas de la secuencia ofiolítica están ampliamente representadas en toda la región de estudio, formando parte del Macizo Moa-Baracoa, este se ubica en el extremo oriental de la faja Mayarí- Baracoa. El mismo ocupa un área aproximada de 1500 Km² y presenta un desarrollo considerable de los complejos ultramáfico, de gabros y volcano-sedimentario (Proenza, 1997, Proenza y otros, 1999, 2000).

Según Fonseca y otros (1985) el espesor aproximado del complejo ultramáfico es de 1000 metros y el de gabros de 500 metros. (Quintas, 1989) estima un espesor de 1200 metros para el complejo volcano-sedimentario.

El complejo ultramáfico desde el punto de vista petrológico se caracteriza por un predominio de harzburgitas, y en menor grado dunitas, también se han descrito dunitas plagioclásicas, wehrlitas, lherzolitas, y piroxenitas (Ríos y Cobiella, 1984, Fonseca y otros, 1985, 1992, Torres, 1987, Andó y otros, 1989, García y Fonseca, 1994, Proenza y otros, 1999).

Los cúmulos de gabros forman grandes cuerpos con dimensiones entre 1 y 3 Km de ancho, por 10 a 15 Km de longitud. El contacto entre los gabros y el complejo ultramáfico generalmente es tectónico. Los principales tipos petrológicos descritos son: gabros olivínicos, gabronorita, gabros, anortositas y noritas (Ríos y Cobiella, 1984, Fonseca y otros, 1985, Torres, 1987, Proenza, 1997, Proenza y otros, 1999, Rodríguez, R. 2000). En el área de estudio el más común es el gabro bandeado o modalmente transicional, cuyas bandas tienen una foliación concordante con el complejo de tectonitas. Las bandas son de color oscuro algo verdoso con textura masiva o fluidal. Los gabros isotrópicos al parecer no se desarrollan o están muy mal representados. En la región de estudio los gabros afloran siempre asociados a las serpentinitas, apareciendo en forma de bloques en las zonas de Quesigua-Cayo Guam-Mercedita, Centeno-Miraflores y Farallones-Caimanes.

El complejo de diques de diabasas está muy mal representado, razón por la cual puede inferirse una expansión (spræding) lenta de la corteza oceánica. Las diabasas descritas en la región aparecen principalmente en forma de bloques tectónicos incluidos en los niveles de gabros, sobre todo en la parte superior del complejo cumulativo (Torres, 1987).

El complejo volcano-sedimentario contacta tectónicamente con los demás complejos del corte ofiolítico (Proenza, 1997, Proenza y otros, 1999, 2000). Está representado por la Fm. Quiviján (Iturralde-Vinent, 1996, 1998) la cual incluye basaltos amigdaloides y porfíricos (algunas veces con estructura de almohadilla), con intercalaciones de hialoclastitas, tobas, capas de *cherts* y calizas (Quintas, 1989). Datos de trazas (REE, LILE) de esta formación, publicados por Keer y otros (1999) demuestran su carácter de *Island-arc tholeiite* (IAT). Este complejo aflora en la región de Farallones, al sur de Yamanigüey y en un pequeño bloque en Cupey.

Arco de isla volcánico del Cretácico (Paleoarco)

Esta unidad está ampliamente desarrollada en la región, representadas por las rocas de las formaciones Téneme, Santo Domingo, así como del Complejo Cerrajón. La Fm. Téneme (Cretácico Superior-Inferior), está compuesta fundamentalmente por flujos de basaltos, andesitas basálticas, tobas y brechas (Proenza y Carralero, 1994, Iturralde-Vinent, 1996, 1998, Gyarmati y otros, 1997). Se encuentra en las cuencas de los ríos Cabonico y Téneme y en la región de Moa. Aunque se han aportado pocos datos geoquímicos de estas rocas, algunos autores consideran que la Formación Téneme pudiera ser parte de un antiguo arco de isla Tipo PIA (Torres y Fonseca, 1990).

La Fm. Santo Domingo (Albiano-Turoniano) está compuesta por tobas y lavobrechas andesíticas, dacitas, tufitas, argilitas, lutitas volcanomícticas, lavas basálticas, liparitodacíticas, conglomerados y calizas. También aparecen pequeños cuerpos de pórfidos dioríticos, andesitas y diabasas (Iturralde-Vinent, 1976, 1996, 1998, Proenza y Carralero, 1994, Gyarmati y otros, 1997) se incluyen

en esta formación las calizas pizarrosas finamente estratificadas y muy plegadas de color grisáceo, que afloran en la localidad de Centeno. Aflora además hacia la parte centro occidental (al norte y sur de la Sierra Cristal), en la parte alta de la cuenca del río Sagua y en la región de Farallones-Calentura. Los materiales de la Fm. Santo Domingo se encuentran imbricados tectónicamente con las ofiolitas de la Faja Mayarí-Baracoa. Muchas veces los contactos coinciden con zonas que presentan una mezcla de bloques de vulcanitas pertenecientes al arco y de ofiolitas (Iturralde-Vinent, 1996).

El complejo Cerrajón (Aptiano-Turoniano) está compuesto de diques subparalelos de diabasas y gabrodiabasas (Gyarmati y otros, 1997).

La actividad volcánica se extendió desde el Aptiense al Campaniense Medio (Iturralde-Vinent, 1994, 1996) y fue el resultado de una subducción intraoceánica. Restos de este basamento ofiolítico del arco afloran actualmente y están representados por las anfibolitas de la Formación Güira de Jauco, al sur de la región de estudio (Millán, 1996, Iturralde-Vinent, 1996).

En la zona de contacto de estas rocas cretácicas con las ofiolitas, las mismas se encuentran deformadas, generalmente trituradas hasta brechas. En ocasiones los contactos coinciden con zonas muy fisuradas y foliadas, o con masas caóticas que contienen mezcla de bloques de ofiolitas y vulcanitas cretácicas (Iturralde-Vinent, 1996, 1998, Cobiella, 2000).

Arco de isla volcánico del Paleógeno (Neoarco)

Entre el Paleoceno-Thanetiense y el Eoceno Medio Inferior se desarrolló otro régimen geodinámico de arco de islas volcánicas en Cuba. Esta actividad volcánica estuvo restringida fundamentalmente a la parte oriental de la isla, y en nuestra zona se considera como materiales distales del vulcanismo paleogénico. Estas secuencias están compuesta por tobas vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobáceas, calizas, conglomerados tobaceos, lutitas, margas, gravelitas, conglomerados

volcanomícticos y algunos cuerpos de basaltos, andesitas, y andesitas-basálticas, los cuales alcanzan hasta 6000 m de espesor (Formación Sabaneta) (Iturralde-Vinent, 1976, 1995, 1996, 1998, Cobiella, 1988, 1997, 1998, Proenza y Carralero, 1994, Quintas y otros, 1995) la cual yace sobre una secuencia de transición que contiene finas intercalaciones de tufitas (Fm. Gran Tierra) (Iturralde-Vinent, 1976) o descansa discordantemente sobre las formaciones Mícara y La Picota y sobre las ofiolitas y vulcanitas cretácicas (Nagy y otros, 1983). Albear y otros (1988) dividen esta formación en Castillo de los Indios (Eoceno Inferior-Medio) y Miranda (Paleoceno-Eoceno), mientras que Gyarmati (1990) la dividen en Sabaneta y Castillo de los Indios. Todas ellas con características similares. En Farallones el corte está compuesto por tobas vitroclásticas y cristalovitroclásticas zeolitizadas, en menor grado argilitizadas, tufitas, calizas, radiolaritas, tobas vítreas y tobas cineríticas.

Las calizas tobáceas y tufitas aparecen regularmente hacia la parte alta de la formación. La estratificación es buena, siendo frecuentemente gradacional. En los Indios de Cananova, en la base de la formación se intercalan areniscas de granos gruesos y algunas brechas, donde fueron encontrados fósiles que indican una edad Paleoceno-Daneano. Esta formación aflora en los flancos septentrional y meridional de la Sierra Cristal, en la cuenca de Sagua de Tánamo, en un área extensa de la región de Cananova hasta Farallones y en un pequeño bloque en Yamanigüey. Las rocas pertenecientes al arco de isla volcánico del Paleógeno yacen sobre los materiales deformados del arco Cretácico, las ofiolitas y las cuencas de *piggy back* del Campaniano Tardío-Daneano (Proenza y otros, 1998).

Este arco está representado en esta región por las unidades litoestratigráficas o formaciones geológicas (Fm) siguientes:

Fm Sabaneta

Edad Paleoceno Inferior (*Daneano parte alta*) - Eoceno Medio. (e_1^a - e_5), se desarrolla en forma de fajas alargadas en las provincias de Guantánamo y Holguín. Presenta una litología compuesta principalmente por tobas vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobáceas, calizas, conglomerados tobaceos, limolitas, margas, gravelitas, conglomerados vulcanomícticos y ocasionalmente pequeños cuerpos de basaltos, andesitas, andesito- basaltos y andesito - dacitas. Es característico debido a la alteración de las tobas, la presencia de minerales arcillosos (montmorillonita) y zeolitas (mordenita, clinoptilolita, etc.). Las rocas de esta formación se formaron en un ambiente de sedimentación marino, con un régimen dinámico de las aguas muy inestable, con un aporte piroclástico considerable, producto de la cercanía a centros magmáticos explosivos, su espesor oscila entre 250 y 1200 m. Presenta relaciones estratigráficas con la Fm. Gran Tierra, sobre la que yace concordantemente y discordantemente sobre las formaciones La Picota, Mícara y Sierra del Purial.

Está cubierta concordantemente por la Fm. Puerto Boniato y discordantemente por las formaciones Baracoa, Cabacú, Charco Redondo, Mucaral, Río Maya, San Ignacio, Sierra de Capiro, San Luís y los grupos Guantánamo (Fm. Yateras y los miembros Cilindro y Vega Grande de la Fm. Maguey) y Nipe (Fm. Júcaro). Esta unidad se distingue por presentarse en forma de suaves pliegues, que en ocasiones están afectados por fallas, los bloques que tienen un buzamiento muy suave, aunque continuo, forman una estructura alargada de anticlinales con sus ejes en dirección norte-sureste, las fallas son de gran longitud y en general tiene direcciones norte - sureste. El vulcanismo es predominantemente del tipo eruptivo. Según García, (2007), en la Fm. **Sabaneta** se superponen ambos procesos, o sea es tanto de *piggy back* como de *back arc* del arco Paleogénico, tanto por la edad como por la cercanía al arco Paleogénico.

Cuencas de "piggy back" del Campaniense Tardío-Daniense

En el Campaniense medio, culminó la actividad volcánica y comenzaron los procesos de cabalgamiento de las secuencias volcánicas generadas y de las ofiolitas del mar marginal (obducción) sobre el borde meridional de la Plataforma de Las Bahamas. En estas condiciones de inestabilidad tectónica se desarrollaron una serie de cuencas, que se comportaron como cuencas de "piggy back" (también denominadas "cuencas superpuestas de primera generación", Quintas, 1989). De este estadio son representativas las formaciones sedimentarias Mícara, La Picota y Gran Tierra.

Dentro de las mismas se encuentran secuencias típicamente olistrostrómicas como es el caso de la Fm. La Picota (Mastrichtiano) y parte de la Fm. Mícara (Mastrichtiano-Paleoceno), las cuales están compuestas por fragmentos y bloques procedentes de la secuencia ofiolítica y de las rocas volcánicas cretácicas (Cobiella, 1978, 2000, Quintas, 1989, 1996, Gyarmati 1990). Por otro lado, la Fm. Gran Tierra (Paleoceno) se compone de calizas brechosas, conglomerados volcanomícticos, brechas, margas, tobas, calizas órgano-detriticas, areniscas volcanomícticas de cemento calcáreo, lutitas y tufitas (Iturralde-Vinent, 1976, Cobiella, 1978, Quintas, 1989). En algunas localidades los depósitos Mastrichtiano-Daneano de tipo olistrostrómico-flyschoide (formaciones Mícara y La Picota) transicionan a la secuencia del Daneano-Eoceno Superior (formaciones Gran Tierra, Sabaneta, Charco Redondo y San Luis) (Iturralde-Vinent, 1996, 1998, Cobiella, 2000).

