

República de Cuba  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
"DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"  
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



**EVALUACIÓN DE LAS TOBAS VÍTREAS DEL YACIMIENTO  
JIGUANÍ COMO MATERIAL PUZOLÁNICO**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Geología  
Maestría en Geología, Mención Prospección y Exploración de Yacimientos  
Minerales Sólidos**

9<sup>na</sup> Edición

**Autor:** Ing. Danicer Sánchez González

**Tutor:** Dr.C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez

MSc. Leonardo Calderius Espinosa

**MOA, 2015**

**Año 57 de la Revolución**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al Rey de los siglos, inmortal, invisible,  
Al único y sabio Dios,  
Sea honor y gloria por los siglos de los siglos.  
Amén.*

*1 Timoteo 1: 17*

**A** esta Revolución Grandiosa de los humildes y para los humildes que con sus conquistas me permiten poder continuar mi superación ahora como Master en Ciencias Geológicas.

**A** mí querida y gran familia que incluye a Ricardo y Marta en especial a mis queridos padres Daniel A. Sánchez y Amelia V. González y hermanita de mi alma Daylenis Sánchez González, por su apoyo incondicional y confianza en todo el proceso de creación de este trabajo.

**A** mí estimado profesor y tutor en Moa Dr. Carlos Leyva por haber tenido gran paciencia y confianza; al MSc. Leonardo Calderius Espinosa por su colaboración incansable en este proyecto desde la producción.

**Al** colectivo de trabajadores de La Empresa Provincial de Construcción y Mantenimiento Constructivo de Granma en especial al colectivo del Departamento de Producción: Leoldis, Ricardo, Elena, Jorge y José mi primo.

**A** los compañeros de la Unidad Empresarial Base Laboratorio del MICONS por haber colaborado en la realización de este trabajo, Alberto Burgo y Ruslán Zaldívar.

**A** todos mis hermanos en la Fé en Cristo Jesús tanto en Moa, Granma, Guantánamo, Santiago, Holguín, Las Tunas, la Habana y Pinar del Rio.

**Al** muy estimado profesor MSc. Yurisley Valdés Mariño por su pronta y siempre efectiva ayuda, por sus muy atinados consejos en todo el tiempo.

Muchas gracias.

## DEDICATORIA

*Dedico este ansioso trabajo  
A los que saben perseverar  
Por las causas justas  
Y lo dan todo hasta el final.*

*A mi querida y muy amada familia*

## PENSAMIENTO

*“El hombre brilla por sus palabras  
pero necesariamente permanece por sus obras.”*

*José Martí*

*“No es ningún tonto el que da lo que no puede conservar,  
para ganar , lo que nadie le puede quitar”*

*Jim Elliot*

*San Juan 12: 25*

## **RESUMEN**

El presente trabajo aborda la evaluación de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní, para evaluar las perspectivas de utilización de la fracción menor de 0.8 mm como puzolana natural en la producción local de materiales de construcción, según los parámetros de calidad normalizados, al sustituir el cemento Pórtland con dos porcentajes diferentes: 10 y 20 % en peso. Se realizó una caracterización, basada en la determinación de la composición granulométrica, la determinación del índice de actividad puzolánica y del rendimiento del cemento a través de los ensayos de resistencia a la compresión a partir del método indicado en las normas para tales especificaciones. Lo que permitió determinar que estos materiales, poseen perspectivas para su utilización como aditivo puzolánico tanto en morteros como en hormigones, al ser utilizados en sustitución de un 10 % de cemento.

## **ABSTRACT**

The present work approaches the evaluation of the vitreous tuffs of the deposits Jiguaní, to evaluate the perspectives of use of the fraction smaller than 0.8 mm like natural pozzolans in the local production of construction materials, according to the standardized parameters of quality, when replacing the Portland cement with two different percentages: 10 and 20 % in weight. It was made a characterization, base to on the determination of the composition the grain sized, the determination of the pozzolans activity index and of the yield of the cement through the tests of compressive strength from the indicated method in the norms for such specifications. It allowed determining, that these materials have perspective for its use like pozzolans additive as much in mortars as in concretes, at least to the being used in substitution of 10 % of cement.

<b>ÍNDICE</b>	<b>PÁG.</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....</b>	<b>8</b>
1.1 Generalidades .....	8
1.2 Las sustancias nocivas al hormigón.....	9
1.3 Propiedades físico - mecánicas de los áridos .....	10
1.4 El cemento en el hormigón.....	11
1.5 Las puzolanas .....	13
1.5.1 Clasificación de las puzolanas según su origen.....	14
1.5.2 Normativas de las puzolanas .....	16
1.5.3 Actividad puzolánica.....	17
1.5.4 Aplicación de las puzolanas .....	18
1.6 Antecedentes de la investigación .....	19
1.7 Características físico-geográficas del yacimiento Jiguaní .....	28
1.8 Marco geológico regional y local .....	30
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
2.1 Metodología de la investigación .....	44
2.2 Etapa preliminar .....	45
2.3 Etapa de trabajo de campo .....	45
2.4 Etapa de laboratorio .....	46
2.4.1 Métodos y técnicas analíticas, empleados en la investigación.....	47
2.4.2 Método utilizado en la investigación.....	47
2.4.3 Determinación de la composición granulométrica .....	47
2.4.4 Determinación del índice de actividad puzolánica.....	49
2.4.5 Determinación de resistencias mecánicas en morteros .....	49
2.4.7 Determinación de resistencias mecánicas en hormigones.....	54

2.4.8 Ensayo de resistencia a la compresión en bloques.....	55
2.5 Etapa de gabinete .....	56
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>58</b>
3.1 Resultados experimentales y su análisis.....	58
3.1.1 Caracterización granulométrica.....	58
3.1.2 Resistencias mecánicas en morteros.....	63
3.1.3 Resistencia mecánica en hormigones.....	66
3.1.4 Determinación de la resistencia a la compresión en bloques.....	68
3.2 Análisis de las perspectivas de utilización del material estudiado como aditivo puzolánico .....	68
3.2.1 Evaluación del índice de actividad puzolánica .....	68
3.2.2 Valoración socioeconómica y ambiental .....	71
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS</b>	

# **INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad las necesidades del hombre y las inventivas de este para darle solución a los problemas constructivos, siempre han estado presentes en el devenir de los tiempos; siendo una de las más importantes la actividad constructiva, con vistas a dar mayor seguridad y confort al seno familiar.

