



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad de Geología-Minería-Informática

Trabajo de Diploma

en opción al título de

Ingeniero Geólogo

Potencialidades de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación para la obtención de aglomerantes ternarios.

Yasniel Hernández Primero

Moa, 2016
“Año 58 de la Revolución”





Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad de Geología-Minería-Informática

Trabajo de Diploma

en opción al título de

Ingeniero Geólogo

Potencialidades de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación para la obtención de aglomerantes ternarios.

Autor: Yasniel Hernández Primero

Tutores: Dr. Carlos A. Leyva Rodríguez
MSc. Yosbel Guerra González
MSc. Roger S. Almenares Reyes
MSc. Daylé Silega Martínez
Ing. Daimara Jiménez Mejías

Moa, 2016
“Año 58 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo: Yasniel Hernández Primero, autor de este Trabajo de Diploma titulado *Potencialidades de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación para la obtención de aglomerantes ternarios* y mis tutores: Dr. Carlos Alberto Leyva Rodríguez e Ing. Daimara Jiménez Mejías certificamos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso como estime conveniente.

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

Yasniel Hernández Primero
Diplomante

Dr. Carlos A. Leyva Rodríguez
Tutor

Ing. Daimara Jiménez Mejías
Tutora

Pensamiento

“Si cerráis la puerta a todos los errores, también la verdad se quedará afuera.”

R. Tagore

“Si tu intención es describir la verdad, hazlo con sencillez y la elegancia déjasela al sastre.”

A. Einstein

Agradecimientos

Agradezco a Fidel y a Raúl por esta hermosa obra que es la Revolución cubana sin la cual este momento en mi vida no hubiese sido posible.

Agradezco a mi madre Ana Raiza Primero Díaz que tanto se ha esforzado para que este momento llegara a mi vida y por el sacrificio hecho y el amor que me ha brindado no solo en estos cinco años sino toda mi vida.

Agradezco a mi padre Cruz Hernández Carballosa por su apoyo y ejemplo.

Agradezco a mi padrastro Roberto Brut Lara por haber contribuido a mi formación como hombre y por el apoyo sin condiciones que ha sabido brindarme.

Agradezco a mis hermanas Jessica y Ana Carmen.

Agradezco a mis tutores: Dr. Carlos A. Leyva Rodríguez, MSc. Yosbel Guerra González, MSc. Roger S. Almenares Reyes e Ing. Daimara Jiménez Mejías por transmitirme sus conocimientos, por la ayuda, los consejos y la atención que me dedicaron.

Agradezco al Ingeniero en Minas Alexei, trabajador en la UEB Geominera Holguín, y a Camilo Matos y Jaime Reyes, técnicos del Laboratorio de Materiales de Construcción de la Empresa Constructora Integral N° 3.

Agradezco a los profesores del Departamento de Geología por inculcarme el amor a la ciencia y por su contribución a mi formación como geólogo.

Agradezco a Rafael (Pocholo) López Elías por su amistad sincera.

Agradezco a mis compañeros de aula la ayuda brindada durante estos años.

A todos, sinceramente muchas gracias.

Resumen

En la presente investigación se evaluaron las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación a 350, 500 y 650°C como fuentes de materiales puzolánicos para la producción de aglomerantes de base cemento portland – toba zeolitizada – caliza. Las tobas zeolitizadas en estado natural (sin calcinar) fueron caracterizadas química y mineralógicamente mediante análisis de Fluorescencia de Rayos X y Difracción de Rayos X, y junto a los productos de su calcinación fueron caracterizadas desde el punto de vista granulométrico mediante análisis de Tamaño de Partículas y Superficie Específica. La evaluación de la reactividad puzolánica a partir de la determinación del índice de actividad resistente en sistemas cemento portland – tobas zeolitizadas natural y calcinada a 350, 500 y 750 °C – caliza, mostró que todos los materiales ensayados se comportan como material puzolánico, al obtener un índice de actividad resistente superior a 75 % tanto a 7 como a 28 días; y además todos los aglomerantes evaluados mostraron un comportamiento mecánico positivo, al alcanzar resistencias a la compresión superiores a las exigidas a los cementos mezclados PP-25 y PZ-25.

Abstract

In this investigation were evaluated the zeolitised tuffs from San Andrés's deposit and the products obtained by its calcination to 350, 500 and 650°C for the elaboration of a binding material based in portland cement – zeolitised tuff – limestone. Zeolitized tuffs without roasting were characterized chemically and mineralogically by means of X-Ray's Fluorescence and X-Ray's Diffraction, and together with products of their calcination they were characterized from the point of view of their size particle by means of analysis of Size of Particles and Specific Surface. The evaluation of the pozzolanic reactivity using the index of resistant activity in the cementitious systems based in portland cement – zeolitised tuff – limestone showed that all analyzed materials behave as pozzolanic materials. All binding materials that were evaluated reached resistances to the compression higher than the demanded to the mixed cements PP-25 and PZ-25.

Índice

Introducción.....	1
I. Estado del arte	4
I.I. Marco teórico conceptual.....	4
Material aglomerante.....	4
Mortero.....	4
Hormigón.....	5
Árido.....	5
Agua de amasado	5
Laborabilidad del mortero.....	6
Cemento.....	6
Cemento portland.....	6
Tipos de cementos.....	9
Producción de mundial de cemento	11
Materiales cementicios suplementarios.....	14
Puzolanas	15
La caliza como material cementicio suplementario	19
Las tobas zeolitizadas como puzolanas	20
Activación térmica de las tobas zeolitizadas para su utilización como puzolana	21
I.II. Antecedentes de la Investigación.....	22
Capítulo 1. Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio	25
1.1. Características físico-geográficas del área de estudio.....	25
1.2. Características tectónicas regionales.....	27
1.3. Características geológicas regionales.....	28
1.3.1. Asociación Estructuro Formacional Auras (Zaza).....	29
1.3.2. Asociación Estructuro Formacional Remedios	34
1.3.3. Cobertura Neoautóctona.....	35
1.4. Características geológicas del yacimiento San Andrés.....	36
Capítulo 2. Materiales y métodos	38
2.1. Selección de las materias primas y toma de muestras.....	38
2.2. Procesamiento de las muestras.....	38
2.3. Activación térmica de la toba zeolitizada.....	39

2.4. Molienda de las muestras	40
2.5. Caracterización de las materias primas	41
2.5.1. Determinación de la composición química	41
2.5.2. Caracterización mineralógica	41
2.5.3. Caracterización granulométrica.....	42
2.6. Preparación de los morteros	42
2.7. Elaboración de las probetas	44
2.8. Ensayos de resistencias mecánicas	45
2.8.1. Ensayo para determinar la resistencia a la flexotracción.....	45
2.8.2. Ensayo para determinar la resistencia a la compresión	46
2.9. Determinación de la actividad puzolánica.	47
Capítulo 3. Valoración de los resultados	48
3.1. Caracterización de las materias primas	48
3.1.1. Composición química de la toba zeolitizada.....	48
3.1.2. Composición mineralógica de la toba zeolitizada	50
3.1.3. Caracterización granulométrica.....	51
3.2. Resistencias mecánicas de los morteros	52
3.2.1. Resistencia a la flexotracción	53
3.2.2. Resistencia a la compresión.....	53
3.3. Índice de actividad puzolánica	55
3.4. Perspectivas de utilización de los aglomerantes cemento portland – toba zeolitizada – caliza	56
Conclusiones.....	59
Recomendaciones.....	60
Bibliografía	61
Anexos	68

Introducción

El descubrimiento del Cemento Portland Ordinario (CPO) como material cementante, patentado en el año 1824 por Joseph Aspdin, ha sido sin lugar a dudas uno de los acontecimientos más importantes en la historia de los materiales de construcción. Su uso prácticamente en todos los trabajos de la construcción, su costo relativamente bajo, la posibilidad de lograr una 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 (Martirena, 2003).

Si se le compara con otros materiales de construcción como los plásticos, el aluminio, la madera, el acero o el vidrio, los costos energéticos y de emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de masa del CPO son muy bajos. Sin embargo, por sus altos volúmenes, su producción está asociada al 5 % del consumo energético del sector industrial y al 7 % de las emisiones de dióxido de carbono (Humphreys, 2002), factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental (Martirena, 2003). Por lo tanto, sus demostradas ventajas como material de construcción y su necesaria demanda para el desarrollo socioeconómico contrastan con un negativo impacto medioambiental, en un momento en que el cuidado del entorno y la eficiencia en la utilización de los recursos energéticos deben estar entre las principales prioridades de la humanidad (Alujas, 2010).

En el proceso de producción del CPO, la producción de clínquer es la responsable del mayor consumo de energía (temperaturas cercanas a los 1450°C) y también de los mayores volúmenes de emisiones de CO₂ (Alujas, 2010). Se calcula que 0,9 toneladas (t) de CO₂ son emitidas por cada tonelada de clínquer producido, esta emisión se divide principalmente en 0,53 t causadas por la descarbonatación de la caliza y 0,39 t atribuidas al uso de combustibles fósiles (Habert et al., 2010).

Las principales medidas para reducir las emisiones de CO₂ generadas por la producción de cemento están encaminadas en cuatro direcciones fundamentales: la mejora en la eficiencia de los procesos y tecnologías de producción, el uso de fuentes alternativas de combustibles, la reducción del factor de clínquer, y más recientemente la captura y almacenaje del CO₂ (Vizcaíno, 2014).

La reducción del contenido de clínquer en el aglomerante se considera la alternativa con mayor potencial, debido a que esta no requiere de inversiones significativas y puede ser realizada tanto a nivel industrial como a nivel local. La reducción del factor clínquer se realiza a través del empleo de materiales sustitutos, que garantizan las propiedades del cemento y al mismo tiempo mejoren su perfil medioambiental (Martirena, 2003); los niveles de sustitución de clínquer, que dependen de las características de los materiales sustitutos empleados, generalmente tienen como máximo el 35 % en masa del aglomerante, debido a que el empleo de estas adiciones causa una reducción de la resistencia a la compresión en los morteros y hormigones, sobre todo a edades tempranas, y genera un aumento del consumo de agua para elaborar las mezclas.

Los materiales cementicios suplementarios (MCS) tradicionalmente utilizados son desechos de procesos industriales, como las cenizas volantes, la microsílice y las escorias de alto horno, además de puzolanas naturales como tobas zeolitizadas y cenizas volcánicas. Las tobas zeolitizadas, debido a la amplia distribución que tienen en nuestro país, constituyen uno de los materiales puzolánicos más perspectivas; según Batista, et al. (2009) estos recursos alcanzan el orden de los 430 millones de toneladas métricas y según datos de la Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM), en Cuba son reportados más de 20 yacimientos.

Las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés han sido objeto de estudio de diversas investigaciones (Almenares, 2011; Cabrera, 2010; Hidalgo, 2014) con el fin de valorar sus posibilidades para ser empleadas en la elaboración de aglomerantes binarios mezclándolas con cemento portland. Estos estudios han revelado que estas mezclas binarias se comportan de manera favorable para sustituciones de hasta el 15 % del cemento, excepcionalmente del 30; estos niveles de sustitución pueden ser superados mediante la activación térmica de estas tobas y su empleo en sistemas cementicios ternarios, por ello la presente investigación pretende agotar el **problema científico**: insuficiente conocimiento de las propiedades puzolánicas de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación para su empleo en la obtención de un aglomerante ternario de base cemento portland – toba zeolitizada – caliza que permita elevar los niveles de sustitución de cemento portland.

Objeto de estudio: Las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés.

Campo de acción: Las propiedades puzolánicas de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación en sistemas cementicios ternarios a base de cemento portland – toba zeolitizada – caliza.

Objetivo general: Evaluar las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación como materiales puzolánicos para la producción de aglomerantes de base cemento portland – toba zeolitizada – caliza.

Hipótesis: Si se comprueba la existencia de propiedades puzolánicas en las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación entonces es posible su utilización en la elaboración de aglomerantes de base cemento portland – toba zeolitizada – caliza e incrementar los niveles de sustitución de cemento.

Objetivos específicos:

1. Realizar la caracterización granulométrica, química y mineralógica de las tobas zeolitizadas empleadas para la elaboración de los aglomerantes de base cemento portland – toba zeolitizada – caliza.
2. Determinar las resistencias mecánicas de los morteros elaborados con toba zeolitizada natural y calcinada en aglomerantes de base cemento portland – toba zeolitizada – caliza.
3. Determinar el índice de la actividad puzolánica de los morteros elaborados con toba zeolitizada natural y calcinada en aglomerantes cemento portland – toba zeolitizada – caliza.
4. Valorar las perspectivas de utilización de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación como fuentes de materiales puzolánicos para la elaboración de aglomerantes de base cemento portland – toba zeolitizada – caliza.

I. Estado del arte

Con el objetivo de disponer de los elementos teóricos y conceptuales para la realización de la investigación, se realizó la consulta de la bibliografía relacionada, esta consulta permitió la elaboración del marco teórico-conceptual, conocer los antecedentes de la investigación y las consideraciones teóricas de las puzolanas.

I.I. Marco teórico conceptual

Para lograr una mejor comprensión de los conceptos que se manejan a lo largo de la investigación se procede a definir algunos términos empleados en el ámbito de los materiales de construcción.

Material aglomerante

Los aglomerantes son materiales que en estado pastoso y con consistencia variable tienen la propiedad de poderse moldear, adherirse fácilmente a otros materiales, unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos físicos hasta alcanzar resistencias mecánicas considerables (Aguilar, 2015).

Los aglomerantes pueden ser naturales: tal es el caso del yeso, la cal y los cementos naturales, o pueden ser artificiales como los que se obtienen de la calcinación de mezclas de rocas de composición conocida y cuidadosamente dosificadas. Se denominan aglomerantes aéreos a aquellos que solo fraguan y se endurecen en contacto con el aire, estos generalmente no contienen arcilla y aglomerantes hidráulicos a los que tienen la capacidad de endurecerse tanto en el aire como en el agua y contienen cantidades relativamente importantes de arcilla (Aguilar, 2015).

Mortero

Es una combinación de aglomerantes y aglomerados. Los más comunes son los morteros de cemento y están compuestos por cemento, agregado fino (arena) y agua. Generalmente, se utilizan para obras de albañilería, como material de agarre y revestimiento de paredes (Aguilar, 2015). Los morteros más comunes se componen de una parte de cemento, tres partes de arena y el agua suficiente para garantizar su laborabilidad; la norma cubana NC 175: 2002 reconoce cinco tipos de morteros de albañilería según sus propiedades físico-

mecánicas y las dosificaciones de sus componentes (Anexo 1) y recomienda los usos para cada tipo.

Hormigón

También denominado **concreto** en algunos países, es el material resultante de la mezcla de cemento (u otro aglomerante) con áridos (grava, gravilla, arena) y agua (Almenares, 2011).

Árido

Según la NC 120: 2014, el árido es un material mineral granular adecuado para su uso en el hormigón. Pueden ser naturales, artificiales o reciclados a partir de materiales previamente utilizados en la construcción.

Los áridos son conformados en diferentes fracciones granulométricas que varían desde 0,149 mm hasta un tamaño máximo especificado, en general se subdividen en áridos gruesos y áridos finos, entendiéndose por árido grueso al que posee principalmente partículas de un tamaño superior a 4,76 mm y como árido fino (arena) aquel que posee partículas de un tamaño desde 0,149 mm hasta 4,76 mm (Herrera y Gayoso, 2007).

Cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido, menores serán las necesidades de cemento y de agua; y cuanto más contenido de granos finos tenga el árido, la mezcla se hace más laborable pero precisa más agua de amasado y cemento. Los áridos, aunque no contribuyen de manera activa al endurecimiento del mortero deben poseer por lo menos la misma resistencia y durabilidad que se exija al hormigón (Almenares, 2011).

Se consideran prohibidas las partículas de carbón, de madera, coke, ceniza, escoria, asfalto, y otros que puedan afectar las propiedades del mortero y se consideran toleradas cantidades de sulfato de calcio (yeso) y de sulfuro de hierro (pirita) siempre que el contenido total en azufre, expresado en anhídrido sulfúrico (SO_3), no sobrepase el 1 % del peso total de la muestra de árido seco (NC 657: 2008).

Agua de amasado

Es el agua que interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la necesaria pues la sobrante, que no interviene en la hidratación del cemento, se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo su resistencia. Se estima que cada litro de agua de amasado en exceso equivale a anular dos kilogramos de

cemento en la mezcla; sin embargo, una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra (Almenares, 2011).

Laborabilidad del mortero

Es la propiedad más importante del mortero fresco, el mortero laborable puede extenderse fácilmente sobre paredes y juntas de la unidad de albañilería, es capaz de soportar el peso de las unidades (ladrillos, bloques, etc.) cuando se colocan sobre él, facilitando su alineación y salir de las juntas cuando se aplica una presión sobre las mismas. Esta propiedad es el resultado de la lubricación de las partículas del árido, mediante la pasta conglomerante. Una buena laborabilidad es importante para propiciar la máxima adherencia en las unidades de albañilería. La laborabilidad se mide en el laboratorio por medio de la fluidez, la cual indica el aumento del diámetro producido en una muestra de mortero fresco moldeado en un molde tronco-cónico de dimensiones determinadas, cuando la mesa de sacudidas se eleva y se deja caer 25 veces en 15 segundos desde una altura de 12,7 mm, girando la manivela con una velocidad constante. La fluidez recomendada para los morteros de albañilería es de 190 ± 5 mm y se determina según lo establecido en la norma cubana NC 170: 2002.

Cemento

Es un aglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas, que posteriormente molida tiene la propiedad de endurecer al estar en contacto con el agua (Aguilar, 2015).

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 en el aire como en el agua y de aglomerar materiales adecuados (Guillen, 2013).

Por otro lado la NC 526: 2012 define como **material cementoso hidráulico** a un material inorgánico, o una mezcla de ellos, que fragua y desarrolla su resistencia mediante la reacción química con el agua para la formación de hidratos, el cual es capaz de hacerlo sumergido.

Cemento portland

Su nombre 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

Portland, en la costa sur del Condado de Dorset, en Inglaterra. El cemento portland ordinario (CPO), que se describe como un cemento hidráulico constituido esencialmente por silicatos de calcio, se obtiene al calcinar a unos 1450°C mezclas preparadas artificialmente de calizas y arcillas. El producto resultante, llamado clínquer, se muele conjuntamente con una cantidad adecuada de regulador de fraguado, que generalmente suele ser piedra de yeso natural (Almenares, 2011).

Un clínquer típico de cemento portland tiene una composición de 67 % de CaO, 22 % de SiO₂, 5 % de Al₂O₃, 3 % de Fe₂O₃ y 3 % de otros componentes (Taylor, 1990); estos cuatro compuestos son los 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 clínquer de cemento portland de tipo medio contiene:

- Silicato tricálcico o alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)40 a 50 %
- Silicato bicálcico o belita ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)20 a 30 %
- Aluminato tricálcico o celita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)10 a 15 %
- Aluminatoferrito tetracálcico o felita ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)5 a 10 %

El silicato tricálcico (C₃S) 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.

