

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

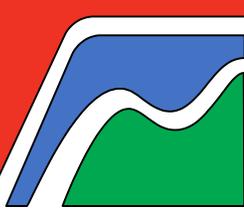
Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero Geólogo

Título: Caracterización de las Tobas de Palmarito
de Cauto para la obtención de bloques de
hormigón.

Autor: Luis Daniel García Molina

Tutores: Dr.C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez
Ms.C. Santiago Cuba Miranda

Moa. 2019 “Año 61 de la Revolución”



Declaración de autoridad

En decisión conjunta, el autor Luis Daniel García Molina y los tutores Carlos Alberto Leyva Rodríguez y Santiago Cuba Miranda, certificamos nuestra propiedad intelectual en este Trabajo de Diploma, el cual se titula “Caracterización de las Tobas de Palmarito de Cauto para la obtención de bloques de Hormigón.” El Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, podrá hacer uso del trabajo para sus fines educativos cuando considere conveniente.

Autor:

Luis Daniel García Molina.

Firma: _____

Tutor:

Dr.C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez.

Firma: _____

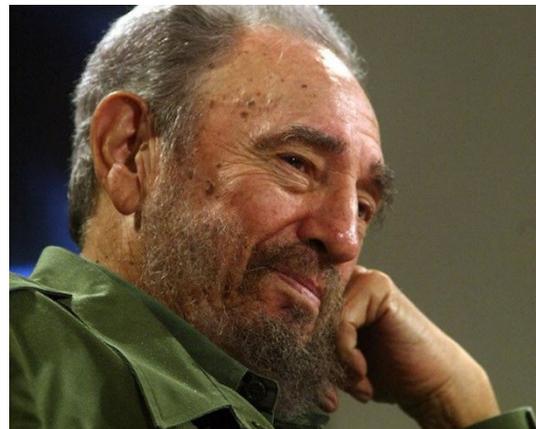
Ms.C. Santiago Cuba Miranda

Firma: _____

PENSAMIENTO

“No basta con tener una idea justa, noble, buena, la suerte es que esas ideas... coincidan con el instante en que la humanidad no se salva si tales ideas no se aplican”.

Fidel Castro Ruz.



DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mi familia y a todas las personas que fueron de gran apoyo cuando más lo necesitaba y a los que en verdad desearon lo mejor siempre para mi futuro, en especial a aquellos que desde que comencé a estudiar siempre desearon que me formara como buen profesional y llegara muy lejos, por eso le agradezco a toda mi familia, amigo y profesores por todos los consejos y por guiarme por un buen camino. Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente:

A mis tutores Carlos Alberto Leyva Rodríguez y a Santiago Cuba Miranda por haber sido la fuente de donde surgió este trabajo y por la confianza que ha depositado en mí para la realización del mismo.

A mis padres, a mi padrastro, a mi hermana, a mi tía, a mi novia, a mis primos por el apoyo que me han brindado.

A mis compañeros de grupo y de cuarto que me han brindado su apoyo en todos estos años.

Al Ms.C. Yurilsley Valdés Mariño por haber sido un apoyo incondicional en mis 5 años de universidad.

A la compañera del laboratorio Oneida Bell Mora que se mostró muy interesada en la realización de los experimentos.

A Lic. Eulalia Castillo Hernández Especialista en Productos de Hormigón de la Empresa de EPROMAC de Santiago de Cuba, Lic. Reynaldo López Menéndez Subdirector Técnico Productivo, Ing. Geóloga María Ester Orosco Castellanos, los cuales dieron todo su desempeño por realizar mi trabajo.

A Juan Fernández López L.C. en Construcción y Jefe de Taller de bloquera no estatal (TCP) por haber hecho posible que mi trabajo se pudiera realizar en su establecimiento.

A todas las personas que se han preocupado por la realización de este trabajo.

RESUMEN

El presente trabajo aborda la evaluación de las tobas del yacimiento zeolitas Palmarito de Cauto, para evaluar las perspectivas de utilización como áridos ligeros y material puzolánico, este último sustituir el cemento Portland con un porcentaje de: 20 % en peso en la fracción menor de 0.063 mm para la producción local de materiales de construcción según los parámetros de calidad normalizados. Se realizó una caracterización basada en la determinación de la composición, química y mineralógica, la determinación tanto de las propiedades puzolánicas como la del árido ligero a través de los ensayos de resistencia a la compresión a partir del método indicado en las normas para tales especificaciones, lo que permitió establecer que los ensayos con la sustitución del 20 % de cemento Portland por polvo de zeolita y la utilización de las tobas zeolitizadas como árido ligero poseen perspectivas para la obtención de bloques de hormigón, aclarando que la sustitución del árido ligero debe mejorar según las recomendaciones dadas.

Palabras claves:

Árido, bloque hueco de hormigón, puzolana y tobas zeolitizadas

ABSTRACT

The present work deals with the evaluation of the tuffs of the Palmarito de Cauto zeolites deposit, to evaluate the prospects of use as light aggregates and pozzolanic material, the latter replacing the Portland cement with a percentage of: 20 % by weight in the fraction less than 0.063 mm for the local production of construction materials according to the standardized quality parameters. A characterization was carried out based on the determination of the chemical and mineralogical composition, the determination of both the pozzolanic properties and the light aggregate through the compression resistance tests from the method indicated in the standards for such specifications, This allowed us to establish that the trials with the replacement of 20 % Portland cement by zeolite powder and the use of zeolitized tuff as light aggregate have prospects for obtaining concrete blocks, clarifying that the replacement of light aggregate should improve according to the recommendations given.

Key words:

Arid, hollow block of concrete, pozzolans and zeolitized tuffs

INDICE

INTRODUCCIÓN.	1
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
Estado del arte de la Investigación	4
Generalidades.	4
Conceptos generales.....	10
Las sustancias nocivas al hormigón.	12
El cemento en el hormigón.	13
Las zeolitas	14
Estructuras de las Zeolitas.....	14
Minerales zeolíticos	15
Propiedades.....	15
Aplicaciones.....	16
Aridos o Agregados.....	17
Principales tipos de áridos.	17
Los áridos en el hormigón.....	18
Propiedades físico - mecánicas de los áridos.....	19
Puzolanas.	20
Clasificación de las puzolanas según su origen.	22
Normativas de las puzolanas.....	24
Actividad puzolánica.	24
Aplicación de las puzolanas.....	25
Hormigón Liviano.	27
Uso y Aplicaciones.	27
Bloques huecos de hormigón. Generalidades.	29

CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO - GEOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS REGIONALES DEL ÁREA DE ESTUDIO	31
1.1 Características físico - geográficas de la regional y local.....	31
1.2 Marco geológico regional.	32
1.3 Tectónica	¡Error! Marcador no definido.
1.3 Características geológicas del yacimiento	37
CAPITULO II: MATERIALES Y METODOS DE LOS TRABAJOS REALIZADOS .	39
2.1 Metodología de la investigación.....	39
2.2 Etapa preliminar.	40
2.3 Etapa de trabajo de campo:	40
2.3.1 Toma y preparación de las tobas zeolitizadas.	40
2.4 Etapa de laboratorio.....	42
2.4.1 Determinación de la composición granulométrica.....	42
2.4.2 Determinación de la composición química.....	43
2.4.3 Caracterización mineralógica.....	44
2.4.4 Determinación del índice de actividad puzolánica.	45
2.5 Fabricación de bloques huecos de hormigón.....	46
2.6. Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón.	49
2.6.1 Resistencia a la compresión	49
2.7 Etapa de gabinete.	54
CAPITULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	55
3.1 Resultados experimentales y su análisis.	55
3.1.1 Caracterización granulométrica de las tobas zeolitizadas.	55
3.1.2 Composición química del yacimiento tobas zeolitizadas de Palmarito de Cauto.	56

3.1.3 Composición mineralógica de las tobas zeolitizadas del Yacimiento Palmarito de Cauto.	57
3.2 Análisis de los resultados obtenidos en bloques huecos de hormigón.	59
3.2.1 Resultados del ensayo de resistencia a compresión.	59
3.3 Análisis de las perspectivas de utilización del material estudiado como aditivo puzolánico.	62
3.3.1 Evaluación del índice de puzolanidad.	62
3.4 Valoración socioeconómica y ambiental.	64
CONCLUSIONES.	65
RECOMENDACIONES.	66
BIBLIOGRAFIA.	67

INTRODUCCIÓN.

En la mayoría de los países subdesarrollado la situación de la vivienda junto a la necesidad de desarrollar otras obras sociales es un problema que aumenta gradualmente a medida que pasan los años, por el desgaste constante de las existentes y el azote de fenómenos naturales que sin duda, han puesto en desventaja las posibilidades de una respuesta rápida a tal problema, debido a la notable escasez de materiales de construcción por el poco desarrollo en este ámbito.

Una manera de compensar este déficit es mediante el aprovechamiento de potencialidades nacionales para la obtención de aditivos, que permitan incrementar los volúmenes, y en la medida de lo posible, la calidad del cemento. Esto ha conllevado a que, a pesar de ser una práctica antigua, en la actualidad el desarrollo de los materiales puzolánicos para diversas aplicaciones dentro del ciclo que abarca la industria de la construcción, es decir, la fabricación de cementos, morteros, hormigones, entre otros, ha adquirido relevante importancia.

Con el objetivo de darle salida a la problemática antes expuesta, se están realizando diferentes investigaciones e inversiones por parte del estado cubano, donde la utilización de las tobas zeolitizadas como material puzolánico y áridos ligeros, contribuirá desde una perspectiva local a la solución de problemas nacionales, ya que los áridos son un material insustituible para la sociedad actual porque estos se emplean en cantidades muy importantes en todos los ámbitos de la construcción, ya sea en vías de comunicación, obras de infraestructura, equipamientos, vivienda, industria química, etc.

La fábrica de Santiago de Cuba comenzó tan solo en 1974 extendiéndose a las restantes fábricas en los años posteriores, con la utilización de tobas zeolitizadas de los yacimientos, Carolina, Siguaney, El Rubio y Tasajera; sin embargo las tobas zeolitizadas de los yacimientos, Las Catalinas, El Chorrillo, San Cayetano, Bueycito, Palenque, Las Pulgas, San Andrés, Palmarito de Cauto y Caimanes, Holguín, Santiago de Cuba y Guantánamo, aún no han sido introducidas en la práctica por la carencia de estudios y falta de voluntad de los gobiernos que avalen su utilización,

con excepción de las tobas vítreas de Palmarito de Cauto, que fueron utilizadas desde septiembre de 1974 como adición al cemento; las que en estos momentos se emplean muy poco por dificultades en la tecnología de la fábrica de Santiago de Cuba, que ha quedado con sólo dos molinos de cemento en operación.

El árido ligero es un material físico y químicamente neutro, que no desprende gases ni malos olores, no se pudre y no es atacable por parásitos, hongos o roedores. No le afectan las sustancias químicas y es altamente resistente a las heladas y a los cambios bruscos de temperaturas.

Debido a que su principal propiedad es la ligereza, sus aplicaciones más directas se hallan en la construcción para la fabricación de materiales aislantes: paneles, bloques, bovedillas, etc. Una buena aplicación consiste en la rehabilitación de antiguas cubiertas de fibrocemento, para lo cual se prepara un hormigón con árido ligero en lugar del denso convencional, logrando dos objetivos: Conseguir un buen aislamiento térmico y eliminar el problema medioambiental que supone al fibrocemento en climas calurosos y secos.

Desde el punto de vista de la seguridad, los hormigones fabricados con áridos ligeros conservan un 80 % de la resistencia mecánica a temperaturas superiores a 600°C. A este factor hay que sumarle un mayor poder aislante, lo cual mejora todavía más sus cualidades frente al fuego. El aprovechamiento de estos recursos naturales como aditivo mineral activo en la sustitución parcial del cemento, ha estado limitado, al menos en parte, porque no ha sido resuelto lo que en este trabajo, se declara como **Problema de la investigación**: Necesidad de profundizar en el conocimiento acerca de las perspectivas de las tobas zeolitizadas del yacimiento Palmarito de Cauto para su empleo como áridos ligeros y material puzolánico.

Por ello el **objeto de estudio** se define como: las tobas zeolitizadas del yacimiento Palmarito de Cauto.

Campo de acción:

Comportamiento de las propiedades puzolánicas y como áridos ligeros de las tobas zeolitizadas de Palmarito de Cauto.

Objetivo general.

Evaluar las perspectivas de utilización de las tobas zeolitizadas del yacimiento zeolitas Palmarito de Cauto como áridos ligeros y material puzolánico para su aplicación en la fabricación de bloques huecos de hormigón.

Objetivos específicos:

- Características geológicas del yacimiento Zeolitas Palmarito de Cauto.
- Determinar el comportamiento de las tobas zeolitizadas de Palmarito de Cauto al ser empleadas como áridos ligeros en la fabricación de bloques huecos de hormigón.
- Determinar las propiedades puzolánicas de las tobas zeolitizadas de Palmarito de Cauto para su empleo como material puzolánico en bloques huecos de hormigón.

Hipótesis:

Si se caracteriza la composición química, granulométrica, mineralógica y se realizan los ensayos correspondientes en los bloques de hormigón con el empleo de las tobas zeolitizadas de Palmarito de Cauto como áridos ligeros y material puzolánico, se podrá llegar a conclusiones coherentes con parámetros de calidad normalizados, acerca de la utilización de este material para esos empleos.

Tareas de Investigación

- Análisis bibliográfico de trabajos antecedentes relacionados con el objeto de la investigación.
- Toma y preparación de las materias primas.
- Fabricación de los bloques huecos de hormigón.
- Realización de los ensayos de los bloques para determinar sus propiedades.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Estado del arte de la Investigación

Generalidades.

En este trabajo se efectúa un análisis sobre los diferentes aspectos que se encuentran relacionados con los temas discutidos en la bibliografía consultada sobre las zeolitas, los áridos y los materiales puzolánicos, con el objetivo de disponer de los elementos básicos para la realización de la investigación. Se expone el estado del arte, la conceptualización y consideraciones teóricas sobre los áridos, su importancia económica y tecnológica.

De acuerdo a las investigaciones realizadas, se constató lo siguiente:

La existencia de yacimientos de zeolita en nuestra país abre el camino de su introducción en la práctica y que esta se revierta en sustitución de importaciones, ahorro de combustible, materiales y productos, mejor eficiencia y productividad, incremento de la producción, protección ambiental y también rubro de exportación, por lo cual reportará grandes beneficios a la Economía Nacional (Casals Corella., 1988).

En descubrimiento de la zeolita se realizó en el año 1756 por el geólogo sueco Barón Axel Cronstedt, el cual observando una roca basáltica, se percató que en el interior de las vesículas existían unos pequeños cristales bien definidos, los que, sometidos al calor, para su sorpresa, observó que desprendían el agua de hidratación o combinación en forma de vapor, de aquí que su nombre de piedra hirviente provenga de dos palabras griegas Zein (hervir) y Lithos (piedra). Esta simple observación también trascendió en el campo de la química y la mineralogía, ya que dio lugar a que se determinara que las zeolitas constituyen los únicos silicatos naturales que hierven, al ser calentados a la llama con bórax en un tubo de ensayo abierto (Casals Corella., 1988).

En Cuba se conocen más de 25 yacimientos y manifestaciones de zeolitas naturales, distribuidas a todo lo largo y ancho del país. Las primeras manifestaciones de tobas de zeolita en Cuba fueron halladas por el geólogo búlgaro

B. Alexiev en un trabajo conjunto con los geólogos cubanos D. Coutín y A. Brito. Posteriormente a este descubrimiento, el Instituto de Geología de la ACC realizó estudios e investigaciones en coordinación con la Universidad de Sofía, a través de la Academia de Ciencias de Bulgaria. Durante la época colonial la roca zeolita ya era utilizada como material de construcción en las edificaciones de la barriada del Vedado, como consecuencia de la crisis energética en la Segunda Guerra Mundial. A partir de 1972 se acometió la elaboración de un proyecto técnico económico de búsqueda y explotación de zeolitas en Villa Clara y aunque a escala mundial no existía una metodología económica de evaluación de este tipo de yacimiento, en 1981 el colectivo de técnicos cubanos culminó el primer informe geólogo sobre reservas industriales y los recursos pronósticos. Esta determinación de reservas industriales, como tales, fueron las primeras que se calcularon en todo el campo socialista (Casals Corella., 1988).

Los yacimientos de zeolita cubanos son de alto rendimiento en clinoptilolita y modernita, llegando en algunos casos a más de 90 %. La diseminación de los yacimientos de zeolitas por todo el país constituye un factor ventajoso para su utilización en las múltiples actividades en que se puede aprovechar, debido a que se abaratarían considerablemente los costos de transportación del mineral beneficiado.

Algunos autores plantean que en la Grecia clásica se conocía y se utilizaban los aglomerantes del tipo cal - puzolanas, pero no fue hasta la época en la Roma clásica donde este tipo de aglomerante alcanzó su máximo esplendor. Ya para el año de 1824 en Leed, Inglaterra, el albañil y maestro de obras Joseph Aspdin patentó un nuevo producto aglomerante que denominó cemento Portland, lo cual contribuyó en gran manera al desarrollo del hormigón, al revolucionar las obras de ingeniería y las construcciones. Entre las bondades que representaba se destacan, las propiedades químicas y mecánicas superiores y la posibilidad de su producción industrial masiva.

El patrimonio construido en el mundo es hoy un 90 % de hormigón, y es el principal destino del cemento. Tanto la producción y consumo del cemento como la del hormigón se asocian con el nivel de desarrollo de un país. Sin embargo, también

han resultado ser, de forma paradójica, los principales responsables de la degradación ambiental del planeta, debido a que su proceso productivo, en lo fundamental, está basado en la explotación intensiva de recursos no renovables (materias primas y combustibles) que emiten significativos volúmenes de gases de efecto invernadero, (Rosell, 2010).