El hormigón constituye el 90 % del capital construido por el hombre, cuyo componente fundamental es el cemento, el consumo del mismo se asocia al nivel de desarrollo de un país, siendo sin embargo responsable del deterioro del medio ambiente en el planeta, generado por la explotación de grandes recursos no renovables, materias primas y combustibles.

Paralelamente a la industria del cemento Portland la industria del hormigón, ha introducido avances, mediante el empleo de materiales puzolánicos tales como, cenizas volantes, escorias siderúrgicas, micro sílice, puzolanas naturales y artificiales, que mejoran las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, en cuanto a durabilidad, resistencia mecánica, disminución del consumo de cemento y del contenido de clínquer.

La industria del cemento es particularmente susceptible a las características de las materias primas, pues de ellas depende el tipo y propiedades del cemento producido y la posibilidad de optimización del proceso de fabricación. La diversidad de aplicaciones que tiene el cemento en la actualidad hace que sea necesario elaborar productos que obedezcan a las distintas necesidades de resistencia mecánica y química, tiempos de fraguado, costos, entre otras.

De aquí que las puzolanas naturales sean un importante componente para la producción de cementos Pórtland ordinario y puzolánico, que contribuyen a la conservación del medio ambiente, al reducir la emisión de gases nocivos como  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$ , ya que no es necesario someter la materia prima (puzolana) a la tostación.

Poseen propiedades puzolánicas los materiales con un elevado contenido de componentes ácidos como la sílice, la alúmina y el óxido férrico, con una estructura desordenada o amorfa capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento.

Las tobas vítreas son rocas volcánicas que poseen altos contenidos de estos compuestos. Esta propiedad, junto a ser finamente divididas, les hace candidatas para su utilización como puzolana.

Las tecnologías constructivas han ido en continuo desarrollo en los últimos años condicionado por el mayor crecimiento de las urbanizaciones en lugares donde la agresividad del medio ambiente al hormigón es mayor, así como, las necesidades de construcciones con fines turísticos e industriales, tales como: diques, presas, embalses, puentes, edificación de viviendas y hoteles en zonas costeras, han requerido la introducción de variaciones en los diseños del hormigón para cumplir las cualidades reológicas específicas para su colocación y conformación en estado fresco y con los requisitos, de altas resistencias mecánicas y elevada durabilidad en el estado de endurecimiento.

En Cuba, la situación de la vivienda es una problemática que crece gradualmente; visto principalmente por el deterioro constante de las existentes y el azote de fenómenos naturales; esto ha motivado la actividad inventiva y multidisciplinaria de los hombres de ciencia en nuestro país, con vista a dar una mayor y más efectiva respuesta a las multiformes actividades constructivas que se necesitan en el orden social y económico, debido a la notable escasez para satisfacer a la creciente demanda de materiales de la construcción por parte de la población.

Las diversas investigaciones se han encaminado al estudio de las rocas y minerales que por diversas génesis pudieran presentar una determinada actividad puzolánica bajo condiciones específicas dígase una molienda más efectiva y una activación térmica; tales rocas pueden ser de origen ígneo o sedimentario que puedan constituir puzolanas, tales como: las tobas vítreas, tobas zeolitizadas y algunas arcillas caoliníticas calcinadas, Rabilero (1992); Dopico (2009); Costafreda; et. al. (2011b); Rosell; et. al. (2011) y Martirena (2004) entre otros. Los estudios abarcan la caracterización de estos materiales minerales y los ensayos físico-mecánicos, que evidencian incrementos de la resistencia mecánica en morteros y hormigones como efecto de la actividad puzolánica,

Según Mather (1982); Rabilero y Muños (1974) y Howland; et. al. (2006), estas adiciones confieren al cemento y al hormigón propiedades de gran importancia

práctica, principalmente cuando se trata de lograr una mayor estabilidad química y por tanto una mayor durabilidad.

Los trabajos de Calleja (1966), Pérez; et. al. (2013), han confirmado la racionalidad de aprovechar en la práctica las propiedades puzolánicas de algunos materiales. Lo anterior se encuentra determinado, por el bajo costo de las operaciones a las que deben ser sometidas las puzolanas de origen natural, hasta adquirir la forma adecuada para su utilización en la práctica industrial. Por otra parte, cuando los materiales puzolánicos son subproductos y desechos de la industria, su empleo constituye una salida de importancia económica y ambiental.

A partir de las investigaciones realizadas, en la provincia de Granma se han tomado acciones encaminadas a disminuir el consumo de cemento, evaluando las perspectivas de utilización de los materiales puzolánicos y aditivos químicos, en mezclas de hormigones aditivados, obteniéndose resultados satisfactorios; Zaldivar (2011) realiza su investigación para el caso del yacimiento de zeolitas en la localidad de Bueycito donde efectúa una experimentación para su uso como puzolana natural. El aprovechamiento de estos recursos naturales como aditivo mineral activo en la sustitución parcial de 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**: El insuficiente conocimiento de las propiedades puzolánicas de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní.

Por ello el **objeto de estudio** se define como: Las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní.

### **Campo de acción**

Las propiedades puzolánicas de las tobas vítreas utilizadas en la elaboración de morteros y hormigones.

### **Objetivo general**

Evaluar las propiedades puzolánicas de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní a través de los ensayos físico-mecánicos para la sustitución parcial de cemento.