El área de afloramiento de la formación Mícara es muy diversa, aflorando en los flancos meridionales de la sierra del Cristal, cuenca de Sagua de Tánamo, Mayarí Arriba, Sector de Los Indios de Cananova y borde suroeste del cerro de Miraflores. La formación La Picota tiene una composición muy variable en cortas distancias, a veces con apariencia brechosa y en ocasiones conglomerática, presentando en proporciones variables la matriz y el cemento, este último carbonatado. Existen dudas acerca de su pertenencia a esta formación o si son brechas tectónicas en

Sagua de Tánamo, la base de la Sierra del Maquey y en la meseta de Caimanes. La formación Gran Tierra es una secuencia terrígeno-carbonatada que aflora en los flancos meridionales de la sierra de Cristal. En las rocas arcillosas y margosas algunas regiones donde afloran brechas muy cataclastizadas formando parte de los melanges. Aflora en los flancos meridionales de la Sierra del Cristal, de esta formación se han registrado los primeros vestigios del vulcanismo paleogénico en forma de tobas.

En consecuencia, estas formaciones constituyen un registro temporal del proceso de emplazamiento tectónico (obducción) de las ofiolitas, el cual estuvo enmarcado en el tiempo de desarrollo de estas cuencas.

Cuencas de "*piggy back*" del Eoceno Medio-Oligoceno

En el Eoceno Medio Inferior concluyó la actividad volcánica paleógena. A partir de este momento y hasta el Oligoceno se desarrolló un segundo estadio de cuencas de *piggy back* (Quintas y Blanco, 1993) en las cuales se depositaron espesores considerables de materiales terrígenos y carbonatados. Las secuencias estratigráficas del Eoceno Medio-Oligoceno están representadas por la formación Mucaral.

La Fm. Mucaral (Eoceno Medio-Oligoceno Inferior) está compuesta por margas con intercalaciones de calizas arcillosas, areniscas polimícticas, conglomerados polimícticos, lutitas y tobas (Cobiella, 1983, Quintas, 1989, Gyarmati).

Neoautóctono (Materiales post-Eoceno)

El "neoautóctono" está constituido por formaciones sedimentarias depositadas en un régimen de plataforma continental que yacen discordantemente sobre las unidades del "sustrato plegado". Las rocas del "neoautóctono" constituyen una secuencia terrígeno-carbonatada poco deformada que aflora o cubre discordantemente los complejos más antiguos y que estructuralmente se caracterizan por su yacencia monoclinal suave u horizontal (Quintas, 1989, Iturralde-Vinent, 1998). El neoautóctono se divide en dos coberturas:

Cobertura del Paleógeno Medio-Neógeno Tardío

Rocas sedimentarias de variadas litologías. Presenta depósitos minerales de calizas, margas, arcillas. Representado en la región por las formaciones:

Fm. Mucaral

Edad Eoceno Medio (*parte alta*) - Eoceno Superior, (e_{5b} – e_7). Se desarrolla en las regiones de Sagua de Tánamo, Mayarí, Sierra de Nipe y Baracoa, provincias de Guantánamo y Holguín. Se reconoce por su litología donde predominan las margas con intercalaciones de calizas arcillosas, areniscas polimícticas, conglomerados polimícticos, limolitas y tobas. La relación estratigráfica está dada por una yacencia concordante sobre las formaciones Charco Redondo, Puerto Boniato y Sierra de Capiro y discordantemente sobre las formaciones La Picota, Mícara, Santo Domingo y Sabaneta. Está cubierto discordantemente por los grupos Guantánamo (*Fm. Yateras y el Mbro. Vega Grande de la Fm. Maguey*) y Nipe (formaciones Bitirí y Camazán).

Las rocas de esta formación se formaron, en un ambiente de sedimentación de aguas marinas profundas, su espesor puede alcanzar hasta 300 m.

Fm. Yateras

Edad Oligoceno Inferior- Mioceno Inferior (*parte baja*) (e_9 – n_1). Las rocas de esta formación afloran en el techo de las elevaciones en la parte norte de la bahía de Guantánamo, formando una faja discontinua entre el río Bállate y la sierra del Convento, provincia de Guantánamo. Se observan parches aislados en el curso superior de los ríos Mayarí y Sagua de Tánamo, y entre Baracoa y Yamanigüey, provincias de Holguín, Santiago de Cuba y Guantánamo. Se reconoce por su litología donde predomina una alternancia de calizas detríticas, biodetríticas y biógenas de grano fino a grueso, estratificación fina a gruesa o masivas, duras, de porosidad variable, a veces aporcelanadas.

La coloración por lo general es blanca, crema o rosácea, menos frecuentemente carmelitosa, sus relaciones estratigráficas están dadas por que yace concordantemente sobre el Mbro. Vega Grande (*Fm. Maquey*) y discordantemente sobre las formaciones Charco Redondo, La Picota, Mícara, Mucaral, Sabaneta, San Ignacio, San Luis y Santo Domingo y el Mbro. Cilindro (*Fm. Maquey*). Está cubierta concordantemente por la Fm. San Antonio y discordantemente por la Fm. Villarroja. Transicional lateralmente con el Mbro. Vega Grande (*Fm. Maquey*), es correlacionable con las formaciones Colón y Jaruco de Cuba Occidental y en parte con las formaciones Paso Real de toda Cuba, Banao y Lagunitas de Cuba Central, Báguanos, Bitirí, Camazán, Maquey y Sevilla Arriba de Cuba Oriental, los sedimentos que dieron origen a estas rocas, es típico de depósitos arrecifales, abarcando distintas variedades del complejo arrecifal, su espesor que oscila entre 160 y 500 m.

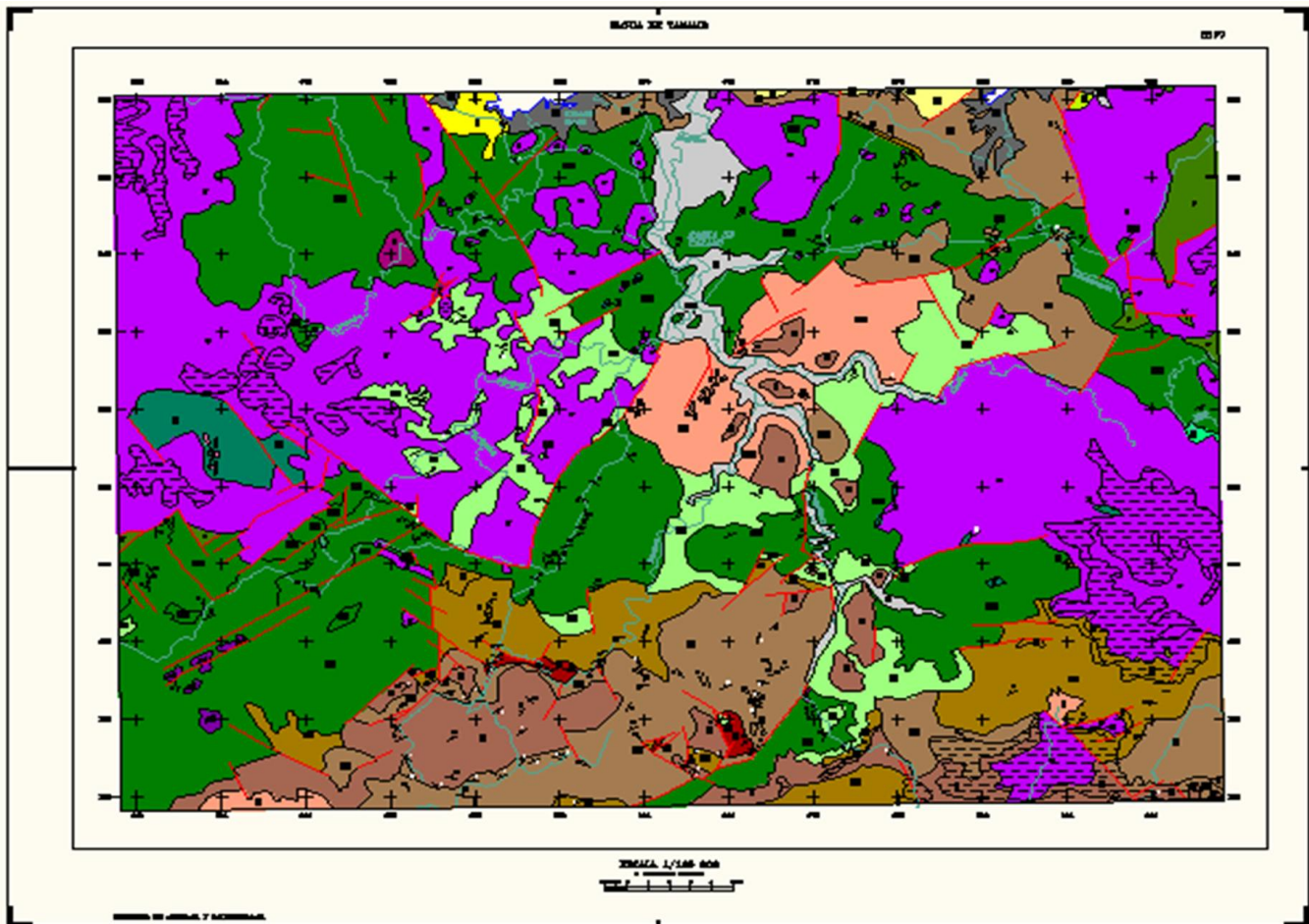


Figura 1.4 Mapa geológico de Sagua de Tánamo. IGP. G. Pantaleon, escala (1:100 000). 2001



1.4 Características de los materiales tobaceos presentes en el yacimiento de Sagua de Tánamo.

En el presente acápite se describen las características generales de las de tobas objeto de estudio, a partir de los reportes de investigaciones geológicas realizadas. (Bandera et al. 1997).

1.4.1 Yacimiento Sagua de Tánamo

Este yacimiento se localiza en la parte sur de la carretera Sagua - Moa a 10 km al este de la ciudad de Sagua de Tánamo, en el noreste de Holguín, las coordenadas del centro son X: 676400, Y 216200, en la hoja topográfica escala 1: 50 000, 5177I.

Estratigrafía:

Las principales formaciones que aparecen en la zona de estudio son:

Formación Mícará. Areniscas polimíctica y aleurolitas (k2 m - P1 (1)).

Formación Gran Tierra. Calizas brechosas, conglomerados, vulcanomícticos (P1 (1)).

Formación Sabaneta. Tobas vitroclásticas, areniscas tobáceas (P1 (1) - P2 (2)).

Asociación Ofiolítica del Cretácico: serpentinitas y gabro.

Tectónica:

El tectonismo se distingue por suaves pliegues en ocasiones, afectados por fallas. En la formación Sabaneta los pliegues tienen buzamiento muy suave, aunque continuos, formando estructuras alargadas de anticlinales con sus ejes en dirección Noreste-Sureste.

Características petrográficas:

Tobas vitroclásticas y vitrocrystaloclasticas de color gris, textura masiva, estructura vitroclástica psamítica, roca constituida por vitroclastos, cristaloclastos, litoclastos. Morfológicamente el yacimiento adquiere una estructura de pliegues anticlinales, las cuales forman elevaciones que en sus partes superiores se acumulan las tobas

con contenido de vidrio volcánico considerable. Además se observan estructuras monoclinales con buzamientos de las capas hacia el Norte-Noreste con ángulos aproximadamente de 15 grados y hacia el Sur con ángulos de 8 grados.

Complejidad geológica:

Tomando en consideración la posición bien definida desde el punto de vista estratigráfico del yacimiento y de los rasgos estructurales, además de la poca variabilidad en cuanto a los parámetros de la materia prima podemos concluir que el yacimiento es poco complejo.

Tipo genético:

La formación genética del yacimiento es el resultado de la acumulación de cenizas volcánicas depositadas al parecer en cuencas marinas de mares someros y tranquilos (se detectaron restos de microorganismos).

Capítulo: II. Materiales, Metodología y volumen de los trabajos realizados.