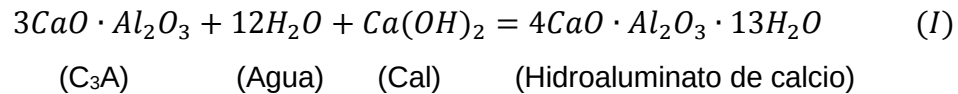
El silicato bicálcico (C₂S) es el que desarrolla en el cemento la resistencia a largo plazo, es lento en su fraguado y en su endurecimiento. Su estabilidad química es mayor que la del silicato tricálcico, por ello los cementos resistentes a los sulfatos llevan un alto contenido de silicato bicálcico.

El aluminato tricálcico (C₃A) 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 clínquer piedra de yeso.

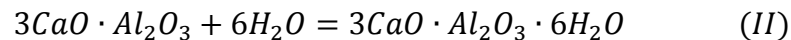
El aluminatoferrito tetracálcico (C₄AF) no participa en la resistencia mecánica, su presencia es necesaria por el aporte de fundentes de hierro en la fabricación del clínquer.

Reacciones de hidratación del cemento portland

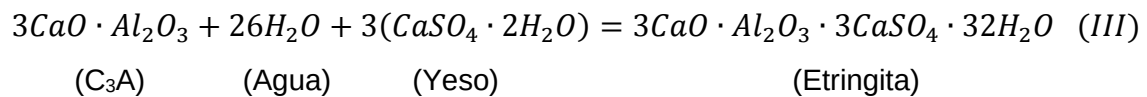
Entre las fases que reaccionan más rápido se encuentra el aluminato tricálcico (C_3A), que en presencia del hidróxido de calcio, reacciona según el esquema siguiente (Betancourt, 2010):



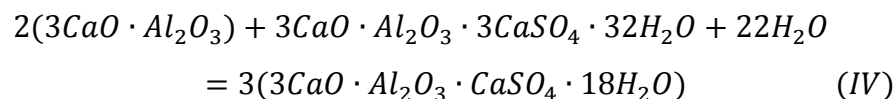
La forma estable del hidroaluminato (con seis moléculas de agua) cristaliza en el sistema cúbico y se forma como resultado de una reacción rápida del aluminato tricálcico con el agua:



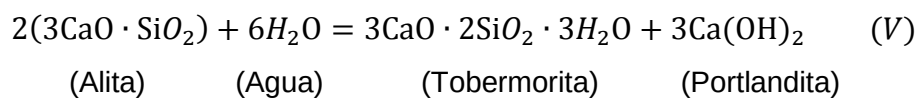
Para retardar el fraguado del cemento, el yeso desempeña el papel de surfactante en el cemento y reacciona con el aluminato tricálcico, fijándolo en hidrosulfoaluminato cálcico (etringita) al principio de la hidratación del cemento (Betancourt, 2010).

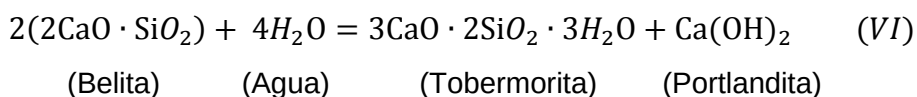


La etringita se segrega, precipitándose sobre los granos de aluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$), retardando así la llegada del agua y por tanto el fraguado del cemento; condiciona la resistencia en los primeros momentos de amasado, reaccionando posteriormente con el resto del aluminato tricálcico que queda después de consumir la proporción de yeso agregado, formándose entonces el monosulfato cálcico (Betancourt, 2010):



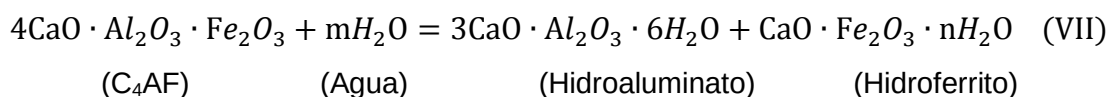
La resistencia del sistema cementicio evoluciona de manera progresiva y se debe fundamentalmente a la formación de hidrosilicatos de calcio como consecuencia de la hidratación de la alita (silicato tricálcico) y la belita (silicato bicálcico), según se expone en las reacciones siguientes (Betancourt, 2010):





En ambas reacciones se observa la formación de dos compuestos básicos, la tobermorita y la portlandita. La tobermorita constituye la fase más importante de los productos de hidratación del CPO, y es precisamente el mineral que aporta las buenas propiedades mecánicas y químicas que posee el cemento.

En la siguiente reacción el ferrito-aluminato tetracálcico (C_4AF) reacciona con el agua de amasado para formar el hidroaluminato y el hidroferrito, (Betancourt, 2010):



Tipos de cementos

De acuerdo a la norma C –150 de la ASTM (American Society of Test of Materials) existen diferentes tipos de cemento portland, los cuales están clasificados en:

- Tipo I: cemento de uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias.
- Tipo II: genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede ocasionar agrietamientos, así como donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos.
- Tipo III: cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es utilizado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días, así como cuando se necesita remover encofrados lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente.
- Tipo IV: presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo (hormigón), donde la subida de temperatura derivada del calor generado durante el endurecimiento, deba ser minimizada.
- Tipo V: cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en hormigones con aguas negras domésticas.

La norma cubana NC 95: 2011 clasifica los cementos producidos en Cuba en tres grados de calidad de acuerdo a la resistencia a la compresión a los 28 días expresada en megapascuales (MPa):

- Cemento Portland 35 (P- 35)
- Cemento Portland 45 (P- 45)
- Cemento Portland 55 (P- 55)

Los cementos mezclados o también llamados cementos compuestos no son más que cementos con incorporación de adiciones de diferentes tipos para la sustitución parcial del clínker en el aglomerante. Entre estos se encuentran los conocidos cementos puzolánicos (Castillo, 2010). De manera general las adiciones minerales realizan una importante contribución a la formación de productos de hidratación (He et al, 1995).

Desde su surgimiento hasta la actualidad, los cementos mezclados han incrementado su variabilidad y tipología. En su origen, los cementos mezclados conformaban sistemas binarios al combinar el cemento portland con un material cementicio suplementario. En la actualidad, el estudio e incorporación de nuevas adiciones ha devenido en el surgimiento de formulaciones más complejas como son los sistemas ternarios y los cuaternarios (Castillo, 2010).

La norma ASTM C 595–12 describe 5 clases de cementos mezclados que pueden encontrarse en diferentes combinaciones:

- Cemento portland de escoria de altos hornos.
- Cemento portland puzolánico.
- Cemento de escoria.
- Cemento portland modificado con puzolana.
- Cemento portland modificado con escoria.

La norma NC 96: 2011 clasifica los cementos mezclados producidos industrialmente en Cuba en tres grados de calidad de acuerdo al porcentaje de adición y a la resistencia a la compresión a los 28 días expresada en megapascuales.

- Cemento portland puzolánico 25 (PP-25): con un porcentaje de adición activa natural entre 6 y 20.
- Cemento portland puzolánico 35 (PP-35): con un porcentaje de adición activa natural entre 6 y 20.

- Cemento puzolánico (PZ-25): cemento portland 25 con un porcentaje de adición activa natural entre 21 y 35.

Investigadores del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central de Las Villas en Cuba, han desarrollado un nuevo tipo de cemento mezclado de base clínquer – arcilla calcinada – caliza, con resultados positivos en su producción y empleo, a nivel industrial y local. La proporción es de 50 % de cemento P-35, 30 % de arcilla calcinada o polvo de cerámica roja y 20 % de caliza. La sinergia entre la arcilla calcinada y la caliza permite aumentar la actividad puzolánica y estas reaccionan con el hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento portland. Esta reacción da lugar a la formación de fases del tipo Afm (hemicarbo y monocarboaluminatos) (Castillo, 2010). Este cemento, conocido como LC3, puede alcanzar prestaciones similares al cemento PP-25 y es idóneo para el uso en aplicaciones de albañilería, la producción de hormigones para pisos, cimentaciones y la producción de una variada gama de elementos prefabricados de pequeño formato como bloques, baldosas hidráulicas y tejas de micro-concreto (Martirena, 2015).

Producción de mundial de cemento

En los últimos años la producción mundial de cemento se ha visto incrementada debido a la demanda creciente que tiene este producto; la producción mundial entre 2005 y 2012 (Figura 1) muestra un incremento de 1520 millones de toneladas, lo que representa un aumento del 65,8 %. Se estima que para el 2050, en caso de presentarse un escenario de alta demanda, la producción de cemento llegue hasta las 4400 millones de toneladas; esta estimación está basada en el aumento de la demanda de cemento que se viene mostrando en los países en vías de desarrollo y en los grandes volúmenes que solicita la industria constructiva del gigante asiático.

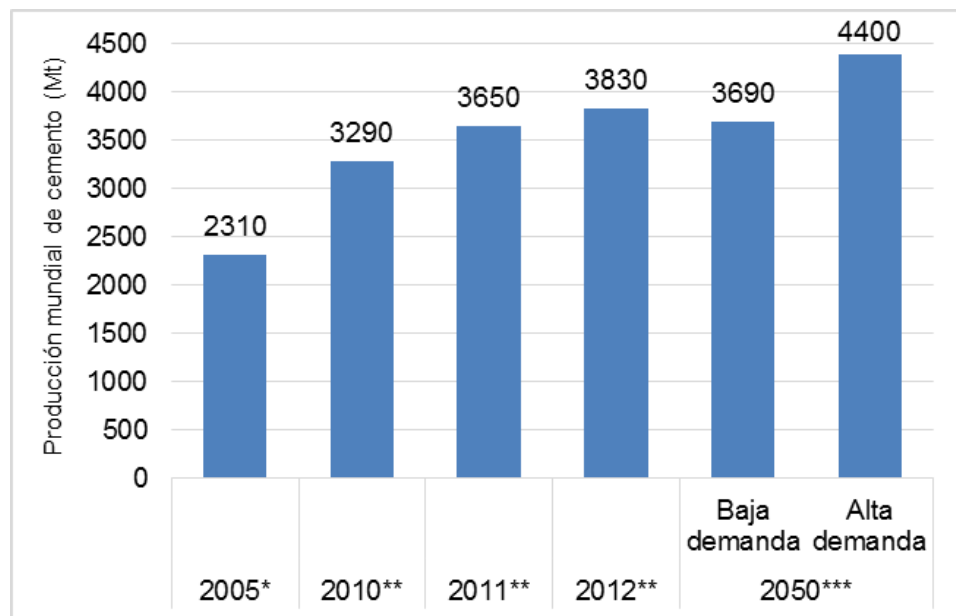


Figura 1. Producción mundial de cemento (Fuentes: * Wikipedia, 2016; ** IndexMundi, 2016; * International Energy Agency, 2009).**

Según la enciclopedia libre Wikipedia, los cinco mayores productores de cemento a nivel mundial en el 2015 fueron China, India, Estados Unidos, Turquía y Brasil (Tabla 1). China, que marcha a la cabeza de la producción mundial ha incrementado su producción de cemento con respecto a su producción del 2005 en 842 millones de toneladas, lo que representa un crecimiento de más del 81 %; por otro lado Estados Unidos ha visto reducida su producción en más del 32 % para igual período.

Tabla 1. Primeros productores de cemento a nivel mundial (Fuente: Wikipedia, 2016).

País	Producción del 2005 (Mt)	Producción del 2015 (Mt)
China	1038	1880
India	145	210
Estados Unidos	100	67,17
Turquía	42	62,73
Brasil	36	59,11

Producción de cemento en Cuba

Cuba cuenta con seis plantas productoras de cemento (Tabla 2), con una capacidad productiva instalada de aproximadamente 2869 millones de toneladas de clínquer al año; cuatro de estas fábricas poseen su tecnología de producción basada en el proceso húmedo lo que las hace ineficientes. Debido a esto, el 71 % del clínquer de cemento gris se produce en las fábricas con tecnología basada en el proceso seco (René Arcay y Karl Marx), mientras que el resto son mayormente explotadas como plantas de molienda (Guerra, 2015).

Tabla 2. Fábricas cubanas de cemento, producción y procesos tecnológicos (Fuente: Guerra, 2015).

Fábrica	Ubicación	Tipo de Proceso	Producción de cemento 2012 (Mt)	Por ciento de la producción total
Mártires de Artemisa	Artemisa	Vía húmeda	196,1	10,7
René Arcay	Mariel, Artemisa	Vía seca	624,2	34,2
Karl Marx	Guabairo, Cienfuegos	Vía seca	675,9	37
Siguaney	Siguaney, Sancti Spíritus	Vía húmeda	128,4	7
26 de Julio	Nuevitas, Camagüey	Vía húmeda	104,5	5,7
José Merceron	Santiago de Cuba	Vía húmeda	95,6	5,2
Total			1824,7	100

La producción de cemento en la última década ha mostrado una tendencia al crecimiento (Figura 2), marcada por un mayor consumo nacional. Recientes cambios en la política económica del país, han propiciado el crecimiento y desarrollo acelerado de inversiones constructivas, sobre todo en el sector privado, lo que amplía la brecha existente entre la capacidad de producción y la cobertura de la demanda (Guerra, 2015). En el año 2014 se produjeron 1579,9 millones de toneladas de cemento, lo que representa un descenso de casi el 5 % con respecto a la producción del 2013 (ONEI, 2015); esta disminución de la producción contrasta con el aumento de la demanda nacional, que pudo ser suplida en parte gracias a la reducción de las exportaciones en este período.

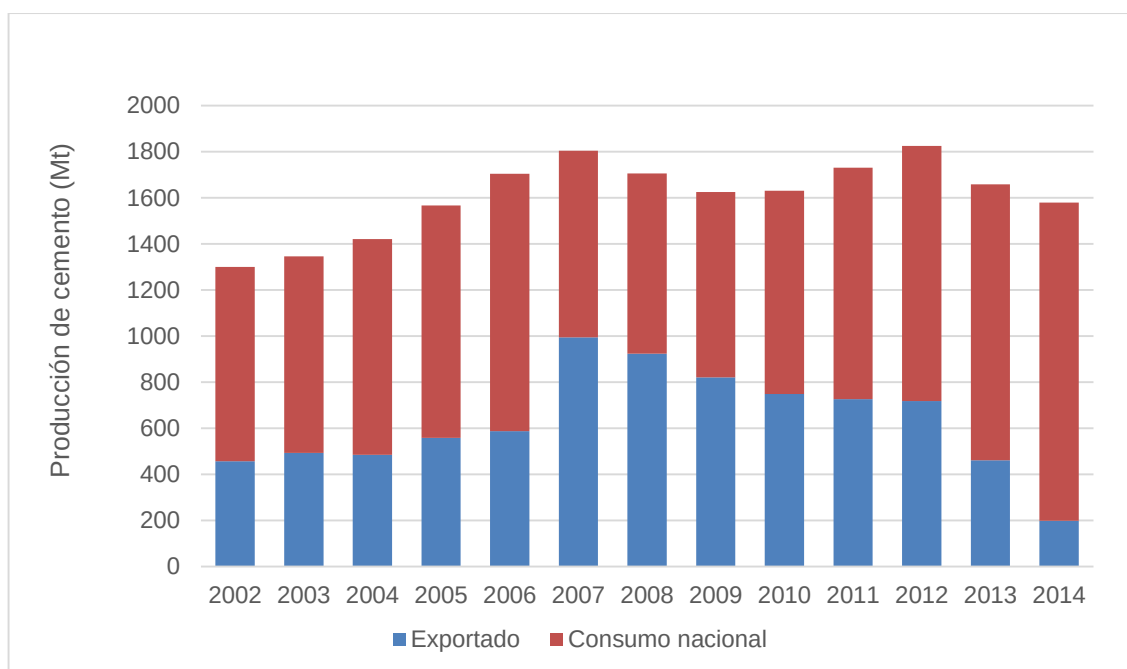


Figura 2. Producción de cemento en Cuba en el período 2002-2014 (Fuente: ONEI, 2015).

Las acciones para disminuir la carga ambiental generada por la industria del cemento en Cuba han estado concentradas por muchos años en la conversión del proceso húmedo al seco. Este tipo de cambio tecnológico conlleva grandes inversiones, por lo que la estrategia ambiental ha sido concentrar la producción en las fábricas de Cienfuegos y Mariel, que son menos contaminantes (Guerra, 2015).

La reducción del factor de clínquer y el aumento de la producción de cementos mezclados representa una buena alternativa, no solo para mitigar el impacto ambiental sino para incrementar los volúmenes de producción de cemento y ayudar a suplir la demanda nacional; ello requiere de inversiones mínimas que pueden ser amortizadas a corto plazo, incluso a nivel local.

Materiales cementicios suplementarios

Los materiales cementicios suplementarios son aquellos que se emplean como sustitos del cemento y que a través de sus propiedades hidráulicas y/o puzolánicas contribuyen al logro de las propiedades mecánicas del concreto endurecido (Martirena, 2014). Los materiales cementicios suplementarios más comúnmente empleados son las cenizas volantes, las escorias granuladas, la micro-sílice, las puzolanas naturales y artificiales, el carbonato de calcio y otros.

Puzolanas

Según la norma cubana NC 526: 2012, una puzolana es un material silíceo o silicio y aluminoso, el cual en sí mismo posee poco o ningún valor cementoso, pero en una forma finamente dividido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias formando hidratos poseedores de propiedades cementosas. Las puzolanas, atendiendo a su origen, se pueden clasificar en dos grandes grupos: naturales y artificiales (subproductos industriales), aunque también puede hablarse de un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que necesitan tratamiento térmico de activación (calcinación), con el objeto de aumentar su reactividad (Hidalgo, 2014).

Puzolanas Naturales: son productos minerales con características composicionales (sílico-aluminosos), estructurales (estructura imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento ya sea de forma natural o alteradas (activación química mecánica o térmica), entre éstas están las acumulaciones de cenizas generadas durante las erupciones volcánicas explosivas, que por su alto contenido de materiales vítreos son propensas a sufrir reacciones como las requeridas para las puzolanas.

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

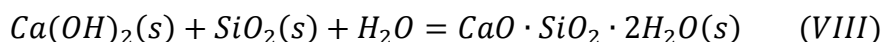
La norma cubana NC TS 528: 2007 establece, de acuerdo con sus requerimientos químicos y físicos tres clases de puzolanas (Anexos 2 y 3):

- **Clase N:** puzolanas naturales calcinadas y sin calcinar que cumplen con los requerimientos aplicables dados en esta norma para esta clase, tales como, algunas tierras de diatomeas, esquistos opalinos, tobas, cenizas volcánicas o pumíticas, calcinadas o no; y varios materiales que requieren calcinación para obtener propiedades satisfactorias, tales como las arcillas y pizarras.

- **Clase F:** Cenizas volantes producidas por la combustión de la antracita y carbón bituminoso que poseen los requerimientos aplicables dados por esta norma para esta clase. Este tipo de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.
- **Clase C:** Cenizas volantes normalmente producidas del lignito o carbón bituminoso que poseen los requerimientos aplicables en esta norma para esta clase. Este tipo de ceniza además de la propiedad puzolánica, tiene también alguna propiedad cementante. Algunas cenizas volantes de esta clase pueden contener contenidos de cal superiores al 10 %.