A partir de ello se plantea como **hipótesis** la siguiente afirmación:

Sí se determinan las características geológicas generales y se evalúan las propiedades puzolánicas de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní, mediante los ensayos físico-mecánicos, entonces se dispondría de un nuevo material puzolánico que contribuiría a la sustitución parcial de cemento en la provincia Granma.

Para dar respuesta a esta hipótesis se proyectan los siguientes:

**Objetivos específicos:**

- Determinar el índice de actividad puzolánica de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní en morteros.
- Evaluar las propiedades físico-mecánicas que caracterizan el comportamiento puzolánico de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní en morteros y hormigones hidráulicos.
- Valorar la posibilidad de empleo de las tobas vítreas como material puzolánico.

**Tareas de la investigación:**

- Recopilación y análisis de los trabajos relacionados con los materiales de construcción y puzolánicos, así como la exploración de la problemática mundial, nacional y local.
- Preparación de las muestras; apoyado en la trituración, homogenización, molienda y cribado de las mismas.
- Caracterización de la materia prima desde el punto de vista granulométrico, y su comparación con los parámetros normalizados.
- Determinación del índice de actividad puzolánica a través del ensayo de resistencia a la compresión en morteros a los 28 días.
- Valoración socioeconómica y ambiental.

**Métodos de investigación**

La tesis se compone de introducción, tres capítulos, conclusiones generales, referencias bibliográficas y los anexos que esclarecen y complementan los temas tratados en los capítulos.

## **Capítulo 1. Marco Teórico Conceptual**

En este capítulo se exponen y discuten los criterios más actualizados que se reportan en la literatura sobre la industria del cemento, el hormigón y las puzolanas. Mediante el método histórico – lógico, se realizó el estudio del estado del arte sobre la valoración y el aprovechamiento de las tobas vítreas como puzolanas naturales, se logró determinar el alcance de la investigación. Se presentan las características geográficas, geológicas y mineralógicas, que permitieron sustentar la evaluación de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní como material puzolánico.

## **Capítulo 2. Materiales y métodos**

Mediante el método lógico se seleccionan las técnicas, normativas a aplicar en la investigación y se establece la metodología para la evaluación del material tobáceo como aditivo puzolánico que permita comprobar la hipótesis científica planteada.

## **Capítulo 3. Resultados y discusión**

Se analizan los resultados de la caracterización granulométrica, el índice de actividad puzolánica y evaluación experimental de los efectos de la adición de las tobas vítreas en morteros y hormigones hidráulicos, lo que permite comprobar los fundamentos teóricos a nivel de laboratorio, mediante el método experimental, el método lógico y el método de análisis – síntesis que contribuyan a la confiabilidad de los resultados obtenidos.

## **Aporte de la investigación**

- La solución a la disponibilidad de un material puzolánico para su uso generalizado en las empresas constructoras de la provincia Granma.

# **CAPÍTULO 1**

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

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

### **1.1 Generalidades**

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: el hormigón, cemento, áridos y puzolana.

El **hormigón hidráulico** también denominado **concreto** 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: (2002b)

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 y siendo llamados cementos hidráulicos.

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

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 física-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: (2005b) 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.

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

El **árido grueso (grava)** es aquel que posee principalmente, partículas de un 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 un tamaño desde 0,149 mm hasta 4,76 mm.

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

## **1.2 Las sustancias nocivas al 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. Químicamente los áridos deben ser inertes,

pero lamentablemente 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. ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , etc.) de los cementos. Ej.: ópalo
- Sustancias que puedan 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, compuestas de los siguientes materiales: limos, arcillas, yesos, carbonatos impuros de calcio y magnesio, sílice opalina, óxido de magnesio, óxido de hierro y mezclas de estos materiales.

### **1.3 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 compresión. No obstante al emplearse la resistencia a 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 estas propiedades, por lo general a medida que es más alto el módulo de elasticidad del árido, mayor es la resistencia a 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** afectan 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 la resistencia a las heladas, que tenga un árido.

El **peso específico**, influye en la elección de un árido donde este 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.

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.

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.

También podemos destacar la **composición granulométrica**, el termino granulometría se refiere a la distribución de los tamaños de las partículas del árido, este factor tiene una influencia grande 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.

#### **1.4 El cemento en el hormigón**

El cemento Portland, es un aglomerante hidráulico, material pulverulento que se obtiene de la mezcla y molienda del clínker más aditivos. Mezclado con agua se 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), sílico – 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 Pórtland es: CaO 60-67; SiO<sub>2</sub> 17-25; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3-8; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.5-6; MgO 0.1-5.5; Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O (álcalis) 0.5-5.5; SO<sub>3</sub> 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.: Cemento Pórtland de 250 kgf/cm<sup>2</sup> mínimo, se comercializa bajo la denominación de P-250.

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 construcciones de ese periodo en muy buen estado de conservación, pese a tener más de 2000 años de construidas.

El **cemento Pórtland puzolánico**, se define como un cemento hidráulico compuesto de una mezcla uniforme de cemento Pórtland y un material puzolánico finamente dividido, su adición va desde un 3 % hasta un 40 %. Algunos autores plantean que se puede llegar al 60-70 %. Se les denominan cementos mezclados, cuando sobrepasa los 15 % de adición, en el mundo del cemento se conoce como cemento PP, (Batista; et. al., 2011).

El **fraguado** de cementos que contienen puzolanas naturales no difiere de los valores típicos encontrados en los cementos Pórtland, por el contrario, cementos compuestos con ceniza volante o humo de sílice tienden a prolongar el fraguado.

La **fluencia** es la propiedad que se relaciona estrictamente con la resistencia, relación agua/cemento y el curado del hormigón. Ya que esta adición retarda la ganancia temprana de resistencia, la fluencia específica de cementos puzolánicos es mayor que la de los Pórtland.

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

La capacidad del hormigón de mantener el desempeño estructural con el paso del tiempo aunque 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.

### **1.5 Las 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 de cenizas volcánicas.

En Grecia, particularmente en la ciudad de Thera, alrededor del 1400 a.c. se introdujo a la mezcla cal-arena, el polvo volcánico de la "tierra de Santorin" explotada en la isla; de esta forma se obtuvieron morteros estables al agua.