Para valorar el carácter puzolánico de las tobas vítreas como puzolanas activadas se realizaron los ensayos correspondientes a las propiedades físico mecánicas que aparecen descritos en la norma cubana NC TS 527, que establece las especificaciones técnicas para la evaluación de las puzolanas.

Los estudios de caracterización del yacimiento muestreado y los métodos utilizados para la evaluación de las materias primas se describen en los siguientes acápite.

2.1 Caracterización de las muestras.

2.1.1 Caracterización química.

La composición química de las tobas empleadas, determinada a partir del método Fluorescencia de rayos X (FRX) se presenta en la tabla 2.1.

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

Como se puede observar la suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 supera el 70 % que se establece como mínimo en la norma ASTM C - 618 para las puzolanas naturales.

Tabla 2.1. Composición química de la muestra de tobas empleadas. Fuente: Almenares, 2011.

Compuesto	Contenido
	Tobas Sagua de Tánamo
SiO_2	68,86
Al_2O_3	13,63
MnO	0,06
MgO	2,64
Na_2O	1,87
CaO	5,34
TiO_2	0,49

P_2O_5	0,10
K_2O	2,27
Fe_2O_3	4,58
SO_3	0,11

Sobre la base de la composición química de las tobas analizadas se pueden clasificar geológicamente como rocas vulcano-sedimentarias, de composición dacítica, como se puede observar en la figura 2.2, realizada a partir del diagrama TAS construido con la ayuda del software SigmaPlot. Según las investigaciones de Ramachandran, (1995), se conoce que las tobas de composición dacítica tienen buena puzolanidad.

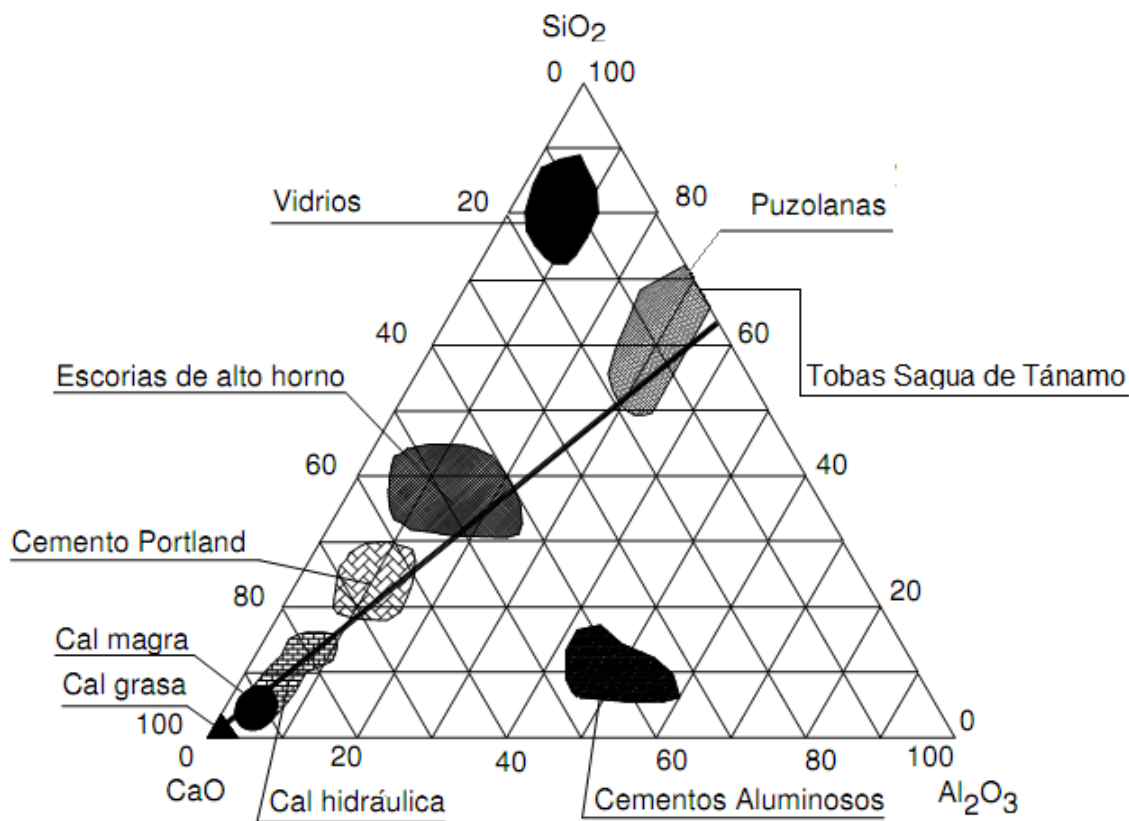


Figura 2.1. Diagrama de puzolanas. Fuente: Deloye, 1993 (Modificado por el autor).

2.1.2 Caracterización mineralógica.

En la tabla 2.2 se muestran los porcentajes de la matriz vítrea, así como el contenido de arcilla y las principales fases mineralógicas cristalinas presentes en estas tobas.

Tabla 2.2. Características mineralógicas de los materiales tobáceos estudiados. Fuente: Frazao, 2007. Tapia, 2003.

Material puzolánico	Matriz vítrea, %	Contenido de arcilla, %	Principales fases cristalinas
Tobas vítreas Sagua de Tánamo	54 - 80	16 - 39	Albita, anortita, apatito, diópsido, hematina, hyperstena, Ilmenita, ortoclasa, cuarzo, esfena, X-magnesio

Como se puede apreciar en la tabla 2.2 las tobas del yacimiento están constituidas esencialmente por vidrio volcánico con un alto contenido de arcillas para estas rocas (montmorillonita), subordinadamente aunque en bajos porcentajes, calcita, cuarzo y feldespato.

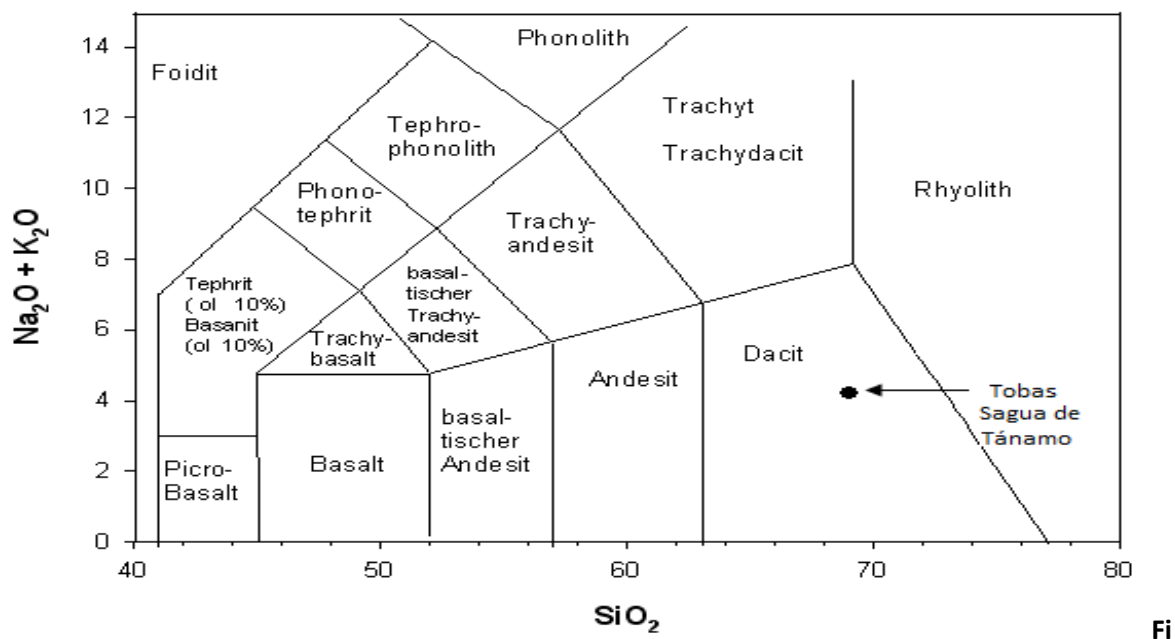


Figura 2.2. Origen de los materiales tobáceos analizados. Fuente: Almenares, 2011 (Modificado).



Figura 2.3. Esquema de la metodología empleada.

2.2 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 de la región así como información de los materiales analizados en este trabajo. En esta etapa se confeccionó el marco teórico conceptual de la investigación.

2.3 Toma y preparación de la muestra.

Las muestras de tobas vítreas de Sagua de Tánamo se tomaron mediante el método por puntos, que consistió en la toma de trozos típicos de la materia prima, con la ayuda de un martillo geológico. Para determinar la cantidad de material utilizado se tuvo en cuenta la norma cubana correspondiente (NC 178 2002).

Las muestras fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño mediante dos etapas de trituración, cada una por separado. Donde 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 2.4 y 2.5, las cuales tienen un diámetro de alimentación de 100 y 25 mm y de descarga de 25 y 4,76 mm, respectivamente.

En la descarga de la segunda etapa del proceso de trituración se usó la operación de cribado de control con un tamiz de 3,15 mm. El material retenido en el tamiz es recirculado en la segunda etapa de trituración, y el cernido, con tamaño inferior a 3,15mm, fue sometido a un proceso de molienda en un molino de bolas, figura 2.6 de 19,5 cm de diámetro interior y 24 cm de longitud para la obtención de las clases

-0,09 mm, esta última fracción se sometió al proceso de calcinación en un horno eléctrico J. P. Selecta de fabricación española (ver figura 2.7) a las temperaturas de 450, 600 y 750 °C durante 60 minutos. Con los materiales calcinados se llevó a cabo la elaboración de los morteros a los cuales se les realizó ensayos para la determinación de la resistencia mecánica. También se tomó una parte del material sin calcinar para confeccionar morteros con material tobáceo natural para realizar una comparación de las resistencias mecánicas de ambos materiales.

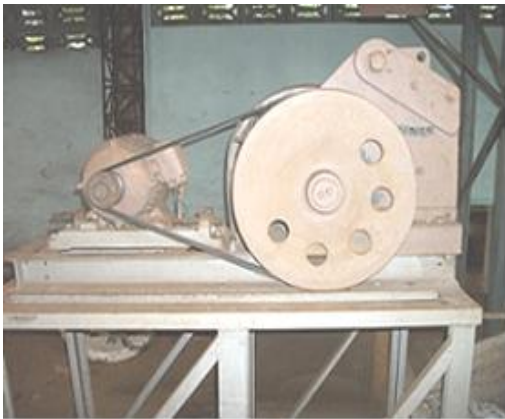


Figura 2.4. Trituradora de mandíbulas TQ (320x165)



Figura 2.5. Trituradora de mandíbulas TQ (150x75)



Figura 2.6. Molino de bolas



Figura 2.7 Horno

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

Se elaboraron 18 probetas (morteros) con material tobáceo calcinado del yacimiento analizado, 3 para cada porcentaje de sustitución de cemento por tobas en correspondencia con los tres intervalos de calcinación a los que fue sometido el material. Se confeccionaron además 6 probetas con toba natural (sin calcinar) y 6 sin adición de tobas (patrones de referencia) para un total de 30.

Para la realización de las probetas se empleó arena de una pila depositada en el patio de la cocina comedor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, procedente de “El Molino Cayo Guam”. El muestreo de la arena se realizó por puntos, para garantizar un muestreo sin desviaciones, la muestra se compuso de tres partes, una tomada en la parte superior, otra en la parte media y la tercera en la parte inferior de la pila principal. Para facilitar el muestreo se empleó una tabla empujada horizontalmente dentro de la pila, justamente bajo el punto de muestreo para evitar la posterior segregación. Se separó la capa exterior de la pila y se tomó la muestra de material existente bajo ella con la ayuda de una pala. La masa total

de la muestra de arena fue de 50 kg. Todo el material fue trasladado al laboratorio de beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para ser homogeneizada y normalizada. Una vez allí el primer paso fue someter la arena a un proceso de secado en una estufa (ver figura 2.8) durante 12 horas a una temperatura de 120 °C para eliminar su humedad, posteriormente y con el objetivo de obtener una arena con características granulométricas de arena natural para morteros según ASTM C 897 – 00, se procedió, con ayuda de los tamices de diámetro 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 y 0,075 mm, a cribar el material para garantizar la cantidad de arena adecuada por cada clase de tamaño en los límites permisibles, como se muestra en la tabla 2.3, con lo cual se obtiene una arena normalizada.