Actividad y reacción puzolánica

Las bases para el empleo de los materiales puzolánicos como sustitutos parciales del clínquer en el cemento portland (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 $Ca(OH)_2$ 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 silicatos de calcio hidratado (CSH) 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 generada durante la hidratación del CPO (Ecuación VIII), son los responsables de la mejora en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón (Taylor, 1990).



(Portlandita) (Sílice) (Agua) (CSH)

La composición de los silicatos de calcio hidratado formados durante la reacción puzolánica es similar a la de los que se forman 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, esta tiende a favorecer no solo la formación de fases de aluminato de calcio, sino también la sustitución parcial del silicio (Si) por aluminio (Al) en la estructura de los CSH, incrementándose en estos la relación Al/Ca. 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 et al., 2002)

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, han sido identificados sus principales factores (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 atómica desordenada.
- Las partículas puzolánicas deben ser suficientemente finas para reaccionar con el hidróxido de calcio.

Hay gran desacuerdo acerca de cómo evaluar las propiedades de una puzolana, debido a que el mecanismo y la cinética de las reacciones puzolánicas son complejas (Costafreda, 2008) y a que cada material puzolánico posee características particulares.

Los métodos de evaluación puzolánica se basan en la determinación de la velocidad de consumo del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como medida del avance de la reacción, y pueden ser clasificados como métodos indirectos y directos. Los métodos directos se basan en la medida de la cantidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que ha reaccionado con el material y los indirectos se basan en el empleo de mediciones de variables que permiten tener una medida de la ocurrencia de la reacción puzolánica; dentro de estas variables están la conductividad eléctrica de soluciones de puzolana- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el comportamiento de la resistencia a la compresión a medida que ocurre la reacción (Costafreda, 2008).

El método de valoración de la actividad puzolánica de un material a través de la resistencia a la compresión de morteros elaborados con adiciones de dicho material no solo ofrecer una medida de la ocurrencia de la reacción puzolánica como el resto de los métodos sino que además proporciona una medida de la efectividad de esta reacción y del material analizado para producir fases de silicatos y aluminatos de calcio hidratados que aporten propiedades cementantes al conjunto; por lo que puede decirse que este método permite una valoración más integral de la actividad puzolánica.

Efectos de la adición de puzolanas al cemento portland

El primer criterio que apoyó la producción de cementos puzolánicos fue el de corregir el cemento portland al fijar la cal libre generada durante la hidratación de los silicatos bicálcicos y tricálcicos, pero adicionalmente estos materiales tienen otros efectos sobre el cemento y el concreto:

- Reemplazan una buena porción del cemento portland (del 15 al 40 %) disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clínquer y más económica de moler.
- Reduce el calor generado durante la hidratación.
- Al eliminar la cal libre evita el agrietamiento del concreto por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse; esto mejora la durabilidad de los hormigones por lo que las construcciones tienen una mayor vida útil.
- 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.

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 portlandita, con la consiguiente desestabilización de las fases hidratadas ricas en Ca y, para el caso de hormigones reforzados, la desestabilización de la capa pasiva que protege al acero como consecuencia de la disminución del pH (Martirena, 2003).

A partir del análisis de los efectos que las puzolanas provocan sobre el cemento, estas pueden emplearse para la elaboración de morteros de albañilería para la colocación de ladrillos, bloques y otros; para la estabilización de suelo en bloques prensados; para la producción de prefabricados ligeros de hormigón como bloques, adoquines y otros y para la fundición de hormigón masivo de baja resistencia.

La caliza como material cementicio suplementario

La roca caliza se ha convertido en un material de gran interés para ser empleada en su estado natural finamente molida como un sustituto parcial del clínquer. La misma tiene la ventaja de ser abundante, barata, y sin el costo ambiental asociado a la producción de clínquer. La producción de cementos con la incorporación de la piedra caliza como extensor del clínquer se ha diseminado de forma internacional, Europa y Canadá muestran una amplia producción desde la última década del pasado siglo (Kirk. et al, 2013).

Se ha demostrado que adiciones entre el 2 % y el 5 % intermolidas con el clínquer no tienen efectos negativos sobre las propiedades físico-mecánicas del cemento, incluso las mejora (Lothenbach, 2008). Históricamente el empleo de la caliza se encontraba permitido por las normas ASTM solo hasta un 5 % en el cemento; en la actualidad los estudios que fomentan su empleo en cantidades superiores, han logrado resultados consistentes y se ha definido por los estándares ASTM C 595–12 un cemento de tipo II que puede incluir hasta un 15 % de polvo de piedra caliza como material sustituto en el cemento (Antoni, 2012).

El carbonato de calcio presente en la piedra caliza tiene un doble papel, una parte reacciona sinérgicamente con el aluminato tricálcico (C_3A) del cemento, formando monocarbo y hemicarbo-aluminatos de calcio, que contribuyen al refinamiento de la estructura de poros de la matriz cementicia; la otra parte actúa como relleno inerte, proporcionando superficie específica adicional para la precipitación de los productos de reacción y favoreciendo con ello las resistencias iniciales (Lothenbach, 2008).

Se ha evaluado la afinidad química que se puede establecer entre la caliza y otros materiales suplementarios como componentes del sistema cementicio, obteniéndose resultados de combinar en diferentes proporciones el polvo de piedra caliza con las cenizas volantes, el metacaolín y arcillas cubanas de baja pureza activadas térmicamente:

- Los sistemas que contienen una baja cantidad de polvo de caliza (menor del 5 %) y altas cantidades de cenizas volantes (30 %), actúan de manera similar al cemento que no contiene polvo de piedra caliza.
- Unido al metacaolín en un 40 % de sustitución, con 10 % de polvo de piedra caliza fina ofrece resistencias a la compresión similares o mayores que el CPO. Sin embargo, para una pasta similar en la cual se usa cenizas volantes, la resistencia a la

compresión resultan sustancialmente más bajas, demostrando los efectos sinérgicos del uso de polvo de piedra caliza fino con metacaolín (Kirk.et al, 2013).

- Las propiedades de los cementos producidos en presencia de sustituciones de clínquer por la combinación de caliza con arcillas cubanas calcinadas de baja pureza de caolinita son muy similares a las de los cementos ternarios donde se utiliza metacaolín (Martirena, 2013).

Los resultados de estudios sobre el comportamiento de un nuevo aglomerante con sustituciones del 15, 30, 45 y 60 % en masa del cemento portland por la combinación metacaolín – caliza, demuestran que hasta el 45 % de sustitución se obtienen resistencias mecánicas superiores a la lograda por el cemento portland desde edades tan tempranas como los 7 días, y se llegan a lograr rendimientos del 93 % para sustituciones del 60 % del cemento portland (Vizcaíno, 2014).

Guerra (2015) después de analizar el comportamiento de las resistencias mecánicas de morteros elaborados con aglomerante a base de cemento portland – toba zeolitizada – caliza plantea que la sinergia entre los componentes activos de la toba zeolitizada, especialmente la alúmina reactiva, con el carbonado de calcio, ayuda a la formación de productos que mejoran las propiedades cementicias del sistema, incluso a edades tempranas.

El efecto de la calidad de la caliza sobre la hidratación del cemento portland y su influencia en las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y la porosidad ha sido analizado por Blanco (2012); sus resultados concluyen que no existe influencia significativa en el grado de hidratación y la porosidad, y que se obtienen resistencias similares a las del cemento portland ordinario tanto para calizas de alta calidad como para calizas dolomíticas con bajos niveles de sustitución.

Las tobas zeolitizadas como puzolanas

Las zeolitas se han empleado como adición mineral puzolánica en las mezclas con cal en las construcciones antiguas y actualmente se utilizan en la construcción como aditivo puzolánicos del cemento (Sersale, R. y G. Frigione, 1985), su actividad puzolánica está dada, además de su composición química, por las estructuras cristalinas muy abiertas y la elevada porosidad interna (Rabilero, 2005) que tienen estos minerales.

Costafreda y Calvo (2007), plantean que la presencia de zeolita en morteros de cemento produce ciertas influencias en el comportamiento de las reacciones de hidratación, que

favorecen la formación de productos igualmente estables y duraderos. Los morteros preparados con adición de zeolita natural, exhiben valores bajos de resistencias iniciales a edades tempranas (2 y 7 días), lo que demuestra que la presencia de zeolita natural produce un evidente retardo de los mecanismos que rigen la reacción de hidratación. A los 28 días, las resistencias de los morteros con agregado de zeolita adquieren un incremento significativo que se manifiesta en sentido ascendente incluso a los 90 días de edad, cuando en ocasiones supera las resistencias del cemento de referencia. La zeolita es capaz de controlar, en la interface cemento-puzolana natural, diversas variables, tales como el pH, la humedad y la velocidad de reacción, y su carácter como intercambiador iónico ejerce profundas influencias en el equilibrio interno de la pasta.

Costafreda et al. (2011), indican que cada variedad de zeolita natural aporta diferentes reactividad, probablemente influenciado por la sutil variabilidad de la composición química y estructura cristalina de los minerales zeolíticos y acompañantes; Costafreda (2011) establece la relación que existe entre el diámetro de las partículas de muestras compuestas esencialmente por zeolitas y esmectitas y su comportamiento puzolánico. El estudio de tres muestras, tras su trituración en tres fracciones distintas (0,080 mm, 0,063 mm y 0,045 mm), demuestra que la superficie específica y la puzolanidad aumentan en la medida en que disminuye el diámetro de las partículas.

Activación térmica de las tobas zeolitizadas para su utilización como puzolana

El proceso de activación puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, siendo este último el candidato más fuerte para modificar la estructura cristalina de las zeolitas y alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica. La activación del material zeolitizado se refiere al proceso de lograr, a partir del aumento de la temperatura, la ruptura de los enlaces químicos y la desestabilización resultante de la estructura cristalina de las fases mineralógicas que la contienen y obtener un material con propiedades puzolánicas superiores a su estado natural (Guerra, 2015).

La factibilidad de que un material sometido a un tratamiento térmico permita la formación de compuestos puzolánicamente activos depende principalmente de la composición química y mineralógica, la temperatura de calcinación y el tiempo de cocción y de enfriado (Hidalgo, 2014).

Con el calentamiento desde temperatura ambiente hasta 220°C ocurre la pérdida del agua adsorbida en las superficies externas e internas de la zeolita (deshidratación). A los 300°C comienza la desestructuración de la heulandita y la clinoptilolita a 450°C (Habert et al, 2008). La presencia de minerales no zeolíticos tiende a aumentar la temperatura de activación, tal es el caso de las fases arcillosas que es a temperaturas superiores a 750°C donde ocurre la destrucción de sus fases mineralógicas. Si la temperatura alcanza valores de 800°C toma lugar la reorganización de la estructura para formar nuevas fases cristalinas estables a altas temperaturas y químicamente poco reactivas. Por tanto, la temperatura de calcinación a la cual se obtiene la mayor reactividad puzolánica debe situarse dentro del intervalo que se extiende entre el final de la deshidratación y el inicio de la recrystalización (Guerra, 2015).

I.II. Antecedentes de la Investigación

Ya en 1897, Le Chatelier había notado que cuando el cemento portland se hidrata se libera cierta cantidad de hidróxido de calcio (cal hidratada) que daña la resistencia y puede ser removida por el agua (Cabrera, 2010).

Saricimen et al. (1992), demostraron que en los países árabes del golfo, donde las condiciones ambientales son agresivas y seriamente corrosivas, el concreto debe ser diseñado no solamente para alcanzar altas resistencias sino también para que posea mayor durabilidad; para esto probaron el uso de puzolanas naturales y con ello lograron extender la vida útil de las estructuras.

La influencia de la finura de la puzolana en la resistencia de las pastas de cemento cal-puzolana natural fue estudiada por Day y Shi (1994). Sus resultados demostraron que la resistencia a la compresión aumenta cuando el material es más fino, y que la finura de la puzolana natural tiene su efecto más significativo en el desarrollo temprano de la resistencia. En Cuba se han efectuado numerosas investigaciones que a nivel de laboratorio, semi-industriales e industriales que han validado las tobas zeolitizadas y las tobas vítreas (vidrio volcánico) como puzolanas naturales, aptas para producir aglomerantes como el cemento romano y adiciones o mezclas al cemento portland, las cuales han dejado el camino abierto a nuevas investigaciones (Batista, 2007).

Los resultados de investigadores como Costa y Massazza (1977), Liebig y Althaus (1998), Habert et al. (2008), han mostrado las perspectiva de utilización de materiales tobáceos a partir de la activación térmica, siempre que la puzolana contenga minerales que puedan ser

activados por calcinación, concluyendo que la activación de los minerales zeolíticos, produce una desestabilización de su estructura e incrementa su reactividad. Resultados que fueron comprobados a partir de los ensayos de resistencia mecánica.

Las primeras producciones de lo que comenzó a ser llamado cemento romano en Cuba, se realizaron en nuestro país en una pequeña planta instalada a tal fin en el lugar conocido por El Brujo a mediados de 1987 en Santiago de Cuba. Algo más tarde se construyó y puso en operación un pequeño molino en Aguas Claras, Holguín y una pequeña planta con un molino de bolas de operación continua de dos cámaras con rendimiento de unos 300 kg/h instalada en la planta de prefabricado del MINAZ en Contramaestre, la cual también permitía mezclar el cemento romano que se producía con cemento portland y distribuirlos para diversos fines constructivos con muy buenos resultados (Almenares, 2011).

Rosell y Galloso (2001); Rosell (2006); Rosell (2007), han dirigido sus investigaciones al empleo de las zeolitas naturales procedentes del yacimiento de Tasajeras, Provincia de Villa Clara, como material de construcción, principalmente en la producción de cementos y otros aglomerantes, y como aditivos o agregados ligeros, para la producción de hormigones de altas prestaciones con excelentes cualidades técnicas, como la impermeabilidad y durabilidad.

Cabrera (2010), valora las tobas de los yacimientos Sagua de Tánamo, Guaramanao, Caimanes y San Andrés para su utilización como puzolana natural. Realiza la determinación de la resistencia a la flexotracción y a la compresión de morteros elaborados con la sustitución de 15 y 30 % de tobas por cemento. Para el caso de las tobas del yacimiento San Andrés los mejores resultados los obtuvo para los morteros con sustitución del 15 % de cemento, que alcanzaron valores de resistencia a la compresión que superaron incluso al patrón a los 28 días.

Almenares (2011) analizó las tobas de los yacimientos Sagua de Tánamo, Caimanes, Guaramanao y San Andrés para su empleo como aglomerantes en morteros a base de cemento portland – puzolana. Realizó análisis de resistencia a la compresión de los mortero elaborados con sustituciones del 15 % y el 30 % del cemento por tobas, con el objetivo de determinar el índice de actividad resistente de los morteros a los 7, 28, 60, 90 y 120 días. Los resultados obtenidos fueron muy favorables para las sustituciones del 15 %, destacándose entre estos los valores del índice de actividad resistente para los morteros

elaborados con las tobas de San Andrés que superaron ampliamente el 75 % establecido por la norma cubana NC TS 528: 2007 e incluso superan en resistencia al patrón a partir de los 60 días. En los morteros elaborados con sustituciones del 30 % del cemento por tobas solo se llegó a superar el valor del índice de actividad resistente, establecido por la norma NC TS 528: 2007, en los del yacimiento San Andrés a partir de los 28 días, pero a pesar de no cumplir esta exigencia, estos morteros a los 28 días ya tuvieron una resistencia a la compresión superior a los 12, 4 MPa lo que los hace óptimos para fungir como morteros de albañilería del tipo V según lo establecido por la norma cubana NC 175: 2002.

Hidalgo (2014) evaluó las tobas de los yacimientos San Andrés y Guaramanao para su empleo como sustituto del 30 % del cemento en morteros. Para ello utiliza la fracción granulométrica menor de 0,8 milímetros que se obtiene como producto de la molienda de dichas tobas en la UEB Geominera Holguín y realiza ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días a las probetas. Los índices de actividad resistentes calculados para las probetas muestran valores por debajo del 75 % que exigen la norma cubana NC TS 528: 2007 y la norma ASTM C 618–00.

Guerra (2015) evalúa los productos de calcinación de las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes como fuente de material puzolánico para la producción de aglomerantes de base clínquer – toba zeolitizada – caliza. Valora la reactividad puzolánica a partir de la determinación del índice de actividad resistente en sistemas cemento portland – tobas zeolitizadas natural y calcinada a 350, 500 y 750°C, mostrando que todos los materiales ensayados se comportan como materiales puzolánicos. Además valora el comportamiento de la resistencia a la compresión de morteros elaborados con toba zeolitizada natural y calcinada a 350, 500 y 750°C en sistemas cementicios a base de cemento portland – toba zeolitizada – caliza y recomienda como la mejor variante la que emplea la activación térmica a 350°C, pues contribuye a la obtención de mayores resistencias a edades tempranas con un requerimiento energético menor.

Capítulo 1. Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio

1.1. Características físico-geográficas del área de estudio

El yacimiento San Andrés se localiza a 23 kilómetros al Noroeste de la ciudad de Holguín y a 3 kilómetros al Sur del poblado San Andrés (Figura 3); tiene una amplitud que va de 55 a 200 metros y una longitud de 1200 metros, abarcando 22,87 hectáreas. El yacimiento está dado en Concesión de Explotación y Procesamiento a la UEB Geominera Holguín perteneciente a la empresa Geominera Oriente.

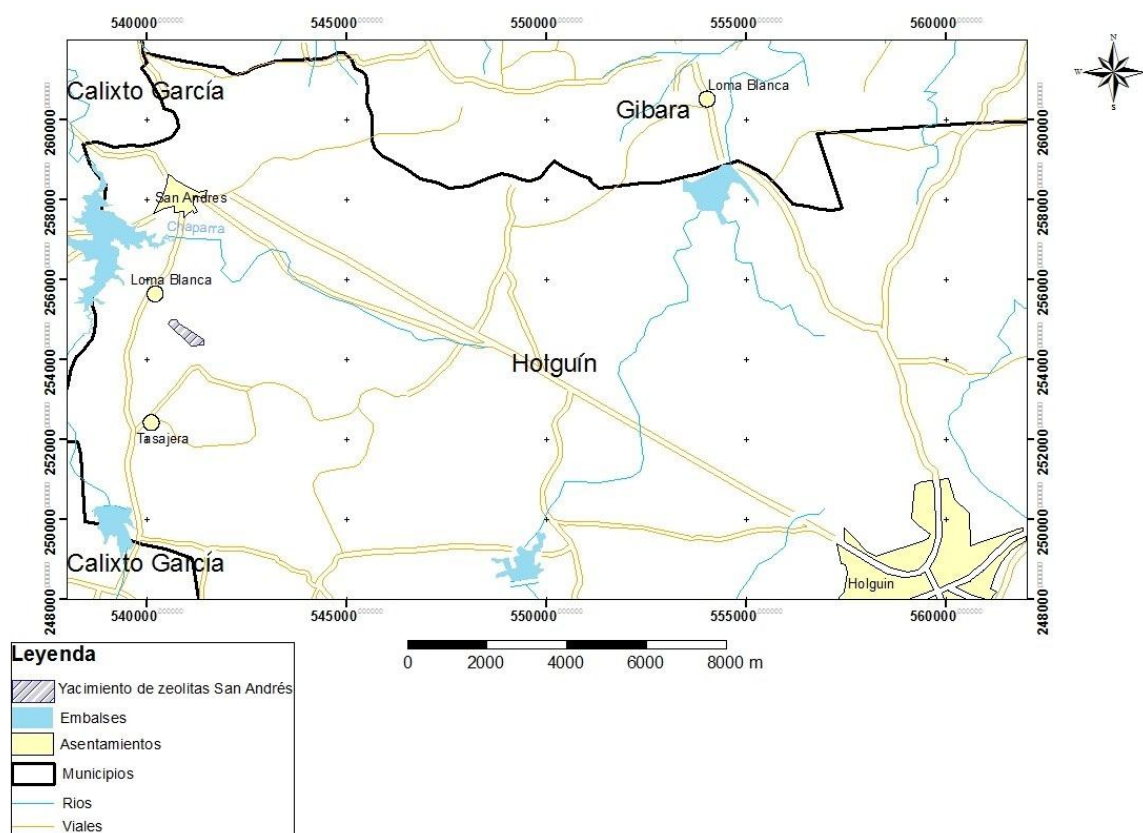


Figura 3. Localización geográfica del yacimiento San Andrés.