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, Agung Deloye (1993).

En 1952 el departamento de restauración de los Estados Unidos brinda una definición del término puzolana, incorporada en las normas ASTM (1958) y mantenida hasta hoy como la definición que dice: "las puzolanas son materiales silíceos o alumino-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" (Almenares, 2011).

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 Pórtland, principalmente la tobermorita.

### **1.5.1 Clasificación de las puzolanas según su origen**

Se clasifican 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.

Cuando se habla de rocas y materiales volcánicos, hay que considerar dos factores controladores de la actividad puzolánica; por una parte, la composición química del magma originario que determina la de los productos, y por otra, la constitución y textura de los minerales de dichas rocas, las cuales dependen de la velocidad de enfriamiento y de los procesos de meteorización que los hallan afectado. En las rocas volcánicas son especialmente interesantes las rocas ácidas (ricas en cuarzo y feldespato).

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, 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 por sus excelentes propiedades puzolánicas.

*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. Deben tener conformidad con la especificación normativa ASTM C 989. 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:* Es un material puzolánico de alta reactividad y 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.

El humo de sílice está disponible como un polvo densificado o en forma de slurry acuoso. La especificación normativa para el humo de sílice es la ASTM C 1240. 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 puzolanas 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 éstos 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. Dentro de las puzolanas comercialmente disponibles se incluyen el metacaolín y las arcillas o esquistos calcinados. Estos materiales son producidos mediante la calcinación controlada de minerales de origen natural. El metacaolín es producido a partir de arcillas caoliníticas relativamente puras y se emplean entre el 5 y el 15 % en peso como aditivo puzolánico. Las arcillas o esquistos calcinados son utilizados a mayores porcentajes en peso.

### **1.5.2 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 Pórtland Puzolánicos PP-250 y PP-350 en correspondencia con las primeras introducciones producidas en la fábrica José Merceron en Santiago de Cuba y se experimentaron diversos métodos entre ellos Fratini, para verificar la actividad de las adiciones de tobas cubanas (Rosell, 2010).

Con carácter experimental con plazo de 2 a 3 años el Comité de Normalización de cemento, presentó y se aprobó en el 2007, la norma de especificaciones NC 528 (2007d) Cemento Hidráulico Puzolanas-Especificaciones. Esta norma homologa los criterios de la ASTM C 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 527: (2007b) Cemento hidráulico. Método de ensayo. Evaluación de puzolanas.

En la NC 120: (2007a). Hormigón hidráulico. Especificaciones, 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.

### 1.5.3 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 Pórtland (Quintana, 2005).

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

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.

#### **1.5.4 Aplicación de las puzolanas**

El primer criterio que apoyó la producción de cementos puzolánicos fue, corregir el cemento Pórtland 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 como son:

- Aumento de su estabilidad química y por tanto aporta 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 clínker).
- 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 clínker 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.
- Durante el fraguado del cemento Portland, se libera calor y grandes cantidades de hidróxidos de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , el cual no posee propiedades cementantes y puede ser lixiviado del hormigón por acción del agua o reaccionar con determinados agentes químicos provocando la expansión y el debilitamiento de la masa del hormigón. La presencia de la puzolana logra por medio de su reacción con el hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , que este desaparezca o disminuya en gran parte.

Para evaluar las puzolanas se tienen en cuenta diferentes parámetros como la composición química, siempre puntualizando la importancia de altos contenidos de los óxidos de  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y mínimos para los componentes alcalinos y alcalinotérreos. (Gener, 2006); (Rabilero, 1988; Rabilero, 2005; Rabilero y Muños, 1974).

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

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

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

### **1.6 Antecedentes de la investigación**

Las puzolanas se conocen desde hace más de 2500 años, 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 alcanzo 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 Pórtland, 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 y 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 (RNR), (materias primas y combustibles) quienes emiten significativos volúmenes de gases de efecto invernadero (GEI), (Rosell, 2010).

La vulnerabilidad del hormigón al medio ambiente es consecuencia de las propiedades del clínquer del cemento Pórtland 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 y Mohammad, 2010; Xing.; et. al., 2004).

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

Saricimen; et. al. (1992) destaca que 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.

La finura del cemento es un factor importante que afecta el índice de desarrollo de la resistencia, para ello Day y Shi (1994), estudiaron la influencia de la finura de la puzolana en la resistencia de las pastas de cemento - cal - puzolana natural. Los resultados demostraron que la resistencia a la compresión aumenta cuando el material es más fino, y la finura de la puzolana natural tiene su efecto más significativo en el desarrollo temprano de la resistencia.

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

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

En tiempos donde el desarrollo de las nuevas tecnologías constructivas van tomando un espacio cada vez más preponderante con vistas de mejoras en las prestaciones de los morteros y hormigones hidráulicos en las diferentes edificaciones. Ya nuestro país a partir de la década de los años 70 viene dando los primeros pasos, donde 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 Pórtland en la confección de los morteros y hormigones hidráulicos a nivel de laboratorio; semi-industriales e industriales.

Uno de los experimentos llevados a cabo fue el caso del estudio del comportamiento cinético de la reacción de los cementos con adición de zeolitas

naturales cubanas. Al respecto ha llegado a la conclusión de que la portlandita originada por la hidratación del silicato tricálcico ( $C_3S$ ) reacciona con la zeolita, para dar lugar a una fase tobermorítica secundaria. (Rabilero, 1988).

En su tesis doctoral Rabilero (1992), aborda la introducción del mineral zeolítico del yacimiento Palmarito de Cauto en el proceso de la fábrica de cemento José Mercerón como extensores del clínquer en la producción de cemento.

Por otro lado Jimenéz (1999) utilizó las escorias ultrabásicas de los hornos de fundición de arco eléctrico de la provincia Las Tunas para obtener un material puzolánico que contenía fase belita y la utilizó en hormigones reduciendo los contenidos de cemento por  $m^3$  de hormigón.