Tabla 2.3. Especificaciones de la arena natural para morteros según norma ASTM C 897 - 00

Diámetro del tamiz, mm	Límite inferior según retenido, %	Límite superior según retenido, %
2,36	0	10
1,18	10	40
0,6	30	65
0,3	70	90
0,15	95	100
0,075	97	100



Figura 2.8. Estufa DHG 9146A con rango de temperatura de 0 – 400 °C.

En 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 2.4. Luego se realizó la adición del cemento en las cantidades previamente calculadas, según las sustituciones (30 % de toba vítrea calcinada y sin calcinar) y con el 100 % para la elaboración de los morteros de referencia y 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. 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, toda la operación de confección de los moldes se realizó a través de la NC-173:2002. Estos se colocaron en el equipo que se muestra en la figura 2.9, 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, tipo inmersión (ver anexo 3) hasta las edades correspondientes a los ensayos de resistencia aplicados a los 7 y 28 días.

Como se observa en la tabla 2.4, se utilizó una relación arena/cemento 3:1. La relación agua/cemento-toba quedó determinada, por la necesidad de alcanzar la fluidez requerida según los ensayos de consistencia normal para el material.

Tabla 2.4. Dosificación para la conformación de los morteros

Material	Porcentaje de sustitución, %	Dosificación				Relación Agua/Cemento -Tobas
		Cemento (g)	Arena (g)	Tobas (g)	Agua (g)	
Patrón		450	1350	-	450	1
Tobas vítreas Sagua de Tánamo	30	315	1350	135	450	1



Figura 2.9. Compactadora Eléctrica

2.5 Determinación de la composición granulométrica.

El análisis granulométrico realizado se empleó para la determinación de la composición granulométrica del material tobaceo utilizado en la elaboración de los morteros.

El análisis granulométrico del material tobaceo se realizó en un analizador de tamaño de partículas; HORIBA LA – 910, de la Empresa “Comandante Pedro Sotro Alba”, Moa Nickel S.A, cuyo procedimiento se expone a continuación:

- Preparación de la muestra de pulpa que se desea analizar: se pesaron 35 g de tobas, se transfirió a un beaker de 1000 mL y se agitó durante 5 minutos con el objetivo de homogeneizar la muestra.
- Con una pipeta se tomaron 2 mL y se vertió en el posillo del equipo, donde permaneció durante 5 min.
- Todos los datos quedaron registrados en el sistema instalado en la computadora acoplada al analizador de tamaño de partículas, del cual se obtuvieron las curvas características de tamaño de los materiales tobaceos.

Este análisis permite obtener la distribución sumaria por clases en las muestras analizadas, el tamaño de partículas predominantes en la muestra, entre otros.

2.6 Determinación de la resistencia a la flexión y compresión.

La determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión de todas las probetas realizados se llevó a cabo a través de pruebas de morteros con una prensa hidráulica de 10 t (toneladas) (ver figura 2.10) la cual arroja los valores en la unidad de medida kilonewton (kN), el equipo cuenta con los aditamentos (Figura 2.11a y 2.11b) necesarios para dichos ensayos, uno para realizar la flexión y otro para la compresión cada aditamento se coloca por separado en el equipo para realizar los ensayos.



Figura 2.10. Prensa hidráulica



Figura 2.11 a. Aditamento para la flexión



Figura 2.11 b. Aditamento para la compresión

2.7 Ensayo de resistencia a la flexión.

El ensayo de la resistencia a la flexión, 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 $(5 \pm 1 \text{ kgf} / \text{s} \text{ } 9 \pm 10 \text{ N} / \text{s})$.

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/cm^2 , cuando P está en kgf o en kN/cm^2 cuando P está en kN

2.8 Ensayo de 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 $40 \pm 0,1$ 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 2.9, cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión. Los platos se guiaron sin fricción apreciable durante el ensayo para poder mantener siempre la misma proyección horizontal. Uno de los platos se mantuvo ligeramente inclinado con el objetivo de obtener un perfecto contacto con la probeta. Estas condiciones se obtuvieron con un aditamento especial para el ensayo de compresión colocado entre los platos de la prensa, ya que estos son mayores que el tamaño establecido por lo que es recomendable usar el mismo aditamento que permita transmitir la carga de la máquina sobre las superficies de las probetas sometidas al esfuerzo de compresión. En el aditamento la placa inferior fue introducida en la platina inferior. La placa superior con rótula recibe la carga transmitida por el plato superior de la prensa a través del conjunto de deslizamiento el cual debe ser capaz de oscilar verticalmente, sin apreciable fricción en el aditamento que guía.

Después de triturada la probeta el conjunto retorna automáticamente a la posición inicial. La velocidad de carga estará comprendida entre 10 y 20 $\text{kgf}\cdot\text{s/cm}^2$ ($0,10$ a $0,20 \text{ kN}\cdot\text{s/cm}^2$) pero se reducirá en caso necesario para que el ensayo no dure más de 10 segundos.

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/cm² cuando P esté en kgf o en kN/cm², cuando P esté en kN.

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

Para cada material ensayado a las diferentes edades, se consideró que la resistencia del mortero, tanto a la flexión como a la compresión, viene expresada por el valor medio de los resultados obtenidos.

2.9 Determinación del índice de actividad puzolánica con cemento Pórtland.

Para la determinación de este índice se tomaron los resultados de las pruebas de compresión simple a las diferentes edades y se obtuvo a través de la ecuación (3):

$$IAR = \frac{A}{B} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde:

IAR: Índice de actividad resistente

A: Promedio de la resistencia a la compresión de las probetas del mortero de ensayo (puzolana y cemento), MPa.

B: Promedio de la resistencia a la compresión de las probetas del mortero patrón (cemento), MPa.

El método se recoge en la ASTM C 311 y la norma cubana NC TS 527.

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, y que para confirmar parámetros de calidad de los mismos, se necesita conocer la resistencia a la flexión, se realizaron pruebas de resistencias mecánicas que tributan a su determinación.

Conclusiones parciales

- Las muestras de tobas vítreas seleccionadas para ser caracterizadas se consideran representativas.
- Las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicadas en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos según las normas establecidas.
- Las tobas vítreas analizadas tiene características adecuadas para ser utilizados como material puzolánico.

Capítulo III. Resultados Obtenidos.

En el presente capítulo se presentan los resultados experimentales que confirman la hipótesis científica sobre las potencialidades de las tobas vítreas del Yacimiento Sagua de Tánamo, para su posible utilización como adición mineral activa al cemento Pórtland, así como una comparación de los resultados obtenidos al emplear material tobaceo calcinado y sin calcinar.

3.1 Resultados experimentales y su análisis.

3.1.1 Caracterización granulométrica

El procedimiento utilizado para la determinación de la composición granulométrica de las tobas vítreas empleadas en la elaboración de los morteros se realizó según las metodologías descritas en el capítulo anterior.

Se puede apreciar en la figura 3.1 que las tobas vítreas de Sagua de Tánamo una vez molidas durante 20 minutos, poseen una distribución granulométrica fina, el 80 % del material cernido se encuentra en el tamiz de diámetro 59 μm , con un diámetro medio de partículas de 40 μm , se observa que el tamaño de partículas en el 50 % del material cernido está en el tamiz 12 μm .

En comparación con el valor máximo de 34 % retenido en el tamiz 45 μm , establecido por la norma ASTM C 618, para su utilización como puzolana natural se puede plantear, que el material analizado presenta características granulométricas adecuadas, que le confieren perspectivas para ser empleados como aditivos puzolánicos al cemento, dado que el cernido en este tamiz sobre pasa el 75 %.

Además de estas características se pudieron conocer los resultados de la superficie específica que brinda el análisis granulométrico en el analizador de partículas HORIBA LA – 910, cuyo resultado arrojó 11087 cm^2/cm^3 . Esta propiedad superficial analizada permite argumentar con mayor precisión los resultados de la caracterización granulométrica del material investigado y su potencialidad como material puzolánico. Al conocer que se trata de un material

fino y con elevada superficie específica, permite un mayor contacto entre las partículas, lo que favorece el proceso de aglomeración que se desarrolla en la mezcla con el cemento, comportamiento que está en correspondencia con las investigaciones desarrolladas por Erdogan (1996), para la utilización como puzolana natural de materiales similares.

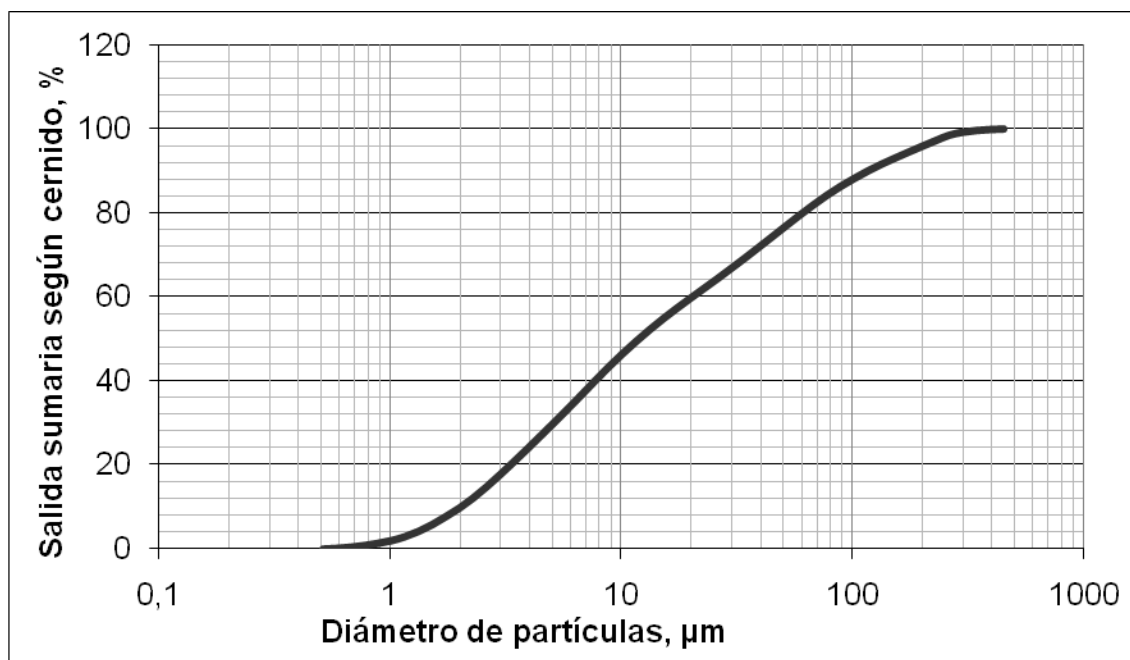


Figura 3.1 Característica de tamaño de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo para 20 minutos de molienda.

3.2 Análisis e interpretación de los resultados obtenidos de las resistencias mecánicas.

3.2.1 Resistencias mecánicas.

En la Tabla 3.1, se ofrecen los resultados de los ensayos mecánicos a la flexión y compresión por muestras preparadas con tobas calcinadas, naturales y muestras patrones de cemento, a las edades de 7 y 28 días.

Tabla 3.1. Resistencia a la flexión y compresión de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo. En MPa.

Resistencia a la flexotracción (30 %)		Tiempo de fraguado	
		7 días	28 días
Patrón de referencia		0.14	0.28
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo 450 °C		0.14	0.31
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo 600 °C		0.19	0.34
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo 750 °C		0.20	0.37
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo Naturales		0.14	0.19
Resistencia a la compresión (30 %)		Tiempo de fraguado	
		7 días	28 días
Patrón de referencia		3.60	8.16
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo 450 °C		1.94	5.48
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo 600 °C		2.40	7.03
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo 750 °C		2.56	8.54
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo Naturales		2.08	3.88

Los resultados de las pruebas de las resistencias mecánicas son de gran importancia para las posibles aplicaciones y control de la calidad de los 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 verificar cómo se comportan las resistencias en el tiempo, y para determinar el índice de puzolanidad de los materiales con adición de tobas.