La vulnerabilidad del hormigón al medio ambiente es consecuencia de las propiedades del clínker del cemento Portland y de las características del sistema de poros de la matriz del hormigón, esto ha conllevado a realizar ajustes en la tecnología de producción del cemento, para hacerlos más resistentes a los ataques de los agentes agresivos, lo cual se ha logrado con la aparición de nuevos aditivos tanto químicos como minerales para mejorar la impermeabilidad de los hormigones (Aitcin, 2000); (Babak, et al., 2010); (Xing., S., et al., 2004).

En el capítulo 1 del “Supplementary cementing materials for concrete” sobre minerales de Rheinisch, Alemania, se demuestra la actividad puzolánica de minerales con 10 a 15 % de cuarzo y 15 a 20 % de feldespato sobre una matriz de vidrio con zeolitización, (Mehta, 1987), refiere que las zeolitas del tipo analcima, chabasita, clinoptilolita, philipsita y leucita presentan actividad puzolánica (Day, et al., 1994); (Harold, 1990).

En los países árabes del golfo donde las condiciones ambientales son agresivas y seriamente corrosivas, el uso de las puzolanas naturales por ellos investigadas en las tecnologías del hormigón contribuye a lograr una mayor resistencia y durabilidad en la vida útil de las estructuras (Saricimen, 1992).

La finura del cemento es un factor importante que afecta el índice de desarrollo de la resistencia, para ello (Day, et al., 1994), estudiaron la influencia de la finura de la puzolana en la resistencia de las pastas de cemento - cal – puzolana natural. Los resultados demostraron que la resistencia a la compresión aumenta cuando el material es más fino, y la finura de la puzolana natural tiene su efecto más significativo en el desarrollo temprano de la resistencia, también analizaron el efecto del agua inicial de curado en la hidratación de los cementos que contienen puzolana natural. Como resultado obtuvieron, que las pastas de cemento Portland son más

sensibles en el período inicial de curado que las de cemento Portland puzolánico (contenido de puzolana 30 %), porque ocurre la hidratación del cemento Portland más rápidamente que la reacción puzolánica en pastas de cemento Portland puzolánico. La hidratación del cemento Portland y la reacción puzolánica continúan después que las probetas se extraen a un ambiente seco (humedad relativa de 20 % aproximadamente). La presencia de puzolanas naturales retarda la hidratación normal del cemento Portland en las primeras horas, pero la acelera después de un día.

Se recomienda la adición de puzolana natural al cemento Portland y al hormigón por separado, ya que reduce el calor de hidratación, prolonga el tiempo de fraguado y mejora la consistencia del cemento. Ya nuestro país a partir de la década de los años 70 viene dando los primeros pasos; numerosas investigaciones han ido elevado el conocimiento geológico del territorio nacional, y otras encaminadas a la aplicación de materiales con propiedades puzolánicas y aditivos químicos al cemento Portland en la confección de los morteros y hormigones hidráulicos a nivel de laboratorio; semi - industriales e industriales (Shannag, *et al.*, 1995).

Uno de los experimentos llevados a cabo fue el estudio del comportamiento cinético de la reacción de los cementos con adición de zeolitas naturales cubanas. Al respecto, se ha llegado a la conclusión de que la portlandita originada por la hidratación del silicato tricálcico (Ca_3Si) reacciona con la zeolita, para dar lugar a una fase tobermorítica secundaria (Rabilero A. C., 1988).

En su tesis doctoral (Rabilero, 1992), presenta los resultados de más de 20 años de investigaciones y de la producción de cemento con el mineral zeolítico del yacimiento Palmarito de Cauto en el proceso de la fábrica de cemento José Mercerón, como adición en la producción de cemento.

Son referencia obligada en nuestro país los trabajos realizados al respecto por Martirena, Roger y Alujas, que introducen el desarrollo de un cemento de bajo carbono a partir del empleo de caliza y arcillas calcinadas de bajo grado con la formulación y evaluación de un cemento Portland puzolánico del tipo ternario, que permita mayores niveles de sustitución de los contenidos de clínker por materiales

con propiedades puzolánicas – limitado actualmente por las normativas nacionales e internacionales al 35 % en masa – mediante el empleo de materias primas nacionales como los materiales cementicios suplementarios (MCS). Como materiales sustitutos del clínker se propone el empleo de arcillas caoliníticas de bajo grado activadas mediante un tratamiento térmico y caliza en su estado natural. La viabilidad de la producción del cemento ternario es comprobada mediante una prueba industrial, así como estudios de costos e impacto ambiental. El impacto directo que tiene la alta reducción del contenido de clínker en el sistema cementicio sobre la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, le confiere al producto resultante la denominación de “cemento de bajo carbono” (LC3).

Gayoso y Rosell reportan sustituciones de zeolita por cemento en hormigones bajo diferentes conceptos de utilización, ya sea incorporado finamente, molido como MCS o como corrector de granulometría de áridos. De manera general han obtenido hasta 12 % de sustitución de zeolita por cemento, logrando altas prestaciones, donde se engloba no sólo la resistencia, sino también las propiedades físico - químicas que garantizan la durabilidad. Se debe destacar el hormigón diseñado para el edificio Atlantic, en Moa, que con adición de 12 % de zeolita, logra 62 MPa a los 28 días, llegando al año a 96 MPa, (Gayoso, et al., 2005).

La caracterización geológica y tecnológica del vidrio volcánico del yacimiento de Guaramanao, orientada hacia su aplicación como material de construcción alternativo. El sistema propuesto se aplica en el municipio de Holguín y permite demostrar que el uso del vidrio volcánico de esta región puede ser utilizado como material para la construcción. Como principal resultado de la investigación propone entre otros, el empleo de la materia prima como materiales de construcción alternativos, específicamente áridos y hormigones ligeros. Sin embargo no realiza pruebas encaminadas a su utilización como puzolana natural (Pérez, 2006).

Varios autores como (López, 2006); (De Armas, 2008) y (Muxlanga, 2009) han estudiado materiales similares como es el yacimiento tobas vítreas y zeolitizadas del municipio Sagua de Tánamo para su utilización como árido ligero y puzolana natural. En estas investigaciones se evaluó la sustitución de 15 y 30 % de tobas por

cemento, con la obtención de resultados favorables; sin embargo, estos se consideran preliminares, al no contar con las técnicas y métodos empleados para la realización de los ensayos con las debidas certificaciones de calidad, lo cual no permite homologar sus resultados, dando lugar a la necesidad de efectuar nuevas investigaciones.

La mezcla de cemento Portland con agua produce reacciones de hidratación muy activas, dando lugar a la formación de productos estables como la portlandita y tobermorita a partir de la hidratación de fases minerales anhidras que están en su composición primaria. La presencia de zeolita en morteros produce ciertas influencias en el comportamiento de esta reacción, 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); sin embargo, el cemento de referencia sin adiciones, para este intervalo de tiempo, adquiere resistencias cuyos valores duplican los de los morteros con adición de puzolana, demostrando que la presencia de zeolita natural produce una evidente ralentización de los mecanismos que rigen la reacción de hidratación, lo que posterga la ganancia de resistencias mecánicas. A los 28 días, la resistencia 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 la resistencia del cemento de referencia, (Costafreda, *et al.*, 2007).

Autores como Costafreda, Díaz, y Calvo determinaron las propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España y su incidencia en ciertas aplicaciones eminentemente prácticas. Plantean que los resultados indican que cada variedad de zeolita natural aporta respuestas diferentes frente a los ensayos, posiblemente influenciado por la sutil variabilidad de su composición química. Es evidente que las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las zeolitas naturales varían sensiblemente de un tipo a otro dentro de la propia familia mineralógica. Es un hecho que se refuerza cuando estas zeolitas se encuentran en paragénesis con otros minerales, como ocurre en el sureste de España, donde es frecuente encontrar representantes de los filosilicatos,

fundamentalmente montmorillonita, como especie mayoritaria del grupo de las esmectita, que son singenéticas y con la mordenita en los yacimientos zeolíticos españoles (Costafreda, et al., 2011).

En el caso de las zeolitas de México y Cuba, se plantea que puede deducirse su pureza a partir de la gran estabilidad de volumen y del tiempo de fraguado; asimismo, por las resistencias mecánicas elevadas que ofrecen sus probetas ante la compresión, además existe un relación entre el diámetro de las partículas de muestras compuestas esencialmente por zeolitas y esmectita 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. Por tal razón para la utilización de los materiales señalados anteriormente se hace necesaria la realización de pruebas que validen su utilización en los diferentes campos de aplicación (Costafreda, et al., 2011).

Conceptos generales.

Para contribuir a una mejor comprensión de los conceptos que se reflejan a lo largo del trabajo se definen algunos términos empleados en el ámbito de los materiales de construcción, como son: hormigón, cemento, áridos y puzolanas. **El hormigón hidráulico** también denominado **concreto** en Sudamérica, es el material constituido por la mezcla de cemento, árido grueso, árido fino y agua, con o sin la incorporación de aditivos o adiciones, que desarrolla sus propiedades al hidratarse el cemento (NC 120, 2007a).

Por su parte se denomina **mortero de albañilería** a la mezcla de uno o varios conglomerantes minerales, áridos finos, agua y a veces adiciones y/o aditivos (NC 175, 2002).

El **cemento** con propósitos constructivos, puede ser descrito como un material calcáreo y silíceo capaz de unir los áridos, la arena, los ladrillos o bloques. Los cementos de interés en la fabricación de concreto tienen la característica de fijarse y endurecerse debajo del agua, en virtud de una reacción química con ella, siendo llamados cementos hidráulicos.

Las **puzolanas** son materiales de naturaleza silíceo o sílico - aluminosa, las cuales por si mismas poseen poca o ninguna propiedad cementante, pero finamente divididas y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio para formar compuestos con propiedades cementantes (NC TS 528, 2007).

Las zeolitas por definición, son aluminosilicatos de cationes alcalinos y alcalinos térreos (potásicos, cálcicos y sódicos).

Tanto el aluminio como el silicio se presentan, entre otras formas, en tetraedros de AlO_4 y SiO_4 unidos, que pueden ser representados por la fórmula: $R_{n+2}/NO \cdot Al_2O_3 \cdot XSiO_2 \cdot YH_2O$. La X en esta fórmula es generalmente mayor o igual que 2, debido a que el AlO_4 tetraédrico es unido solamente al SiO_4 tetraédrico; n es el catión de valencia.

La armazón contiene canales interconectados donde se encuentran los cationes de sodio, calcio, potasio, magnesio, etc., los cuales neutralizan las cargas negativas y moléculas de agua. Estos cationes son móviles y pueden intercambiarse en diferentes grados por otros cationes. Llamaremos Ze a la macroestructura y x los cationes intercambiables; representaremos de forma abrevada como Ze - x a las Zeolitas.

Los **áridos** son aquellas materias de forma granular o fibrosa que, con preparación especial o sin ella, han de ser unidos entre sí por un aglomerante para conformar los hormigones y morteros (De Armas, 2008).

Los áridos constituyen la mayor parte de la masa en el hormigón, pudiendo llegar hasta 80 - 85 % en peso, de ahí que las propiedades físico - químicas y mineralógicas del árido tienen una profunda influencia en la resistencia, elasticidad y demás propiedades del hormigón.

El **fino o filler** es el material inerte finamente dividido empleado para disminuir la retracción, actuar como extensores, mejorar la laborabilidad y la coherencia en morteros y hormigones (NC 251, 2005b).

Existen diversas clasificaciones de los áridos, siendo las más empleadas las que los agrupan según su origen y tamaño. En la norma, (NC 251, 2013). Se define

como **árido** al material mineral procedente de rocas que se encuentran desintegradas en estado natural o precisan de trituración mediante procesos industriales. Las dimensiones son diferentes, varían desde 0,149 mm hasta un tamaño máximo especificado.

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

El **árido grueso (grava)** es aquel que posee principalmente partículas de tamaño superior a 4,76 mm.

Nota: El árido grueso puede describirse como grava (sin beneficiar o beneficiada) o como roca triturada (NC 251, 2005b).

El **árido fino (arena)** es aquel que posee partículas de tamaño que va desde 0,149 mm hasta 4,76 mm.

Nota: El árido fino puede estar descrito como arena natural (cernida o beneficiada), arena de grava triturada y arena de roca triturada (NC 251, 2005b).

Las sustancias nocivas al hormigón.

Las propiedades deseables de un árido para utilizarlo en hormigón son: que sea químicamente duradero, duro, resistente a los esfuerzos mecánicos, de forma aproximadamente cúbica después de triturado y capaz de dar una buena adherencia con la pasta de cemento. Químicamente los áridos deben ser inertes, pero en ocasiones muchos áridos naturales contienen sustancias nocivas al hormigón, clasificándose químicamente en cuatro grupos:

- Sustancias solubles en agua que pueden causar la lixiviación del árido debilitándolo o provocando eflorescencia en el hormigón. Ej.: sal común (NaCl).
- Sustancias solubles que pueden interferir el fraguado del aglomerante y la hidratación posterior. Ej.: yeso.

- Sustancias que pueden reaccionar con los constituyentes alcalinos. (Na_2O , K_2O , etc.) de los cementos. Ej.: ópalo.
- Sustancias que pueden causar la corrosión del acero de refuerzo. Ej.: la sal común, sulfuros (pirita).

Los áridos deben ser inertes por sí mismos, pero pueden contener incrustaciones, o estar cubiertos con una película de materiales dañinos, que pueden ser: limos, arcillas, yeso, carbonatos impuros de calcio y magnesio, sílice opalina, óxido de magnesio, óxido de hierro y mezclas de estos materiales.

El cemento en el hormigón.

El cemento Portland es un aglomerante hidráulico, material pulverulento que se obtiene de la mezcla y molienda del clinker más aditivos. Mezclado con agua, solidifica y endurece, uniendo cuerpos sólidos. Tiene un color gris oscuro o claro, por lo que comúnmente se le nombra cemento gris. Las materias minerales útiles para fabricar cemento se dividen en: componentes carbonatados (calizas, margas, pizarras), silicio – aluminoso (arcillas, caolín, areniscas, feldespatos) y aditivos (yeso, arenas cuarzosas, puzolanas, carbonato de calcio y óxidos e hidróxidos de hierro). Se utilizan también residuos de otras industrias como escorias metalúrgicas o colas mineras.

La composición química promedio en % del cemento Portland es: CaO = 60 - 67, SiO_2 = 17 - 25, Al_2O_3 = 3 - 8, Fe_2O_3 = 0.5 - 6, MgO = 0.1 - 5.5, Na_2O y K_2O (álcalis)= 0.5 - 5. y SO_3 = 1.3. La calidad del cemento depende de su composición química y la finura del molido, se expresa en la resistencia a la compresión alcanzada por el mortero a los 28 días. Ej: la del cemento Portland es de 250 kgf/cm² mínimos, se comercializa bajo la denominación de P - 25.

El **cemento Romano**, tiene su origen en la Grecia antigua, se obtiene mezclando cal 70 % y puzolana 30 %. En la actualidad se pueden apreciar numerosas obras de ese periodo en muy buen estado de conservación, pese a tener más de 2000 años de construidas.

El **cemento Portland puzolánico**, se define como un cemento hidráulico compuesto de una mezcla uniforme de cemento Portland y un material puzolánico

finamente dividido, su adición va desde un 5 % hasta un 20 % en las normas europeas y cubanas.

El desarrollo de **la resistencia** en hormigones con puzolanas tiene como regla general el incremento en las resistencias finales comparadas con los cementos Portland puros.

La capacidad del hormigón está en mantener el desempeño estructural con el paso del tiempo, aunque ésta no depende exclusivamente de las propiedades del cemento, sino de una gama de propiedades del hormigón. En la práctica se ha demostrado que las adiciones puzolánicas inciden en una mayor durabilidad del concreto para determinados tipos de ambientes.

Las zeolitas.

Estructuras de las Zeolitas.

Las Zeolitas poseen una estructura silicática tridimensional y cristalina peculiar, la que puede ser designada como cavernosa, por lo que todos los minerales pertenecientes al grupo zeolíticos están caracterizados por una red de canales o poros que conducen a cavidades centrales. La estructura cristalina de cada uno de los minerales miembros del grupo es única, por lo que cada uno de los minerales zeolíticos se caracterizan por canales, poros y cavidades o cavernas de dimensiones estrictamente determinadas. Las estructuras de muchas zeolitas han sido determinadas por análisis cristalográficos de difracción de rayos X. Los enlaces de estos minerales son muy rígidos en todas las direcciones, por lo que cuando se sumergen en agua no se hinchan. Los tamaños de los canales son importantes, pues en intercambio iónico se efectúa a través de ellos. Los iones demasiado grandes presentes en una disolución no podrán intercambiarse con los cationes móviles de la Zeolita. Así pues, la zeolita se asemeja a un tamiz iónico, por lo que puede discriminar entre diferentes iones basándose en sus estructuras y tamaños. La mayor parte las zeolitas cristalizan en los sistemas monoclinicos o rómbicos, pero existen también zeolitas tetragonales, trigonales y cúbicas. En general, son incoloras o blancas, aunque pueden presentarse con diferentes tonalidades debido a su contenido de impureza, principalmente de óxido de hierro y

de materia orgánica; presentan una dureza 3,5 a 5,3 un peso específico entre 2 y 2,4 y su peso volumétrico inferior al rango 1,7 - 1,8 g/ cm³, (Casals Corella., 1988).