Son referencia obligada en nuestro país los trabajos realizados al respecto por Martirena que introduce el empleo de cenizas de paja de caña en la producción de un aglomerante cal-puzolana de alta finura a utilizar en sustitución de altos volúmenes de cemento como adición mineral activa demostrando su efectividad en la mejora de las propiedades mecánicas y de durabilidad, así como del perfil ecológico del material, al reducir drásticamente el contenido de clínquer de cemento Pórtland y fue posible sustituir hasta un 20% de cemento Pórtland en la mezcla por igual masa de aglomerante cal-puzolana, mejorando significativamente las propiedades mecánicas y la durabilidad, en comparación con el hormigón sin adiciones (Martirena, 2004).

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

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 solo la resistencia sino las propiedades físico químicas que garantizan la durabilidad. Cabe destacar el hormigón diseñado para el edificio Atlantic que con adición de 12% de zeolita logra 62 MPa a los 28 días,

llegando al año a 96 MPa (Gayoso y Rosell, 2005).

Pérez (2006) establece 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, lo que en nuestra investigación nos dimos la tarea de investigar, refiriéndonos no solo a las características geológicas generales del yacimiento de tobas vítreas sino ya más directamente a las pruebas en el laboratorio que me indiquen con mayor certeza su posible utilidad enfocándonos bajo el concepto de rendimiento del cemento con vistas a contribuir al ahorro del cemento.

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, para dar lugar a la necesidad de efectuar nuevas investigaciones.

Costafreda y Calvo (2007) plantean que la mezcla de cemento Pórtland con agua produce reacciones de hidratación muy activas, dando lugar a la formación de productos estables, tales 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, lo que demuestra 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, las resistencias de los morteros con agregado de zeolita adquieren un incremento significativo que se manifiesta en sentido ascendente incluso a los 90 días de edad, cuando en ocasiones supera las resistencias del cemento de referencia.

Según Costafreda; et. al. (2009) plantea que las zeolitas naturales pueden comportarse como puzolanas activas en sistemas hidróxido de calcio-puzolana, en los cuales provocan abatimientos sensibles en los contenidos de carbonato de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  y de la cal libre en disolución a medida que transcurre el tiempo. Llegando a la conclusión de que muchas especies de zeolitas interfieren drásticamente en la concentración de carbonato de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  en disolución y en la conductividad eléctrica de la misma, lo que es un aspecto inherente al tamaño de la partícula, la composición química y la capacidad de intercambio iónico de estos materiales. La aplicación de estos materiales puzolánicos con alta superficie específica trae consigo un mayor consumo de agua en relación al cemento.

De igual modo, Dopico aborda similar temática pero utilizando en este caso la zeolita finamente molida y logra hormigones con un 20% de sustitución de cemento con resistencias de 45 MPa, cuyas cualidades de compacidad lo definen como durable, (Dopico, 2009).

Rosell (2010) en su investigación confirma que la demanda de agua que provoca el uso de la zeolita como material puzolánico, es controlada con el uso de aditivo químico incrementando la dosis con respecto al patrón, en función de la finura de la adición y el asentamiento que requiere la tecnología. Se manifiesta el incremento de la resistencia mecánica con el uso de la zeolita como material cementicio suplementario (MCS), lo cual evidencia su reactividad puzolánica y eficacia en el objetivo de aumentar el rendimiento del cemento logrando economías y sustentabilidad del proceso producción de hormigón de resistencias

típicas del país.

Según Cabrera (2010), valora un grupo de materiales tobáceos para su utilización como puzolana natural dentro de los cuales se encuentra las tobas de Sagua de Tánamo, Guaramanao, Caimanes y San Andrés. En la investigación se logra determinar la resistencia a la flexotracción y a la compresión de morteros elaborados con la sustitución de 15 y 30 % de tobas por cemento, cuyos resultados evaluados fueron favorables. No obstante, en la investigación no determina el índice de puzolanidad y la caracterización granulométrica se realiza por vía seca, lo que quiere decir que los resultados pudieron verse afectados, debido a que lo recomendado para clases de tamaño pequeñas es el método por vía húmeda. Además se analiza el material sólo a los 7 y 28 días, lo que impide, conocer si las resistencias se incrementan en el tiempo, como se ha planteado por investigadores como Rabilero y Muños (1974), Gener y Alonso (2002) y otros, que lo establecen como característica fundamental de los materiales puzolánicos.

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

Costafreda; Díaz y Calvo (2011b), 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 distintos, como ocurre en el sureste de España, donde es frecuente encontrar representantes de los filosilicatos, fundamentalmente montmorillonita, como especie mayoritaria del grupo de las esmectitas que son singenéticas con la mordenita en los yacimientos zeolíticos españoles.

En el caso de las zeolitas de México y de Cuba, plantean los autores Costafreda; Díaz y Calvo (2011b) 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.

Costafreda (2011) establece la relación que existe entre el diámetro de las partículas de muestras compuestas esencialmente por zeolitas y esmectitas y su comportamiento puzolánico. El estudio de tres muestras, tras su trituración en tres fracciones distintas (0,080 mm, 0,063 mm y 0,045 mm), demuestra que la superficie específica y la puzolanidad aumentan en la medida en que disminuye el diámetro de las partículas. 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.

Almenares (2011) realiza una evaluación de los materiales tobáceos de los yacimientos Sagua de Tánamo, Caimanes, Guaramanao y San Andrés como puzolanas naturales al 15 y 30 %, determinando la composición química, la caracterización granulométrica, mineralógica y la determinación del índice de actividad puzolánica, poseen perspectivas para su utilización como aditivo puzolánico, por lo menos al ser utilizados en sustitución de un 15 % de cemento. Cuando sustituyo el 30 % de cemento con material tobáceo, obtuvo morteros cuyas resistencias son suficientes para su utilización en aplicaciones de albañilería. En su trabajo señala que los materiales puzolánicos que actúan como aglomerantes le conceden baja resistencia mecánica a una edad temprana, y su fraguado es algo más lento que el del cemento Pórtland ordinario. Por esta razón lo considera como un cemento para aplicaciones de albañilería. Aunque el destaca que en los últimos años ha adquirido una aplicación en la fabricación de hormigones hidráulicos, confiriéndole propiedades ventajosas a los cementos,

tales como mayor resistencia a mayor edad, menor calor de hidratación y durabilidad.