3.2 Resistencia a la flexión.

La resistencia a la flexión es una medida a la resistencia de la tracción del concreto (hormigón), es una medida de resistencia a la falla por momentos de una viga o una losa de concreto no reforzada. La resistencia a la flexión es muy poco utilizada en el concreto estructural. Las agencias y empresas que no utilizan la flexión para el control de campo, generalmente hallaron conveniente y confiable el uso de resistencia a la compresión para juzgar la calidad del concreto entregado. Sin embargo, la resistencia a la flexión o Modulo de Rotura se utiliza para el

control de aceptación de pavimentos. Por lo tanto, es de gran importancia su conocimiento, lo que estaría a la disposición de un uso específico que lo requiera.

Como se puede observar en el gráfico representado en la figura 3.2 existe un aumento de la resistencia a la flexión en el tiempo transcurrido entre los 7 y 28 días de los morteros ensayados, período en el cual los valores medios calculados para ambas edades han pasado de los 0,14; 0,19; y 0,20; MPa a los 0,19; 0,28; 0,31; 0,34; y 0,37; MPa, para morteros elaborados con 30 % de tobas activadas y naturales, lo que indica que el aumento de las resistencias mecánicas a la flexión es directamente proporcional al incremento del tiempo.

Los morteros de referencia, muestran un aumento de resistencia, pero el incremento es menor en comparación con los morteros con adición de tobas, con excepción de las tobas naturales, cuyo incremento está ligeramente por debajo de los patrones.

Los mejores resultados lo exhiben los morteros confeccionados con tobas calcinadas a 750 °C, lo que puede estar relacionado con las transformaciones físico – químicas que le ocurren al material al ser calcinado a esta temperatura, dichas transformaciones pueden responder a la composición mineralógica de la materia prima, específicamente el contenido de arcilla (Montmorillonita).

Se verifica en todos los casos las ventajas, desde el punto de vista de las propiedades tecnológicas, que poseen las tobas activadas térmicamente con respecto a las naturales e incluso con respecto a los morteros de referencia.

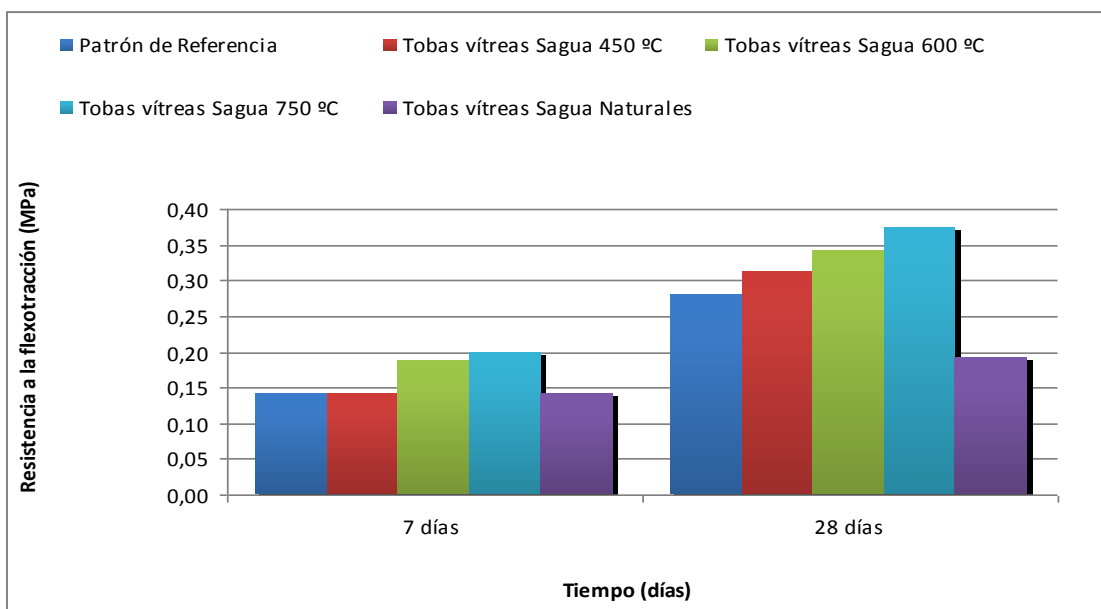


Figura. 3.2. Resistencia a la flexión de los materiales tobáceos y patrones de referencia.

3.3 Resistencia a la compresión.

En la figura 3.3 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión de los morteros con adición de tobas calcinadas, con tobas naturales y patrones de referencia. De forma similar a los resultados obtenidos en la resistencia a la flexotracción, se puede observar que la resistencia a la compresión de los morteros con adición de tobas calcinadas, muestran un incremento de 7 a 28 días. También se puede distinguir que las tobas calcinadas poseen mayor resistencia que las tobas naturales.

Los morteros de referencia muestran un incremento de la resistencia, superando los valores alcanzados por las tobas calcinadas a 450, 600 °C y las naturales, no siendo así para las tobas calcinadas a 750 °C.

La ganancia de la resistencia en el tiempo para las tobas calcinadas se ve favorecida por el incremento de la temperatura de activación, los mejores resultados nuevamente fueron obtenidos por las tobas calcinadas a 750 °C, incluso superando los patrones de referencia a la edad de 28 días, seguidos de las tobas calcinadas a 600 y 450 °C, en ese orden. Este fenómeno puede estar

relacionado con la temperatura específica reportada donde se produce el desorden estructural y por ende la activación, para cada caso en particular depende de las características morfológicas y estructurales de cada muestra y de la presencia y tipo de los minerales acompañantes (Alujas, 2010). Pues, estos materiales poseen gran contenido de arcilla (Montmorillonita) que varía entre 16 y 39 % (Almenares, 2011), las cuales según reportes de He, et al 1994,1996, se activan a temperaturas entre 730 y 830 °C, también estas tobas poseen alto contenido de cuarzo y feldespatos que pueden sin dudas aumentar la temperatura de activación de las mismas. Además no se tiene reporte de la presencia de minerales de zeolitas en estas tobas, lo que podría contribuir al desarrollo de resistencias mecánicas superiores a temperaturas mucho menores, puesto que estos se activan a temperaturas más bajas (Habert, et al 2008).

Por otro lado, se corroboran los resultados obtenidos por Almenares (2011) para las tobas naturales, las cuales exhiben un comportamiento similar al obtenido para estas tobas con el mismo porcentaje de sustitución en lugar del cemento. Los resultados obtenidos aquí demuestran las potencialidades de las tobas calcinadas para ser empleadas como material puzolánico activo, corroborándose la hipótesis de que las tobas activadas desarrollan resistencias más favorables que las naturales.

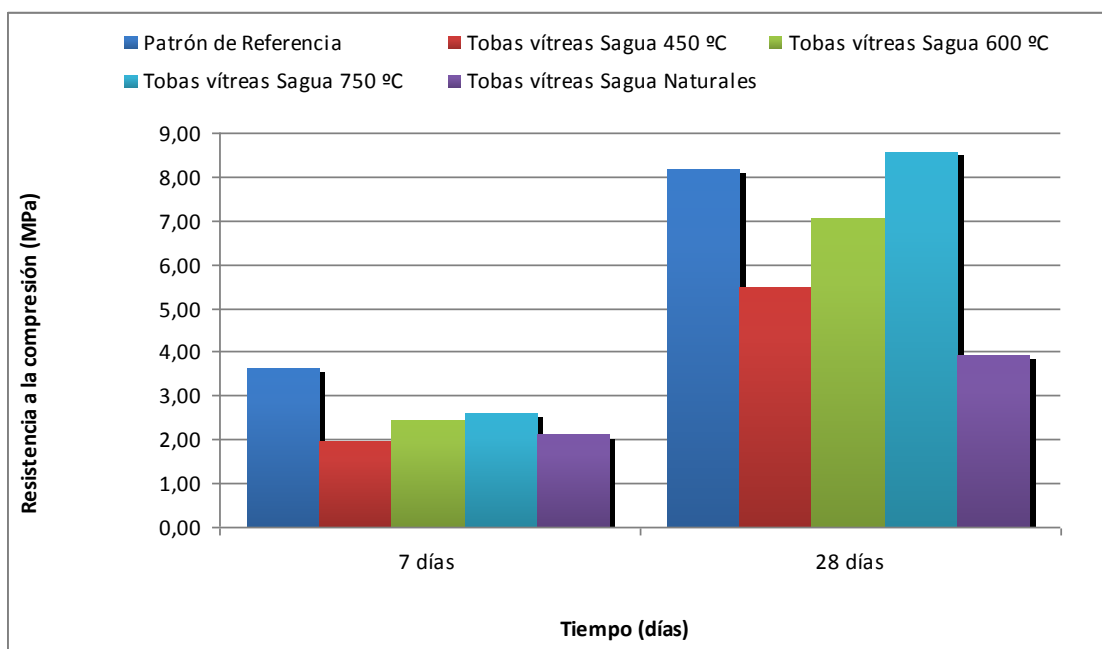


Figura. 3.3. Resistencia a la compresión de los materiales tobáceos y patrones de referencia.

3.4 Resultados del índice de actividad puzolánica.

En la tabla 3.2 se representan los valores de los diferentes índices de actividad resistente por muestras de morteros, con relación al valor de resistencia mecánica a la compresión del mortero patrón para las dos edades de ensayo.

Se debe destacar que la reacción puzolánica prevalece en el tiempo, esto puede estar relacionado con la reacción que ocurre con los productos de la hidratación de cemento, particularmente el hidróxido de calcio, con las fases activas de la puzolana, por lo que se puede considerar un proceso de larga duración, que puede continuar a partir de esta edad. Según Campolat et al. (2003), en el aspecto práctico, este proceso es beneficioso, ya que con la neutralización del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se obtendrán morteros y hormigones cada vez más resistentes, lo cual representa un aporte de estabilidad para las estructuras que se proyecten con el empleo de estas adiciones.

Como se puede apreciar, los valores del índice de actividad resistente calculados para cada muestra, con porcentajes de adición de 30 %, supera en solo el 75 %

que es el mínimo exigido por la norma ASTM C 618 -08, los morteros con adicción de tobas calcinadas a 600 y 750 °C, para la edad de 28 días, siendo más intenso para para las tobas calcinadas a 750 °C.

Tabla 3.2. Índice de puzolanidad de los materiales tobáceos.

Morteros	Índice de Puzolanidad	
	7 días	28 días
Sustitución de 30 %		
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo 450 °C	54	67
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo 600 °C	67	86
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo 750 °C	71	105
Tobas vítreas de Sagua de Tánamo Naturales	58	48

De acuerdo a los resultados mostrados, se deduce que el aumento de los valores del índice de actividad resistente es directamente proporcional a la magnitud tiempo. Característica esencial de los materiales puzolánicos.

La respuesta a que a las mayores temperaturas se obtenga un mayor índice de actividad puzolánica, está directamente relacionada con el mecanismo de activación de las tobas, debido a su composición mineralógica. Pues como se planteó en el acápite anterior estos materiales poseen alto contenido de montmorillonita, cuarzo y feldespatos muy estables a esas temperaturas (Almenares, 2011).

A pesar de que las normas no especifican la estructura y la morfología que deben tener estos materiales, Gener (2002); Valdez et al (2004), han demostrado su influencia sobre la actividad puzolánica. De tal forma, otro aspecto que puede influir en la actividad puzolánica de las tobas calcinadas son sus propiedades morfológicas (granulométrica, superficie específica) la cual puede llegar a

afectarse por el proceso de activación térmica. La disminución del diámetro de las partículas, favorece el proceso de aglomeración que se desarrolla en la mezcla con el cemento según se ha planteado por Rabilero (1988); Gonzales de la Cotera (1996); Erdogdu (1996); Gener (2002).

De acuerdo a los resultados planteados anteriormente se confirma, que los materiales tobáceos activados de Sagua de Tánamo, poseen actividad puzolánica, a las temperaturas de activación por encima de 600 °C. El mejor comportamiento lo exhiben las tobas calcinadas a 750 °C y en comparación con los materiales tobáceos sin calcinar los valores del índice de puzolanidad de las tobas calcinadas así como de los ensayos de resistencia mecánica son mayores.