Minerales zeolíticos.

Actualmente existen alrededor de 40 minerales zeolíticos distintos, que han sido reconocidos y se han obtenido más de 100 artificiales, siendo su origen volcánico.

En la literatura sobre el tema se refiere el nombre genérico de zeolitas para las obtenidas artificialmente y las naturales se les llama por su nombre específico. Pero a la zeolita natural los especialistas la denominan roca zeolítica. La piedra es de color verde, si predominan en su cuerpo elementos ferrosos y cambiará según su composición química.

A continuación se relacionan los nombres de 20 de estos minerales:

- | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|---------------|
| - Analsita | -Faujasita | -Heulandita | -Scolecita |
| -Chabazita | -Ferrierita | -Laumontita | -Stilbita |
| -Clinoptilolita | -Gismondita | -Mordenita | -Thomsonita |
| -Epistilbita | -Gonnardita | -Nacrolita | -Wairakita |
| -Erionita | -Harmotona | -Filipsita | -Yugawaralita |

En Cuba las más abundantes son la Clinoptilolita y la Mordenita, coincidiendo con ser la más importante a escala mundial por la consecutividad de sus apariciones, dimensión de los depósitos y diversidad de aplicaciones (Casals Corella., 1988).

Propiedades.

Una característica singular de las zeolitas es que simultáneamente mediante diversos principios: absorción, intercambio iónico, tamiz molecular, etc. Lo más importante de las zeolitas es su propiedad de servir de tamiz molecular. Debido a su estructura cavernosa asegura una enorme área en su interior, pero al paso a las mismas está limitado sólo a moléculas con un tamaño determinado que pueden pasar a través del tamiz. El volumen vacío en algunas zeolitas puede alcanzar valores tan altos como un 47 % (Chabazitas), mientras que las dimensiones de los canales, en las distintas especies minerales de zeolitas, permiten el paso de moléculas con diámetros específicos efectivos de varios angstroms, las cuales son

absorbidas en los espacios vacíos; esto explica el empleo de algunas zeolitas como absorbentes industriales. La capacidad de intercambio iónico es una de sus notables propiedades que han coadyuvado a la difusión de su empleo; oscila entre 0,55 y 3,10 meq/ g. El intercambio iónico está dado por poseer una geometría molecular bien definida, con poros generalmente llenos de agua y cuyos enlaces forman canales y cavidades que le permiten ganar y perder agua reversiblemente e intercambiar los cationes de su estructura, sin que ésta se altere (Casals Corella., 1988).

Debido a esa conformación, las zeolitas presentan una estructura microporosa adecuada para la acción catalítica, lo que las convierte en un material ideal para muchos procesos químicos industriales. Esta propiedad de permitir, específicamente el paso de algunas moléculas y no de otras fue aprovechada en los años 1950 para introducirla comercialmente como cribas moleculares en los procesos industriales que lo requerían. La propiedad absorbente le permite un sin número de posibilidades de uso, principalmente en la agricultura, ya que al deshidratarse su volumen está constituido por hasta un 50 % de espacio poroso, lo cual le confiere una alta capacidad de absorción a baja presión; la hidratación también es una propiedad de gran importancia, ya que la deshidratarse estos minerales no cambian su estructura, pudiendo llenarse con líquidos o gases repetidos. La otra propiedad importante es su alto contenido silíceo (Casals Corella., 1988).

Aplicaciones.

Las zeolitas abarcan disimiles empleos industriales en función de sus propiedades físico – químicas estas se identifican en:

I. Capacidad de intercambio iónico.

Esta es una de las propiedades de las zeolitas que han servido para la difusión de su empleo.

- Componentes de la alimentación animal.
- Fertilizantes y acondicionadores de suelo.
- Concentración y asimilación de especies radiactivas.

- Eliminación de iones amoniacales de las aguas albañales.
- Empleo de la zeolita como medio filtrante en la purificación del agua potable e industrial.

II. Capacidad de absorción y como tamiz – molecular.

- Beneficios del aire con oxígeno.
- Catalizador y limpieza de gases, aceites, etc.

III. Hidratación y deshidratación.

IV. Composición silicia.

- Como elemento puzolánico.
- Elementos de sillería u ornamentales.
- Agregados ligeros.
- Relleno de la industria del papel.

Aridos o Agregados.

Principales tipos de áridos.

Existen diversas clasificaciones de los áridos, siendo más empleadas las que los agrupan según su origen y según su tamaño. Los áridos según su origen se clasifican en artificiales y naturales; y según su tamaño en finos y gruesos (Guerra, 2008).

- **Áridos naturales:** se obtienen producto de la descomposición o trituración de las rocas. La descomposición o meteorización de las rocas se produce por la acción de los agentes naturales como: agua, viento, temperatura, clima, fauna y flora, que con el tiempo van descomponiendo la roca en granos de pequeños tamaños. Muchas veces los tamaños de estos granos son los que usualmente se emplean en la confección de morteros y hormigones, por ejemplo: arena de mar, arena de río, gravas, etcétera (Guerra, 2008).

El otro proceso para la obtención de árido naturales es la trituración. Es un método artificial, por medio de trituradoras se Trituran las rocas sólidas en los yacimientos,

hasta alcanzar los tamaños adecuados, clasificándolos según sea su destino final (Guerra, 2008).

- **Áridos artificiales:** Se preparan con productos diversos en estado pulverulento pastoso, para comunicarles fácilmente la forma y se endurece por proceso físico - químicos como ejemplo: escoria, ladrillo triturado, pizarra dilatada. Ej. Perlita (Guerra, 2008).

Los áridos en el hormigón.

Los áridos constituyen la mayor parte de la masa en el hormigón, pudiendo llegar hasta 80 - 85 % en peso, de ahí que las propiedades física - químicas y mineralógicas del árido tienen una profunda influencia en la resistencia, elasticidad y demás propiedades del hormigón. Las propiedades deseables de un árido para utilizarlo en hormigón son: que sea químicamente inerte, duradero, duro, resistente a los esfuerzos mecánicos, de forma aproximadamente cúbica después de triturado y capaz de dar una buena adherencia con la pasta de cemento. El tamaño, abundancia y continuidad de los poros del árido es su más importante propiedad física. El tamaño y la naturaleza de los poros afectan la resistencia a los esfuerzos mecánicos de los áridos, la absorción y la permeabilidad. Esta última asu vez da idea de la resistencia a los ataques químicos y la resistencia a las heladas, que tenga un árido. La mayor parte de las propiedades de los áridos son atribuidas directamente a los componentes de las rocas, esta propiedad depende en gran medida del proceso tecnológico utilizado para la fabricación del árido. Algunas otras propiedades que pueden tener importancia especial tales como: Peso específico, propiedades térmicas, resistencia a la abrasión, granulometría, entre otras (Guerra, 2008).

Peso específico: esto puede influir en la elección de un árido donde el peso sea un factor a considerar, por ejemplo, los paneles de aislamiento sonoro, donde interesan pesos específicos bajos o una presa de gravedad donde interesan pesos específicos altos, por motivos de seguridad y económicos. El peso específico de los áridos comunes varía desde 2,2 en el caso de las cuarcitas, a 2,9 en el caso de los gabros (Guerra, 2008).

Las propiedades térmicas, como el calor específico de los áridos, pueden tener importancia en ciertos trabajos tales como grandes presas y estructuras masivas similares. La conductividad térmica tiene importancia desde el punto de vista de su resistencia al fuego y en la construcción de algunas estructuras tales como chimeneas de hormigón reforzado. En el hormigón se utilizan por lo general áridos con un tamaño que no rebase los 76 mm. Para poder garantizar una granulometría adecuada en el hormigón, se producen en las canteras diferentes grupos de áridos donde cada grupo contiene varias fracciones de tamaño. Convencionalmente se han clasificados en áridos finos (arena) formados fundamentalmente por partículas menores que 4,6 o 5 mm y áridos gruesos (granitos, gravillas, piedras, macadán) formados por partículas fundamentalmente mayores que estos tamaños (Guerra, 2008).

Propiedades físico - mecánicas de los áridos.

Las propiedades físicas y mecánicas de los áridos naturales deben ser consideradas en función de su resistencia a la compresión, resultando conveniente que las rocas utilizadas para la fabricación de áridos presenten un mínimo de resistencia a la compresión. No obstante al emplearse la resistencia a la compresión de los áridos como un índice de su calidad, no debe plantearse como una limitante en la aceptación del árido.

El **módulo de elasticidad** del hormigón depende en un considerable grado del árido empleado en su fabricación, la resistencia a flexión depende también de 9 Tesis de Maestría en Geología Santiago Cuba Miranda estas propiedades, por lo general a medida que es más alto el módulo de elasticidad del árido, mayor es la resistencia a la flexión, manteniendo los otros factores iguales.

El tamaño, abundancia y continuidad de los poros del árido es su más importante propiedad física. El **tamaño y naturaleza de los poros** afecta la resistencia a los esfuerzos mecánicos de los áridos, la absorción y la permeabilidad. Esta última a su vez da idea de la resistencia a los ataques químicos y a las heladas que tenga un árido.

El **peso específico** influye en la elección de un árido, por lo que éste es un factor a considerar, por ejemplo: en los paneles de aislamiento sonoro interesan pesos específicos bajos, en una presa de gravedad interesan pesos específicos altos por motivos de seguridad y económicos. El peso específico de los áridos comunes varía desde 2,2 en el caso de las cuarcitas hasta 2,9.

Las **propiedades térmicas**, como el calor específico de los áridos, pueden tener importancia en ciertos trabajos como son las grandes presas y estructuras masivas similares.

La **conductividad térmica** tiene importancia desde el punto de vista de su resistencia al fuego y en la construcción de algunas estructuras como las chimeneas de hormigón reforzado.

La **resistencia a la abrasión** es importante en la elección del árido para su aplicación en pisos industriales, pavimentos, algunos tipos de silos y canales para el traslado de líquidos.

Otra propiedad a destacar es la **composición granulométrica**; el término granulometría se refiere a la distribución de los tamaños de las partículas del árido, este factor tiene gran influencia sobre el comportamiento del hormigón en cuanto a la facilidad de mezclado, transporte, colocación y compactación, sin que se produzca separación de las partículas de diferentes tamaños que integran el árido.

Puzolanas.

Según el Instituto Americano del Hormigón, en su (Guía 232.1R., 2000), es a la civilización romana a quien se le debe el origen del nombre puzolanas, como derivado del término “pozzuolana”, con el que se referían a unas cenizas volcánicas consolidadas, encontradas en las proximidades del sitio de Pozzuoli o Puzzoli, cerca de Nápoles y con las que se constituían los célebres morteros romanos. Vitruvius en el siglo I A.C. ya menciona el uso de estos aditivos al mortero que se confeccionaba en la proporción de una unidad de cal por tres de arena o dos por cinco - según la calidad de la arena - con el agregado seleccionado.

A falta de roca volcánica en otras latitudes, se utilizaba teja o ladrillo picado. En este sentido, se registra su uso en la época de la construcción de los aljibes de Jerusalén (bajo el mandato de Salomón, siglo X A.C). Esta costumbre parece haber sido introducida por los obreros fenicios que construyeron el templo de dicho rey y que conocían empíricamente las propiedades de los materiales llamados actualmente puzolanas artificiales (Quintana, 2005).

En la isla de Bali, al este de Java, los habitantes utilizan desde hace más de dos mil años para la construcción de muros y terrazas, una mezcla de caliza coralina, nueces de coco cocidas y cenizas de su volcán sagrado (Deloye, 1993).

En 1952 el departamento de restauración de los Estados Unidos brinda una definición del término puzolana, incorporada en las normas, (ASTM C 618, 1958) y mantenida hasta hoy como la definición que dice: "las puzolanas son materiales silíceos o alúmino - silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se encuentran finamente divididos y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes".

A esta definición, empleada por varios investigadores para el estudio de los materiales puzolánicos, se le puede agregar que existe un predominio del componente amorfo.

En un sentido más particular las puzolanas, o por lo menos algunas de ellas, son de naturaleza zeolíticas, capaces de reaccionar con otras sales cálcicas, así como otros óxidos alcalinotérreos, siempre en presencia de agua y a temperatura ambiente, para dar lugar a la formación de silicatos y aluminosilicatos hidratados similares a los resultantes de la hidratación del cemento Portland, principalmente la tobermorita (Almenares, 2011).

En Cuba existe un inmenso potencial de puzolanas naturales con numerosos yacimientos de rocas zeolitizadas y de vidrio volcánico diseminadas por, prácticamente, todo el territorio nacional, generalmente con elevada actividad puzolánica. Las puzolanas presentan en virtud de su inestabilidad química reflejo del desorden estructural, altas posibilidades de reaccionar con otras sustancias para

formar nuevos compuestos más estables, es así como atrapan la cal libre en el clinker. Éstas engloban materiales de diferente naturaleza, por esto cuando se habla de ellas, se hace alusión a rocas, suelos, sedimentos o productos artificiales que presentan propiedades puzolánicas.

Clasificación de las puzolanas según su origen.

Las **puzolanas según su origen** se pueden clasificar en dos grandes grupos: naturales y artificiales, aunque existe un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que necesitan tratamientos térmicos de activación con el objeto de aumentar su reactividad.

Las **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 en la industria del cemento, 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. Más tarde por procesos geológicos de enterramiento estas cenizas se convierten en tobas, las cuales son rocas volcánicas bastante porosas, característica que les confiere una gran superficie interna, lo que favorece su reactividad, entonces, como puzolana sirve tanto el sedimento como la roca.

En las **puzolanas artificiales**, su condición puzolánica se debe a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta denominación se incluyen los subproductos de determinadas operaciones industriales tales como: residuos de bauxita, escorias y polvos de chimeneas de altos hornos, cenizas volantes, etc. Las de mayor uso en la actualidad, en el mundo por sus excelentes propiedades puzolánicas son las cenizas volantes, en función de las ventajas económicas y técnicas que ofrecen, ya que es un material residual y con ello los cementos aumentan la trabajabilidad y disminuyen el calor de hidratación.

Cenizas volantes: Son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de potencia, constituyen en sí las partículas no combustibles removidas de la chimenea de los gases. Las características de las

cenizas volantes pueden variar significativamente en dependencia de la fuente del carbón mineral que se quema. Las cenizas de Clase F son normalmente producidas de la quema de la antracita o de carbones bituminosos y generalmente poseen un contenido bajo de calcio. Las cenizas de Clase C son producidas cuando se queman carbones sub-bituminosos y poseen típicamente propiedades puzolánicas. Las cenizas volantes utilizadas en el hormigón deben tener conformidad con la especificación normativa (ASTM C 618, 2002a).

Escorias granuladas de alto horno: subproductos no metálicos producidos en un alto horno cuando el mineral de hierro es reducido a hierro dulce. La escoria líquida es enfriada rápidamente para formar gránulos, que son molidos hasta una finura similar a la del cemento portland. Las escorias granuladas de alto horno tienen por sí mismas propiedades cementicias, pero estas son mejoradas cuando se utilizan con cemento portland. Se recomienda utilizarlas entre el 20 y el 70 % en peso de los materiales cementicios y deben tener conformidad con la especificación normativa, (ASTM C 989-06, 2006). En esta norma se definen tres grados de escorias: 80, 100 y 120, donde el grado más alto contribuye más al potencial resistente.

Humo de sílice: material puzolánico de alta reactividad, es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferro-silíceo. Se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor de 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. Su utilización oscila entre el 5 y el 12 % en peso de los materiales cementicios para las estructuras de hormigón que necesitan alta resistencia o una permeabilidad significativamente reducida al agua. La especificación normativa para el humo de sílice es la norma (ASTM C 1240-05, 2003). Debido a su extrema finura, deberán garantizarse procedimientos especiales para la manipulación, el vertido y el curado del hormigón con este material.

Puzolanas mixtas o intermedias: son aquellas que, naturales por su origen, se someten a un tratamiento térmico con el objeto de cambiar sus propiedades para aumentar su reactividad química. Dentro de éstas se incluyen la ceniza de la

cáscara de arroz y las arcillas; un representante típico de éstas últimas es el polvo de ladrillo, producto obtenido como desecho de la industria de la cerámica roja.

Normativas de las puzolanas.

Las evaluaciones de la actividad puzolánica en nuestro país estuvieron dirigidas inicialmente al cumplimiento de requisitos de los cementos mezclados clasificados como Portland Puzolánicos PP - 250 y PP - 350 en correspondencia con las primeras producciones de la fábrica José Mercerón en Santiago de Cuba y se experimentaron diversos métodos, entre ellos el de Fratini, para verificar la actividad de las adiciones de tobas cubanas, (Rosell, 2010).

Con carácter experimental y con plazo de 2 a 3 años, el Comité de Normalización de cemento, presentó y se aprobó en 2007 la norma de especificaciones, (528 2007). Esta norma homologa los criterios de la norma (618 2002a) y en ella se enmarcan, incluso, aquellos materiales obtenidos como subproductos de la generación eléctrica a partir de carbón mineral, cenizas volantes no existentes en el país y cualquier otra puzolana natural, independientemente de su génesis y mineralogía, y no tiene en cuenta que nuestro país tiene formación geológica diferente a la de norte América continental. Los métodos de ensayo en que se sustenta esta norma es la (NC TS 527, 2007C).

En la (NC 120, 2007a) se establece requisito para el uso de adiciones tanto activas como inertes, pero no establece un requisito respecto a composición, granulometría u otro aspecto. Se regula en el caso de las activas que deben ser de probada aptitud mediante el uso del coeficiente “k” de acuerdo a la relación agua/cemento y el contenido de cemento especificado en dicha norma para la prestación a que será sometida.