Según el Sistema de Coordenadas CubaSur los vértices del área del yacimiento son:

Nº de vértice	X	Y	Nº de vértice	X	Y
1	541100	254355	5	540800	254900
2	540500	254900	6	541100	254700
3	540600	255000	7	541400	254500
4	540735	255000	8	541400	254355

Clima

El clima de la región es subtropical húmedo (Atlas Nacional de Cuba, 1992) se distinguen dos períodos bien marcados de distribución de las precipitaciones: un período seco que se extiende de noviembre-abril con precipitaciones de 200 a 400 milímetros y otro período húmedo que se extiende de mayo a octubre con acumulados entre 600 y 800 milímetros.

La temperatura del aire alcanza sus máximos anuales (26–28°C) en el trimestre julio-septiembre, mientras que los mínimos (22–24°C) se registran en el período diciembre-febrero. La distribución espacial de las temperaturas está influenciada por el relieve y la distancia a la costa; la temperatura media anual de la región oscila entre 24 y 26 grados Celsius.

Relieve

El relieve de la región de estudio presenta diferentes formas condicionadas por la posición de Cuba en el arco insular de las Antillas, en la zona de interacción de las placas norteamericana y caribeña y por la influencia de las oscilaciones paleoclimáticas del cuaternario que determinaron la heterogeneidad y el desarrollo del relieve; entre estas heterogeneidades se encuentran: llanuras, colinas y mesetas estratificadas; en general las cotas mínimas de estos sistemas oscilan entre 50 y 100 metros y en las colinas de 200 a 300 metros sobre el nivel del mar, la dirección predominante de dichos sistemas es de Este-Oeste.

El relieve en la zona del yacimiento es algo ondulado con pequeñas elevaciones en forma de mesetas, localizándose en una de ellas el propio yacimiento con cotas superior de alrededor de 100 m sobre el nivel del mar.

Vegetación

La vegetación predominante en la región es de sabana (Notófilo), en las partes más elevadas predominan los árboles y arbustos de mediana talla aislados, son muy comunes en la zona los Xeromorfos espinosos sobre serpentinitas (cuabal). Hacia las partes llanas, predomina una flora representada fundamentalmente por plantaciones agrícolas (Atlas Nacional de Cuba, 1992). En el área del yacimiento la vegetación es escasa.

Hidrografía

Las características del relieve y el régimen de precipitaciones han favorecido la formación de una red hidrográfica en la que, en la mayoría de los casos, los ríos corren de Sur a Norte; la densidad de la red fluvial en el área es de 1 a 1,5 km/km². Los ríos más importantes que se desarrollan en la región son el Chaparra y el Cacoyogüin, estos generalmente presentan una forma sinuosa y se alimentan directamente de las precipitaciones y de los caudales de sus afluentes (Atlas Nacional de Cuba, 1992).

1.2. Características tectónicas regionales

La actividad tectónica actual del territorio cubano está vinculada a su última etapa de evolución geólogo–tectónica, en la cual permanecen con un grado de actividad significativa los movimientos verticales y horizontales. La génesis de estos movimientos está vinculada con su ubicación en las proximidades de la zona de fallas Bartlett–Caimán, principal estructura tectónica activa, al tiempo que constituye el límite transformante entre las placas caribeña y norteamericana. Por las investigaciones sismotectónicas se comprobó que los movimientos recientes, condicionaron la desarticulación del territorio cubano en un sistema de bloques tectónicos (Figura 4). El yacimiento San Andrés tiene su ubicación en la parte Este del bloque Camagüey.

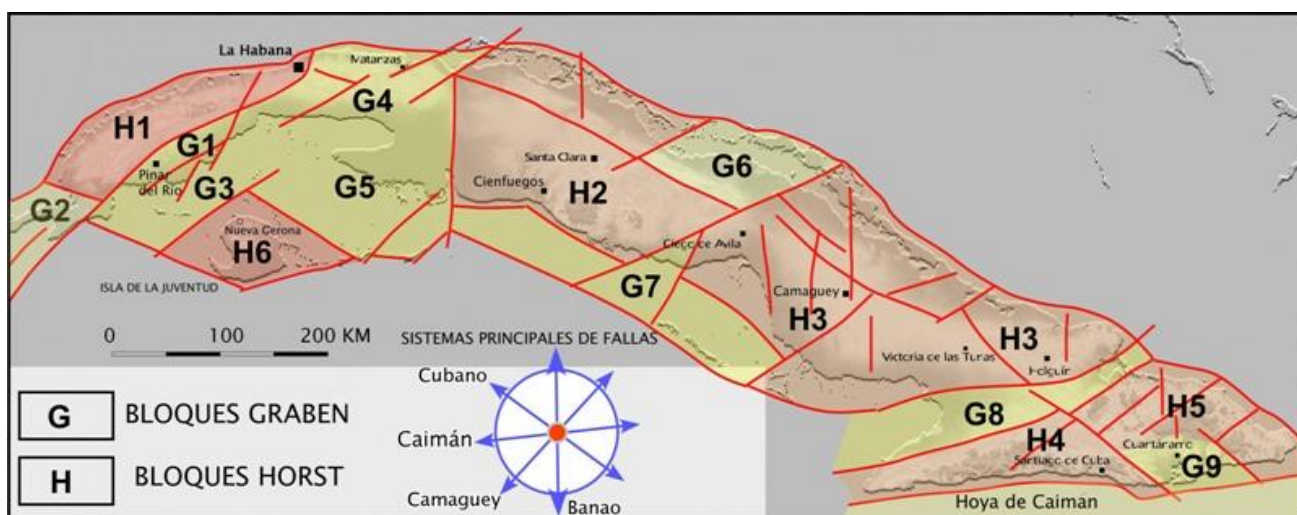


Figura 4. Mapa de bloques neotectónicos de primer orden (Fuente: Iturralde-Vinent, 2012).

El horst Camagüey (H3) presenta depósitos marinos del Eoceno superior y Neógeno-Cuaternario, pero faltan los del Oligoceno y base del Mioceno inferior. El Eoceno superior

coincide con una etapa de subsidencia de corta duración, que se transforma en una etapa de levantamiento general durante el Oligoceno y Mioceno inferior basal. En el inicio del Mioceno comienza un descenso lento acompañado de una transgresión del mar, que llega a cubrir casi toda el área del bloque en el Mioceno medio. Desde entonces comienza el levantamiento relativo del terreno que se continúa hasta hoy. La estructura interna del horst Camagüey está caracterizada por su subdivisión en bloques menores, con distintas tendencias de movimiento (Iturralde-Vinent, 2012).

1.3. Características geológicas regionales

En Cuba se pueden reconocer dos niveles estructurales principales: el sustrato plegado y el neoautóctono. El sustrato plegado está constituido por distintos tipos de terrenos que constituyen fragmentos de la placa de Norteamérica, del Caribe y, posiblemente del pacífico (Figura 5). Estos terrenos son tanto de naturaleza continental como oceánica e incluyen rocas que se datan desde el Neoproterozoico hasta el Eoceno superior, en la zona de estudio está representado por las Asociaciones Estructuro Formacionales Remedios y Zaza. El neoautóctono está representado por las rocas y estructuras originadas a partir del Eoceno superior, que se desarrollan básicamente en el mismo lugar que hoy ocupa el territorio de Cuba, formando parte del margen pasivo meridional de la placa norteamericana (Iturralde-Vinent, 1998).

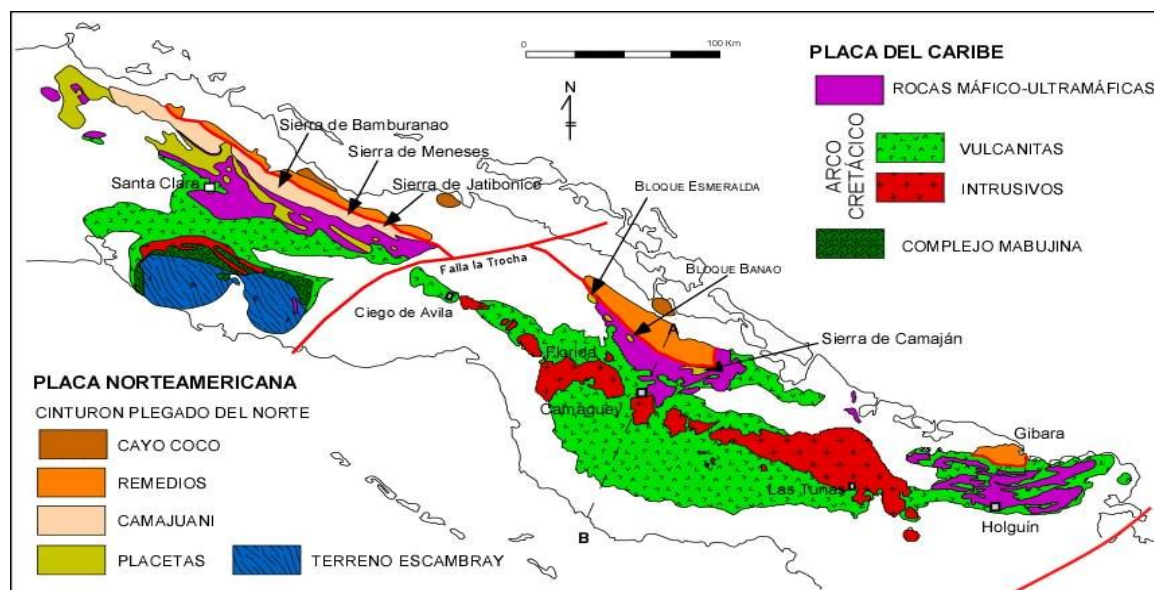


Figura 5. Constitución del sustrato plegado en el centro cubano (Fuente: Iturralde-Vinent, 2012).

1.3.1. Asociación Estructuro Formacional Auras (Zaza)

En la región de Holguín esta zona está constituida por un melange integrado por franjas alargadas sublatitudinales de las formaciones del arco insular volcánico de Cretácico junto con las secuencias de la asociación ofiolítica. Este melange en la zona de estudio se encuentra cubriendo a la Asociación Estructuro Formacional Camajuaní-Placetas (que aflora en la parte central de la Isla) y al borde meridional de la Asociación Estructuro Formacional Remedios (Kosak, et al., 1988).

Las franjas constituidas por las rocas del arco insular, por su consistencia, generalmente forman valles alargados, mientras que las ultrabasitas forman elevaciones alargadas sublatitudinales. Muchas veces ocurre que las franjas de vulcanitas están cubiertas por las escamas del manto de ultrabasitas. Dentro del melange, las serpentinitas tectónicas representan las partes más plásticas y el sistema de sus escamas envuelve y empuja en su parte delantera los diferentes niveles de la asociación ofiolítica y las rocas arco-insulares (Kosak, et al., 1988).

Asociación ofiolítica

Los restos de la corteza oceánica forman parte predominante de las masas de la melange alóctona, mezclada con las formaciones del arco insular volcánico (Kosak, et al., 1988). Según observaciones realizadas, sobre la base de las variedades de rocas que se encuentran en el melange se puede reconstruir la asociación completa reconociéndose los siguientes complejos litológicos: complejo peridotítico (tectonitas), complejo transicional, complejo cumulativo, diques de diabasas y complejo efusivo-sedimentario.

Complejo peridotítico (tectonitas)

Harzburgitas, en menor grado websteritas y lherzolitas, con bolsones aislados de dunitas, todas serpentinizadas. Raros diques de gabroides. Ocasionalmente cromititas podiformes. Estas rocas están usualmente muy deformadas y formando cuerpos potentes que afloran extensamente (Iturralde-Vinent, 1998).

Complejo transicional

Harzburgitas, lherzolitas y websteritas con bolsones y bandas duníticas, todas serpentinizadas, a veces con cromititas podiformes. Gabroides como cuerpos y diques. Diques aislados de plagiogranitos. En ocasiones se observan complejos haces

entrecruzados de diques zonados de plagioclasitas, gabroides y pegmatitas impregnando una masa de serpentinitas brechosas, probables representantes de antiguas cámaras magmáticas colapsadas. El complejo transicional aflora más limitadamente que el anterior y está mejor documentado en Holguín (Iturralde-Vinent, 1998), localizándose hacia la parte meridional del complejo (Pentelenyi y Garcés, 1988).

Complejo Cumulativo

Cúmulos máficos (gabros olivínicos, noritas, troctolitas y anortositas) y ultramáficos (lherzolitas, websteritas, harzburgitas y raras dunitas), todos serpentinizados. Ocasionales cuerpos podiformes y venas cortantes de cromititas. Diques de gabroides, plagioclasitas y plagiogranitos. En la parte superior de la sección puede aparecer un cuerpo potente de gabros isotrópicos. Los cúmulos máficos están presentes en la mayoría de los macizos de ofiolitas, pero están mejor documentados en Santa Clara, Camagüey, Holguín y Mayarí-Baracoa (Iturralde-Vinent, 1998). En la región de Holguín este complejo se localiza hacia la franja ofiolítica meridional y en las áreas noroccidentales (Pentelenyi y Garcés, 1988).

Diques de diabasas

Diques de diabasas, gabro-diabasas y doleritas, aislados o en haces poco densos, emplazados entre los complejos transicional y cumulativo, en menor grado en el complejo peridotítico. Raramente masas de diques paralelos entre basaltos (Furrazola y Núñez, 1997). Según el Pentelenyi y Garcés (1988) en la región de Holguín el sistema de diques de doleritas con su típico desarrollo generalmente no se encuentra en afloramientos. Sin embargo en las franjas de melange o en los olistostromas de la región, en forma de bloques de varias dimensiones, a veces como componentes predominantes, aparecen rocas, que muestran la alternancia característica de microgabro a dolerita o de dolerita a basalto-dolerita en zonas de espesores de unos decímetros hasta metros.

Complejo efusivo-sedimentario

Diabasas, basaltos afíricos, subafíricos y variolíticos, a menudo con almohadillas, intercalados con capas de hialoclastitas, silicitas, radiolaritas, lutitas tufíticas y raras calizas (Furrazola y Núñez, 1997). Según los resultados del levantamiento geológico realizado por la brigada cubano-húngara en 1988 este complejo aflora en la región holguinera como la formación Santa Lucía, que según el Léxico Estratigráfico de Cuba del 2013 se renombra como formación Bariay.

La formación Bariay (bry) está constituida por basaltos afíricos con intercalaciones de silicitas y calizas, limolitas, basalto-doleritas, y microgabros. En muchas partes, los basaltos han sufrido un “metamorfismo hidrotermal”, con un desarrollo global de las facies zeolíticas y, en partes, de esquistos verdes. Las alteraciones acompañantes demuestran una zonalidad (silicificación con vetas de cuarzo, alteración completa a illita-hidrómica-caolinita y en otras zonas esmectitas-cloritas). Esta formación se depositó entre el Jurásico superior y el Cretácico inferior (Neocomiano) y tiene un espesor entre 800 y 1000 metros (Colectivo de autores, 2013).

Formaciones del arco volcánico

El arco insular volcánico del Cretácico se desarrolló a partir del piso Aptiano hasta la parte baja del piso Campaniano, formando un complejo estratovolcánico de composición heterogénea y de estructura complicada con discordancias internas. Su espesor completo en las cercanías de los centros volcánicos mayores pudo alcanzar los 4000 metros (Kosak, et al., 1988).

La reconstrucción del arco insular volcánico se hace difícil por el intenso tectonismo, denudación y su mala aflorabilidad. Según Kosak, et al. (1988) en la región de estudio el arco volcánico se han separado dos grandes formaciones vulcanógena y vulcanógena-sedimentarias: la Fm. Iberia (ib) de composición básica-media y la formación Loma Blanca (lb) de composición media-ácida.

En el desarrollo del arco insular volcánico existen algunas tendencias generales: disminución del magmatismo básico, aumento del carácter medio-ácido y junto con la formación de complejos volcánicos, el aumento de la intensidad en la sedimentación y energía del relieve, así como la profundidad del agua, aunque en algunos lugares, según datos radiométricos se observa que el vulcanismo ácido aparece casi junto con el vulcanismo básico (Kosak, et al., 1988).

Fm. Iberia (ib)

Esta formación se encuentra ampliamente propagada en la zona de estudio, su espesor oscila entre los 1000 y los 1200 metros. Litológicamente está representada por lavas andesíticas, andesito-diabásicas y basálticas, diques diabásicos y basálticos, tobas, aglomerados básicos y medios, lavas y brechas andesito-basálticas, conglomerados, areniscas, calizas y margas. Las lavas y los diques forman cuerpos lenticulares de diversos

tamaños, presentando los cuerpos de lavas espesores entre 3 y 40 metros. Las rocas piroclásticas, representadas por las tobas y los aglomerados básicos y medios son de color gris verdoso, así como las lavas y brechas andesito-basálticas. Las rocas terrígenas están constituidas por conglomerados grises y gris verdoso, con fragmentos subangulares y redondeados, de tamaños entre 1 y 70 milímetros, con cemento carbonatado y por areniscas generalmente tobáceas de colores gris y gris verdoso, de grano medio a grueso y bien estratificadas, que se intercalan con los conglomerados formando capas entre 10 y 20 centímetros. Las calizas sonaporcelanadas y compactas de color gris claro y verdoso, formando intercalaciones lenticulares bien estratificadas en paquetes de espesores entre 5 y 10 metros. La parte vulcanógena representa el 95 % de la secuencia, y el 5 % restante corresponde a la parte terrígena (Colectivo de autores, 2013).

Fm. Loma Blanca (lb)

Esta formación aparece en la zona de estudio al igual que la Fm. Iberia, pero ocupa un área menor. Está constituida por tobas y tufitas andesíticas, andesito-dacíticas, riodacíticas y riolíticas. Su mejor afloramiento se encuentra al sur del poblado de San Andrés en los alrededores de Loma Blanca. Además de las piroclastitas en la constitución de la Fm. Loma Blanca aparecen los sedimentos vulcanomícticos y carbonatados.