Investigadores como Rosell y Gayoso (2001), dirigieron sus investigaciones al empleo de las zeolitas naturales, como material de construcción, principalmente en la producción de cementos y otros aglomerantes, y como aditivos o agregados ligeros, para la producción de hormigones de altas prestaciones con excelentes cualidades técnicas, como la impermeabilidad y durabilidad.

Rosell; et. al. (2011), plantean que las adiciones activas en los hormigones son cada día más usuales, no solo debido a razones económicas, sino porque los efectos que se desarrollan son beneficiosos para las prestaciones del hormigón, dígase durabilidad y resistencias mecánicas. Destacó también el desarrollo de estudios de algunos minerales industriales nacionales de génesis ígnea como los vidrios volcánicos, las tobas vítreas o zeolitas, han demostrado su actividad puzolánica.

Pérez; Carballo y Ruiz (2013) estiman la ventaja económica que supondría un mejor uso del material zeolítico con granulometría menor de 0.8 mm donde se incluye un material conocido como fillers según NC 120: (2007a) en la elaboración de hormigones para la construcción, mezclándolo directamente en las plantas hormigoneras con los demás componentes y reduciendo el empleo del cemento. Su aplicación en la fábrica de traviesas de la provincia de Villa Clara permitió disminuir un 12 % el cemento empleado, además de reducir el tiempo de desmolde de 12 a 6 horas, con mejor acabado en las piezas y mayor resistencia de las mismas en el tiempo.

Las primeras producciones de lo que comenzó a ser llamado cemento romano en Cuba, se realizaron en nuestro país en una pequeña planta instalada a tal fin en el lugar conocido por El Brujo a mediados de 1987 en Santiago de Cuba. Algo más tarde sucedió en la provincia Granma donde se realizaron investigaciones ingeniero geológicas por un grupo de especialistas encabezado por el entonces Ing. Rolando Rizo Beria y la Ing. Milagros Bridón, pertenecientes a la Empresa Geominera Oriente en las tobas zeolitizadas de la localidad de Bueycito, municipio Buey Arriba, para ese entonces en dicho yacimiento se contó con una planta de

procesamiento del mineral, el por qué hoy día no contamos con dicha planta sufre de varias interrogantes al paso de los años, una de ellas pudo haber sido las reiteradas violaciones en todo proceso tecnológico del mineral desde que es extraído de la mina hasta su paso por la planta de procesamiento.

En su investigación Zaldivar (2011) realiza una reevaluación del mencionado yacimiento de las tobas zeolitizadas de Bueycito donde se evidencia la posibilidad del uso de este material puzolánico en las mezclas de hormigón y morteros hidráulicos de fck 20 MPa con adiciones de 5 y 10 %, logrando rendimientos del cemento superiores a la unidad.

La evaluación entonces de materiales puzolánicos consiste obviamente en encontrar materiales que por sus características químicas, mineralógicas y petrológicas, incluso morfológicas hagan suponer la posibilidad de actividad puzolánica. Las tobas vitroclásticas de origen volcánico, constituyen una fuente prácticamente inagotable de puzolanas. Por lo que se puede considerar que el empleo actual de materiales puzolánicos es una aplicación innovadora de una tecnología antigua para depósitos de materiales con características adecuadas que permitan su utilización para estos fines.

### **1.7 Características físico-geográficas del yacimiento Jiguaní**

Según Llull (1995) en su Informe de Prospección Detallada y Exploración Orientativa de vidrio volcánico en el yacimiento Jiguaní da a conocer las siguientes características físico-geográficas y geológicas generales del yacimiento.

#### **Ubicación**

El yacimiento se encuentra ubicado al Norte de la ciudad de Jiguaní, en la localidad conocida como Pozo Viejo, en la provincia Granma, se localiza en la plancheta topográfica 4977-II. Según el sistema de coordenadas Lambert el sector de estudio se encuentra ubicado en el siguiente punto, X: 541 900; Y: 195 500.

#### **Relieve**

El área de estudio se caracteriza por tener una superficie suavemente ondulada, a veces llana, con cotas que oscilan entre 5 - 100 m.s.n.m., resultando el límite Sur del valle con cota de 100 m; reflejo de los intensos cambios estructurales y morfológicos transcurridos en el tiempo.

## Clima

Es un área típica de un clima tropical húmedo, sometida a la acción de los vientos alisios del NW en el invierno y de ENE en verano. De acuerdo a la distribución de las precipitaciones atmosféricas, se determinan en el año dos períodos, el húmedo (Mayo-Octubre) y el período seco (Noviembre-Abril) con 200-300 mm que resulta insuficiente para el abastecimiento de agua a algunos tipos de cultivos y para el consumo de animales, en comparación con el lluvioso (600 y hasta 1100-1200 mm), con una media anual de la provincia de 1350 mm. La distribución de las precipitaciones es irregular y juegan un papel significativo en los escurrimientos superficiales y en el régimen subterráneo, las cuales aumentan con las alturas topográficas. Los valores más bajos de lluvia en la provincia se registran hacia zonas de Cauto Cristo, Río Cauto, Jiguaní y Pílon. En el Valle del Cauto las zonas de muy baja pluviosidad, reflejan láminas de 800 mm anuales o menos, convirtiéndose en una de las llanuras más secas de la isla, provocando la concentración de altos contenidos de sales. La temperatura media anual se oscila entre los 24 y 26°C, con mínimas entre 19.6 y 22.2°C y máximas que fluctúan entre los 30.0 y 32.5°C.