Actividad puzolánica.

La actividad puzolánica se refiere a la capacidad y velocidad de reacción entre los aluminosilicatos de la puzolana y el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento para formar productos cementantes. La reacción principal en estos sistemas es la que se describe en la reacción (III), donde se obtiene como producto

el hidróxido de calcio hidratado, también comúnmente formulado en esta rama con las siglas C - S - H:



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

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

Las características generales que le confieren a las puzolanas gran reactividad son:

- La suma de los componentes ácidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) >70 %.
- Estructuras amorfas o parcialmente desordenadas.
- Alta superficie específica.

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

Aplicación de las puzolanas.

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

La adición de puzolanas confiere al cemento Portland y al hormigón propiedades de gran importancia práctica. (ICONTEC 1512, 2009) como son:

- Aumento de su estabilidad química y por tanto una mayor durabilidad.

- Disminuye la liberación del calor de hidratación confiriendo menor permeabilidad en los hormigones, que los hace idóneos para la construcción de presas y obras que necesiten grandes masas de este material.
- Minimiza la expansión volumétrica durante el fraguado; lo que elimina o reduce las grietas y con ello aumenta la resistencia mecánica.
- Mejora la maniobrabilidad de la mezcla de hormigón, con menor tendencia a la segregación de sus componentes.
- Menor costo de producción (ahorro de combustible al disminuir el consumo de clinker).
- Mayor homogeneidad del hormigón.
- Reduce la presencia de cal libre, porque proporciona los elementos necesarios para completar la reacción química de formación de las fases cristalinas principales que acompañan al cemento. La cal libre presente en el clinker afecta la resistencia química del cemento y del hormigón, exponiéndolo al “lavado químico” que produce la lluvia y la humedad atmosférica.

Sin embargo, los cementos puzolánicos presentan también desventajas, como:

- Necesidad de una mayor cantidad de agua de mezclado para una consistencia dada.
- Menor resistencia a la compresión en edades cortas, pero mayores a partir de los 28 días de fraguado.
- En ocasiones provoca una mayor retracción al secado.

Para evaluar las puzolanas se tienen en cuenta diferentes parámetros como la composición química y mineralógica, siempre puntualizando la importancia de altos contenidos de los óxidos de SiO_2 ; Al_2O_3 y Fe_2O_3 y mínimos para los componentes alcalinos y alcalinotérreos, (Gener, 2006); (Rabilero A. C., 1988); (Muños, 1974).

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

- Hormigón armado.

- Hormigón en masa.
- Hormigón con áridos potencialmente reactivos.
- Hormigón para elementos prefabricados no estructurales.
- Hormigón armado estructural de resistencia hasta media (no superior a 35 MPa).
- Pavimentos de hormigón para firmes de carretera.
- Hormigón armado de baja resistencia.

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

Hormigón Liviano.

Definición y clasificación.

Se designa convencionalmente como hormigones livianos a aquellos que producen una densidad que fluctúa entre 300 kg/m^3 y 1900 kg/m^3 , ya que los normales presentan una densidad normal de 2400 kg/m^3 (Guzmán, *et al.*, 2010).

Por su tipo de aplicación el hormigón liviano se clasifica en:

- Hormigón de Relleno
- Hormigón Aislante
- Hormigón Estructural o de alto desempeño

Uso y Aplicaciones.

Las aplicaciones que se le pueden dar al hormigón liviano se basan exclusivamente en el diseño que se le dé además de los agregados escogidos para la elaboración del mismo (Guzmán, *et al.*, 2010).

El hormigón liviano es ideal para la construcción de elementos secundarios en edificios o viviendas, que requieren de ser ligeros a fin de reducir las cargas muertas; para colar elementos de relleno que no soporten cargas estructurales; para la construcción de vivienda con características de aislamiento térmico (Guzmán, *et al.*, 2010).

Hormigón Estructural.

El uso fundamental del hormigón liviano busca reducir la carga muerta de una estructura de hormigón, lo que permite a su vez que el diseñador estructural reduzca el tamaño de columnas, zapatas y otros elementos de cargas en la cimentación particularmente (Guzmán, *et al.*, 2010). Este sería un beneficio financiero directo capaz de cuantificarse con bastante aproximación al reducirse el consumo de acero y el peso de la estructura en sí, debido a un ahorro en el diseño de la cimentación y de la estructura de soporte, ofreciendo al arquitecto o ingeniero una mayor libertad de planeación debido a un mayor espaciamiento entre columnas y mayores luces (Guzmán, *et al.*, 2010).

Se encuentran además otros beneficios como, por ejemplo, la reducción en peso produce un ahorro en el transporte de los materiales con respecto al volumen, además se facilitan las operaciones en el sitio de la construcción debido a que hay menos fatiga humana y al mismo tiempo esto ayuda a que se aumente el rendimiento de cada trabajador, dando lugar a una edificación más rápida y así a una reducción en el costo. El hormigón estructural liviano posee una densidad en el orden de 1 440 kg/m³ a 1 840 kg/m³, en comparación con el concreto de peso normal que presenta una densidad en el rango de 2 240 kg/m³ a 2 400 kg/m³. En edificios, el hormigón estructural liviano proporciona una estructura de concreto con mayor calificación de resistencia al fuego, además la porosidad del agregado liviano proporciona una fuente de agua para el curado interno del hormigón que permite el aumento continuo de la resistencia y durabilidad del hormigón (Guzmán, *et al.*, 2010).

Aislante Térmico.

Un aislante térmico es un material usado en la construcción y caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura. Una de las características del hormigón liviano es el valor alto de aislamiento térmico, el cual aumenta o disminuye en relación inversa con la densidad del material. La conductividad es la característica por la cual el calor pasa de un material sólido a otro cuando están en

contacto entre sí, sabemos que el aire es un mal conductor de calor, por lo tanto los hormigones livianos, que son porosos por excelencia lo cual indica que encierran cantidades considerables de aire, los convierte en buenos aislantes térmicos (Guzmán, *et al.*, 2010).

Prefabricados.

Los prefabricados de hormigón son elementos compuestos de hormigón, realizados en una fábrica o complejo industrial sobre el terreno y, posteriormente, instalados, en su posición final. Los productos prefabricados de hormigón son ampliamente conocidos y utilizados, vienen en todo tipo de diseños para utilizar. El uso más común de prefabricados de hormigón con agregados de peso ligero y del hormigón aireado es en forma de bloques de mampostería utilizados para la construcción de muros de carga y sin carga o muros divisorios (Guzmán, *et al.*, 2010).

Bloques huecos de hormigón. Generalidades.

Los bloques huecos de hormigón es el material moderno más popular para construir todo tipo de edificios, como casas, edificios de oficinas, fábricas y hasta edificios de varias plantas sin necesidad de soporte estructural adicional. El buen bloque de hormigón es sinónimo de economía y versatilidad, aplicándose a todas las formas constructivas. Es adaptable, creativo y relativamente fácil de usar. Los bloques de hormigón soportan altas cargas, resisten el fuego, tienen caras y lados bien formados y son uniformemente de la más alta calidad. Están disponibles en cientos de formas, tamaños, colores resistentes a la intemperie y alta estabilidad ante la exposición a la luz de sol y agentes climáticos (Silot, 2015).

La experiencia internacional en construcción de bloques de hormigón han demostrado el excelente comportamiento de este sistema constructivo al que se asigna cada vez mayor preferencia sobre otros materiales usados en la construcción como consecuencia de las conocidas ventajas que resultan de su empleo y que en esencia se pueden resumir en resistencia, durabilidad, economía y velocidad constructiva. Esto unido a la simplicidad de fabricación hace de este sistema constructivo uno de los procedimientos más completos para resolver el problema de las construcciones, en las cuales todas las ventajas de aplicación de los bloques

son más evidentes al permitir una economía total en materiales y mano de obra en la fabricación de piezas hasta su colocación que difícilmente puede alcanzarse con otros sistemas (Silot, 2015).

Según la norma (NC 247, 2010), los bloques huecos de hormigón son piezas prefabricadas a base de cemento, agua, áridos finos y/o gruesos, naturales y/o artificiales, con o sin aditivos, sin armadura alguna con densidades normalmente comprendidas entre $1\ 700\ \text{kg/m}^3$ y $2\ 200\ \text{kg/m}^3$. Los bloques se fabrican vertiendo una mezcla de cemento, arena y agregados pétreos (normalmente calizos) en moldes metálicos, donde sufren un proceso de vibrado para compactar el material (Silot, 2015).

CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO - GEOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS REGIONALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 Características físico - geográficas de la regional y local.

El macizo montañoso de la Sierra del Cristal se extiende fundamentalmente en dirección submeridional. Sólo al sur del punto más alto (1231 m) adquiere dirección sub latitudinal. Las partes de la divisoria de agua de la sierra es una superficie aplanada, bastante ancha (de 100 - 200 m en el norte a 1 - 1.5 km en el sur), coronada por pequeñas colinas con elevaciones relativas de 100 - 150 m.

En las cuencas de los ríos el relieve es algo distinto, con alturas absolutas de 300 - 400 m. Los ríos del municipio son: Guanicum, Baracaldo, Aura, Colorado, Jagua, Bayate, Baraguá y Bío, todos afluentes del Cauto. Existen también numerosos arroyuelos, algunos de los cuales no corren todo el año, entre lo que podemos mencionar; Bayate Seco, Pinalito, San Francisco y El Mijjal.. Los valles en el curso superior de los ríos son escarpados y estrechos. Las pendientes de los valles son bastante inclinadas, a veces escarpadas. Las divisorias de aguas en los cursos superficiales generalmente son estrechas (20 - 30 m). La red fluvial de la zona de los trabajos es densa, la principal arteria fluvial es el río Cauto, existen otros arroyos que desembocan en este río.

El macizo de la Sierra de Nipe se caracteriza por la existencia de la amplia superficie pleniplanizada de Pinares de Mayarí (1200 km²), con cotas absolutas de 600 - 700 m y desniveles relativos de 30 - 50 m.

La red de comunicaciones está ampliamente desarrollada debido a la presencia de la carretera Palma – Cueto, que pasa por el poblado de Palmarito de Cauto.

La zona investigada está situada unos 50 km al N de Santiago de Cuba y a unos 2 km al SE del municipio Mella, (ver figura 1.1)

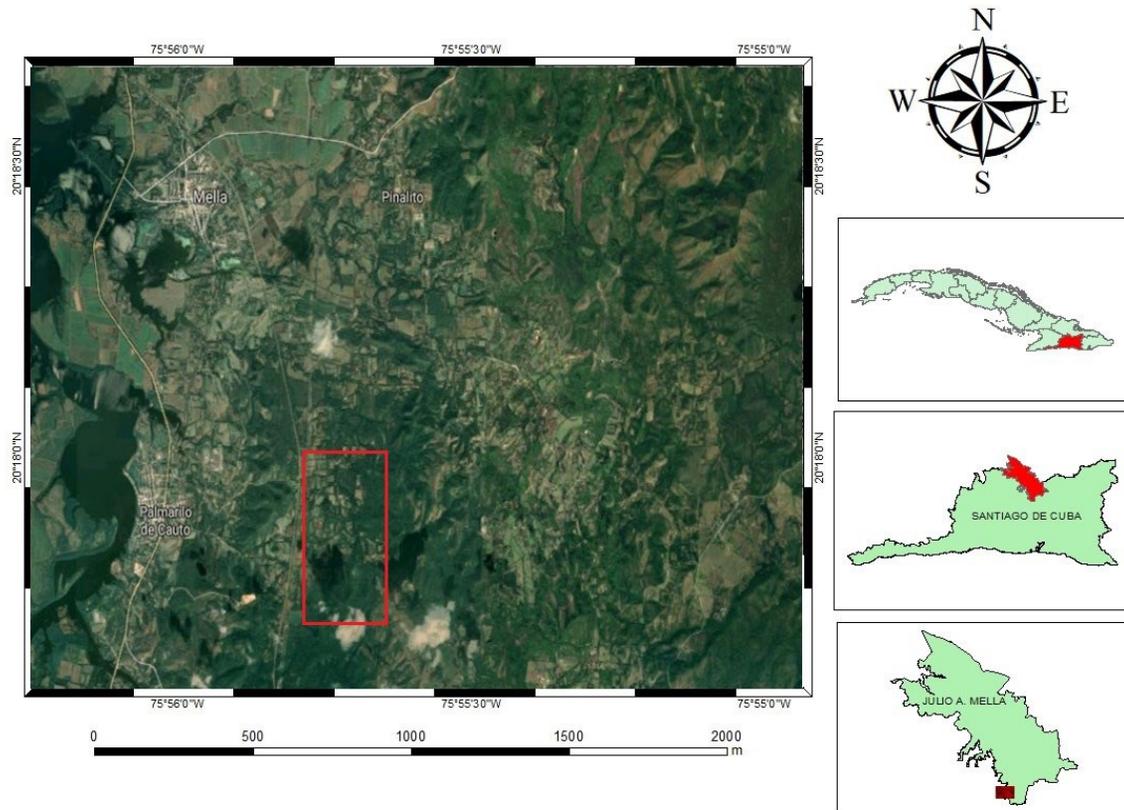


Figura 1.1 Mapa de ubicación geográfica escala 1:50000.

1.2 Marco geológico regional.

Según los trabajos realizados por (Adamovich, *et al.*, 1974) a escala 1: 50 000 y teniendo como base el levantamiento geológico escala 1: 100 000 en la antigua provincia de Oriente por la Brigada Cubano - Húngara, se dan a conocer las características geológicas generales de la región.

Geológicamente la región de está compuesta por los sedimentos de las formaciones que se describen a continuación:

- Formación Bucuey (BUC) K₂.
- Formación Picota (PIC) K₂^m.
- Formación Miranda (MIR).
- Formación Charco Redondo (CHR).
- Formación San Luís (SLU).

Formación Bucuey (BUC) K₂.

Está representada por las rocas más antiguas de la región que son las vulcanitas que afloran en la parte central de la cúpula oriental, estas vulcanitas presentan algunas intercalaciones de tobas de distintas estructuras y granulometría. En general este complejo volcánico sedimentario está representado por efusivos y sus derivados de composición andesítica y andesítica basáltica, estos rasgos la diferencian profundamente del paquete tobáceo del Paleógeno.

Formación Picota (PIC) K₂^m.

En los alrededores del núcleo volcánico, en la cúpula Oriental mencionada anteriormente aparece un horizonte terrígeno de gravelita conglomerática con escasas intercalaciones margosas en las cuales se han encontrado rudistas del Maestrichtiano; en los bordes de esta cúpula aparecen algunos pequeños lentes de calizas arrecifales con rudistas del Maestrichtiano en Jagua y Magueyal.

Formación Miranda (MIR).

Esta formación está representada por una secuencia de rocas piroclásticas con escasos y pequeños mantos efusivos de composición andesito - dacítica y dacítica. Este paquete tobáceo tiene alrededor de 300 m de espesor, con una estructura de ritmo de composición de deposición de hasta 5 m, comenzando en la parte inferior del corte con conglomerado grueso, con cantos de hasta 1 m y más.

Se continúa con variedades litocristaloclasticas y/o litocristalo vitroclásticas, más arriba por variedades cristalovitroclásticas, en la parte superior por vitroclásticas (predominantes) y por último aparecen tufitas calcáreas de distintas granulometrías, a veces de color violáceo grisáceo.

Hacia la parte superior del perfil tobáceo, los conglomerados desaparecen de la base de los ritmos para dar lugar a variedades litocristaloclasticas de textura gravelítica, los últimos ritmos tienen como parte principal las variedades vitroclásticas, el color de este paquete tobáceo es verdoso con matriz amarillento, o grisáceo con matriz verdosa. Las rocas calcáreas y terrígeno calcáreas juegan un

rol extremadamente limitado, excepto en la zona de Mayarí Arriba donde adquiere un poco más de desarrollo.

La escasa actividad efusiva, que se limita en toda la extensa área ocupada por esta formación, está dada por aislados a pequeños cuerpos de andesito - basaltos, andesitas y andesito - dacitas. La posición de estos cuerpos generalmente está dada en los contactos con la Formación Miranda y las rocas calcáreas suprayacentes de la Formación Charco Redondo del Eoceno - medio.

Formación Charco Redondo (CHR).

Está representada por las calizas del Eoceno - medio, la mayoría de las cuales en los sectores Occidental, Nor - Occidental, Sur - Central y Sur Oriental son de estratos gruesos o masivos y hacia la parte Nor - Oriental y Sur - Oriental de estratos medios a veces finos. Las calizas del Eoceno - medio aparecen también en forma de manchones encima de las cúpulas, dando lugar a formaciones positivas del relieve como son los mogotes de San Nicolás, La Picota y otros. En el contacto de estas calizas del Eoceno - medio con las tobas aparecen pequeños yacimientos de manganeso.

Formación San Luís (SLU).

Representada por una gran variedad de rocas clásticas y terrígenas carbonatadas de granulometría variada, arcillas, conglomerados y calizas laminares o de capas gruesas, margas, además se caracteriza por el predominio de areniscas de granos finos, medios y de aleurolitas carbonatadas, las cuales en conjunto constituye más del 90 % de la formación. El espesor total de la formación se estima en unos 700 m.

Cuaternario (Q).

Los depósitos del cuaternario están representados por depósitos friables en el caso de ejecución de arroyos y corrientes intermitentes, y por los aluviones de los ríos Jagua, Indio, Guaninicún y otros; los aluviones, están constituidos por areniscas y arcillas de color gris oscuro.