Según la posición estratigráfica y el vulcanismo riolítico presente en la fase más joven del arco insular volcánico del piso Campaniano posiblemente las intrusiones pequeñas de dioritas porfiríticas cuarcíferas, dacitas subvolcánicas y riolitas, ricos en Na y pobre en K, estén asociada al magmatismo de la Fm. Loma Blanca (Kosak, et al., 1988).

Cobertura del Arco insular volcánico

Según Kosak, et al. (1988) la extinción gradual del megarritmo magmático de la Asociación Estructuro Formacional Auras es consecuencia de la colisión con el borde del continente norteamericano. La obducción sobre este borde, después del empuje gradual del arco, son sucesos que se reflejan en el carácter de los sedimentos de la cobertura, sobre la base de estos podemos diferenciar formaciones terrígenas y terrígeno-carbonatadas, que por su posición transicional, en cierto sentido forma parte de la cobertura del arco volcánico extinto. La cobertura del arco insular volcánico está representada en esta zona por las formaciones La Jíquima, Haticos, Tinajita y Vigía.

Fm. La Jíquima (lj)

Se depositó durante el Cretácico superior (Campaniano-Maastrichtiano superior, parte alta) en aguas de mediana profundidad con condiciones reductoras que posibilitaron la conservación de restos de plantas carbonizadas. Su litología se caracteriza por la presencia de semiciclos donde las rocas transicionan gradualmente de granulometría gruesa a fina. Está representada por conglomerados polimícticos, areniscas, limolitas, lutitas, margas y calizas arcillosas, las cuales se repiten rítmicamente en el corte de la unidad, aunque puede haber ausencia de algunas de estas litologías. En ocasiones los paquetes de conglomerados pueden observarse de forma aislada. La estratificación puede ser desde muy gruesa y masiva, a media y fina, por lo que en esta unidad están presentes los flysch de tipo proximal, medial y distal (Colectivo de autores, 2013).

Fm. Haticos (ht)

El Léxico Estratigráfico de Cuba del año 2013 considera a los Haticos como un olistostroma de edad Paleoceno superior. Su desarrollo se encuentra limitado a la provincia de Holguín, tiene un espesor que oscila entre los 200 y los 800 metros y su ambiente deposicional fue una cuenca marina profunda, ubicada en el frente de los mantos de sobrecoimiento de rocas de arco volcánico y ofiolitas. Su origen es tectóno-gravitacional. Esta secuencia olistostrómica de edad Paleoceno superior está constituida, en su mayor parte, por bloques de serpentinitas, gabro, microgabro, gabro-diabasa, diabasa, granodiorita, jasperoides y rocas magmáticas y tufogénicas en general. El tamaño de los bloques y fragmentos oscila entre unos pocos centímetros y hasta 4 m. La matriz es volcanomíctica o tufogénica, presentándose intercalaciones de tobas, con fragmentos aislados de similar composición que el resto de la secuencia (Colectivo de autores, 2013).

Fm. Tinajita (tn)

Se desarrolla en las alturas de Maniabón, al E-SE del pueblo de Gibara y al E-NE de la ciudad de Holguín con un espesor de 30 a 50 metros. Se compone de calizas biodetríticas o microcristalinas, de color gris a gris claro, de facies retroarrecifales, masivas o en capas gruesas, compactas. Rara vez contiene partes margosas o dolomitizadas, aparece cortada por numerosas venas de calcita. Se encuentran fuertemente carsificadas con abundantes cavernas. En ocasiones, se aprecian margas, margas calcáreas y calcarenitas en la base de

las calizas. Su deposición ocurrió en el Cretácico superior (Campaniano-Maastrichtiano inferior) en un ambiente nerítico en parte arrecifal (Colectivo de autores, 2013).

Fm. Vigía (vg)

Esta formación aflora en forma de franjas alargadas, discontinuas, al Sur y al Este del macizo serpentinitico de la provincia de Holguín. Se depositó en un ambiente nerítico, con un régimen dinámico de las aguas muy inestable entre el Paleoceno superior y el Eoceno medio. Su espesor oscila entre 200 y 300 metros. Se compone de intercalaciones de areniscas polimícticas bien estratificadas de granos gruesos, y de medianos a finos; limonitas, calizas arcillosas y margas de color verde grisáceo, dispuestas en capas de 3 a 5 centímetros de espesor. Más arriba, en la secuencia, aparecen tobas riodacíticas blancas y grises, así como tufitas intercaladas con margas y calizas arcillosas. Estas tobas tienen su origen en una actividad volcánica lejana relacionada con el vulcanismo del Paleógeno en lo que hoy es la Sierra Maestra.

1.3.2. Asociación Estructuro Formacional Remedios

La zona Remedios es una faja de rocas deformadas que a menudo está sobreyacida por mantos alóctonos provenientes del SW. Su estratigrafía es semejante a la de la zona Cayo Coco en su sección del Cretácico inferior y más antigua, donde se identifican las formaciones Cayo Coco y Perros (Iturralde-Vinent, 2012).

En el Léxico Estratigráfico de Cuba del año 2013 se reconoce el Grupo Remedio, que abarca las formaciones Gibara, Palenque, Perros, Purio y Vilató. Este grupo se desarrolla en forma de bandas discontinuas y alargadas al norte de Cuba, en las provincias de Villa Clara, Sancti Spíritus, Ciego de Ávila, Camagüey y Holguín. La edad del grupo va desde el Jurásico superior (Tithoniano) al Cretácico superior (Maastrichtiano) y su espesor oscila entre 800 y 2000 metros (Colectivo de autores, 2013). En la región de Holguín la zona Remedios está representada por la formación Gibara.

Formación Gibara (gb)

Se desarrolla al Norte de la provincia de Holguín, en ella se presentan calizas macizas, compactas, organodetríticas, de grano medio, grueso, fosilíferas, de color amarillo-grisáceo, gris-blancuzco; dolomitas; calizas dolomitizadas, macizas, de color gris, gris rosado y gris blancuzco; calizas micríticas de color blanco amarillento. Las rocas de esta unidad generalmente están muy plegadas y fracturadas. Las calizas están algunas veces

fuertemente carsificadas. Su deposición ocurrió a partir del Cretácico inferior (Aptiano) hasta el Cretácico superior (Maastrichtiano inferior) en un ambiente variable, desde bancos de aguas someras hasta cuenca de aguas profundas, pelágicas. Su espesor oscila entre 1 500 y 2 000 metros, aunque algunos autores plantean que puede sobrepasar los 6000 metros (Colectivo de autores, 2013).

1.3.3. Cobertura Neoautóctona

Al concluir la orogénesis con la fase cubana, quedó consolidado un sustrato de la corteza continental recién formada y la isla de Cuba continuó su desarrollo según las reglas del desarrollo de las plataformas. La denudación comenzó acompañada de movimientos tectónicos verticales, a consecuencia de estos procesos nuestro territorio se fracturó en bloques, similar a un mosaico. Los diferentes bloques se hundieron o se levantaron y después se erosionaron, bajo los sedimentos neoautóctonos aparecen niveles del sustrato plegado de las tobas ácidas y tufitas algo arcillosas del paleógeno, que en algunas partes se redepositaron formando lentes de arcillas plásticas amarillentas en el basamento de las formaciones más jóvenes (Kosak, et al., 1988). El intervalo desde el Eoceno inferior-medio se caracteriza por una tranquilidad tectónica. Se forman sedimentos neríticos, litorales, lagunares, con el aporte de tobas cineríticas de la actividad volcánica de la Sierra Maestra (Kosak, et al., 1988).

En la región holguinera el neoautóctono está representado por el Grupo Nipe que abarca las formaciones Báguanos, Bitirí, Camazán, Júcaro y Río Jagüeyes, de las que, por su cercanía al área de estudio, se analizan Río Jagüeyes y Camazán.

Fm. Río Jagüeyes (rj)

Aflora al Sur de las bahías de Nipe y Levisa y se extiende en una faja irregular y discontinua que se proyecta hacia el Sur hasta el valle del río Cauto, en la provincia de Holguín. Su ambiente deposicional va desde una cuenca restringida hasta la zona sublitoral, incluyendo su borde, tiene un espesor de 150 metros. Esta formación tiene una edad del Mioceno inferior, parte alta al Mioceno superior, parte baja. Su litología está representada por limolitas, areniscas, gravelitas polimícticas de matriz arenácea a arcillosa, con cemento carbonatado escaso o ausente y margas arcillosas y arenáceas, fosilíferas, alternando con calizas biodetríticas, calizas biohémicas, calcarenitas y arcillas. Las arcillas y limolitas

pueden ser yesíferas. Predominan los colores crema, grisáceo y marrón (Colectivo de autores, 2013).

Fm. Camazán (cz)

Se desarrolla en las partes central, meridional y occidental de la provincia de Holguín y, en menor grado, en Granma (parte NE) y Santiago de Cuba (parte NW) y, probablemente, en Las Tunas. Su deposición ocurrió a partir del Oligoceno superior hasta el Mioceno inferior, una parte en una zona sublitoral, con facies arrecifales y retroarrecifales y otra en un ambiente con circulación restringida. Se compone de calizas coralino-algáceas (biolititas); calizas biodetríticas, a veces arcillosas, formando capas de 15 a 30 centímetros de espesor, con macroforaminíferos apreciables a simple vista; calcarenitas, calciruditas, limolitas calcáreas, con intercalaciones de margas y arcillas, ocasionalmente yesíferas. Coloración variable, amarillo, crema, marrón y gris. Tiene un espesor entre 440 y 800 metros, según datos de pozos. (Colectivo de autores, 2013).

1.4. Características geológicas del yacimiento San Andrés

El yacimiento de Zeolitas San Andrés se desarrolla en una secuencia de rocas vulcanógeno-sedimentarias de edad cretácica, dentro de los límites de la formación Loma Blanca (Figura 6). Estructuralmente el yacimiento tiene una forma estrecha y alargada con dirección NE–SW a modo de escama tectónica con una extensión de algo más de 1 km, limitada por fallas. Las condiciones hidrogeológicas del yacimiento son de complejidad media, debido a la presencia de dos acuíferos: uno relacionado con las grietas y el otro relacionado con las fallas, ambos no confinados. La región es atravesada por numerosas fallas que afectan mayormente el piso estructural inferior, se observan dos sistemas fundamentales con direcciones NW-SE y NE-SW (Rizo et al, 1988).

Las variedades litológicas presentes en el yacimiento son: tobas vitroclásticas, tobas vitrocristaloclásticas, calizas tobáceas con intercalaciones de tufitas, areniscas tobáceas, calizas biomórficas silicificadas y andesita-basalto. De manera general predominan las tobas vitroclásticas de composición andesito-dacítica, grano fino y color verde claro, en ocasiones algo amarillentas. Las tobas presentan diferentes grados de zeolitización y espesores variables al igual que el buzamiento (Rizo et al, 1988).

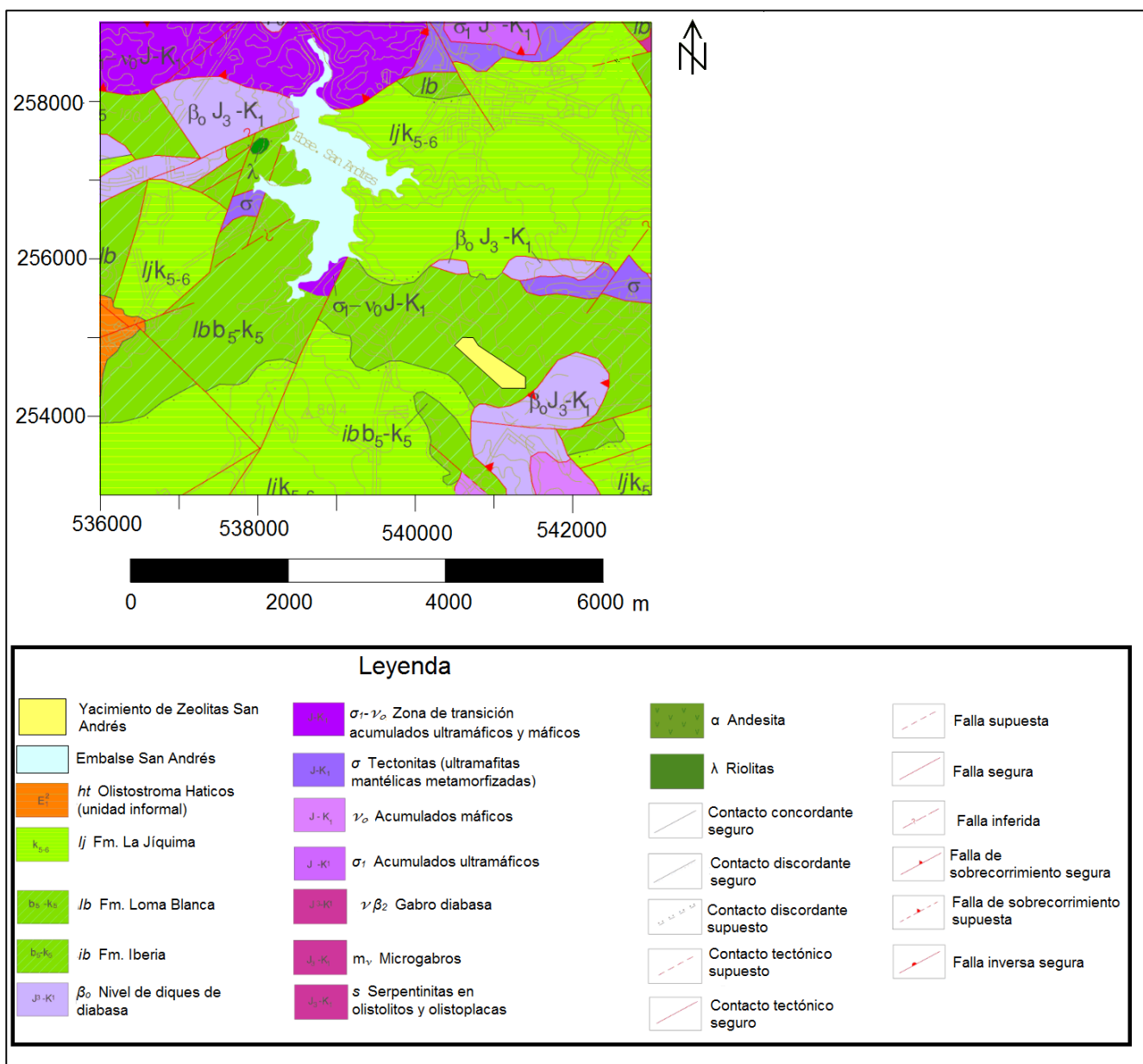


Figura 6. Esquema geológico del área de estudio (Adaptado del mapa geológico de la República de Cuba 1: 100 000. IGP, 2011. Hoja 4978, Holguín).

Las tobas zeolitizadas están compuestas por mezclas de más de dos tipos de minerales de zeolitas entre estos están la clinoptilolita-heulandita, mordenita y raramente la desmina, como minerales acompañantes están el cuarzo, la calcita, la montmorillonita y los feldespatos (Rizo et al., 1988). La concentración promedio de minerales del grupo de las zeolitas en el depósito es del 75 %, lo que denota su excelente calidad (Rizo, 2009).

Capítulo 2. Materiales y métodos

Las propiedades puzolánicas de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación fueron valoradas mediante el índice de actividad resistente (IAR); para su determinación fue necesario realizar ensayos de resistencia a la compresión a morteros elaborados con aglomerantes a base de cemento portland – toba zeolitizada – caliza, donde fueron empleadas las variantes con toba zeolitizada natural y calcinada a 350, 500 y 650°C. Previo a la elaboración de los morteros se realizaron operaciones de muestreo, molienda y calcinación de las materias primas y se practicaron ensayos granulométricos, químicos y mineralógicos a las tobas zeolitizadas; estas operaciones y los materiales, equipos y utensilios empleados en cada una de ellas son expuestas en este capítulo.

2.1. Selección de las materias primas y toma de muestras

Para la confección de los morteros, las materias primas empleadas fueron: toba zeolitizada, caliza, arena sílice y cemento portland P-35 de producción nacional.

La toba zeolitizada se tomó en el punto de empaque de la Planta de Procesamiento de Zeolitas de la UEB Geominera Holguín. El muestreo se le practicó a sacos de 50 kg del producto comercial de granulometría menor a 0,8 mm mientras eran llevados mediante un transportador de banda desde el punto de llenado hasta la máquina encargada de sellarlos. Fueron tomadas un total de 10 muestras parciales de aproximadamente 0,5 kg cada una, dejándose de muestrear cuatro sacos entre una muestra y otra.

La caliza empleada para la elaboración de los morteros se obtuvo del árido calcáreo que produce el molino 200 Mil del municipio Gibara. El contenido de CaCO_3 de esta caliza está por encima del 90 %, mientras que el de SiO_2 no supera el 0,5 %; la suma de los contenidos de magnesio, sílice y aluminio no excede el 3 % (Mora, 2009).

2.2. Procesamiento de las muestras

Las muestras parciales de toba zeolitizada fueron reunidas para conformar una muestra conjunta de 5 kg; para garantizar la homogeneidad, la muestra se vertió sobre una lona cuadrada de lado igual a 50 cm y se procedió a realizar el mezclado levantando la lona por dos esquinas adyacentes, de manera tal que la muestra se deslizara por su superficie sin derramarse, este proceso se repitió para los otros tres pares de esquinas; luego la muestra

fue extendida sobre la superficie de la lona y se procedió a mezclar nuevamente, proceso que fue repetido un total de tres veces.

Tras producirse la última operación de mezclado, la muestra fue extendida sobre la superficie de la lona cuidando que cubriera la mayor parte del área con una capa de un espesor prácticamente constante; auxiliándose de una tablilla de madera de un metro de longitud, la muestra fue cuarteada mediante el trazado de las diagonales del cuadrado constituido por la lona; luego la muestra fue reducida a la mitad retirando de encima de la lona dos porciones no adyacentes. Este ciclo de mezclado, cuarteo y reducción fue repetido nuevamente quedando la muestra reducida a una masa de 1,25 kg. Tras estos dos ciclos de reducción la muestra de toba zeolita fue nuevamente homogenizada, cuarteada y separada en cuatro porciones de 312,5 g.

2.3. Activación térmica de la toba zeolitizada

Tres de las cuatro porciones de toba zeolitizada, obtenidas tras la reducción de la muestra, fueron sometidas a tratamiento térmico a las temperaturas de 350°C, 500°C y 650°C, mientras que la otra se conservó en estado natural para ser utilizada de esta manera en la elaboración de los morteros. La selección de estas temperaturas se basó lo expuesto en el acápite *Activación térmica de las tobas zeolitizadas para su utilización como puzolanas* perteneciente al Estado del arte de esta investigación y en las experiencias de trabajos precedentes como el de Guerra (2015).

Para la calcinación fue utilizado un horno eléctrico J.P Selecta 2000 de fabricación española (Figura 7). En cada tanda de calcinación se utilizó un recipiente de acero con capacidad para 400 gramos de toba zeolitizada. Primeramente se esperó hasta que el horno alcanzara la temperatura de activación deseada y luego se introdujeron las muestras por un período de una hora. Al retirar las muestras, estas fueron esparcidas sobre una superficie metálica para que alcanzaran rápidamente la temperatura ambiente y así lograr que se conserven los cambios estructurales logrados durante la calcinación.