Valoración socioeconómica y ambiental

Se ha podido constatar de manera particular que dentro de la provincia Holguín existen municipios con posibilidades de explotar recursos minerales para la construcción, uno de ellos es el municipio de Sagua de Tánamo. Lo cual puede ser de gran beneficio para el desarrollo local del mismo.

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 tobas calcinada 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.

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
Homogeneización 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.

Lo anterior permite comprender el ahorro considerable de energía al practicar la producción de puzolanas a nivel local ya que mientras más cerca este la fuente de la materia prima de la industria, menores serán los gastos en cuanto al transporte y con ello el consumo de combustibles.

De acuerdo a la literatura especializada (Taylor), plantea que para producir una tonelada de clinker se necesita consumir aproximadamente 150 kilogramos de combustibles. Por tanto, producir un millón de toneladas de clinker, consumiría cerca de 150 mil toneladas de combustible. La adición de diferentes cantidades de puzolanas, ahorra combustible, ya que a pesar de que en este caso el material se calcina el consumo de energía empleada es mucho menor que para la fabricación del Clinker.

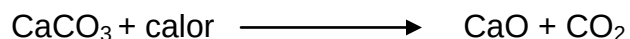
Tabla 3.4 Relación entre gastos energéticos vs% de adición de puzolana. Tomando como referencias la fabricación de un millón de toneladas de clinker de cemento.

% de adición de puzolana	Toneladas métricas de puzolana	Toneladas de combustible ahorradas
10	100 000	15 000
20	200 000	30 000
30	300 000	45 000
40	400 000	60 000

Cuba cuenta con una capacidad de producción de cemento Pórtland o gris de 3,376 millones de toneladas, tomando como referencia la producción de un millón de toneladas, con una media de un 30% de adición de puzolanas, se ahorrarían unas 45 mil toneladas de combustibles, equivalentes a unos 22 millones de USD, tomando como referencia que una tonelada de combustible cuesta unos 490,00 USD.

Estos valores se ajustarían de localizarse y explotarse yacimientos de puzolanas de mayor calidad, que equivaldrían a mayores por cientos de adicción y la introducción masiva del uso de los cementos puzolánicos en la actividad constructiva.

En cuanto a los beneficios ambientales que trae consigo el empleo de las puzolanas como adición mineral al cemento Portland. Tenemos que durante la fabricación del clinker 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 clinker 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 formula.



Otro de los gases nocivos que se emiten a la atmósfera durante la fabricación del clinker es el SO_2 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 clinker 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 prestaciones de los cementos producidos.

Conclusiones parciales

- La distribución granulométrica de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo es adecuada de acuerdo a los requisitos normalizados para su utilización como puzolana natural activada.
- La resistencia a la flexión y a la compresión de los morteros elaborados con material tobáceo calcinado, muestra un incremento de 7 a 28 días con respecto a los morteros patrones y los morteros elaborados con toba sin calcinar.
- Los valores más altos en los ensayos de flexión y compresión lo muestran los morteros elaborados con el material tobáceo calcinado a 750 °C, posteriormente se encuentran los elaborados a 600 y 450 °C en ese orden. Los valores más bajos lo muestran las tobas sin calcinar.
- El índice de actividad resistente de los morteros de tobas calcinadas y sin calcinar, a las edades de 7 y 28 días de fraguado es superior a 75 %, solo por los materiales calcinados a 600 y 750 °C a la edad de 28 días.
- Los mejores resultados obtenidos, fueron alcanzados por los morteros elaborados con material calcinado a 750 °C.
- Las perspectivas de utilización de los materiales tobáceos estudiados en esta investigación muestran resultados alentadores para los programas de construcción de viviendas y otras obras sociales, lo cual permite influir

positivamente en el desarrollo local con la disminución del consumo de cemento.

Conclusiones

Los materiales tobáceos de Sagua de Tánamo, según requisitos de calidad establecidos por la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM C 618), poseen perspectivas para su utilización como aditivo puzolánico activo, lo que se fundamenta en los siguientes argumentos:

- Desde el punto de vista teórico al considerar la composición química, granulométrica y mineralógica, se predice que los materiales reúnen las condiciones para ser considerados potencialmente materiales puzolánicos activos.
- Se confirma, que al realizar la calcinación de las tobas vítreas estas han aumentado su actividad puzolánica, incluso a temperaturas de 450 °C. Esto está avalado desde el punto de vista teórico por la transformación del material arcilloso montmorillonítico (Alujas, 2010).
- Experimentalmente se confirma que las mejores perspectivas para la utilización de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo como aditivo puzolánico activo, la tienen los materiales calcinados a 750 °C.
- Al sustituir el 30 % de cemento con material tobáceo, se obtienen morteros cuyas resistencias son suficientes para su utilización en aplicaciones de albañilería.

Recomendaciones

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

- Estudiar con técnicas adecuadas el mecanismo de la reacción puzolánica que ocurre al emplear tobas vítreas y su comparación con otros materiales naturales y artificiales.
- Completar el estudio en sistemas cal – puzolana y en hormigones, que permitan establecer las dosificaciones correspondientes a cada aplicación específica.
- Desarrollar el proyecto de exploración geológica de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo para ser empleadas como material puzolánico.
- Continuar estas investigaciones como una alternativa más factible que el empleo del metacaolín, que hasta este momento es la aprobada inicialmente para ser aplicada en nuestro país.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Almenares. R. R. S. 2011.** Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como aditivos puzolánicos. Carlos A. Leyva Rodríguez (Tutor). Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 77 p.
2. **Ambroise. J. S. Maximilien and J. Pera.** Properties of Metakaolin blended cements. Advanced Cement Based Materials, 1994.
3. **Andó J., Miklos K., Ríos Y.** Caracterización general de la asociación ofiolítica de la zona Holguín - Moa y el papel de las ofiolitas en el desarrollo estructural de Cuba. Revista Minería y Geología, Vol. 7, No.1, 1989.
4. **Alujas A.** Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente, 2010.
5. **Avila D.** Caracterización mineralógica y tecnológica de materiales arcillosos del territorio de Moa para su empleo en la industria local, 2010.
6. **Arikan. M. et al.,** Properties of blended cements with thermally activated kaolin. Construction and Building Materials, 2009.
7. **Aitcin Pierre-Claude** "Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow", Cement & Concrete Research Issue No. 9, Vol. 30, 2000, pp: 1349-1359.
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 Concrete.
9. **ASTM C – 618. 2008.** Standard Specification for coal fly ash raw or calcinate natural Pozzolan for use as mineral admixture in concrete.
10. **ASTM C – 618, 2008:** Specification for coal fly ash and raw or calcined Natural Pozzolan for use as mineral admixture in Concrete.

11. **Bandera. D. Naranjo. V. Rodríguez. J. & J. Rojas. 1997.** Informe Prospección Preliminar y Detallada vidrio volcánico "Sagua de Tánamo". Prov. Holguín. Cálculo de Reservas realizado en Nov. 1997. Inédito. Inv. 4743, ONRM.
12. **Brown. G. ed.** The X-ray Identification and Clay Structures of Clay Minerals 2nd edition ed., ed. C.M.G. Mineralogical Society. 1961.
13. **Baronio. G. and L. Binda.** Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. Construction and Building Materials, 1997.
14. **Batista R.** Valoración del potencial de los recursos minerales para la industria del cemento en Cuba, 2007.
15. **Blanco J., Proenza J.** Terrenos geológicos de Cuba Oriental. Revista Minería y Geología, 1994.
16. **Cabrera R.** Evaluación de las tobas vítreas y zeolitizadas de la región de Holguín para su utilización como puzolana natural en la construcción, 2010.
17. **Campos M.** Rasgos principales de la tectónica de la porción oriental de las provincias de Holguín y Guantánamo. Revista Minería y Geología No.2, 1983.
18. **Campos M.** Tectónica y minerales útiles de la asociación ofiolítica y de los complejos vulcanógenos del arco insular cretácico en Cuba Oriental. Inédito. Departamento de Geología, I.S.M.M, 1991.
19. **Castillo O. Pou C.** Tecnología general del cemento.
20. **Calleja, J. 1966.** Apología de los conglomerantes puzolánicos. Revista Cemento – Hormigón. (386): 3.
21. **Calleja, J. 1969.** Las puzolanas. Monografía del I.E.T.C.C. 281. 95 p.
22. **Cobiella J.L.** Sobre el origen del extremo oriental de la fosa de Bartlett. Editorial Oriente, 1984.

23. **Cobiella J. L.** Un melange en Cuba oriental. Revista La Minería en Cuba, No.4, Año 4. 1978.
24. **Cobiella J.L.** y otros. Geología de la región central y suroriental de la provincia Guantánamo. Editorial Oriente, 1984.
25. **Cobiella J.L., Quintas F.** Análisis estratigráfico y tectónico de las provincias orientales y Camagüey. Departamento de Geología, I.S.M.M., 1983.
26. **Cobiella J. L., Quintas F. y otros.** Geología de la región central y suroriental de la provincia de Guantánamo. Editorial Oriente, 1984.
27. **Cobiella J. Y Rodríguez J.** Algunos rasgos de la geología de Cuba oriental. Ciencias Técnicas, Serie Geodesia y Geofísica No.3, 1978.
28. **Costafreda. J.L. Rosell. M. Calvo. B.** Estudio del comportamiento puzolánico de algunas zeolitas de Iberoamérica empleando el método de la conductividad eléctrica.
29. **Cyr. M. P. Lawrence, and E. Ringot.** Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. Cement and Concrete Research, 2006.
30. **Chakchouk. A. B. Samet, and T. Mnif.** Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. Applied Clay Science, 2006.
31. **Chakchouk. A. et al.** Formulation of blended cement: Effect of process variables on clay pozzolanic activity. Construction and Building Materials, 2009.

32. **Cabrera, J. and M.F. Rojas**, Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system. Cement and Concrete Research, 2001.
33. **Draper, G., Barros, J.A., 1994**. Cuba. In: Donovan, S.K., Jackson, T.A. (eds.). Caribbean Geology: An Introduction. Kingston, University of West Indies Publishers Association, 65-86.
34. **Drits, V.A.** Structural and chemical heterogeneity of layer silicates and clay minerals. Clay Minerals, 2003.
35. **Erdogan, T.Y. 1997**. Admixture for Concrete. Middle East Technical University. Press. Ankara.
36. **Erdogan, T.Y. 2003**. Beton. Middle East Technical University Press, Ankara.
37. **Erdogan, T.Y. 2002**. Materials of construction. Middle East Technical University. Press. Ankara.
38. **Erdogdu, K. 1996**. Effects of pozzolanic cements of different fineness values and some mechanical properties of pozzolanic cements of different fineness values. Thesis. Middle East Technical University, Ankara.
39. **García A., Almenares N.** Estudio morfotectónico de las zonas Nuevo Mundo y Las Camariocas. Trabajo de diploma, Departamento de Geología, I.S.M.M., 1994.
40. **García G.** Regularidades de la distribución de las cortezas de intemperismo ferroniquelíferas de Cuba oriental. Tesis doctoral, I.S.M.M., 1978.
41. **García E. Suarez M.** Las arcillas: Propiedades y Usos.
42. **Gonzales S.** Evaluación de mezclas de cieno carbonatado y cemento P-350 para su posible uso como materia de construcción, 2012.