La región está cortada por dos principales sistemas de fallas de dirección NO - SE y NE - SO, algunas con dirección submeridional. Las fallas de dirección NO - SE

aparecen enmarcando dos grandes estructuras braquianticlinales, cuyos ejes buzanan hacia el NO, en ambos casos una de estas estructuras está en el extremo Oeste de la región, y es donde se encuentra el área investigada, la otra se encuentra al Este de la zona de Magueyal, aquí las tobas presentan menor zeolitización. Al Norte de la región (Pinalito) aparecen algunos afloramientos de las ultrabásitas serpentinizadas del macizo Pinares de Mayarí. Por los sistemas de fallas descritos, los desplazamientos tanto horizontal como vertical son de poca consideración. La edad de estas fallas, al parecer, es Eoceno Medio (f^2_2), aunque algunas de ellas han sido revisadas posteriormente.

Merecen especial atención los afloramientos de pequeños cuerpos de naturaleza metasomática hidrotermal de color rojizo conocido por Bayates, de forma irregular intruyen las tobas del Paleoceno en la parte Sur de la cúpula Occidental y las calizas de la parte Norte y Sur Este, en las inmediaciones de los yacimientos de manganeso. Estos Bayates, de origen hidrotermal metasomática, nos indican la intensidad de los procesos pos - volcánicos (fumarolas, gas, campos de hidrotermas) que dieron lugar a la zeolitización de las tobas, silificación de otras rocas y a la acumulación de los óxidos de manganeso.

A continuación se muestra el mapa geológico de la región con su respectiva área de estudio y sus principales formaciones (ver figura 1.2) sacado del mapa geológico de las provincias Orientales, escala 1: 100 000, autores, Brigada Cubano – Húngara. Edición digital por el Grupo CASIG IGP 2001.

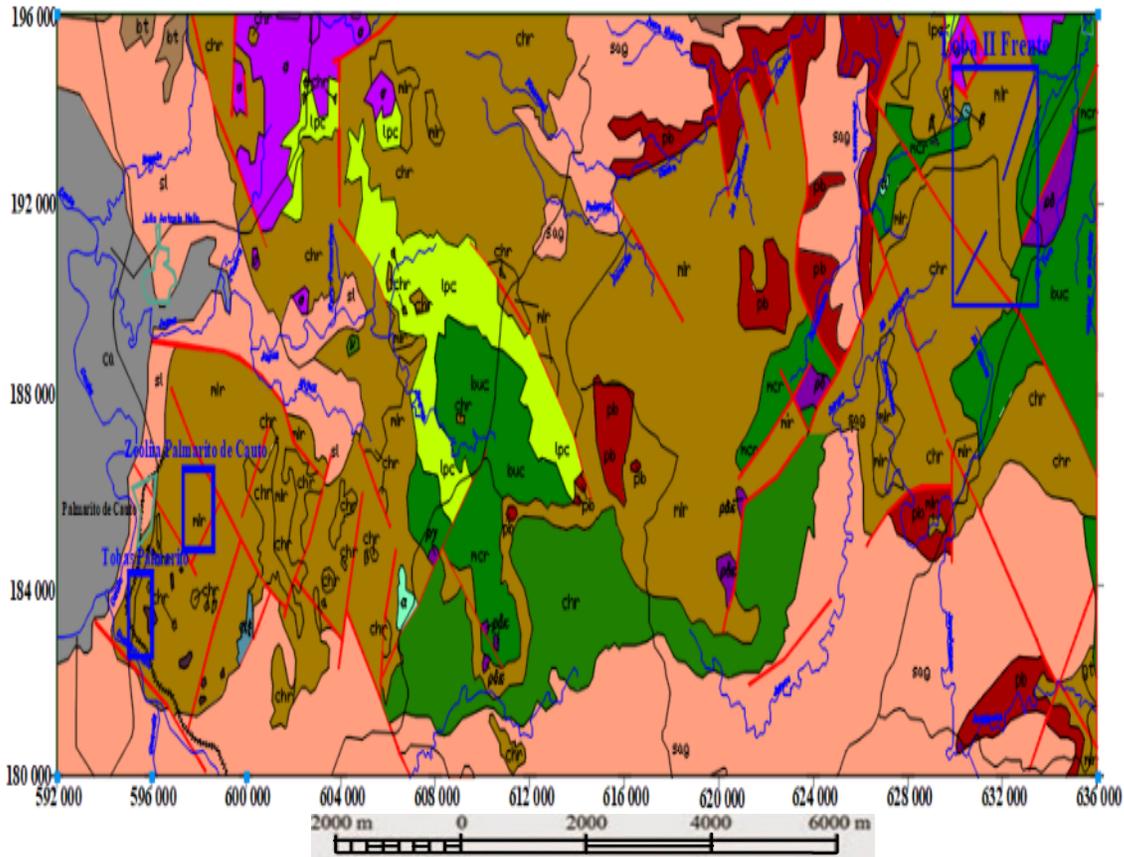


Figura 1.2 Mapa geológico de la región, Escala original 1:100000 (Brigada Cubano – Húngara), Edición digital por el Grupo CASIG IGP 2001.

LEYENDA

- Q1 Fm. Cauto (ca): Arcillas, limos, arenas, gravas y conglomerados, con estratificación horizontal y cruzada.
- P3-N1 Fm. Biñiri (bt): Calizas algáceas, duras, carsificadas, que contienen ocasionalmente fragmentos de corales.
- P2-P3 Fm. Sagua (sag): Margas con intercalaciones de calizas arcillosas, areniscas polimícticas, conglomerados polimícticos, limolitas y tobas.
- P1-P2 Fm. San Luis (sl): Areniscas polimícticas, limolitas, margas, arcillas, calizas arcillosas, calizas biodetríticas, calizas arenosas y conglomerados polimícticos.
- P2 Fm. Charco Redondo (chr): Calizas compactas organo-detríticas, fosilíferas, de color variable.
- P1 Fm. Puerto Boniato (pb): Alternancia de calizas y margas, con intercalaciones de sílice.
- P1-P1 Fm. Miranda (mir): Tobs con intercalaciones de tufitas, areniscas tobaceas, calizas, conglomerados, limolitas, margas, gravelitas y conglomerados vulcanomícticos.
- P1 Fm. Gran Tierra (gt): Calizas brechosas, conglomerados vulcanomícticos, brechas, margas, tobas, calizas organo-detríticas, areniscas vulcanomícticas
- K1-P1 Fm. Mícara (mcr): limolitas, brechas; areniscas, arcillas y calizas, margas, gravelitas y conglomerados.
- K2 Fm. La Picota (lpc): Conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas y conglobrechas mal seleccionadas que se intercalan con argilitas.
- K1-K2 Fm. Bucuey (buc): Tobs y lavobrechas, tufitas, argilitas, limolitas, lavas, conglomerados y calizas.

ROCAS MAGMATICAS

- αβ andesito-basaltos
- α andesitas
- β basaltos
- σ serpentinitas
- ρδ pórfidos dioríticos
- ρδκ pórfido-diorítico-cuarzífero

OTROS SIMBOLOS

- Contactos concordantes.
- Fallas.
- Carreteras y caminos.
- Líneas férreas.
- Ríos y arroyos.
- Ciudades y pueblos 123

1.3 Características geológicas del yacimiento.

Zeolitas Palmarito de Cauto.

En el área de estudio se describen en la parte superior del corte una secuencia rocosa que incluye potentes capas de zeolitas en los límites de la articulación de la zona Nipe - Cristal - Baracoa. El horizonte está constituido por varios ciclos de sedimentación bien definidos, en cuya base predominan las variedades conglomeráticas, mientras que en la parte alta aparecen tobas cristalovitroclásticas zeolitizadas. Son rocas de color verde, bien estratificadas en capas de 10 - 15 cm. Cerrando el ciclo aparecen tufitas calcáreas, calizas tobáceas y calizas. Algunas tobas están compuestas casi exclusivamente por mordenita aunque en estas rocas aparece también la clinoptilolita. Cuando ambos minerales se encuentran juntos, se observa que la mordenita se desarrolla en la periferia de los vitroclastos y la clinoptilolita en el centro de los mismos. Los contenidos de mordenita pueden alcanzar como promedio 72 %, mientras que la clinoptilolita no sobrepasa el 10 %, (Orozco, *et al.*, 1998).

Se caracteriza por presentarse en forma de dos elevaciones semi alargadas con dirección SW-NE y SE-NW respectivamente, las cuales coinciden con el rumbo de las capas en una estructura monoclinal de buzamiento suave (15 - 20 grados) hacia el Oeste en la elevación principal y hacia el NW en la otra. Tomado del Informe sobre los resultados de los trabajos de Exploración Orientativa y Detallada escala 1:2000 del yacimiento Zeolitas Palmarito de Cauto en la provincia Santiago de Cuba, según cálculo de reservas de Enero 1990 (Rizo, 1990).

Estas características morfo estructurales son típicas de la Formación Miranda y de los depósitos volcánico - sedimentarios en Cuba oriental a la que pertenece la génesis de este yacimiento.

Litológicamente en el yacimiento aparece un potente horizonte de piroclastita representado por diferentes variedades de tobas, con predominio de las variedades vitro, vitrocristalo y vitrolitoclásticas con granulometría que va de granos finos a medios y colores entre verde, verde claro amarillento a verde grisáceo, ocasionalmente azulosas, con espesores entre 2 - 7 m. Ocasionalmente estas

variedades presentan una estructura de aspecto poroso, tornándose algo abrasivas, lo cual ocurre fundamentalmente en las variedades de grano medio (ver figura 1.2), (Miranda, 2018).

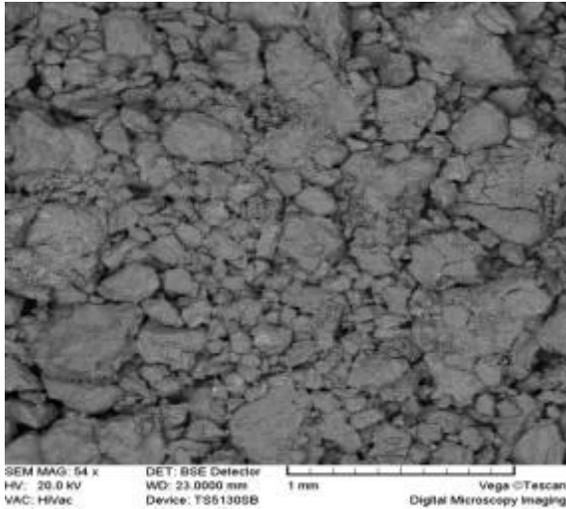


Figura 1.3 Zeolitas del yacimiento, Palmarito de Cauto, (Miranda, 2018).

Estas variedades litológicas constituyen, por los resultados de las propiedades tecnológicas, las litologías donde se localizan casi en su totalidad los espesores de materia prima útil que conforman el yacimiento, (tipos naturales de menas), debido fundamentalmente a la presencia y predominio de la fase vítrea en las mismas, que como resultado de su alteración origina la zeolitización de la roca. Subordinadamente aparecen las variedades lito, litovitro y litovitrocristaloclasticas y demás combinaciones, generalmente de grano medio a grueso, aspecto poroso, algo abrasivas y coloración semejante al grupo anterior, aunque en general con tonos más oscuros. El espesor de estas capas varía de 1 - 5 m, con estas litologías están relacionados los espesores de rocas con resultados tecnológicos con materia prima útil de menor calidad.

Según diferentes especialistas, los procesos diagenéticos son los que han condicionado la formación de los minerales de zeolita a partir del vidrio volcánico.

CAPITULO II: MATERIALES Y METODOS DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.

Este capítulo contiene las características de los materiales que se utilizaron y los experimentos realizados destinados a la evaluación de las características físico - mecánicas de los diseños de bloques huecos de hormigón producidos con árido ligeros y la sustitución de un 20 % del cemento empleando las tobas zeolitizadas del yacimiento Palmarito de Cauto.

2.1 Metodología de la investigación.

La investigación desarrollada contempló una metodología basada en 3 etapas fundamentales, las cuales se sintetizan en la recopilación, análisis e interpretación de la información, así como su posterior representación, las cuales son esquematizadas en la figura 2.1.

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se trazaron varias tareas las cuales fueron cumplidas satisfactoriamente. A continuación, se describen las etapas de trabajo.

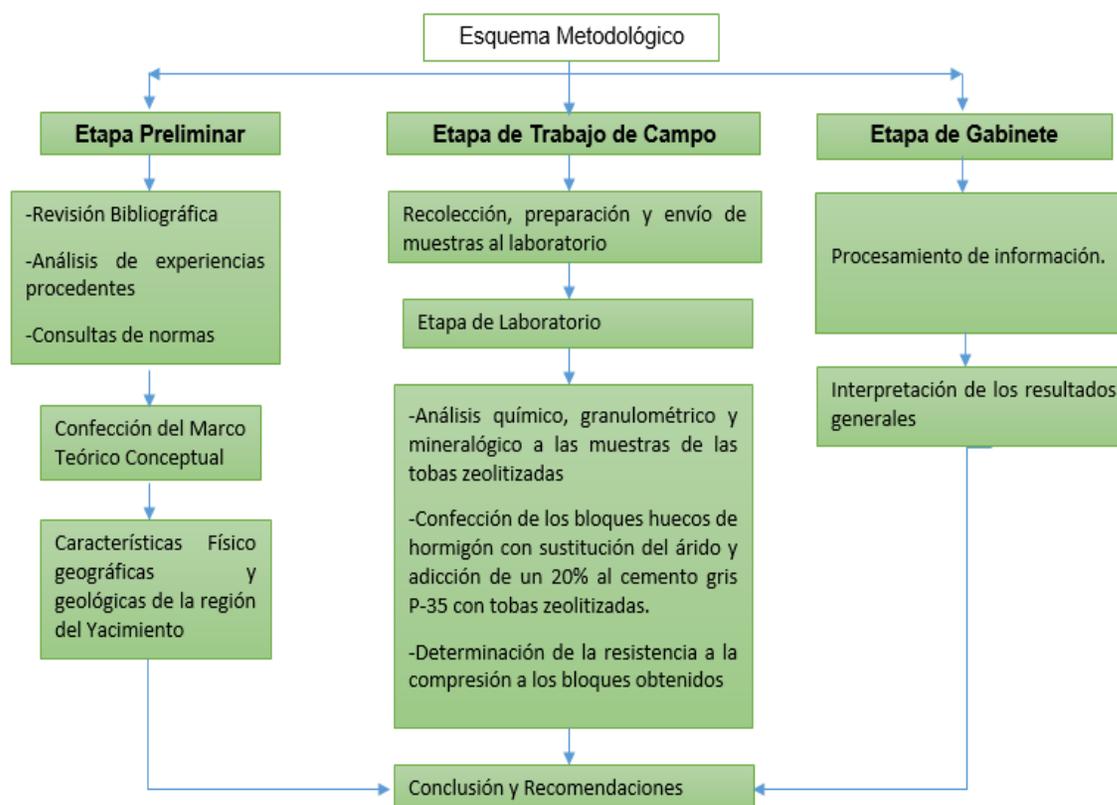


Figura 2.1 Flujograma de la investigación.

2.2 Etapa preliminar.

Se desarrolló la consulta de un volumen considerable de literatura relacionada con la temática a nivel mundial, nacional y provincial en el Centro de Información Científico–Técnica (ICT) del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y en otros centros docentes del país basada en búsquedas bibliográficas de artículos científicos, Trabajos de Diploma, Maestrías, Doctorados, etc.; en el Archivo Técnico de la Empresa Geominera Oriente se revisó toda la información geológica referente al yacimiento de tobas zeolitizadas en la región de Palmarito de Cauto, de conjunto con los especialistas de la Unidad Empresarial Base Laboratorio Elio Trincado Figueredo de la Empresa Geominera Oriente y la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en Santiago de Cuba, se consultaron además las normas nacionales e internacionales referidas a la investigación en particular, entre otros.

2.3 Etapa de trabajo de campo:

2.3.1 Toma y preparación de las tobas zeolitizadas.

Para la realización de la investigación, las muestras fueron tomadas del yacimiento de tobas zeolitizadas en la localidad de Palmarito de Cauto correspondiente al municipio Mella (ver figura 2.2). El método de toma de muestras aplicado fue por puntos, que consistió en la toma de fragmentos en forma de trozos adecuados para esta materia prima, las muestras recogidas se encuentran en las coordenadas X: 20.319620 Y: -75.885938. Seguidamente fueron sometidas a un proceso de reducción de su tamaño mediante series de etapas de trituración, cada una por separado.



Figura 2.2 Yacimiento Zeolitas Palmarito de Cauto.

En la primera etapa se utilizó la trituración por impacto, de forma manual, hasta garantizar fragmentos menores de 100 mm aproximadamente seguidamente se procedió a la segunda etapa de trituración empleando una trituradora de mandíbula TQ 150 x 75 mm (ver figura 2.3 a) la cual se le reguló la salida hasta 8 mm. Al producto de la segunda etapa del proceso de trituración se le realizaron manualmente dos operaciones de cribado de control, la primera con un tamiz de 10 mm de malla y la segunda con uno de 5 mm. El material retenido en la primera etapa de cribado se recirculó en la segunda etapa de trituración y al cernido se le realizó la segunda etapa de cribado. El retenido la segunda etapa de cribado se homogeneizó por el método del anillo mediante el empleo de una pala.