Figura 7. Horno eléctrico J.P Selecta 2000 utilizado para calcinar las tobas zeolitizadas.

2.4. Molienda de las muestras

La relación que existe entre el área superficial de un material y su volumen se denomina superficie específica; para el caso de los materiales puzolánicos, esta relación ofrece una medida del área con que estos cuentan para interactuar con la portlandita durante la reacción puzolánica. La superficie específica de un material está íntimamente relacionada con su tamaño de partícula; generalmente puede afirmarse que a menor tamaño de partícula se cuenta con mayor superficie específica y con mayores facilidades para la ocurrencia de la reacción puzolánica. Con el fin de maximizar estas posibilidades, la toba zeolitizada y caliza fueron molidas, utilizándose para ello un molino de bolas de 19,5 cm de diámetro interior y 24 cm de longitud (Figura 8) localizado en la planta de beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico.



Figura 8. Molino de bolas utilizado para moler los materiales.

2.5. Caracterización de las materias primas

2.5.1. Determinación de la composición química

La composición química cualitativa y cuantitativa de las muestras de tobas utilizadas en los experimentos, se realizó por el método de fluorescencia de rayos X (FRX) en un equipo de marca Axios, previamente calibrado y bajo una atmósfera de vacío (Figura 9).

El método consiste en hacer incidir un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al pasar al estado normal emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento, y la intensidad de su fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento en la muestra; el espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad. Los contenidos de los diferentes elementos químicos fueron calculados mediante la resolución de un sistema de ecuaciones, a través de la correspondencia con una serie de muestras patrones con las que se calibra el equipo.



Figura 9. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X marca Axios.

2.5.2. Caracterización mineralógica

El análisis mineralógico se realizó por el método de Difracción de Rayos X (DRX), cuyas mediciones se realizaron en un difractómetro de rayos X Phillips X'Pert (Figura 10). El mismo consiste en hacer incidir un haz de rayos X sobre la muestra, y mediante un detector montado en un goniómetro se mide el ángulo donde aparecen los rayos difractados, así como la intensidad de los mismos, basado en la ley de Bragg.



Figura 10. Difractómetro Philips X'Pert utilizado para determinar la composición mineralógica.

2.5.3. Caracterización granulométrica

Los análisis granulométricos de la toba zeolitizada natural y calcinada, del cemento portland y de la caliza fueron realizados en un analizador de tamaño de partículas HORIBA LA – 910 de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, Moa Nickel S.A, quedando todos los datos registrados en el sistema instalado en la computadora acoplada al analizador; este análisis permite obtener la curva granulométrica de cada muestras analizadas y el área superficial, lo que proporciona una medida de la superficie disponible que tiene cada material para participar en las reacciones puzolánica y de hidratación del cemento.

2.6. Preparación de los morteros

El primer paso para la confección de los morteros fue la elaboración de las mezclas aglomerantes, para ello se elaboraron tres mezclas de cemento portland P-35, caliza y toba zeolitizada calcinada a 350°C, 500°C y 650°C y una mezcla similar a las anteriores pero empleando toba zeolitizada natural. Cada mezcla aglomerante se dosificó de manera tal que, en términos de por ciento de la masa del aglomerante, el cemento representara el 50 %, la caliza el 20 % y la toba el 30 % (Tabla 3); esta dosificación de los componentes del aglomerante se seleccionó simulando la que se utiliza para elaborar el cemento de bajo carbono (LC3) desarrollado por investigadores del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central de Las Villas.

Tabla 3. Dosificación de los morteros.

Mortero	Aglomerante						Arena (g)	Agua (ml)	Relación agua/aglomerante
	Cemento (g)	Caliza (g)	Toba Zeolitizada (g)						
			Natural	350°C	500°C	650°C			
TZ-N	225	90	135	-	-	-	1350	270	0,6
TZ-350	225	90	-	135	-	-	1350	270	0,6
TZ-500	225	90	-	-	135	-	1350	270	0,6
TZ-650	225	90	-	-	-	135	1350	270	0,6
Patrón	450	-	-	-	-	-	1350	225	0,5

Obtenidos los aglomerantes, se procedió a la elaboración de los morteros siguiendo lo establecido en la norma cubana NC-TS 527:2011, donde se empleó una parte de aglomerante, tres de arena y el agua necesaria para que la mezcla alcanzara una consistencia adecuada (Tabla 3), además fue elaborado el mortero patrón en el cual el aglomerante estuvo compuesto por un 100 % de cemento portland P-35.

Para lograr la correcta homogenización de los morteros, durante el mezclado de sus componentes se utilizó la mezcladora que se muestra en la figura 11, en la cual se vertió el agua, previamente medida con una probeta graduada, se adicionó el aglomerante y se procedió a mezclar hasta alcanzar la homogeneidad, después se vertió la arena y se mezcló nuevamente.



Figura 11. Mezcladora utilizada para la elaboración de las mezclas.

2.7. Elaboración de las probetas

Cada mortero, incluido el patrón fue dosificado al doble de las cantidades que aparecen en la tabla 3, con lo que fue posible elaborar seis probetas para cada tipo de mezcla aglomerante: tres para determinarles las resistencias mecánicas a los 7 días y tres para determinárselas a los 28, lo que resultó en un total de 30 probetas.



Figura 12. Moldes para las probetas.



Figura 13. Compactadora eléctrica.

Los morteros, una vez mezclados, fueron vertidos en dos capas en los moldes (Figura 12) y compactados con la ayuda del equipo que se muestra en la figura 13. La primera capa, tras ser compactada, permite la expulsión el aire atrapado en la pasta y el ascenso de la humedad y la segunda permite emparejar y enrasar los moldes. Debido a la forma y dimensiones de los moldes las probetas elaboradas tuvieron forma de prismas con dimensiones de 40 mm X 40 mm X 160 mm.

A las probetas se las dejó fraguar y endurecer en los moldes durante 24 horas, tras este tiempo fueron extraídas y colocadas en el área de curado (Figura 14) hasta que alcanzaran las edades correspondientes (7 y 28 días) para realizarles los ensayos de resistencias mecánicas; para el curado, las probetas fueron depositadas en un recipiente con agua, garantizando que quedaran totalmente sumergidas.



Figura 14. Probetas durante el curado.

2.8. Ensayos de resistencias mecánicas

La determinación de la resistencia a la flexotracción y a la compresión de las probetas se llevó a cabo a través de pruebas de morteros con una prensa hidráulica de 10 toneladas de fuerza (Figura 15), el equipo cuenta con dos aditamentos independientes (Figura 16), uno para determinar la flexotracción y otro para la compresión.



Figura 15. Prensa hidráulica utilizada para la determinación de las resistencias mecánicas.

2.8.1. Ensayo para determinar la resistencia a la flexotracción

Para este ensayo fue colocado entre los platos de la prensa el aditamento que se muestra en la figura 16 a; este aditamento cuenta con dos puntos de soporte, separados a una distancia de 100 mm, sobre los que se apoya la probeta y un punto que transmite el esfuerzo de la prensa a la probeta, ubicado a la mitad de la distancia de los puntos de soporte, de

manera tal que descansa sobre la cara superior de la probeta y permanece alineado con su eje transversal.

La carga fue aplicada verticalmente sobre la cara lateral de la probeta incrementándose a una razón de $49 \pm 10 \text{ N/s}$ hasta lograr la rotura de la probeta. El módulo de rotura (R) fue determinado por la ecuación siguiente:

$$R = \frac{6M}{b^3} \quad (IX)$$

Donde: $b = 4 \text{ cm}$, es el lado de la sección cuadrada de la probeta y M es el momento flector, que es calculado por la fórmula:

$$M = \frac{Pl}{4} \quad (X)$$

Donde: P es la carga de rotura aplicada a la probeta, que se mide en kN y $l = 10 \text{ cm}$, es la distancia entre los puntos de soporte.

Sustituyendo a M y a los valores de b y l en la ecuación IX se tiene que:

$$R = 0,234 \cdot P \quad (XI)$$

Mediante la ecuación XI , R se obtuvo en kN/cm^2 , este resultado fue convertido posteriormente a MPa .

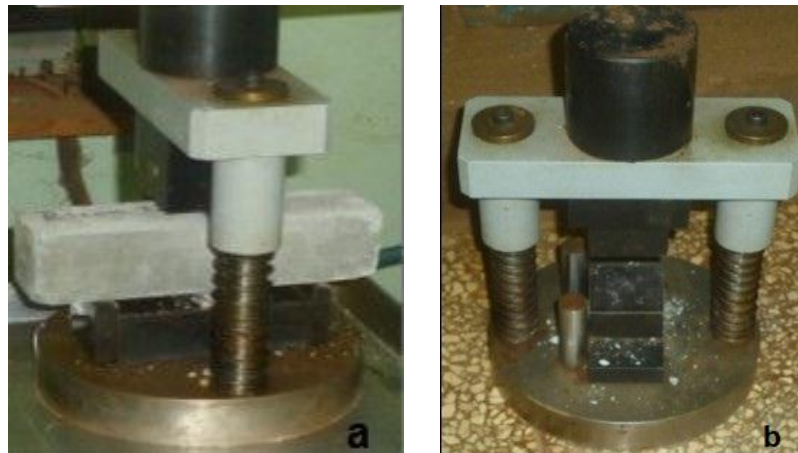


Figura 16. Aditamentos de la prensa hidráulica para medir las resistencias mecánicas: a, para la resistencia a la flexotracción y b, para la resistencia a la compresión.

2.8.2. Ensayo para determinar la resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión se utilizó el aditamento que se muestra en la figura 16 b; este aditamento, a diferencia del empleado para determinar la resistencia a la

flexotracción, solamente cuenta con un punto de soporte para la probeta y un punto para transmitir el esfuerzo de la prensa a la probeta.

La resistencia a la compresión (R) fue calculada mediante la ecuación:

$$R = \frac{P}{S} \quad (XII)$$

Donde: P es la carga aplicada a la probeta y $S = b^2 = 16 \text{ cm}^2$ es la superficie de la probeta sobre la que se aplica la carga.

Una vez obtenida la resistencia a la compresión, esta fue convertida a MPa .

2.9. Determinación de la actividad puzolánica.

La norma cubana NC TS 527:2011 fija el índice de actividad puzolánica como una medida de la reactividad del material puzolánico, y para su determinación establece que la sustitución de cemento por el material puzolánico debe hacerse en un 35 %. En esta investigación a pesar de que se sustituye el 50 % del cemento y son utilizados para ello dos materiales cementicios suplementarios, se decidió utilizar el índice de actividad puzolánica para evaluar la reactividad de la toba zeolitizada y como una medida de la calidad de los morteros.

Para la determinación del índice de actividad puzolánica se tomaron los resultados de los ensayos de compresión simple a los 7 y 28 días, tanto de los morteros con adición como de los morteros de referencia; este método está recogido en la norma norteamericana ASTM C 311 y la norma cubana NC TS 527:2011. El índice fue calculado a según la ecuación:

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

Donde: IAR es el índice de actividad resistente expresado en tanto por ciento, A es el promedio de la resistencia a la compresión de las probetas analizados y B es el promedio de la resistencia a la compresión de las probetas elaboradas con el mortero patrón.

El material analizado es considerado poseedor de propiedades puzolánicas si el IAR toma un valor igual o superior al 75 %.

Capítulo 3. Valoración de los resultados

Los resultados de la determinación del índice de actividad puzolánica de los productos de la calcinación de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés ofrecen una medida de su reactividad y de sus posibles aplicaciones; estos resultados, junto a los de la determinación de las resistencias mecánicas y la caracterización química, mineralógica y granulométrica de las tobas zeolitizadas son expuestos en este capítulo.

3.1. Caracterización de las materias primas

3.1.1. Composición química de la toba zeolitizada

La composición química de las tobas del yacimiento San Andrés, determinada mediante Fluorescencia de rayos X (FRX) se presenta en la tabla 4. 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; en el Anexo 4 se muestran los contenidos de los elementos trazas que presentan en estas tobas. La composición química determinada en esta investigación se corresponde con la obtenida por otros investigadores como Tapia (2013) y Almenares (2011).

Tabla 4. Composición química de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés.

Compuesto químico	Contenido (%)	Compuesto químico	Contenido (%)
SiO ₂	64,29	TiO ₂	0,47
Al ₂ O ₃	12,62	P ₂ O ₅	0,08
MnO	0,05	K ₂ O	1,72
MgO	2,71	Fe ₂ O ₃	2,7
Na ₂ O	1,58	SO ₃	0,06
CaO	5,09	PPI	8,63

Según su composición y localización en el diagrama SiO₂ vs Na₂O+K₂O las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés se clasifican como rocas de composición dacítica (Figura 17) y según las investigaciones Ramachandran (1995) y Snellings (2011) las rocas que presentan esta composición son propensas a presentar buena actividad puzolánica.

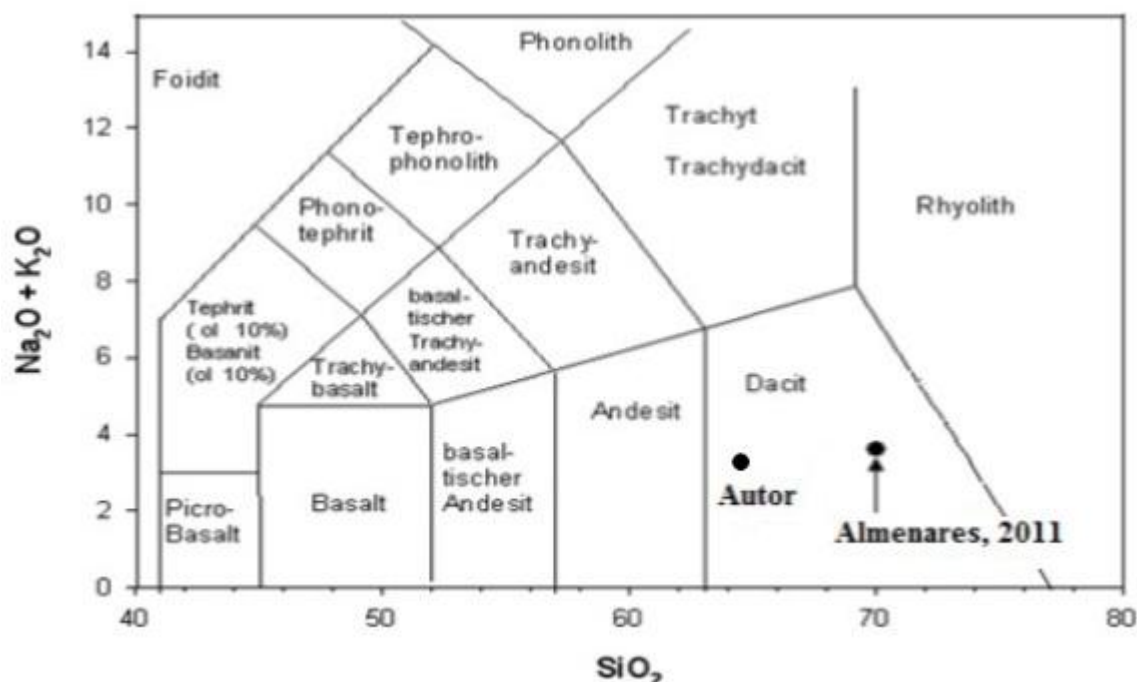


Figura 17. Ubicación de las tobas de San Andrés en el gráfico SiO_2 vs $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$.

Como se puede observar la suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 supera el 79 %, que comparado con el 70 % que establece como mínimo la norma NC TS 528:2011 para las puzolanas naturales en Cuba, es un indicador preliminar de reactividad de estas tobas. Estas tobas presentan un carácter ácido, con un contenido de SiO_2 alrededor de 65 %. La concentración del 5,09 % de CaO puede estar dada por la presencia de fases minerales de zeolitas ricas en calcio, además de plagioclasas cálcicas y calcita. En el diagrama ternario de los materiales cementicios suplementarios (MSC) confeccionado por Snellings (2011), estas tobas se ubican dentro del campo de las puzolanas de origen volcánico (Figura 18).

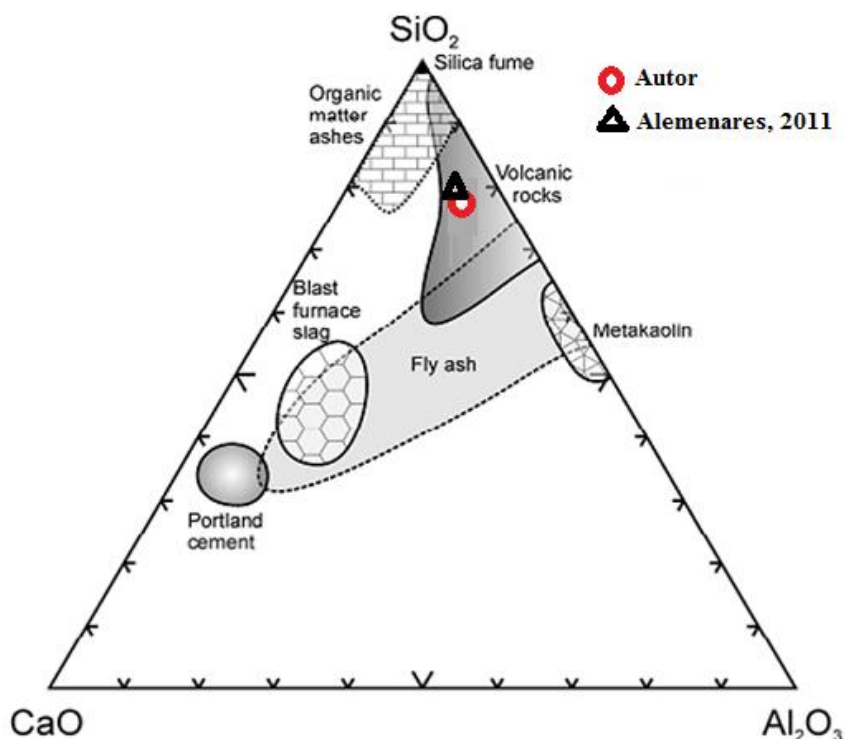


Figura 18. Diagrama ternario CaO-SiO₂-Al₂O₃ que agrupa la composición química (%) de los principales MCS (Fuente: Snellings (2011), modificado por el autor).

3.1.2. Composición mineralógica de la toba zeolitizada

En la tabla 5 se muestran los porcentajes de la matriz vítrea más el contenido de zeolita, así como el contenido de arcilla y las principales fases cristalinas presentes en estas tobas. Se observa que las tobas de San Andrés poseen buenas características reflejadas en su alto contenido de minerales del grupo de las zeolitas y fase vítrea y su bajo contenido de minerales arcillosos.

Tabla 5. Composición mineralógica de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés.

Matriz vítrea + fases de zeolitas (%)	Contenido de arcilla (%)	Principales fases cristalinas
56 – 92	8 – 10	Clinoptilolita-heulandita, mordenita, cuarzo, montmorillonita, hematita, calcita, albita y anortita.