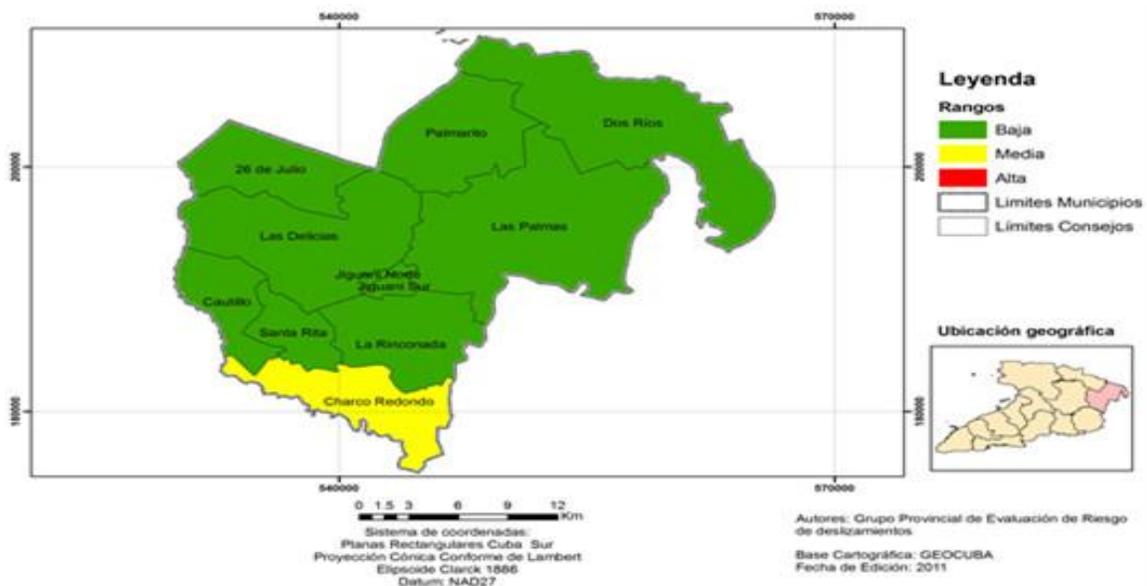


Figura 1.1. Mapa de ubicación geográfica

## **1.8 Marco geológico regional y local**

### **Estratigrafía de la región**

La región es típica de sedimentos con edades que fluctúan entre el Holoceno y el Eoceno Medio (Brull; et. al., 1998), según el levantamiento cubano-húngaro a escala 1:250 000 (figura 1.2.), siendo características las formaciones geológicas siguientes:

- Grupo El Cobre: Subdivisiones (eco): Fm. El Caney y Fm. Pílon. Se puede localizar en los alrededores del poblado El Cobre y otras áreas de las provincias de Granma y Santiago de Cuba. Constituida por diferentes tipos de rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables en sentido vertical y lateral. Las transiciones entre ellas a veces son bruscas y otras graduales y en muchos casos es prácticamente imposible establecer delimitaciones entre ellas. Las rocas más abundantes son: tobas, tobas aglomeráticas, lavas y lavas aglomeráticas de composición andesítica, andesito-dacítica y dacítica, raramente riolítica, riodacítica y basáltica. Con estas rocas se intercalan tufitas y calizas, además se asocian a este complejo vulcanógeno-sedimentario cuerpos hipabisales y diques de diversa composición. En su composición también participan tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas y vulcanomícticas y grauvacas. Yace discordantemente sobre las formaciones Manacal, Palma Mocha y Tejas. Está cubierta concordantemente por la Fm. Puerto Boniato y discordantemente por las formaciones Cauto, Charco Redondo, Dátil, Jaimanitas (parte indiferenciada y su Mbro. Tortuguilla), Río Maya, San Luis, los Grupos Guacanayabo (Fm. Manzanillo), Guantánamo (Miembros Guardarraya y Yacabo de la Fm. Punta Imías) y el Mbro. Quintero (Fm. La Cruz).

Edad: Paleoceno- Eoceno Medio parte baja.

-Formación Mícara (mc): Se desarrolla en las provincias de Granma, Holguín y Santiago de Cuba. Por su composición esta unidad se puede dividir en tres partes: inferior, media y superior.

Inferior: Constituida por aleurolitas masivas, mal estratificadas, brechas, areniscas, arcillas y calizas.

Media: Secuencia olistostrómicas de margas, areniscas, aleurolitas, gravelitas y conglomerados. Los olistolitos son de brecha y ultrabasitas serpentinizadas. La estratificación es buena.

Superior: Predominan las aleurolitas y subordinadamente brechas y areniscas tobáceas, en su parte más alta, con intercalaciones de tobas ácidas bentonizadas y calizas. Presentan buena estratificación. Las areniscas, aleurolitas, brechas, gravelitas y conglomerados son polimícticos. Las calizas son biodetríticas, arenosas y brechosas. Algunas veces en la parte alta de la formación, las areniscas y aleurolitas tienen un contenido alto de tobas vitroclásticas y cristaloclásticas y de tufitas psammíticas. En estos depósitos se observa estratificación gradacional y en ocasiones cruzada.

Yace discordantemente sobre las formaciones La Picota y Santo Domingo. Es cubierta concordantemente por la Fm. Gran Tierra y discordantemente por las formaciones Charco Redondo, Mucaral, Puerto Boniato y Sabaneta. Su parte inferior transiciona lateralmente a la parte alta de la Fm. La Picota.

Edad: Cretácico Superior Maestrichtiano Superior- Paleoceno Inferior Daniano basal.

-Formación Charco Redondo (chr): Sus depósitos están ampliamente distribuidos en todo el Norte de la Sierra Maestra incluyendo la Cordillera de la Gran Piedra. Son calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas y en la base en ocasiones conglomerados basales. Pueden aparecer calcarenitas, y algunas areniscas escasas intercaladas. Yace discordantemente sobre las formaciones Caney, Tejas, y el Grupo El Cobre (parte indiferenciada).