Otra sección se utilizó la trituración por impacto, de forma manual, obteniendo fracciones de 25 a 30 mm aproximadamente para llevar a cabo la trituración en el molino de mandíbula (figura 2.3 a); el cual tiene un diámetro de alimentación de 20 mm regulando la salida del material a 2 mm. Luego para la reducción del tamaño de las partículas y el peso del material se utilizó un molino triturador marca ROCKLABS (ver figura 2.3 b) donde se realiza la trituración del material por efectos de golpes y fricción, obteniéndose una granulometría final, según el tamaño de la abertura de salida, la que fue ajustada previamente hasta tamaño de partícula deseado, teniendo en cuenta que según las investigaciones anteriores, las fracciones granulométricas, a menor diámetro de sus partículas, mejoran el intercambio con el hidrato de cal contenido en el cemento. Este equipo automáticamente va cuarteando el material para la obtención de una muestra representativa del material estudiado;

para esto se ajusta el control de acuerdo a las NRIB 1981 “Masa de la muestra para ensayos y determinaciones” y procedimientos de Preparación de Muestras.

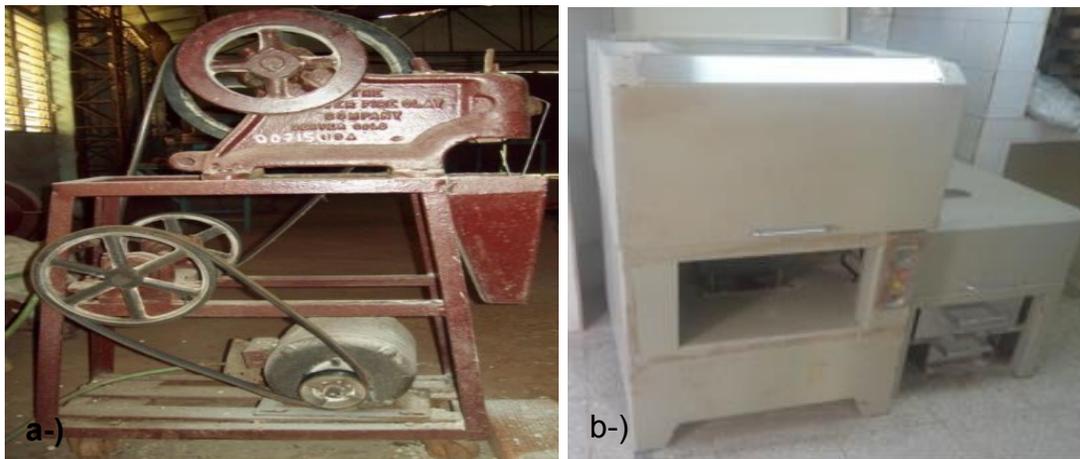


Figura 2.3 (a) Trituradora de mandíbula TQ 150 x 75 mm, (b) Molino triturador ROCKLABS.

2.4 Etapa de laboratorio.

2.4.1 Determinación de la composición granulométrica.

El análisis granulométrico se realizó para conocer el tamaño de los granos y la distribución sumaria por clases de los áridos y del material puzolánico en la elaboración de los bloques huecos de hormigón en las muestras analizadas.

Para el caso de los áridos, el procedimiento se basa en la determinación de las fracciones granulométricas por medio de un movimiento lateral y vertical del tamiz, acompañado de una acción de sacudida, de manera que la muestra se mueva continuamente sobre la superficie de los tamices. Se utilizó la tamizadora mostrada en la figura 2.4, hasta lograr cernir todo el material posible en cada tamiz para las diferentes muestras analizadas.

Las muestras del árido fino se separaron en las clases de tamaño menores a 0.063 mm; las muestras del árido grueso se separaron en las clases de tamaño, 4.76 hasta 9 mm, mediante el proceso de cribado por vía seca.



Figura 2.4 Tamizadora.

Para determinar los porcentajes granulométricos de las tobas zeolitizadas las muestras fueron tratadas mediante el método de tamizaje para el mezclado de una muestra de 1000 g de tobas zeolitizadas, logrando un control de la homogenización, y que esta a su vez sea representativa, posteriormente se redujo el peso de la muestra por el método de cuarteo, de forma manual, utilizando una regla graduada; el peso de la muestra analizada fue de 500 g. La tamizadora utilizada la cual fue programada para 10 minutos de tamizaje.

2.4.2 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 Espectrofotometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP - OES), el cual se muestra en la figura 2.5. El método consiste en medir la intensidad de la luz emitida a longitudes de onda específicas y se usa para determinar las concentraciones de los elementos de interés.

Las muestras fueron sometidas a temperaturas lo suficientemente elevadas para ocasionar no sólo la disociación en átomos, sino también para ocasionar una cantidad significativa de excitación colisional (e ionización) de los átomos de las muestras. Una vez que los átomos o los iones se encuentran en estado excitado, ellos pueden decaer a estados más bajos mediante las transiciones de energías térmicas o radiactivas (emisión).

El Spectro Arcos es un espectrómetro óptico de emisión que funciona automáticamente y con medición simultánea. El equipo trabaja con emisión atómica mediante plasma de acoplamiento inductivo y dispone de un sistema de detección basado en semiconductores que sirve para el análisis cuantitativo y semicuantitativo de líquidos. La muestra líquida se convierte por nebulización en un aerosol y se conduce al plasma. La muestra se vaporiza por la alta temperatura del plasma (6000 - 8000 K). Las moléculas se disocian o se deshacen en átomos. Los átomos son excitados y se ionizan en parte. Dentro del sistema, la radiación emitida se disgrega en sus componentes espectrales. La intensidad se mide mediante detectores semiconductores (CCD).



Figura 2.5 Espectrómetro óptico.

2.4.3 Caracterización mineralógica.

El análisis mineralógico se realizó por el método de Difracción de Rayos X (DRX). Este método se empleó para la determinación de las fases minerales contenidas en las tobas. Los difractogramas se obtuvieron en un equipo de la firma PANALYTICAL, modelo X'PERT³, empleando para ello los siguientes parámetros de operación:

Barrido tipo Gonio en $[\theta]$, registro angular desde 4.0042 hasta 79.9962 con distancia de paso en 2θ de 0.0080, radiación de Cu, filtro de níquel y tiempo de barrido de 50 s. La diferencia de potencial es de 40 kV y corriente de 30 mA. (ver figura 2.6).



Figura 2.6 Equipo X'PERT³

2.4.4 Determinación del índice de actividad puzolánica.

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

$$I.A.R = \frac{A}{B} * 100 \quad (I)$$

Donde:

I.A.R: Índice de actividad resistente

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

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

El método se recoge en la (ASTM C 311, 2017), y la norma cubana (NC TS 527, 2007C).

Dado que para determinar el índice de puzolanidad se necesita conocer la resistencia a la compresión de las briquetas tanto de los bloques con adición como de los bloques de referencia, se realizaron pruebas de resistencia mecánica que tributan a su determinación.

2.5 Fabricación de bloques huecos de hormigón.

Se realizó la producción de los bloques huecos de hormigón en la bloquera de San Juan, perteneciente a la empresa de materiales de la construcción de Santiago de Cuba. Se utilizó las materias primas caracterizadas anteriormente. En este taller se utiliza una máquina criolla (ver figura 2.7) de hacer bloques con un solo molde y mecanismos que permiten el zarandeo y la compactación de la mezcla. También es parte de esta un motor eléctrico trifásico para lograr el funcionamiento del mecanismo de vibración en la mesa vibratoria, lo cual logra la compactación de los bloques dentro de los moldes y su posterior remoción con el mecanismo botador hacia arriba para el traslado manual al secado de los mismos.



Figura 2.7 Máquina Criolla.

En la tabla 2.1 se exponen las dosificaciones de las adiciones minerales utilizadas en la investigación.

Tabla 2.1 Dosificación empleada para los diseños de bloques huecos de hormigón.

Materiales Empleados	U/M	Cantidad	Representación en %
Patrón (Primer Diseño, Bloques tipo II)			
Cemento gris P 350	kg	29.5	17
Arena cernida de Juragua	kg	56.9	33
Granito de Juragua molido	kg	87	50
Agua	Litros	Apreciación	
Primer Diseño sustitución del granito (Bloques tipo II)			
Cemento gris P 350	kg	29,5	20
Arena cernida de Juragua	kg	56,9	38
Tobas zeolitizadas Palmarito	kg	63	42
Agua	Litros	Apreciación	

Tabla 2.1 Dosificación empleada para los diseños de bloques huecos de hormigón (Continuación).

Patrón (Segundo Diseño, Bloques tipo III)			
Cemento gris P 350	kg	25	10
Arena cernida de Juragua	kg	81.25	34
Granito de Juragua molido	kg	133	56
Agua	Litros	Apreciación	
Sustitución del cemento al 20 % (Bloques tipo III)			
Cemento gris P 350	kg	19	8
Arena cernida de Juragua	kg	81.25	34
Granito de Juragua molido	kg	133	56
Tobas zeolitizadas Palmarito	kg	6	2
Agua	litros	Apreciación	

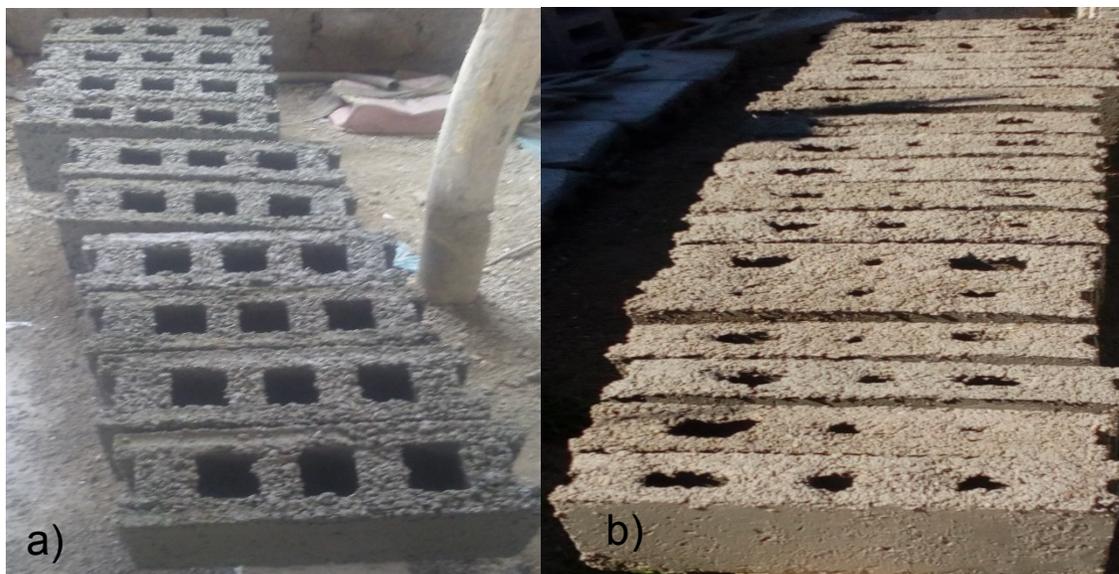


Figura 2.8 a) Bloques con sustitución del granito; b) Bloques con sustitución del cemento al 20 %.

Se elaboraron 10 bloques de tipo II (0,15x40) cm con sustitución del granito y 10 bloques de tipo III (0,10x40) con un 20 % de sustitución del cemento. Además se confeccionaron 10 bloques patrones para cada diseño respectivamente sin sustituir ningún material.

Para el primer y segundo diseño se siguió la siguiente metodología:

En el primer diseño se realizó manualmente el mezclado, primero se abrió la mezcla de la zeolita y arena en el caso del granito de toba zeolitizadas se le roció agua antes de hacer la mezcla para evitar que este material absorbiera el agua de esta, ya que este material es muy poroso y no le daría tiempo al cemento a reaccionar luego se le agregó el cemento para batir en seco y poco a poco ir agregándole el agua para así lograr la mejor homogeneidad posible entre los productos empleados en el amasado. Después de obtener la mezcla de los materiales pasamos a verterla en el molde de la máquina criolla, en el que se le dio el tiempo requerido de vibrado en la máquina dándole la mejor compactación posible y así obtener el diseño de los bloques requeridos, garantizando 10 bloques de tipo II (0,15x40), seguidamente estos pasarían a su etapa de curado poniéndolo a la sombra por 3 días y 4 días al sol respectivamente rociándoles agua por todo ese tiempo para un total de 7 días

de curado, en el que a las dos horas de producido comenzaría en roció por aserción del curado a las muestras.

Transcurrido los 6 días las muestras fueron llevadas al laboratorio de Hormigón los Guaos perteneciente a la Empresa Materiales Santiago para terminar su etapa de curado y así completar los 7 días.

A continuación comienza el análisis en el Laboratorio, al llegar las mismas se toma 6 unidades para la prueba de resistencia. Las unidades se le toma las dimensiones, después se le pone una capa de capping (consiste en una mezcla de un 40 % de cemento y un 60 % de yeso) esto no aporta resistencia al Bloque sino para alinear el área de contacto con la prensa pasado las 24 horas de puesto se realiza la rotura en la prensa, para conocer los MPa que adquiere y saber si cumplen o no.

Destacar que como la muestra elaborada se realizó en un mezclado manual este influye al igual que el curado a obtener buenos resultados; además aclarar que la arena que se utilizó no era lavada sino artificial que era la que se está trabajando actualmente con un grado de impurezas de un 16 % entre limo y arcilla y para este tipo de producto debe de ser menor a un 14 %.

Para el segundo Diseño se empleó la misma metodología que el primer diseño, lo que en este caso se sustituyó el 20 % del cemento por el material de polvo de las tobas zeolitizadas, obteniendo de ellos 10 de bloques de tipo III (0,10 x40). Estos también fueron llevados al laboratorio de Hormigón los Guaos perteneciente a la Empresa Materiales Santiago para darles comienzo a los ensayos, al igual que el primer diseño no se realizaron las pruebas de absorción.

2.6. Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón.

Los ensayos de la resistencia a la compresión de las tobas zeolitizadas a través de pruebas de bloques se detallan a continuación.

2.6.1 Resistencia a la compresión.

Este método se establece para determinar el valor de la resistencia media a la compresión de los bloques. Cada bloque que constituye la muestra de ensayo es

sometido a una carga de compresión en el sentido longitudinal de los huecos hasta la rotura determinándose la resistencia a la compresión promedio.

Equipos, utensilios y medios de medición.

- Máquina para ensayo a la compresión con la capacidad mínima de 1500 kN.
- Hacha de albañil o lima de grano grueso.
- Masetas niveladas con superficie pulida (terrazo, mármol, madera o metálica).
- Nivel de burbuja.
- Espátula.
- Cemento Gris P 350.
- Bandeja Metálica.
- Yeso rápido, lento o arena sílice.
- Aceite desmoldante.

Preparación de las muestras de ensayo.

Se eliminan las irregularidades o exceso de materiales en las caras de los bloques; para ello se utilizó el hacha de albañil y la lima de grano grueso. Después se cortó el bloque en dos parte por la mitad con una sierra de disco (ver figura 2.7).



Figura 2.7 Sierra de disco.

Se coloca una capa de pasta (capping) sobre la superficie de carga y apoyo de los bloques (ver figura 2.8) con el fin de nivelar estas, para ello se utiliza la meseta nivelada, se evita la adherencia entre las capas de nivelación y la meseta aplicando una capa de aceite desmoldante. La capa de nivelación de la superficie de carga y apoyo puede estar constituida por un mortero de cemento gris P 350 y yeso con una proporción de 4:1 (4 partes de cemento con una parte de yeso), se adiciona agua hasta que adquiera una consistencia pastosa capaz de asentar el bloque y no disgregarse bajo su peso. La resistencia a compresión de estos morteros será superior a la especificada para los bloques (NC 247, 2010).



Figura 2.8 Muestras de los bloques con el capping.

Para la aplicación de la capa de nivelación, se vertió el mortero preparado sobre la superficie engrasada y se esparció con la cuchara de albañil formando una capa uniforme, rápidamente se colocó el bloque sobre esta capa comprobándose su perpendicularidad con la base por medio de un nivel de burbuja en posición vertical donde se acomodó con golpes ligeros con el mango de la cuchara de albañil hasta que quede bien asentado el bloque, luego se retiró el material sobrante por los lados una vez rematados estos con un movimiento de la espátula entrante hacia arriba. Al notarse el endurecimiento de la mezcla antes de las dos horas de colocado el recape, se producirá un leve movimiento sobre el plano horizontal al bloque para evitar su adherencia a la meseta, después se levanta y se retira de la misma y se coloca de forma vertical para no dañar la capa de nivelación en las esquinas (NC 247, 2010).

Se limpió la meseta y se repitió el mismo proceso para aplicar la segunda capa de nivelación sobre la otra cara del bloque, se comprobó el paralelismo y la verticalidad de las caras por medio del nivel de burbujas. Se observará que las capas de nivelación de los bloques no se dañen en la manipulación y se esperó entre 24 horas y 72 horas para efectuar el ensayo (NC 247, 2010).

Para efectuar el ensayo cada bloque a ensayar se colocará suavemente sobre el plato inferior de la máquina de ensayos a compresión sin deslizarlo por este y sobre

un área previamente determinada con un centro geométrico conocido que coincide con el eje de carga de la máquina. Al poner en contacto la cara superior del bloque con el plato superior de la máquina se hará suavemente sin que se produzcan impactos al bloque y que se garantice un buen contacto entre ambas superficies (NC 247, 2010).

En el momento en que la superficie de la cara superior de la prensa hidráulica (ver figura 2.9) y el bloque tengan contacto se aplica una carga a velocidad constante de 5 kN/s hasta determinar el esfuerzo máximo hasta la rotura.



Figura 2.9 Prensa hidráulica.

Expresión para determinar los resultados.