43. **Gyarmati, P.; I. MÈndez ; M. Lay.** Caracterización de las rocas del arco de islas Cretácico en la Zona Estructuro-Facial Nipe-Cristal-Baracoa. En: G. F. Furrazola, K. E. Nuñez-Cambra (eds.). Estudios sobre Geología de Cuba, Ciudad de la Habana, Instituto de Geología y Paleontología, **(1997)**, p. 357-364.
44. **Gyarmati P. y otros.** Informe sobre los trabajos de levantamiento geológico en escala 1:50 000 y búsquedas acompañantes en el polígono V, CAME-Guantánamo. Inédito. E.G.S., 1990.
45. **Heller-Kallai. L.** Hanbook of clay science. 2006.
46. **He. C. E. Makovicky, and B. Osbaeck.** Thermal treatment and pozzolanic activity of Na- and Ca-montmorillonite. Applied Clay Science, 1996.
47. **He. C. E. Makovicky, and B. Osbaeck,** Thermal stability and pozzolanic activity of calcined illite. Applied Clay Science, 1995.
48. **He, C., B. Osbaeck, and E. Makovicky,** Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. Cement and Concrete Research, 1995.
49. **Habert. G. et al.** Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. Applied Clay Science, 2009.
50. **He. C. E. Makovicky, and B. Osbaeck,** Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. Applied Clay Science, 1994.
51. **Hernández Zaldívar.** Estudio sobre la vulnerabilidad y el riesgo sísmico del sector Atlántico, Miraflores y Vivienda Checa. 2012.
52. **Howland, J. J.; Blanco-Varela, M. T.; Gener, M. y Martín, A. R. 2006.** Investigación sobre la durabilidad de los hormigones elaborados con cemento Pórtland y adición de puzolanas naturales, en ambiente marino. Cemento Hormigón, ISSN 0008-8919 (891): 2-10.

53. **Iturralde- Vinent, M. 1994.** Cuban geology: A new plate tectonica síntesis. Journal of petroleum geology, 17, 39-70.
54. **Iturralde- Vinent. M. 1996a.** Introduction of the Cuban geology and tectonics. In M. Iturralde-Vinent (ed). Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba, IGCP Proyect 364, Miami, USA, 3-35.
55. **Iturralde- Vinent. M. 1995.** Cuencas sedimentarias del paleoceno – eoceno de cuba. Bol. Soc. Venezolana de geología., 20(1-2), 75-80.
56. **Iturralde- Vinent. M. 1998.** El segmento de arco volcánico del paleoceno-eoceno medio del caribe. In Ay P: V. young on (eds), transactions of the 3rd geological conference of the of the geological society of Tand the 14th Caribbean geological conference, T y T, 1995, vol.1, 343-362.
57. **Jiménez, M. P.; García, M. A. y Morán, C. F. 1982.** Hormigón armado. Tomo I. Barcelona, España. Editorial Gustavo Gili S.A. ISBN 84 - 252 – 0758 – 4: 13–18.
58. **Justo Álvarez.** Evaluación preliminar de materiales cementantes suplementarios como aditivos al cemento P-350 para su utilización en la construcción. 2012.
59. **Justice. J.M. et al.** Comparison of Two Metakaolins and a Silica Fume Used as Supplementary Cementitious Materials. In Seventh International Symposium on Utilization of High-Strength/High Performance Concrete. 2005.
60. **José R.** Evaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo para su utilización como árido y puzolana natural en la construcción, 2009.
61. **Kakali. G. et al.** Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. Applied Clay Science, 2001.

- 62.**LEA. F. M.1938.** The chemistry of pozzolans, Proc. Symp on the Chemistry of Cement. Estocolmo. 460 – 504 p.
- 63.**López Peña.** Caracterización geológica de las materias primas minerales de los Municipios Moa – Sagua de Tánamo para su empleo como materiales de construcción.
- 64.**Martirena. J.F.** Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clinker de cemento Portland: la aglomerante cal -puzolana como adición mineral activa, in Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones. 2003, Universidad Central de Las Villas: Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- 65.**Mariñan T.** Mezclas de arcillas y residuos sólidos carbonatados para su utilización en la industria de materiales de construcción, 2012.
- 66.**Mateos M.** Resistencias de mezclas de puzolana natural, cal y arena, 1977.
- 67.**Mayet R.** Depósitos de arcillas abigarradas en Cuba Occidental, 2005.
- 68.**Martin-Calle.** Pouzolanicite d'argiles thermiquement actives: Influence de la mineralogie et des conditions de calcination in Laboratoire matériaux Minéraux. 1989.
- 69.**Mostafa. N.Y. et al.** Activity of silica fume and dealuminated kaolin at different temperatures. Cement and Concrete Research, 2001.
- 70.**Morsy. M.S. S.A.A. El-Enein and G.B. Hanna,** Microstructure and hydration characteristics of artificial pozzolana-cement pastes containing burnt kaolinite clay. Cement and Concrete Research, 1997.
- 71.**Muller, C.J,** Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics. 2005.
- 72.**M. T. Blanco-Varela, S. Martinez-Ramirez, T. Vázquez, M. Gener, P.M. Carmona-Quiroga.** Actividad puzolánica de una roca volcánica zeolítica.

- 73.**Nagy N.** Ensayo de las zonas estructuro faciales de Cuba oriental, contribución geológica de Cuba oriental. Editorial Ciencia y Técnica, ACC, 1983.
- 74.**Nagy E. y otros.** Informe de los trabajos de levantamiento geológico para el mapa en escala 1: 250 000 del territorio de la antigua provincia de Oriente. ACC, 1976.
- 75.**NC 173 - 2002:** Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión.
- 76.**NC 175, 2002.** Mortero de albañilería. Especificaciones.
- 77.**NC 178 – 2002.** Áridos. Análisis granulométrico.
- 78.**NC 251 – 2005.** Áridos para hormigones hidráulicos —requisitos.
- 79.**NC 54 – 207,1980:** Cemento. Ensayo físico – mecánicos.
- 80.**NC TS 527 - 2007:** Cemento hidráulico. Método de ensayo. Evaluación de las puzolanas.
- 81.**Fonseca E., Zelepuguin M. y Heredia M.** Particularidades de la estructura de la asociación ofiolítica en Cuba. Ciencias de la tierra y el espacio, No.9, 1984.
- 82.**Fonseca Z., Salazar R.** Estudio morfotectónico del extremo oriental de Cuba a escala 1:100 000. Trabajo de diploma, Departamento de Geología, I.S.M.M., 1989.
- 83.**Price Lyan. Worrel Ernst, Phylipsen Dian.** Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in Energy-Intensive Industries in Key developing Countries. Proceedings of the 1990. Earth Technologies Forum, Washington, DC, September 27-29, 1999.
- 84.**Proenza. J. Gervilla. F. Melgarejo. J.C., 1999b.** La moho transition zone en el macizo ofiolítico moa-baracoa (cuba): un ejemplo de transición magma/peridotita. Rev.Soc. Geol. España, 12(3-4), 309-327.

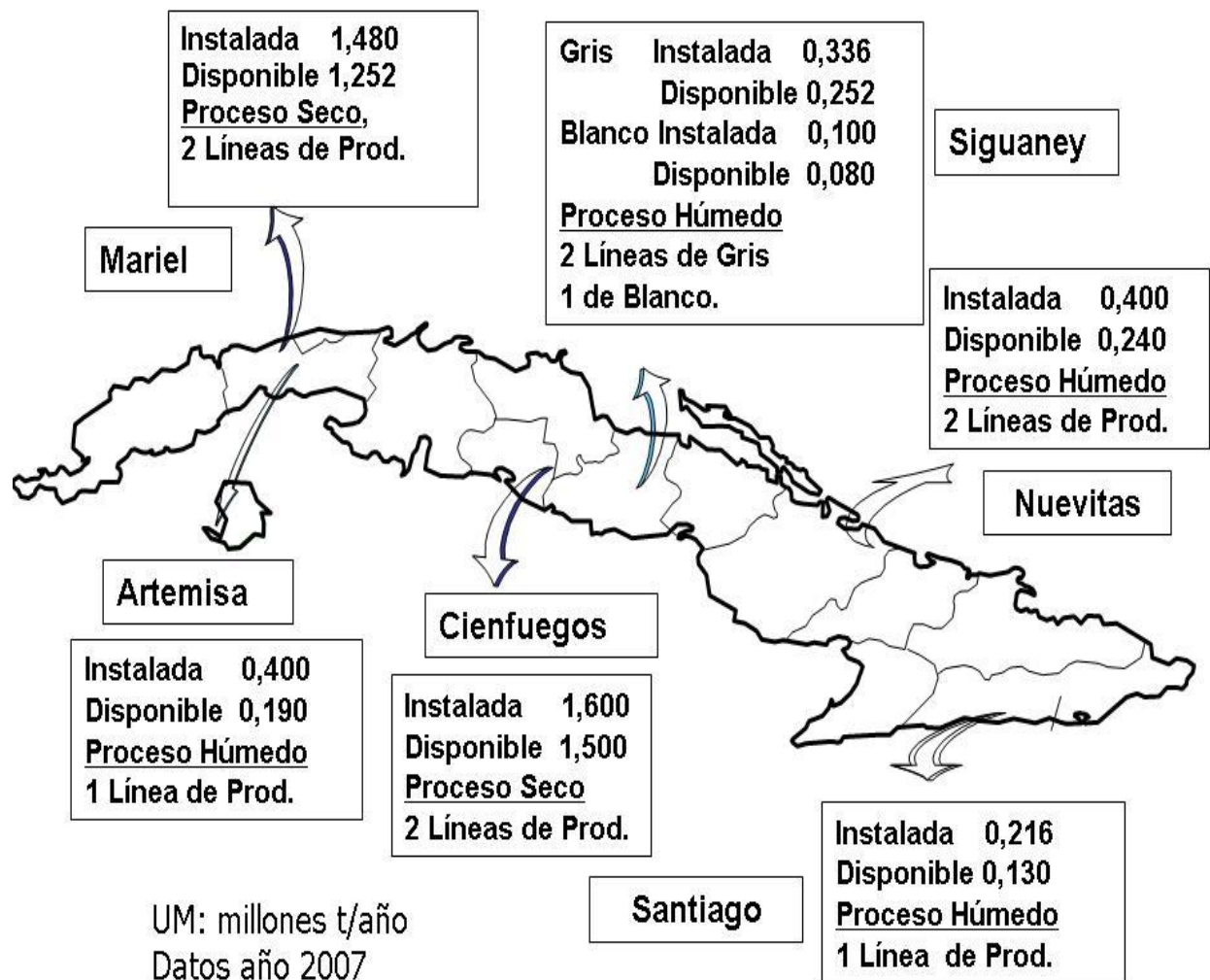
- 85.**Proenza. J. Gervilla. F. Melgarejo. J.C. Bodinier. J.L. 1999a.** Al-and Cr-rich chromites from Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt (Eastern Cuba): consequence of interaction between volatile rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. *Economic geology*, 94,547-566.
- 86.**Proenza. J. J.C. Melgarejo. F. Gervilla.** La faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba oriental): una litosfera oceánica modificada en una zona de suprasubducción cretácica. En: Tercera Conferencia Internacional sobre Geología de Cuba, el Golfo de México y el Caribe Noroccidental, (2000).
- 87.**Proenza. J.A. 1997.** Mineralización de cromita en la Faja Ofiolítica Mayarí - Baracoa (Cuba): Ejemplo del yacimiento Mercedita. CICT, ISMM. Moa. (Tesis Doctoral). 227p.
- 88.**Proenza. J. Carralero, N. 1994.** Un Nuevo enfoque sobre la geología de la parte sur de la cuenca Sagua de Tánamo, *Minería-geología*, 11(2), 3-10.
- 89.**Quintas. F. Proenza. J. Castillo. J.L. 1995.** Análisis tectono-sedimentario de la paleocuenca sabaneta. *Minería y geología*, 12, 3 -8.
- 90.**Quintas F.** Análisis estratigráfico y paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la provincia Guantánamo y áreas cercanas. Tesis doctoral, Departamento de Geología, I.S.M.M., 1989.
- 91.**Quintana, C. E. 2005.** Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Emilio R. Redolfi (Tutor). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba. 308 p.
- 92.**Ramachandran. V.S. et al, eds.** Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials. First ed. Construction Materials Science and Technology Series, ed. V.S. Ramachandran. 2002.
- 93.**Rabilero. A. C. 1988:** Las Puzolanas. Cinética de Reacciones. Editorial Oriente. Santiago de Cuba. Santiago de Cuba. 114 p.