Los componentes cristalinos mayoritarios, están determinados principalmente por clinoptilolita-heulandita y mordenita; en menores cantidades se encuentra cuarzo, montmorillonita, hematita, calcita, anortita y albita, lo que corrobora los resultados de los

análisis químicos. Se ha reportado que las fases cristalinas no poseen actividad puzolánica (Odler, 2000), sin embargo, aquellas que se encuentran en un estado metaestable pueden presentar una actividad puzolánica moderada (Valdez, et al., 2004), como es el caso de la albita y la anortita las cuales pueden presentarse con cierta alteración. Rabilero (2005), plantea que es importante la posibilidad, por lo menos teóricamente, de que algunos feldespatos alcalinos de muy baja cristalización puedan presentar determinada actividad puzolánica, acentuada por una molienda intensa y efectiva que dé lugar a un producto de elevada superficie específica. La presencia de calcita puede favorecer la hidráulicidad de las muestras.

Dentro de los minerales de las tobas zeolitizadas, las fases de mayor potencial de reactividad, además del vidrio volcánico, son las fases zeolíticas, esto está dado por su estructura cristalina muy abierta y/o marcadamente desordenada, con una elevada porosidad interna (Rabilero, 2005).

3.1.3. Caracterización granulométrica

A partir de los análisis granulométricos fueron construidas las curvas de distribución granulométrica para cada material (Figura 19). El material más fino resultó ser la caliza, seguida por las tobas zeolitizadas calcinadas a 650, 350 y 500°C y por la toba zeolitizada natural como el material más grueso, con valores de tamaño medio de partícula de 28,21; 55,92; 57,16; 62,19 y 80,16 μm respectivamente.

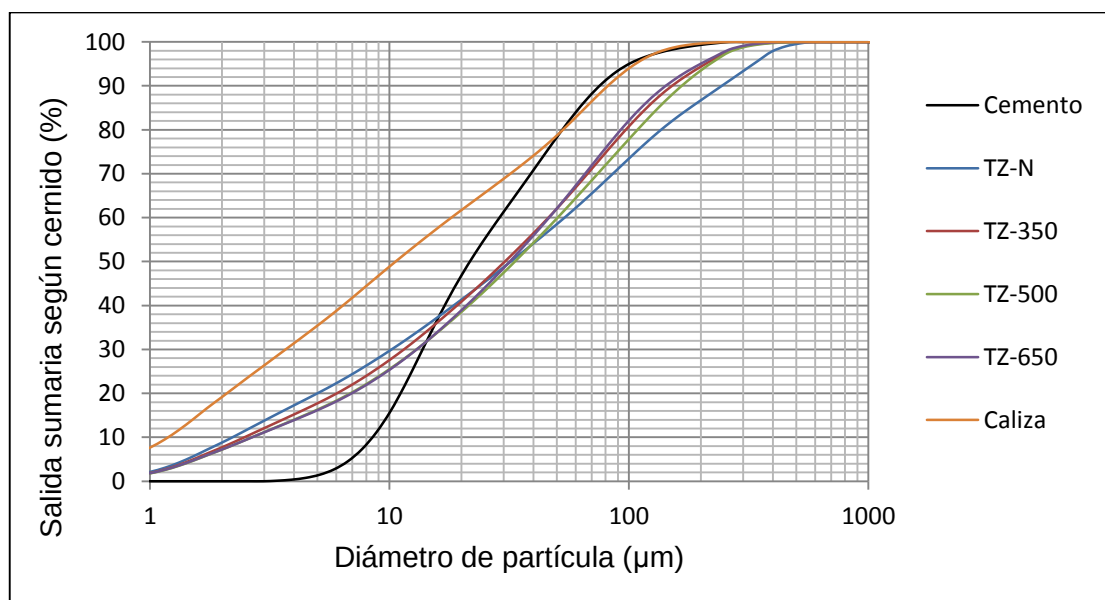


Figura 19. Curvas granulométricas de los materiales.

El analizador HORIBA LA-910 también determinó la superficie específica de los materiales; con resultados de 17217; 8535,9; 7923; 7435,3 y 7499,4 cm^2/cm^3 para la caliza, la toba zeolitizada natural, y la toba zeolitizada calcinada a 350, 500 y 650°C respectivamente. La figura 20 muestra que a medida que disminuye el tamaño de partícula de los materiales calcinados se observa un aumento de su superficie específica, mostrando la relación inversa que existe entre estas variables; para el caso de la toba zeolitizada natural esta tendencia no se cumple, la causa de ello pudiera deberse a que como este material no ha recibido tratamiento térmico la morfología de sus granos minerales difiere de la de las partículas de las tobas zeolitizadas calcinadas.

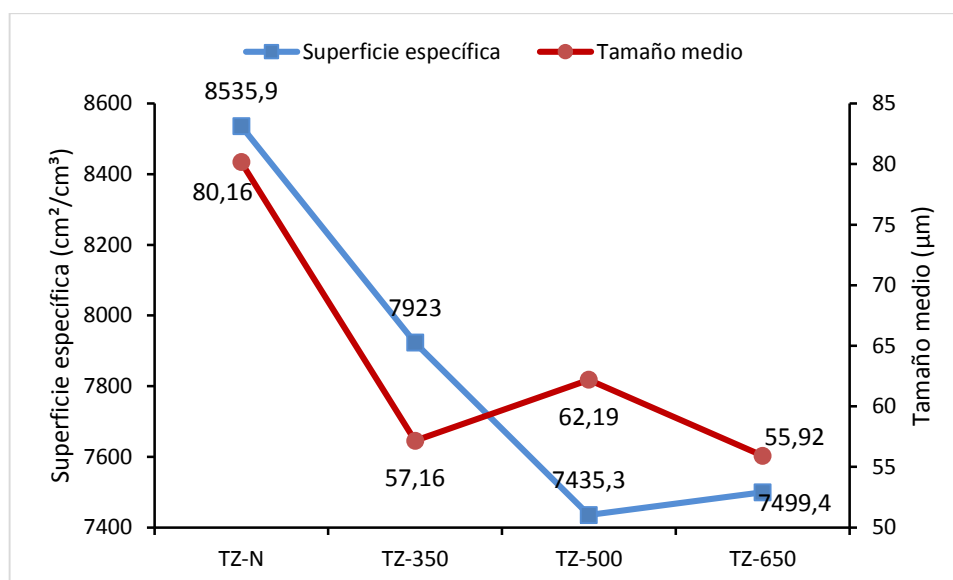


Figura 20. Relación entre el tamaño de partícula y la superficie específica de los productos de la calcinación de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés.

3.2. Resistencias mecánicas de los morteros

Los resultados de las pruebas de las resistencias mecánicas son de gran importancia para las posibles aplicaciones y control de la calidad de cementos, morteros y hormigones, principalmente la resistencia a la compresión, la cual puede ser utilizada como criterio principal para seleccionar el tipo de mortero, ya que es relativamente fácil de medir y comúnmente se relaciona con otras propiedades, como la adherencia y la absorción (Almenares, 2011). A continuación son presentados los resultados de los ensayos de resistencia a la flexotracción y a la compresión realizados a los morteros.

3.2.1. Resistencia a la flexotracción

Las resistencias a la flexotracción de los morteros analizados, hasta las edades en que se practicaron los ensayos, nunca llegan a superar la del patrón. El mejor resultado, en términos absolutos lo obtuvo el mortero preparado con toba zeolitizada calcinada a 650°C que alcanzó valores de 0,62 y 1,03 MPa a los 7 y 28 días respectivamente (Figura 21). Las resistencias más bajas fueron alcanzadas por el mortero preparado con la toba calcinada a 500°C para el caso de los análisis a 7 días y por el mortero preparado con toba calcinada a 350°C para los análisis a los 28 días.

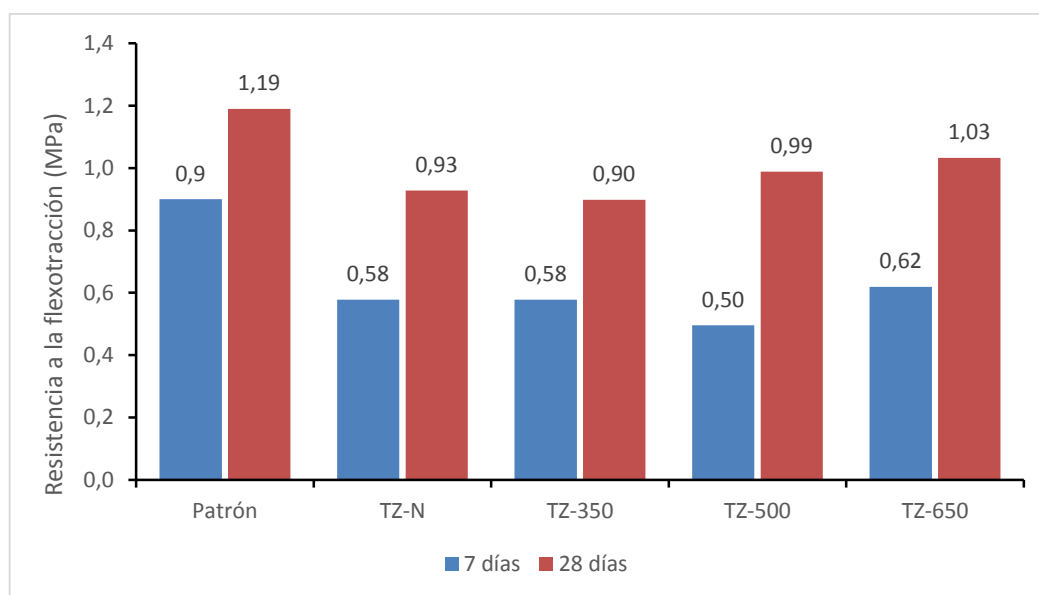


Figura 21. Resistencia a la flexotracción de los morteros.

La resistencia a la flexotracción de todos los morteros a los 28 días es superior a la de los 7 días; el mayor incremento, que fue de 0,49 MPa, lo percibió el mortero elaborado con toba calcinada a 500°C; mientras que la mezcla que se preparó con la toba calcinada a 350°C fue la que menos incrementó su resistencia, con una diferencia de 0,32 MPa entre los 7 y 28 días.

3.2.2. Resistencia a la compresión

Todos los morteros muestran incrementos en su resistencia a la compresión para el período entre los 7 y 28 días (Figura 22); el mayor aumento fue de 9,36 MPa y lo obtuvo el mortero preparado con toba zeolitizada calcinada a 650°C; mientras que el menor incremento, que

fue de 7,73 MPa, fue logrado por el mortero elaborado con toba zeolitizada calcinada a 350°C.

A los 7 días el mejor comportamiento lo obtuvo el mortero elaborado con toba zeolitizada calcinada a 350°C, con un valor de resistencia a la compresión de 21,95 MPa; mientras que el que logró la menor resistencia, con un valor de 20,13 MPa, fue el mortero elaborado con toba zeolitizada calcinada a 500°C. La mejor resistencia a los 28 días, lograda por el mortero elaborado con toba zeolitizada calcinada a 350°C, fue de 29,68 MPa; mientras que el de peor resultado fue el mortero de toba zeolitizada natural con una resistencia de 29,30 MPa.

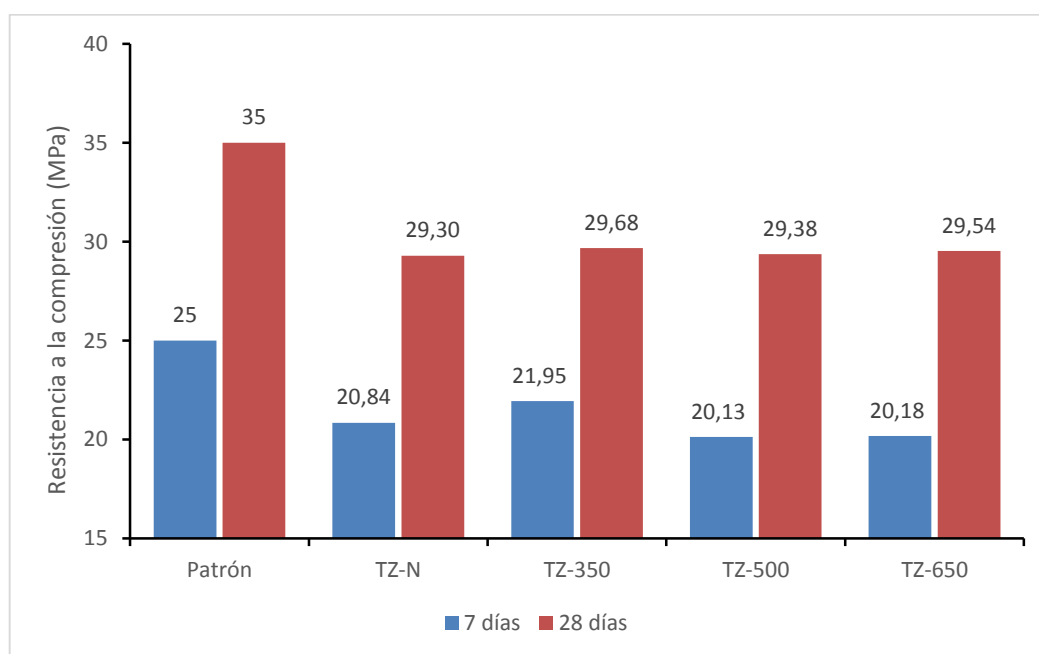


Figura 22. Resistencia a la compresión de los morteros.

Las relaciones entre la resistencia a la compresión lograda a edades tempranas (7 días), la superficie específica y la temperatura de activación del material puzolánico son puestas en evidencia en la figura 23. Entre el mortero elaborado con toba zeolitizada natural y el de la toba zeolitizada calcinada a 350°C se observa que, a pesar de una reducción de la superficie específica del material puzolánico, la resistencia a la compresión a los 7 días ha aumentado, por lo que en este intervalo el efecto de la activación térmica es preponderante al efecto que genera la reducción de la superficie específica. Para el intervalo entre 350 y 500°C la mayor influencia es ejercida por el factor superficie específica, porque su disminución, a pesar del aumento de la temperatura de activación, genera una reducción de la resistencia a la

compresión del mortero. El intervalo de 500°C a 650°C muestra un incremento de la resistencia a la compresión causado por el aumento de la superficie específica y de la temperatura de activación.

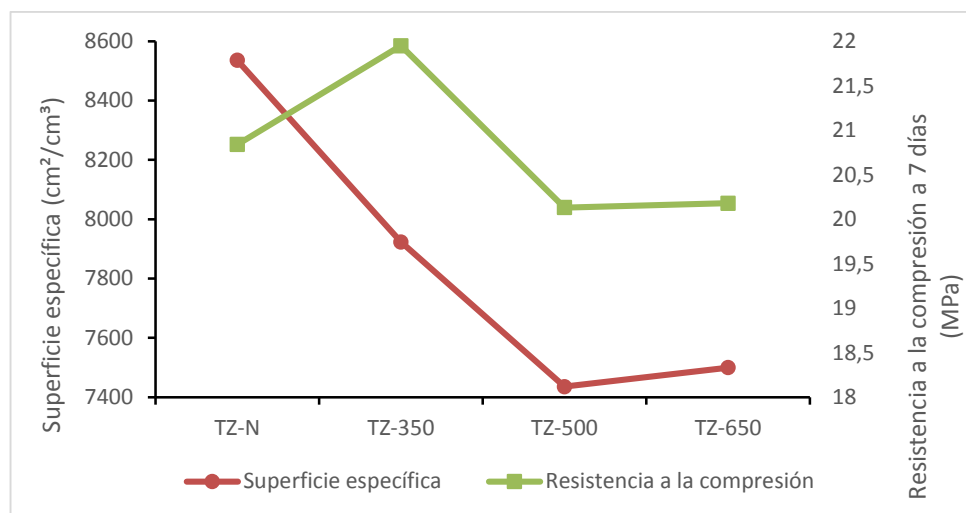


Figura 23. Influencia de la superficie específica sobre la resistencia a la compresión a los 7 días.

3.3. Índice de actividad puzolánica

Los resultados de la determinación del índice de actividad resistente (Tabla 6) muestran que todos los morteros superan el 75 % establecido por la norma cubana NC TS 527:2011, por lo que puede considerarse que la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación, aquí analizados, tienen buena reactividad en el aglomerante ternario cemento portland – toba zeolitizada – caliza y por lo tanto son poseedores de propiedades puzolánicas.

El material con el mejor comportamiento fue la toba zeolitizada calcinada a 350°C, que alcanzó índices de 87,80 y 84,79 % a 7 y 28 días respectivamente; este resultado puede tener como causa el hecho de que de los materiales calcinados este fue el que tuvo la mayor superficie específica, lo que pudo favorecerle en la formación de una mayor cantidad de silicatos de calcio hidratados a temprana edad. Por otro lado, los materiales con resultados más reservados fueron la toba calcinada a 500°C a los 7 días, con un índice de actividad de 80,5 %, y la toba zeolitizada natural a los 28 días con índice igual a 83,70 %.

Tabla 6. Índice de la actividad puzolánica de la toba zeolitizada natural y de los productos de su calcinación.

Morteros	IAR (%)	
	7 días	28 días
TZ-N	83,38	83,70
TZ-350	87,80	84,79
TZ-500	80,50	83,93
TZ-650	80,72	84,39

3.4. Perspectivas de utilización de los aglomerantes cemento portland – toba zeolitizada – caliza

Los aglomerantes a base de cemento portland – toba zeolitizada – caliza desarrollados en esta investigación a partir de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación a 350, 500 y 650°C presentan propiedades superiores, en cuanto a resistencia mecánica a la compresión, que las exigidas a los cementos PP-25 y PZ-25 de producción nacional; a esto hay que agregar el hecho de que en la elaboración de los aglomerantes desarrollados en esta investigación se sustituye el 50 % del cemento portland, mientras que en los aglomerantes PP-25 y PZ-25 las mayores sustituciones que pueden hacerse, según la norma cubana NC 96: 2011, son del 20 y el 35 % respectivamente.

Producir una tonelada de cualquiera de los aglomerantes desarrollados en esta investigación en vez de una de cemento PZ-25 o del PP-25 significaría dejar de producir y/o consumir 150 kg o más de cemento portland ordinario, lo que traería aparejado dos beneficios considerables: se contaría con una mayor disponibilidad de aglomerantes para la ejecución de las obras constructivas y se reducirían significativamente las emisiones de CO₂ y el consumo energético en las plantas cementeras.

Tabla 7. Resistencia a la compresión a 28 días de los morteros normados y de los desarrollados en la investigación (Fuente: NC 175: 2002 con modificación del autor).