La resistencia a la compresión de cada bloque (R'_i) se calcula por medio de la siguiente expresión (NC 247, 2010).

$$R'_i = \frac{F_j}{a_j} \quad (II)$$

Donde

R'_i : resistencia a la compresión de cada bloque, MPa

F_j : carga de rotura, kN

a_j : área de la sección bruta del bloque, m²

La resistencia a la compresión media (R'_m) se calcula por medio de la siguiente expresión (NC 247, 2010):

$$R'_m = \frac{\sum_{i=1}^n R'_i}{n} \quad (\text{III})$$

R'_m : Resistencia a la compresión media, MPa

n : Tamaño de la muestra de ensayo

2.7 Etapa de gabinete.

Es la última etapa de la investigación, en ella se procesaron los datos obtenidos de los análisis realizados durante la ejecución de los trabajos, esto permitió una representación visual de los parámetros de resistencias mecánicas e índice de puzolanidad en figuras y tablas; se desarrolló una interpretación conjunta de todos los resultados, los que aportaron información que fue de gran ayuda para conocer si se cumplían los objetivos trazados.

CAPITULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos experimentales que confirman la hipótesis científica sobre las potencialidades de los materiales tobáceos del yacimiento zeolitas Palmarito de Cauto como áridos ligeros y material puzolánico. Para llegar a esta conclusión se realizó el procesamiento de la información granulométrica, química y mineralógica de los áridos, el material tobáceo y los ensayos de resistencia a la compresión de los bloques huecos de hormigón que serán empleados como áridos ligeros y material puzolánico.

3.1 Resultados experimentales y su análisis.

3.1.1 Caracterización granulométrica de las tobas zeolitizadas.

El procedimiento utilizado para la determinación de la composición granulométrica del material puzolánico empleado en la elaboración de los bloques se realizó según las metodologías descritas en el acápite 2.4.1.

Para la obtención de los tamaños de grano a utilizar en la investigación se utilizó el cribado por los tamices No. 200 (0.074 mm); No. 230 (0.063 mm) y No. 325 (0.044 mm). Estas fracciones granulométricas han sido estudiadas por O. Pérez et al. (2013). El material a utilizar en la investigación fueron analizadas y ensayadas por el laboratorio de la ENIA Santiago de Cuba teniendo en cuenta la factibilidad de su elaboración en las condiciones actuales de trituración y molienda que posee la entidad, y la potencialidad de ser aplicada a escala industrial en la producción de bloques huecos de hormigón.

El análisis granulométrico de las tobas vítreas obtenidas en las condiciones actuales de procesamiento arrojó los siguientes resultados.

En el Gráfico 1 se evidencia que el tamaño medio de las partículas está en el rango de 0,044 a 0,074 mm, siendo mayoritario el contenido de partículas menor que 0.044 mm.

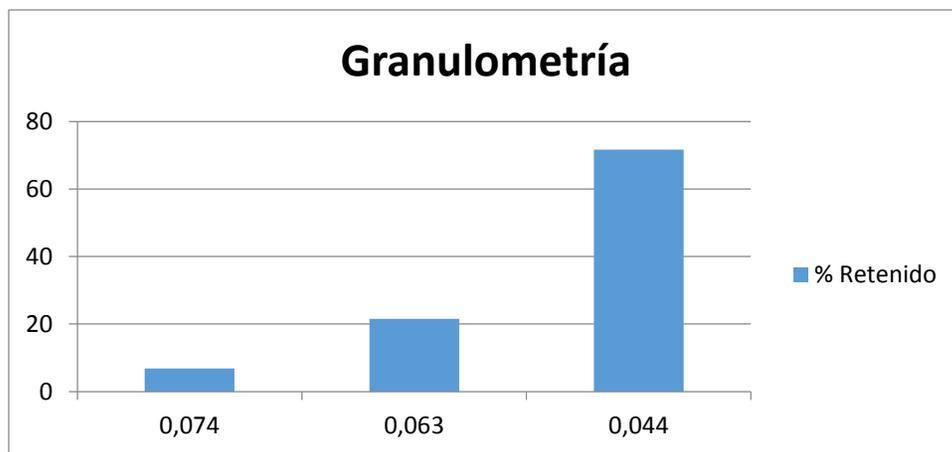


Gráfico 3.1. Características del tamaño de los granos en las tobas zeolitizadas.

Según las pruebas realizadas en esta investigación, las condiciones actuales de trituración y molienda que existen en la entidad permiten obtener una granulometría fina, que posibilita el uso de este material.

Tabla 3.1 Análisis granulométrico de las tobas zeolitizadas.

Peso inicial		Yacimiento de Tobas Zeolitizadas (Palmarito)	
Tamices			
Mm	SI	Peso (g)	% Retenido
0.074	No. 200	34	6.8
0.063	No. 230	107.5	21.5
0.044	No. 325	358.5	71.7
	Σ	500	100

3.1.2 Composición química del yacimiento tobas zeolitizadas de Palmarito de Cauto.

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 los óxidos de sodio, magnesio y potasio, entre otros.

Para tener una valoración más clara y precisa de los resultados que se han obtenido durante la investigación de estos yacimientos, se muestran tablas y gráficos donde se comparan los resultados obtenidos en trabajos de investigaciones anteriores con

los obtenidos en la investigación actual, (Garcés, 1983); (Fernández, 1984) y (Rizo, 1990), los cuales corroboran el contenido químico y mineralógico de esta materia prima, que la hace apta como puzolanas natural para el uso propuesto (ver Tablas 3.2 y 3.3).

Tabla 3.2 Composición química (media). Resultados de las investigaciones anteriores.

Comp.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Mg O	MnO ₂	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	PPI
Cont. (%)	67.14	15.76	3.84	9.45	3.61	3.77	3.28	--	--	--	Tr	11.9

Tabla 3.3 Composición química (media). Investigación actual.

Comp.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	MnO ₂	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	PPI
Cont. (%)	68.62	11.02	3.28	3.22	0.63	0.43	0.95	0.05	0.05	0.22	0.1	10.12

3.1.3 Composición mineralógica de las tobas zeolitizadas del Yacimiento Palmarito de Cauto.

Dentro de los minerales más comunes en los yacimientos estudiados resultan ser la mordenita, aparece de forma subordinada la clinoptilolita - heulandita, cuarzo, albita, anortita, montmorillonita. (ver gráficos 3.2 y 3.3)

- Contenido medio de CaO= 3.22 a 6.44 %.
- Peso volumétrico seco= 1.33 a 1.61 t/m³.
- Absorción= 18.6 a 32.8 %.
- Contenido medio de arcillas (Montmorillonita) = 10 a 19 %.
- Contenido de mordenita y clinoptilolita - heulandita = 65 a 96 %.

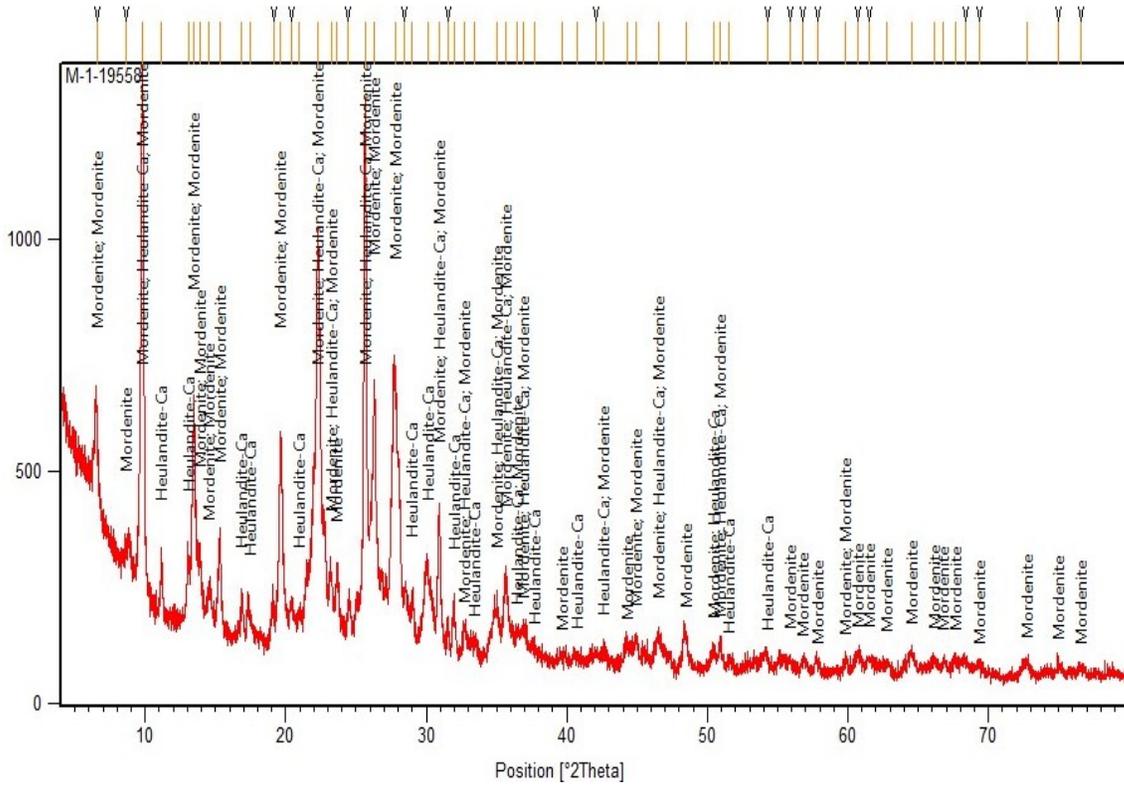


Figura 3.2 Difractograma de una muestra de zeolita Mordenita y Heulandita, obtenido mediante difracción de polvos de DRX del yacimiento zeolita Palmarito de Cauto.

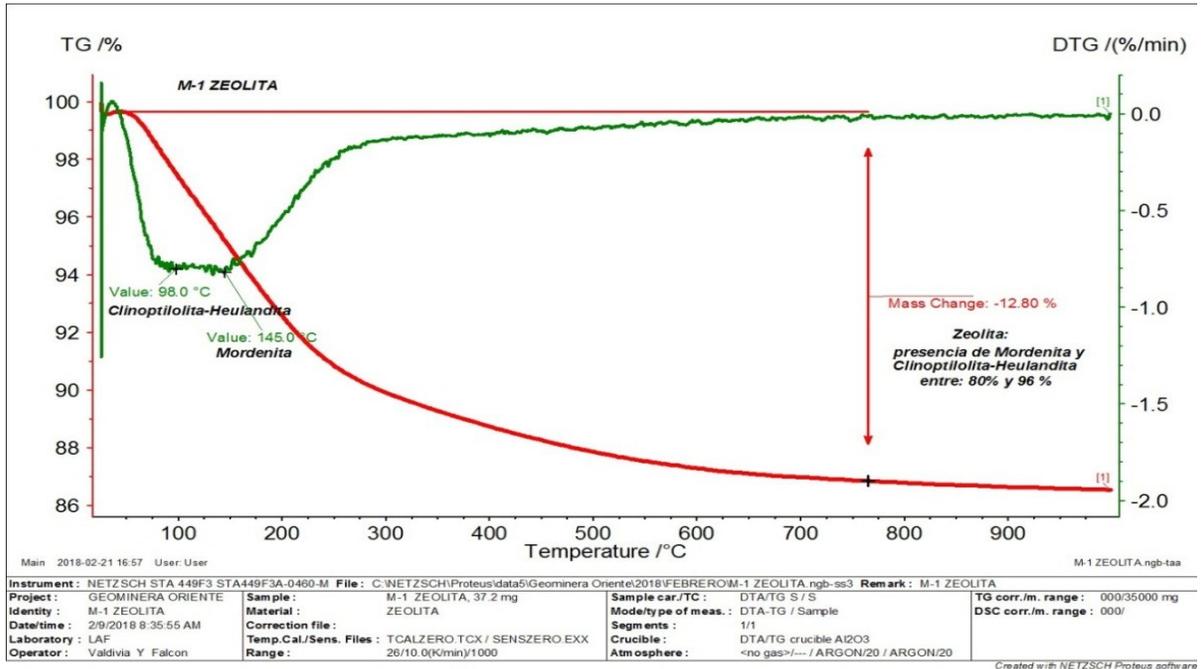
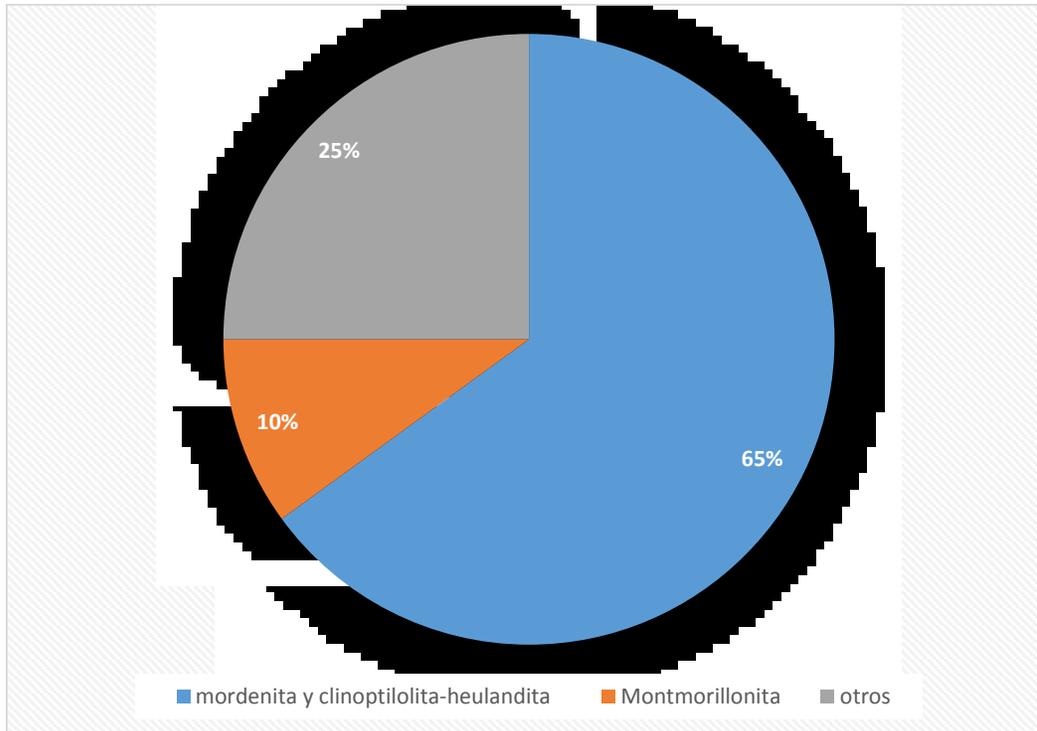


Figura 3.3 Caracterización cualitativa y cuantitativa realizada a la muestra del yacimiento Zeolita Palmarito de Cauto, mediante el empleo de la técnica de ATD.

A continuación se muestran gráficos donde se exponen los contenidos en (%) de Montmorillonita, mordenita y clinoptilolita - heulandita de una muestra de zeolita del yacimiento zeolita Palmarito de Cauto (ver gráficos 3.4).



Gráficos 3.4 Contenidos en (%) de Montmorillonita, mordenita y clinoptilolita - heulandita de una muestra de zeolita del yacimiento zeolita Palmarito de Cauto.

3.2 Análisis de los resultados obtenidos en bloques huecos de hormigón.

3.2.1 Resultados del ensayo de resistencia a compresión.

El ensayo de compresión se le realizó a tres bloques patrones a la edad de 7 días. En las tablas 3.4 se muestran los resultados obtenidos por la prensa hidráulica que se llevó a la unidad de (MPa) por medio de la ecuación (II).

Tabla 3.4 Comportamiento de la resistencia a compresión de los bloques patrones a la edad de 7 días.

Bloques	Fecha de Producción	No. Ensayo	Calidad	R/Comp MPa	Ensayo a los 7 días
Bloques tipo II (0,15x40)	13/04/2019	152	C	4,51	7
Bloques tipo III (0,10x40)	13/04/2019	151	C	2,98	7

Se puede observar en la tabla anterior que todos los valores se encuentran por encima de 2 MPa que es el valor mínimo requerido por la norma (NC 247, 2010)— Bloques huecos de hormigón — Especificaciones para este tipo de bloque.

Con el mismo procedimiento que se le realizó este ensayo a los bloques patrones se le realizaron a las muestras con zeolitas como se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Comportamiento de la resistencia a compresión de los bloques de toba zeolitizadas a la edad de 7 días.

Bloques	Fecha de Producción	No. Ensayo	Calidad	R/Comp MPa	Ensayo a los 7 días
Bloques tipo II (0,15x40)	11/04/2019	150	N/C	3,81	7
Bloques tipo III (0,10x40) (sustitución 20 %)	04/06/2019	289	C	2,26	7

Como se puede observar los valores de los bloques de tipo II donde se sustituyó el árido convencional por tobas zeolitizadas no cumplió con el valor mínimo que exige la norma (NC 247, 2010) (ver tabla 3.6) mientras que los bloques de tipo III si cumplieron pero comparado con su patrón su resistencia disminuyo en 0.72 MPa.

Tabla 3.6 Indices físicos mecánicos.

Tipo de Bloque	Resistencia a la compresión		
	Rc mínima a los 7 días	Absorción máxima	Rc mínima a los 28 días
	MPa	%	MPa
Bloques 0.15x40 (II)	4.0	10	5.0
Bloques 0.10x40 (III)	2.0	-	2.5

Donde:

Rc es la resistencia media a la compresión; MPa.