94. **Rodríguez A.** Estudio fotogeológico de Moa y áreas adyacentes. Revista Minería y Geología, No.2, 1989.
95. **Rodríguez M. Alfonso J.** Influencia en las características mecánicas de adiciones calizas de distinto tamaño de grano, en cementos portland con diferentes contenidos de C₃A.
96. **Rodriguez-Camacho. R.E. and R. Uribe-Afif.** Importance of using the natural pozzolans on concrete durability. Cement and Concrete Research, 2002.
97. **Rojas. M.F. and J. Cabrera.** The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems. Cement and Concrete Research, 2002.
98. **Richardson. I. G.** The nature of C-S-H in hardened cements. Cement and Concrete Research, 1999.
99. **Samet. B. T. Mnif, and M. Chaabouni,** Use of kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement. Cement and Concrete Composites, 2007.
100. **Singh. M. and M. Garg.** Reactive pozzolana from Indian clays--their use in cement mortars. Cement and Concrete Research, 2006.
101. **Shvarzman. A. et al.** The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite.
102. **Shi. C. and R.L. Day.** Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans. Cement and Concrete Research, 2001.
103. **Souza. P.S.L. and D.C.C. Dal Molin.** Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity. Cement and Concrete Research, 2005.

104. **Taylor. H.F.W. ed.** Cement Chemistry. 1990, Academic Press: London, U.K. 491.
105. **Tendai Njila.** Estudio Químico – Mineralógico de los lateríticos ferrosialíticos en los sectores Téneme, Farallones y Cayo Guam, Tesis doctoral. 2011.
106. **Tobón J. I.** Puzolanas en los alrededores de Irra, 2000.
107. **Todor. D.N.** Thermal Analysis of Minerals. 1976).
108. **Torres N.** Estudio morfotectónico del área Moa-Cabañas. Trabajo de diploma, Departamento de Geología, I.S.M.M., 1996.
100. **Torres, M & Fonseca, E. 1990.** Características geólogo -petrológicas del contacto entre la asociación ofiolítica y el arco volcánico en Moa-Baracoa. *Boletín de Geociencias* 4 (1): 18-32.
109. **Torres, M. 1987.** Características de la asociación ofiolítica de la región norte de Moa-Baracoa y su relación con el Arco Volcánico Cretácico. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa. (Trabajo de diploma). 113p.
110. **Vanderley M. John.** On the sustainability of the Concrete. Extended version of the paper commissioned by UNEP Journal Industry and Environment. 2002.
111. **Von Weinzsaecker E. Lovins A. Lovins H.** Factor Four: Doubling wealth, halving resources. Reporte al Club de Roma. Earth scan Publication Ltd. London. 1998.
112. **Zhang. Y.M. W. Sun, and H.D. Yan.** Hydration of high-volume fly ash cement pastes. Cement and Concrete Composites, 2000.

Anexos

Anexo 1. Ubicación de las fábricas de cemento de Cuba.

Ubicación de las Fábricas de Cemento de Cuba

Anexo 2. Descripción de pozos por sectores del Yacimiento analizado.**SECTOR I****POZO 1.**

Coordenadas: X: 677 655,74 Y: 216 520,88 Z: 105,96

Profundidad: 24,40 Nivel de Agua: 0,0

0,0-0,20m	Cubierta areno arcillosa
0,20- 9,80	Tobas vitroclásticas, verde clara, granulometría media, algo ligera, abrasiva al tacto. V. Volc: 71-77 %; Montm: 18-23 % y Ca CO3: 4-6 %.
9,80-14,10	Tobas vtc verde claro, grano grueso, algo ligera. V. Volc: 71-76,1 %; Montm: 16- 20 % y Ca CO3: 4-7 %.
14,10-19,45	Toba tufítica, verde claro, en ocasiones muy alterada, deleznable y untuosa al tacto.
19,45-24,40	Tufita de color gris oscuro, masiva. Basicidad es 0

POZO 9.

Coordenadas: X: 677 558,57 Y: 216 515,43 Z: 92,14

Profundidad: 23, 50

0,0-13,00	Toba cristalovtc, color verde grisáceo, granulometría fina a media con grietas rellenas de Ox Mn, abrasiva, poco densa. V. Volc: 67,50- 77,50 %; Montm: 13,50- 23 % y Ca CO3: 5- 10 %.
13- 15,30	Tufita color verde grisáceo con grietas de Ox Mn. V. Volc: 47,50 %; Montm: 38 % y Ca CO3: 24, 50 %.
15,30-19,80	Toba litocristalclástica, color gris azulado, contiene fragmentos de rocas de color blanco y oscuro 1cm aprx.
19,80-21,00	Toba cristalovtc color gris azulado, granulometría media.
21-22,90	Idem a 15,30-19,80
22,90-2,50	Caliza tobacea color gris azulado.

POZO 10.

Coordenadas: X: 677 582,48 Y: 216 622.80 Z: 88,54

Profundidad: 14,00 m

0,0-0,90	Tobas vtc color verde gris, grano fino, ligera. V. Volc: 77, 50 %; Montm: 18,50% y Ca CO3: 4 %.
0,90 a 3,50	Toba vitrocriataloclast., verde gris, grano fino a medio; con grietas rellenas de Ox Mn y en partes fragmentadas. V. Volc: 77, 50 %; Montm: 18,50% y Ca CO3: 4 %.
3,50 a 5,0	Toba vitrocrystaloclástica, color verde gris, agrietada y fragmentada, con aisladas inclusiones de clastos de caliza. V. Volc: 30 %; Montm: 50,50% y Ca CO3: 15,50 %.
5,0 a 7,0	Toba vitrocrystaloclástica, color verde pardo, grano medio, algo porosa. V. Volc: 30 %; Montm: 60 % y Ca CO3: 10 %.
7,0 a 9,0	Toba tufítica color gris intenso, grano fino, algo fragmentada. V. Volc: 39 %; Montm: 40, 0% y Ca CO3: 21, 0 %.
9,0 a 14,0	Toba cristaloclastica, color gris oscuro, grano medio a grueso, predominio de esta última al final del intervalo.

POZO 11.

Coordenadas: X: 677 561,72 Y: 216 621.20 Z: 87,97

Profundidad: 18,50 m

0,0 a 6,0	Toba vtc de color de color verde gris, grano fino a medio, fragmentadas por la perforación. V. Volc: 77,50 %; Montm: 17 a 19,50% y Ca CO3: 3 a 5 %.
6,0 a 8,0	Toba vitro cristaloclástica, color gris verde, grano fino a medio, fragmentadas. V. Volc: 72,50 %; Montm: 20,50% y Ca CO3: 7 %.
8,0 a 13,80	Toba cristalolitoclastica, color gris claro, grano medio. V. Volc: 45,0 a 42,70 %; Montm: 47,0 a 48,30% y Ca CO3: 8 a 9 %.
13,80 a 15,30	Toba litocristaloclastica, color gris oscuro, grano medio a grueso, grietas finas con Ca CO3.
15,30 a 18,50	Tránsito a calizas margosas.

SECTOR II**POZO 6.**

Coordenadas: X: 676 676,93 Y: 215 967.85 Z: 223,76

Profundidad: 33,00 m

0,0 a 0,10	Cobertura.
0,10 a 5,0	Toba vitroclástica color blanco gris grano fino a medio.
5,0 a 8,0	Intercalaciones de calizas
8,0 a 20,0	Tobas vitroclasticas. V. Volc: 57 a 77 %; Montm: 21 a 38,0% y Ca CO3: 2 a 9 %.
20,0 a 24,0	Tufitas, grano medio y poco densa. V. Volc: 42,0 a 39 %; Montm: 51,0 a 52,0% y Ca CO3: 6 a 8 %.
24,0 a 26,0	Toba vitrocrystaloclastica, color verde gris, algo ligera, grano medio a grueso.
26,0 a 33,0	Toba cristaloclastica.

POZO 7.

Coordenadas: X: 676 703,47 Y: 215 870.82 Z: 211,47

Profundidad: 18,50 m

0,0 a 10,0	Tobas vitroclasticas, color verde claro a gris más oscuro, con grietas rellenas de Ox Mn, la densidad aumenta con la profundidad.
10,0 a 14,60	Intercalación de tufita, grietas con Ox Mn. V. Volc: 27,50 %; Montm: 57,60 -58 % y Ca CO3: 14,50 %.
14, 60 a 16,0	Tobas color azul gris.
16,0 a 18,50	Tobas litoclasticas, color verde pardo, bastante alterada, aspecto poroso por lixiviación, al final del intervalo contiene brechas.

POZO 8.

Coordenadas: X: 676 674,35 Y: 216 062, 51 Z: 203, 51

Profundidad: 15 m

0,0 a 4,0	Tobas vitroclasticas, grano fino, poco densa. V. Volc: 80 a 77 %; Montm: 16 a 13 % y Ca CO3: 3, 90 a 9, 50 %.
4,0 a 6,0	Toba cristalovtc, grietas rellenas de Ox Mn. V. Volc: 65 %; Montm: 31 % y Ca CO3: 4, 0 %.
6,0 a 10,9	Tobas litocristaloclasticas, color verde gris.

10,9 a 15,0	Calizas tobaceas.
-------------	-------------------

SECTOR III.**POZO 2.**

Coordenadas: X: 676 202, 38 Y: 215 556,20 Z: 227, 57

Profundidad: 25, 35 m

0,0 a 4,0	Tobas vitroclasticas. V. Volc: 66 a 69 %; Montm: 25 a 30 % y Ca CO3: 3 a 4 %.
4,0 a 6,0	Tobas vtc intercaladas con calizas tobaceas.
6,0 a 10, 80	Tobas vtc intercaladas con calizas grises fragmentadas de 10,20 a 10,80
10,0 a 14,0	Tobas vtcrystalclasticas, color verde gris. V. Volc: 55 a 56 %; Montm: 38 a 39 % y Ca CO3: 4, 30 a 4, 50, %.
14,10 a 16,60	Tobas vtclasticas. V. Volc: 54, 20 %; Montm: 38 % y Ca CO3: 7, 80 %.
6,60 a 25,0	Tobas litocrystaloclasticas, granulometria media a gruesa. Intercalaciones de calizas grises fragmentadas de 23, 35 a 24,25.

POZO 3.

Coordenadas: X: 676 414, 99 Y: 215 749, 27 Z: 215,04

Profundidad: 28, 30 m

0,0 a 4,50	Tobas vitroclasticas, grano medio, grietas rellenas de Ox Mn. V. Volc: 66 a 68 %; Montm: 26 a 29 % y Ca CO3: 2 a 6 %.
4,50 a 5,50	Intercalaciones de calizas tobaceas, gris pardo, fragmentadas
5,50 a 17,30	Tobas vitroclasticas, grano fino medio. Poco densa. V. Volc: 60 a 66 %; Montm: 24 a 32 % y Ca CO3: 2 a 10 %.
17,30 a 18,0	Calizas.
18,0 a 24,50	Toba crystalolitoclastica masiva, densa.
24,50 a 28,30	Toba crystalolitoclastica masiva, densa. Contiene clastos de rocas intrusitas.

SECTOR IV.**POZO 4.**

Coordenadas: X: 678 580, 11 Y: 216 172,54 Z: 82, 75

Profundidad: 10, 0 m

0,0 a 6,50	Tobas litovitroclastica, color verde gris, ls clases son de colores claros. V. Volc: 71 a 77 %; Montm: 19 a 24 % y Ca CO3: 2 a 4 %.
6,50 a 10,0	Toba litoclastica verde parda, más densa que la anterior. Con fragmentos de rocas de diferente composición

POZO 5.

Coordenadas: X: 678 524,04 Y: 216 090,20 Z: 87, 39

Profundidad: 11, 60 m

0,0 a 0,40	Cubierta
0,40 a 4,50	Tobas vitroclasticas, verde gris grano medio, poco densa. V. Volc: 76 a 80 %; Montm: 19 a 22 % y Ca CO3: 0 a 1 %.
4,50 a 6,40	Toba crostalolitoclastica algo densa.
6,40 a 11,60	Toba zeolitica, verde, bastante alterada, triturada, mas alterado el material arcilloso.

Anexo 3. Morteros en el área de curado (tipo inmersión).



Anexo 4. Morteros para la determinación de la resistencia mecánica a los 7 días para las temperaturas de 450, 600 y 750 °C.