Tipos de morteros	Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)	Adherencia a los 28 días (MPa)
I	2,4	$0,15 \pm 0,005$
II	3,5	$0,25 \pm 0,005$
III	5,2	$0,40 \pm 0,005$
IV	8,9	$0,50 \pm 0,005$
V	12,4	$0,65 \pm 0,005$
TZ-N	29,30	-
TZ-350	29,68	-
TZ-500	29,38	-
TZ-650	29,54	-

La tabla 7 permite comparar la resistencia a la compresión a los 28 días que impone la norma cubana NC 175: 2002 a los tipos de morteros y los valores alcanzados por los mezclas desarrolladas en esta investigación; como puede verse, los morteros desarrollados en la investigación poseen mejor comportamiento mecánico que las mezclas (morteros) normalizadas. Estos resultados son alentadores y muestran que existen amplias posibilidades de que los morteros logrados en la investigación puedan ser utilizado en las funciones que cumplen los morteros reconocidos en la norma NC 175: 2002 (Tabla 8); pero para determinar las posibilidades reales de empleo de los morteros elaborados con aglomerantes de base cemento portland – toba zeolitizada – caliza es necesario analizar otras propiedades como la adherencia a los 28 días y la retención de agua.

Tabla 8. Aplicaciones de los morteros de colocación (Fuente: NC 175: 2002).

Lugar de colocación			Resistencia a la compresión a 28 días (valor mínimo)		Retención de agua (%) (valor mínimo)
			Recomendada	Alternativa	
Exterior	Sobre el nivel del terreno	Muro portante	III	IV-V	90
		Muro no portante	I	II-III	
		Antepecho	III	IV-V	
	Bajo el nivel del terreno	Muro de fundición	V	IV>V	90
		Muro de contención			
		Pavimentos, caminos, patios			
Interior		Muro portante	III	IV-V	90
		Muro no portante	I	II-III	90

Conclusiones

Las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos obtenidos mediante su calcinación a 350, 500 y 650°C poseen propiedades puzolánicas que los hacen adecuados para la elaboración de aglomerantes a base de cemento portland – toba zeolitizada – caliza, lo que está fundamentado en que:

- Las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés poseen un contenido total de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 superior al 70 % y una composición mineralógica en la que predominan minerales del grupo de las zeolitas; lo que hace que estas tobas sean materiales con altas potencialidades para ser empleadas como puzolanas.
- Los morteros confeccionados con aglomerantes a base de cemento portland – toba zeolitizada – caliza a partir de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación a 350, 500 y 650°C mostraron un comportamiento de su resistencia a la compresión superior al exigido a los cementos PP-25 y PZ-25.
- Tanto la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés como los productos de su calcinación a 350, 500 y 650°C lograron un índice de actividad puzolánica por encima del 75 %.
- El mortero que mejor comportamiento mecánico exhibió fue el elaborado con la toba zeolitizada calcinada a 350°C; alcanzando valores de resistencia a la compresión de 21,95 y 29,68 MPa a los 7 y 28 días respectivamente; mientras que el mortero elaborado con la toba zeolitizada natural resultó ser el más económico y el más ecológico debido a que su elaboración requirió de un consumo energético menor y su resistencia a la compresión no dista mucho de la del mortero elaborado con la toba calcinada a 350°C.

Recomendaciones

- Determinar la adherencia a los 28 días y la retención de agua de los morteros desarrollados en la investigación para determinar las posibilidades de sus aplicaciones como morteros de revestimiento y de colocación.
- Realizar análisis de Difracción de Rayos X a los productos de la calcinación de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés para contribuir al esclarecimiento de las causas del comportamiento de su actividad puzolánica.
- Continuar en investigaciones futuras el desarrollo de aglomerantes ternarios a base de cemento portland – toba zeolitizada – caliza con el objetivo de mejorar las prestaciones de los aglomerantes desarrollados en la investigación e incorporar otras fuentes de tobas zeolitizadas.
- Realizar un balance de costo-beneficio para la producción de los aglomerantes de base cemento portland – toba zeolitizada – caliza.

Bibliografía

1. AGUILAR PÉREZ, A. 2014. Evaluación de las propiedades físico–mecánicas de morteros de albañilería y prefabricados de pequeño formato a base de Cemento de Bajo Carbono. Trabajo de Diploma. Santa Clara, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
2. AGUILAR CONTRERAS, Y. 2015. Cementos de bajo carbono LC3 producidos en condiciones de pequeña escala, para la fabricación de bloques huecos de hormigón hidráulico y hormigones de hasta 20 MPa. Trabajo de Diploma. Santa Clara, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
3. AL-AKHRAS, N. 2006. Durability of metakaolín concrete to sulfate attack. Cement and Concrete Research.
4. ALMENARES REYES, R. 2011. Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como aditivo puzolánico. Tesis en opción al grado de Máster en Ciencias. Moa, Instituto Superior Minero Metalúrgico.
5. ALUJAS DÍAZ, A. 2010. Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
6. ANTONI, M., et al. 2012. Cement substitution by a combination of metakaolín and limestone. Cement and Concrete Research.
7. ASTM C09.24. 2000. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. C 618–00. American Society of Test of Materials. United States.
8. ASTM C09.24. 2000. Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland–cement concrete. C 311–00. American Society of Test of Materials. United States.
9. ASTM. 2000. Standard specification for portland cement. C 150–00. American Society of Test of Materials. United States.
10. ASTM. 2012. Standard Specifications for Blended Hydraulic Cements. C 595–12. American Society of Test of Materials. United States.

11. BATISTA, R. 2007. Valoración del potencial de los recursos minerales para la industria del cemento en Cuba. Tesis en opción al grado de Máster en Ciencias. Pinar del Río, Universidad Hermanos Saíz Montes de Oca.
12. BATISTA, R., et al. 2009. El uso de las puzolanas naturales cubanas, una alternativa para el ahorro energético y el cuidado del medio ambiente. En: GEOCIENCIAS 2009. Memorias [CD – ROM]. La Habana, Cuba.
13. BETANCOURT RODRÍQUEZ, S. 2010. Estudio teórico experimental de las propiedades puzolánicas de las cenizas de bagazo y paja de caña. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Santa Clara, Universidad Central ``Marta Abreu`` de Las Villas.
14. BLANCO, F. 2012. Polímeros y Materiales Compuestos.
15. CABRERA MÉNDEZ, R. 2010. Valoración de las tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín para su utilización como puzolana natural en la construcción. Trabajo de Diploma. Moa, Instituto Superior Minero Metalúrgico.
16. CASTILLO, R. 2010. Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
17. Colectivo de autores. 2013. Lexico estratigráfico de Cuba. [CD–ROM]. 3^{ra} edición. La Habana, Instituto de Geología y Paleontología.
18. COSTA, U. y MASSAZZA, F. 1977. Influence of thermal treatment on the activity of some natural pozzolans with lime. *Cemento* 74 (3): 105–122.
19. COSTAFREDA, J.L. y CALVO, B. 2007. Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución del fraguado de morteros de cemento. En: XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales. Memorias [CD – ROM]. Oviedo, España.
20. COSTAFREDA, J.L., et al. 2007. Propiedades y aplicaciones de las rocas zeolitizadas de Cabo de Gata, Almería España. En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias [CD – ROM]. La Habana, Cuba.
21. COSTAFREDA, J.L. 2008. Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Universidad Politécnica de Madrid.

22. COSTAFREDA, J. L. 2011. Granulometría y reacción puzolánica. En: IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2011. 4 – 8 de abril. Memorias [CD – ROM]. La Habana, Cuba.
23. COSTAFREDA, J. L., et al. 2011. Propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España. En: IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2011. 4 – 8 de abril. Memorias [CD – ROM]. La Habana, Cuba.
24. DAY, R. Y SHI, C. 1994. Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural–pozzolan cement pastes. *Cement and Concrete Research* 24(8):1485 – 1491.
25. ERDOGAN, T. 2002. Materials of construction. Ankara, Middle East Technical University.
26. ERDOGDU, K. 1996. Effects of pozzolanic cements of different fineness values and some mechanical properties of pozzolanic cements of different fineness values. Thesis. Ankara, Middle East Technical University.
27. FURRAZOLA, G.F. Y NÚÑEZ, K. E. 1997. Estudios sobre la geología de Cuba. La Habana, Instituto de Geología y Paleontología.
28. GUERRA GONZÁLEZ, Y. 2015. Evaluación de los productos de calcinación de las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes como material puzolánico. Tesis en opción al grado de Máster en Ciencias. Moa, Instituto Superior Minero Metalúrgico.
29. GUILLEN DELGADO, R. 2013. Características geológicas y evaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo para su utilización como aditivo puzolánico. Trabajo de Diploma. Moa, Instituto Superior Minero Metalúrgico.
30. HABERT, G., et al. 2008. Effects of the secondary minerals of the natural pozzolans on their pozzolanic activity. *Cement and Concrete Research* (38): 963–975.
31. HABER, G., et al. 2010. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research* (40): 820 – 826.
32. HE, C., et al. 1995. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects, *Cement and Concrete Research* (25): 1691– 1702.
33. HERRERA DE LA ROSA, R. y GAYOSO BLANCO, R. 2007. Áridos para hormigón: especificaciones y ensayos. En: Curso Control de Calidad de los Áridos. La Habana, Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción.

34. HIDALGO CÉSPEDES, C.E. 2014. Evaluación de las tobas vítreas y zeolitizadas de los yacimientos Guaramanao y San Andrés, para su utilización como aditivo puzolánico. Trabajo de Diploma. Moa, Instituto Superior Minero Metalúrgico.
35. HIDALGO MAYO, A. Y PÉREZ RIVAS, G. Regionalización climática de la provincia Holguín. Centro Meteorológico Provincial.
36. HUMPHREYS, K. 2002. Toward a Sustainable Cement Industry. Climate Change.
37. INDEXMUNDI. 2016. Hydraulic cement: world production by Country. [en línea] <http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/cement/cement_t22.html> [consultado: el 31 de mayo del 2016].
38. INSTITUTO DE GEOGRAFÍA. 1992. Atlas Nacional de Cuba.
39. INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y PALEONTOLOGÍA. 2011. Mapa geológico de la República de Cuba. Esc. 1: 100 000. Hoja 4978, Holguín.
40. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY AND WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMEN. 2009. Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050.
41. ITURRALDE-VINENT, M. A. 1998. Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. Acta Geológica Hispana 33(1-4):9-56.
42. ITURRALDE-VINENT, M. A. (Editor). 2012. Compendio de Geología de Cuba y del Caribe. 2^{da} ed. [DVD-ROM]. Editorial CITMATEL, La Habana, Cuba.
43. KIRK, V., et al. 2013. Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolín. Cement & Concrete Composites.
44. LIEBIG, E. y ALTHAUS, E. 1998. Pozzolan activity of volcanic tuff and suevite: effects of calcination. Cement and Concrete Research 28 (4): 567–575.
45. LOTHENBACH, B. 2008. Influence of limestone on the hydration of portland cements. Cement and Concrete Research.
46. KOSAK, J. A., et al. 1988. Desarrollo estructural del arco insular volcánico cretácico en la región de Holguín. Geología y Minería 1: 24.
47. MARTIRENA, J. F. 2003. Una alternativa ambiental compatible para disminuir el consume de aglomerante de clíinker de cemento portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Santa Clara, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

48. MARTIRENA, J. F. 2014. Los materiales cementicios suplementarios. En: XXI Escuela Internacional de Verano en Ciencia y Tecnología de Materiales. 29 de junio-12 de julio. La Habana.
49. MARTIRENA, J. F. 2015. La producción local del cemento de bajo carbono LC3. En: Primer taller regional de capacitación en la producción local del cemento de bajo carbono LC3. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
50. MORA RODRÍGUEZ, A. J. 2009. Estudio del estéril del molino 200 mil como materia prima para la producción de bloques huecos de hormigón en el municipio Gibara. Trabajo de Diploma. Holguín, Universidad Oscar Lucero Moya.
51. NC/CTN 23. Áridos para morteros de albañilería- especificaciones. NC 657: 2008. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
52. NC/CTN 22. Cemento hidráulico- términos y definiciones. NC 526: 2012. 2^{da} ed. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
53. NC/CTN 22. Cemento hidráulico-puzolanas-especificaciones. NC-TS 528: 2007. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
54. NC/CTN 22. Cemento hidráulico- métodos de ensayo- determinación de la resistencia mecánica. NC 506: 2007. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
55. NC/CTN 22. Cemento portland- especificaciones. NC 95: 2011. 2^{da} ed. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
56. NC/CTN 22. Cemento con adición activa- especificaciones. NC 96: 2011. 2^{da} ed. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
57. NC/CTN 22. Cemento hidráulico- puzolanas- especificaciones. NC TS 528: 2007. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
58. NC/CTN 37. Hormigón hidráulico- especificaciones. NC 120: 2014. 3^{ra} ed. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
59. NC/CTN 37. Morteros de albañilería- especificaciones. NC 175: 2002. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
60. ODLER, I. 2000. Special Inorganic Cement. 150 p.
61. ONEI. 2015. Industria manufacturera. En: Anuario estadístico de Cuba 2014. [en línea] <<http://www.onei.cu/aec2014/11%20Industria%20Manufacturera.pdf>> [consulta: 21 de junio del 2016].

62. PENTELENYI, L Y GARCÉS LEYVA, E. 1988. Informe sobre los resultados de levantamiento geológico y búsqueda acompañante a escala 1:50 000 en el Polígono Cuba-Hungría.
63. RABILERO, A. 1988. Las Puzolanas, cinética de las reacciones. Santiago de Cuba, Editorial Oriente.
64. RABILERO, A. C. 2005. Mineralogía de las puzolanas. En: Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GOCIENCIAS 2005: 5 - 8 de abril. Memorias [CD-ROM]. La Habana, Cuba.
65. RAMACHANDRAN, V. S. 1995. Concrete Admixtures Handbook. 2nd ed. Noyes. 670 p.
66. RAMACHANDRAN, V. S., et al. 2002. Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials. (Construction Materials Science and Technology Series)
67. RIZO BEYRA, R., et al. 1988. Informe sobre los trabajos de Exploración Orientativa y Detallada de zeolitas en el sector Loma Blanca del yacimiento San Andrés.
68. RIZO BEYRA, R. 2009. Reclasificación de recursos del yacimiento zeolitas San Andrés.
69. ROSELL, M. 2006. Zeolitas naturales cubanas, reactividad puzolánica y uso en adiciones para hormigones. Centro Técnico para el Desarrollo de Materiales de Construcción.
70. ROSELL, M. 2007. Influencia del tamaño de partícula de zeolita en su actividad puzolánica. En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2007 [CD-ROM]. La Habana, Cuba.
71. ROSELL, M. y GAYOSO, R. 2001. Utilización de la zeolita como material de construcción: experiencia cubana. En: I Jornada Iberoamericana de Materiales de Construcción. Red CYTED XIII-C. 10 p.
72. SARICIMEN, H., et al. 1992. Effect of field and laboratory curing on the durability characteristics of plain and pozzolan concretes. Cement and Concrete Composites 14(3):169-177.
73. SERSALE, R. y G. FRIGIONE. 1985. Natural zeolites as constituents of blended cements, La Chimica e l'industria 67 (4): 177 –180.
74. SNELLINGS, R. 2011. Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites. Katholieke Universiteit Leuven, Groep Wetenschap & Technologie, Arenberg Doctoraatsschool, W. de Croylaan 6, 3001 Heverlee, België.

75. TAPIA, M. E. 2003: Valoración de la gestión geominera ambiental en el yacimiento Zeolita San Andrés. Tesis en opción al grado de Master en Ciencias. Moa, Instituto Superior Minero Metalúrgico. 70 p.
76. TAYLOR. H.F. 1990. Cement Chemistry. Academic Press: London, U.K. 491.
77. VALDEZ, P., et al. 2004. Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales – portlandita. Ciencia UANL, VII(002): 190 – 195.
78. VIZCAÍNO, L. M. 2014. Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer– arcilla calcinada– caliza. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
79. WIKIPEDIA. 2016. Anexo: producción mundial de cemento. [en línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Países_por_producción_de_cemento> [consultado: el 31 de mayo del 2016].

Anexos

Anexo 1. Dosificaciones generales y propiedades de los morteros de albañilería según NC 175: 2002

Tipos de morteros	R c. 28d. (MPa)	Adh. 28d. (MPa)	Cementos			Arena	Hidrato de cal
			P-35	PP-25	Albañilería		
I	2,4	0,15±0,05	1			8	2
				1		6	2
					1	4	1,5
II	3,5	0,25±0,05	1			6	2
				1		5	1
					1	4	1
III	5,2	0,40±0,05	1			4	2
				1		4	1
					1	3	1
IV	8,9	0,50±0,05	1			4	1
				1		4	0,5
					1	3	0,5
V	12,4	0,65±0,05	1			3	1
				1		3	0,5
					1	2,5	-

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

	Clase de Aditivo Mineral		
	N	F	C
Dióxido de Silicio (SiO ₂)+Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)+Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃), min. %	70,0	70,0	50,0
Trióxido de Azufre (SO ₃), máx. %	4,0	5,0	5,0
Contenido de Humedad, máx. %	3,0	3,0	3,0
Pérdida por Ignición, máx. %	10,0 ^a	6,0 ^b	6,0

^a: Para el caso de puzolanas naturales que contengan en su composición mineralógica contenidos de zeolitas se excluye este requisito, tal es el caso de las tobas zeolitizadas que se emplean como puzolanas y que han demostrado una buena actividad tanto con el cemento como con la cal.

^b: El uso de puzolanas clase F que contienen una pérdida por ignición mayor que 12,0 % pueden ser aprobadas por el consumidor si los reportes de cumplimiento de aceptación o los resultados de los ensayos de laboratorio la hacen utilizable.

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

	Clase de Aditivo Mineral		
	N	F	C
Finura: Cantidad retenida con tamizado húmedo sobre el tamiz 45 μm (No. 325), máx. % ^a	34	34	34
Índice de Actividad de Resistencia: ^b Con cemento portland, 28 días min. % del mortero control.	75 ^c	75 ^c	75 ^c
Requerimiento de agua, máx. % de control	115	105	105
Requerimientos de Uniformidad La densidad y la finura de muestras individuales no podrán variar del promedio establecido para los 10 ensayos precedentes o para todos los ensayos precedentes si el número es menor que 10, por más que:			
Densidad, variación máxima del promedio, %	5	5	5
Retenido en % sobre 45 μm (No. 325), máx. variación, porcentaje de puntos del promedio	5	5	5
^a : Tener cuidado para evitar la aglomeración del material extremadamente fino. ^b : El índice de actividad de resistencia con el cemento portland no debe ser considerado como una medida de la resistencia a la compresión del hormigón que contiene el aditivo mineral. La cantidad de aditivo mineral especificada para el índice de ensayo de actividad de resistencia con el cemento portland no es considerada como la cantidad recomendada para el hormigón que será usado en el trabajo. La cantidad óptima de aditivo mineral para cualquier proyecto específico se determina de acuerdo a las propiedades requeridas del hormigón y los otros constituyentes, y deberá ser establecida mediante ensayos. El índice de actividad con cemento portland es una medida de la reactividad con el cemento dado y puede variar con la procedencia del aditivo mineral y del cemento. ^c : Se conoce que el método de actividad de resistencia a los 28 días, indicará una especificación de confianza.			

Anexo 4. Concentración de elementos trazas de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés

Elementos	Concentración (ppm)		Elementos	Concentración (ppm)
Ba	648		Pr	7
Ce	43		Rb	34
Cr	39		Sr	352
Cu	33		Th	5
La	21		V	45
Nb	6		Y	31
Ni	85		Zr	176
Ga	13		Zn	58
Pb	22		Nd	55