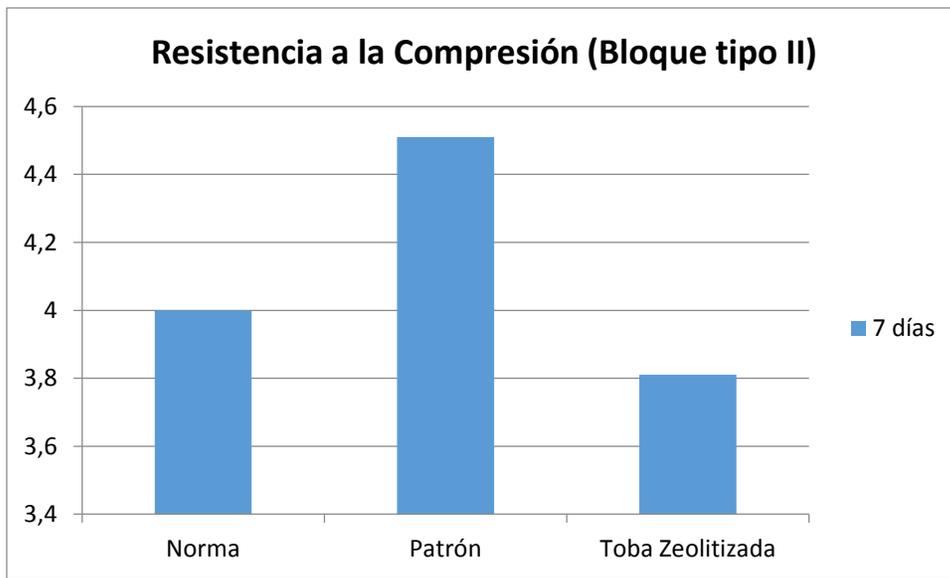


Figura 3.5 Resistencia a la compresión de los bloques con sustitución del árido.

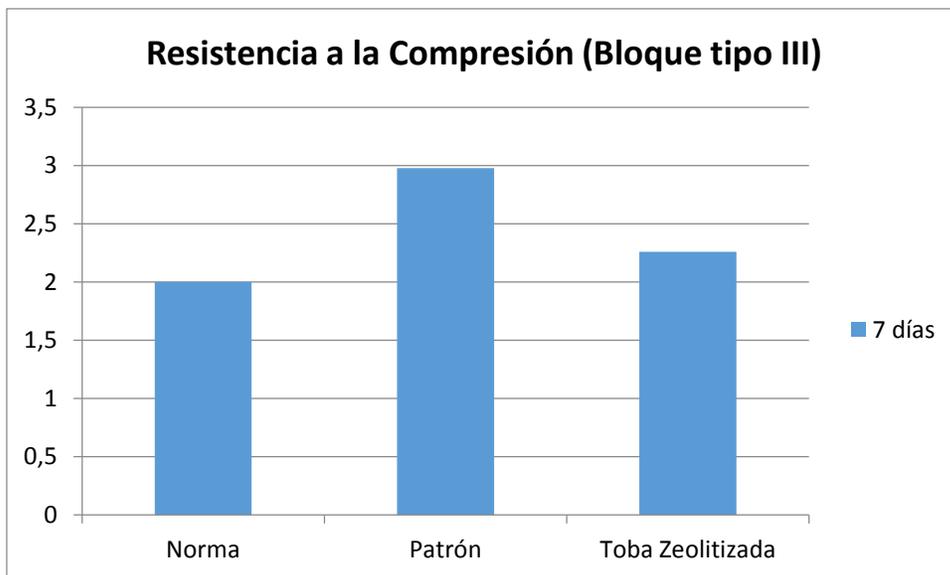


Figura 3.6 Resistencia a la compresión de los bloques con sustitución del 20 %.

En la figura 3.3, se puede observar que los bloques no cumplieron con las exigencias requeridas según con la resistencia mínima establecida para los bloques de tipo II en la norma (NC 247, 2010), como la muestra elaborada se realizó en un mezclado manual este influye al igual que el curado a obtener buenos resultados; además la diferencia en las resistencias experimentadas por el bloque patron y el bloque con la sustitución del árido está dada por la arena que se utilizó la cual no era lavada sino artificial que era la que se está trabajando actualmente con un grado

de impurezas de un 16 % entre limo y arcilla y para este tipo de producto debe de ser menor a un 14 %.

Las muestras de los bloques al 20 % de adición de tobas al cemento si cumplieron con las exigencias requeridas (ver figura 3.4) según con la resistencia mínima establecida para los bloques de tipo III en la norma (NC 247, 2010). Los valores de resistencias mecánicas en función del tiempo con adición del 20 % de tobas zeolitizadas van teniendo un aumento discreto a los 7 días; siendo esta una característica propia de los materiales puzolánicos al retardar el fraguado del cemento, y con esto la ganancia de mayores resistencias a edades posteriores. Aunque este fenómeno se explica si se tiene en cuenta que las puzolanas tienen una fuerte tendencia a reaccionar con el hidróxido de calcio y otras sales cálcicas en presencia de agua a temperatura ambiente Los valores de resistencia a la compresión de los bloques con la adición del 20 % de tobas zeolitizadas alcanzan la resistencia diseñada en la investigación de 2,6 MPa a los 7 días. Destacar que en las series con adición de tobas zeolitizadas del yacimiento de Palmarito de Cauto, la resistencia a la compresión en edades tempranas tienden a acercarse a los valores de la serie patrón, lo cual viene dado por el carácter de la composición química y mineralógica que éstas presentan a partir de los procesos diagenéticos del contenido de minerales zeolíticos que los acompañan.

3.3 Análisis de las perspectivas de utilización del material estudiado como aditivo puzolánico.

3.3.1 Evaluación del índice de puzolanidad.

En la tabla 3.6 se presentan los valores de los índices de actividad resistente para la muestra de los bloques de tipo III, en relación al 75 % del valor de resistencia mecánica normado a la compresión del bloque patrón para los 7 días de ensayo.

Se debe destacar que la reacción puzolánica prevalece en el tiempo, mucho después de los períodos normales de fraguado (hasta 7 días), es decir, mientras se produzca hidróxido de calcio, la acción inhibidora de la puzolana persiste, por lo que se puede considerar un proceso de larga duración. Según (Costafreda, *et al.*, 2011), en el aspecto práctico, este proceso es beneficioso, ya que con la neutralización del

hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se obtendrán bloques de hormigones cada vez más resistentes, lo cual representa un aporte de estabilidad para las estructuras que se proyecten con el empleo de estas adiciones.

Tabla 3.6 Índice de puzolanidad del material tobáceo.

Índice de Puzolanidad		NC TS 528: 2007
Yacimiento Zeolita Palmarito de Cauto	7 días	%
Sustitución al 20 %	89.6	75

Como se puede apreciar, los valores del índice de actividad resistente para las muestras con porcentaje de adición de 20 % se encuentran por encima del 75 % lo cual es aceptable según lo que se establece en la (NC TS 528, 2007) a partir de los 7 días. De acuerdo a los resultados mostrados para la dosificación, se estima que aumentando la magnitud del tiempo, los valores del índice de actividad resistente llegarían a aumentar, siendo esta una característica esencial de los materiales puzolánicos.

La actividad puzolánica puede verse afectada por la composición química, granulométrica, mineralógica y por el contenido de agua en la mezcla, entre otros factores, sin embargo, las propiedades puzolánicas varían considerablemente según el origen del material debido a la variabilidad de las características mineralógicas de los materiales activos y otras fases constituyentes. Por lo tanto, para determinar la actividad puzolánica, no es suficiente la cuantificación de la presencia de dióxido de silicio, alúmina y óxido de hierro.

La disminución del diámetro de las partículas favorece el proceso de aglomeración que se desarrolla en la mezcla con el cemento según se ha planteado por (Campolat, *et al.*, 2003) y (Rabilero A. C., 1988) entre otros. Por otro lado se explica la influencia que tienen el porcentajes de adición de material puzolánico utilizados en el trabajo (20 %), los cuales se comportan de manera similar a lo reportado por (Erdogdu, 1996); (Gener, *et al.*, 2002) y (Massazza, *et al.*, 1979), que variaron las proporciones de cemento Portland con puzolana natural. La resistencia aumenta en el tiempo, sin embargo disminuye con el porcentaje de adición de puzolana.

El análisis conduce a plantear que la diferencia en la actividad puzolánica de los bloques ensayados en función del aumento del contenido en peso del material tobáceo con relación al cemento, podría estar dada por el contenido de agua de la mezcla y la composición granulométrica de los áridos que participaron, incluyendo el material tobáceo. Es evidente que los procesos que se verifican aquí parecen ser muy complejos, por lo que se debe profundizar en el conocimiento de su naturaleza.

3.4 Valoración socioeconómica y ambiental.

El actual trabajo establece un paso muy significativo para el perfeccionamiento de nuevos materiales con excelentes posibilidades de ser utilizado como materiales de construcción. Se ha podido comprobar de manera particular que en la provincia Santiago de Cuba existen las posibilidades de explotar recursos minerales para la construcción, donde la valoración técnica ha resultado positiva. En muchos casos, bajo la valoración de su consumo local, pudiendo resultar de un impacto importante para estas comunidades.

El empleo de las tobas zeolitizadas estudiadas en la presente investigación contribuye al desarrollo de nuevos materiales de construcción y con ello, ahorrar un volumen importante de recursos minerales. Y basado en las propiedades de estas materias primas de ser aislantes térmicos y acústicos, contribuiría al mejoramiento de la calidad de vida de las personas.

Las puzolanas, como aditivos, son de capital importancia dentro de la industria del cemento, ya que intervienen en la calidad del producto final, aumentan la eficiencia del proceso de fabricación, reducen los costos de producción y las emisiones de CO₂ al medio ambiente.

Decir además que la preparación mecánica de esta materia prima contribuiría al ahorro energético, que al ser triturada o molida se fragmenta más fácil al ejercer menos resistencia que el árido tradicional por ser un material poroso.

CONCLUSIONES.

- La composición química predominante de los elementos mayoritarios del yacimiento de Zeolitas de Palmarito de Cauto son: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , y CaO .
- La composición mineralógica predominante es mordenita, y aparece de forma subordinada la clinoptilolita - heulandita, cuarzo, albita, anortita, montmorillonita.
- Se estableció un diseño para el uso como áridos ligeros en la producción de Bloques tipo II con la sustitución del árido de 3/8 por la Zeolita de Palmarito de Cauto, siendo estos bloques no conformes; lo que supone realizar ajustes para que no se afecte la calidad del producto terminado.
- Desde el punto de vista experimental se considera que la composición química, granulométrica y mineralógica de las materias primas evaluadas, reúnen las condiciones para ser considerados materiales puzolánicos activos.
- Al sustituir el 20 % de cemento con material puzolánico tobáceo se obtienen bloques tipo III cuyas resistencias son suficientes para su utilización en aplicaciones de prefabricados y albañilería, con una cara vista muy compacta. Estando conforme estos bloques con la exigencia de la norma cubana (NC 247, 2010) que considera un mínimo de 2 y 2,5 MPa.

RECOMENDACIONES.

1. Se debe lograr que la mezcla de los áridos se realice en una mezcladora mecánica para lograr la homogeneidad de la misma.
2. Es necesario incrementar el nivel de curado para un mejor fraguado por ser la zeolita un material que presenta desventajas como:
 - Necesidad de una mayor cantidad de agua de mezclado para una consistencia dada.
 - Menor resistencia a la compresión en edades cortas, pero mayores a partir de los 28 días de fraguado.
 - En ocasiones provoca una mayor retracción al secado.
3. Se debe elevar el rigor técnico de control y fiscalización de la producción en los Centros.
4. Utilizar un método de encapsulamiento con cemento y la toba zeolitizada molida, para reducir la absorción de agua de los bloques de toba zeolitizadas.
5. Valorar además las tobas zeolitizadas como árido ligero en la construcción de baldosas, losetas, mosaicos y otros productos de pequeño formato.
6. Tomar en cuenta el uso integral de esta materia prima en las diferentes aplicaciones investigadas, así como sus mejores indicadores energéticos durante la preparación mecánica, lo cual resulta en mayor eficiencia económica, entre estos otros usos están: material cementicio suplementario, bloques naturales, productos antiácidos, etc.
7. Realizar pruebas a escala Semindustrial para garantizar e introducir en las obras constructivas la utilización de los materiales puzolánicos estudiados a un 20 %.

BIBLIOGRAFIA.

1. Adamovich, A. F., et al. 1974. Levantamiento geológico escala 1: 100 000 y 1: 50 000 en la antigua provincia de Oriente.
2. Aitcin, C. 2000. *Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow, Review.*
3. Almenares, R. S. 2011. *Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitas de la provincia de Holguín como aditivo puzolánico.*
4. ASTM C 1240 - 05. 2003. El humo de sílice. Especificaciones.
5. ASTM C 311. 2017. Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland - Cement Concrete.
6. ASTM C 618. 1958. Definición del término puzolana.
7. ASTM C 618. 2002a. Standard Specification for coal fly ash and raw or calcinated Natural Pozzolan for use as mineral admixture in Concrete.
8. ASTM C 989 - 06. 2006. Escorias granuladas de alto horno para Uso en Concreto y Morteros.
9. Babak, A. and Mohammad, S. 2010. *Use of natural zeolite as a supplementary.*
10. Campolat, F., et al. 2003. *Use of zeolite coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production.*
11. Casals Corella., Cosme. 1988. *La Zeolita Mineral del Siglo XX. Uso y Aplicaciones.*
12. Costafreda, J. L. and Calvo, B. 2007. *Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución del fraguado de morteros de cemento.*
13. Costafreda, J. L., Díaz, J. J., & Calvo, B. 2011. *Propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España.*

14. Day, R. L. and Shi, C. 1994. *Effect of initial water curing on the hydration of cements containing natural pozzolan.*
15. De Armas, J. 2008. *Reevaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo como puzolanas naturales.*
16. Deloye, F. 1993. *Hydraulicité et pouzzolanicité.* Bulletin Liaison Lab. Ponts.
17. Erdogan, T. Y. 2002. *Materials of construction.*
18. Erdogdu, K. 1996. *Effects of pozzolanic cements of different fineness values and some mechanical properties of pozzolanic cements of different fineness values.*
19. Fernández, A. 1984. *Búsqueda Orientativa, escala 1:25 000, Sector II Frente, de Tobas para uso como árido ligero.*
20. Garcés, E. 1983. *Exploración Orientativa y Detallada del Yacimiento de Tobas Palmarito de Cauto.*
21. Gayoso, R. and Rosell, M. B. 2005. *Non - conventional aggregates and mineral admixture in high performance concrete.*
22. Gener, R. M. and Alonso, L. J. M. 2002. *Influencia de la composición mineralógica de puzolanas naturales en las propiedades de los cementos con adiciones.*
23. Gener, R. M. 2006. *Los cementos mezclados con puzolanas, una necesidad para el ahorro de energía y la durabilidad.*
24. Guerra, J. d. A. 2008. *Reevaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo como puzolanas naturales.* Moa, ISMM.
25. Guía 232.1R. 2000. *Use of Raw or processed Natural Pozzolans in Concrete.*
26. Guzmán, L. F. V. and Alcívar, G. E. S. 2010. *Hormigones livianos.* Guayaquil, Ecuador.
27. Harold, T. 1990. *Cement chemistry.*

28. ICONTEC 1512. 2009. Establece el Método para determinar la actividad puzolánica en cementos puzolánicos, mediante el Ensayo de Frattini.
29. López, L. M. 2006. *Caracterización geológica de las materias primas mineras de los municipios Moa - Sagua de Tánamo para su empleo como material de construcción.*
30. Massazza, F. and Costa, V. 1979. Aspects of the Pozzolanic Activity and Properties of Pozzolanic Cements.
31. Mehta, P. K. 1987. *Natural Pozzolans. Supplementary cementing materials for concrete.*
32. Muños, R. Y. 1974. *Actividad puzolánica: Evaluación de una toba cubana.*
33. Muxlanga, R. J. 2009. *Evaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo para su utilización como árido y puzolana natural en la construcción.*
34. NC 120. 2007a. Hormigón hidráulico. Especificaciones.
35. NC 175. 2002. Morteros de albañilería. Especificaciones.
36. NC 247. 2010. Bloques huecos de hormigón. Especificaciones.
37. NC 251. 2005b. Aridos para hormigones hidráulicos - requisitos.
38. NC 251. 2013. Clasificación de los áridos.
39. NC TS 527. 2007C. Cemento Hidráulico. Método de Ensayo - Evaluación de las Puzolanas.
40. NC TS 528. 2007. Las puzolanas.
41. Orozco, G. and Rizo, R. 1998. Depósitos de zeolitas naturales de Cuba.
42. Pérez, R. Y. 2006. *Características geológicas y perspectivas de utilización como material de construcción del vidrio del sector Guaramanao, San Andrés, Municipio Calixto García.*

43. Quintana, C. E. 2005. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos.
44. Rabilero A. C. 1988. *Las Puzolanas. Cinética de Reacciones*: Editorial Oriente.
45. Rabilero, A. C. 1992. *Empleo de los aglomerantes cal - puzolana en la construcción*.
46. Rizo, R. 1990. Exploración Orientativa y Detallada escala 1:2000 del Yacimiento Zeolitas Palmarito de Cauto.
47. Rosell, M. B. 2010. Zeolita natural cubana del tipo clinoptilolita - heulandita como material cementicio suplementario en hormigones.
48. Saricimen, H. 1992. *Effect of field and laboratory curing on the durability characterist of plain and pozzolan concretes*.
49. Shannag, M. J. and Yeginobali, A. 1995. *Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan*.
50. Silot, D. R. 2015. Evaluación de prefabricados de pequeño formato con cemento de bajo carbono criollo. Moa, ISMM.
51. Xing., S., Yun., I. M. and Jun., G. Y. 2004. *A study on the effect of fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete*.