Está cubierta discordantemente por las formaciones Barrancas, Bayamo, Dátil, Farallón Grande y San Luis. Aparece cortada en los pozos Granma 1, Embarcadero, Santa Regina 1, Manzanillo 1, Oruita 1 y Vicana 2.

Edad: Eoceno Medio.

- Formación Barrancas (bs): Se extiende en forma de franja irregular por la parte Noroccidental de la Sierra Maestra, entre los ríos Buey y Mabay, provincia Granma. Son características las tobas riolíticas-riodacíticas, cristalovitroclásticas

y vitroclásticas, margas, areniscas calcáreo-tobáceas, calizas biodetríticas y calcilitas. Cubre discordantemente a las formaciones Charco Redondo y El Caney, no estando clara su relación con la Fm. Farallón Grande. Está cubierta discordantemente por las formaciones Cauto y Dátil.

Esta unidad representa un vulcanismo remanente del Arco Volcánico Paleogénico, el cual se manifiesta también en una serie de diques que cortan las unidades Farallón Grande y San Luís. Los sedimentos siliciclásticos, del Eoceno Medio (parte alta) - Eoceno Superior, afloran ampliamente bordeando la cuenca desde el Sur y hasta el Noreste.

Edad: Eoceno Medio (parte alta)-Eoceno Superior.

- Formación San Luis (sl): Se desarrolla ampliamente en la vertiente Sur y Este de la cuenca, de gran potencia, compuesta predominantemente por areniscas polimícticas, limolitas, margas, arcillas, calizas arcillosas, biodetríticas, arenosas y conglomerados polimícticos. Se encuentra muy bien estratificada. Está cortada por diques y cuerpos de basaltos. Yace concordantemente sobre las formaciones Farallón Grande y Puerto Boniato, cubierta discordantemente por las formaciones Casanova, Cauto, Río Maya, Manzanillo, Sevilla Arriba, Cabo Cruz, Bitirí y Camazán. Los mayores espesores de la cuenca están formados por los paquetes de rocas carbonatado-arcillosas y fragmentario-carbonatadas desde el Oligoceno al Reciente.

Edad: Eoceno Medio (parte alta)-Eoceno Superior.

- Formación Camazán (cz): Aflora en grandes áreas en la región central de la cuenca, siendo una de las unidades más ampliamente distribuidas. Se corresponde con una secuencia de calizas coralino-algáceas (biolititas), calizas biodetríticas a veces arcillosas, calcarenitas, calciruditas, limolitas calcáreas, con intercalaciones de margas y arcillas, ocasionalmente yesíferas; su coloración es variable, desde el amarillo, crema, carmelita y gris. Se observa en relación discordante con las formaciones Charco Redondo, San Luis y Tejas. Es cubierta concordantemente por las formaciones Paso Real y Río Jagüeyes, y discordantemente por las formaciones Bayamo y Cauto. Transiciona lateralmente a la Fm. Bitirí, y en parte a la Fm. Paso Real.

Edad: Oligoceno Superior -Mioceno Inferior por asociación fosilífera.

- Formación Bitirí: Ocupa áreas discontinuas en la región de Contramaestre y Jiguaní. Litológicamente está constituida por calizas algáceas de matriz fina, duras, compactas y carsificadas, que contienen ocasionalmente fragmentos de corales y grandes Lepidocyclinas. Colores amarillo-grisáceo a carmelitoso. Yace discordantemente sobre las formaciones Charco Redondo y San Luis. Es cubierta discordantemente por las formaciones Cauto, Río Jagüeyes y la cobertura aluvial Cuaternaria. Lateralmente transiciona a las calizas algáceas de la Fm. Camazán.

Edad: Oligoceno Superior- Mioceno Inferior.

- Formación Río Macío (rio): Está constituida por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, aleurolitas y arcillas. Se extiende en el cauce, orillas y desembocadura de los ríos. Yace discordantemente sobre numerosas formaciones, que abarcan desde las formaciones más antiguas hasta el Cuaternario.

Edad: Holoceno.

- Formación Bayamo (by): Puede observarse al Sureste y centro de la cuenca, principalmente en los alrededores de la ciudad de Bayamo. Se compone de arenas grises y amarillo-grisáceas de grano fino, con lentes de areniscas y conglomerados de guijarros finos e intercalaciones de arcillas arenosas. Cubre discordantemente las formaciones Camazán, Charco Redondo, Manzanillo y Paso Real. La sobreyace concordantemente la Fm. Cauto.

Edad: Plioceno Superior- Pleistoceno Inferior.

- Formación Cauto (cau): Ocupa la mayor parte del área de la Cuenca Cauto. Son depósitos mal consolidados de arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada. Coloración gris y gris-parduzca. Yace concordantemente sobre la Fm. Bayamo y discordantemente sobre las formaciones Barrancas, Bitirí, Camazán, Dátil, Manzanillo, Paso Real, Río Jagüeyes, San Luis, Manzanillo, Paso Real y el Grupo El Cobre.

En el Cuaternario también se han depositado abundantes sedimentos, los cuales aún no son reconocidos como una formación, pero se agrupan por los ambientes de sedimentación predominantes.

Edad: Pleistoceno Superior.

- Formación Dátil (dt): Está constituida por un conglomerado polimíctico mal seleccionado, mal cementado y sin estratificación visible, color rojizo con manchas de ocre. En la mayoría de los casos, los cantos son sub-angulosos y sus diámetros varían entre 0.5 cm y 35.0 cm. Están constituidos por distintos tipos de rocas de la Fm. Cobre, incluyendo rocas abisales, hipabisales e hidrotermales, entre los cuales predominan las variedades más resistentes, calcedonia y ágata en menor medida. La matriz del conglomerado es una arenisca arcillosa, de color rojo con manchas de ocre, poco resistente, friable y limonitizada.

Edad: Plioceno Superior- Pleistoceno basal.

- Formación Yayal (yay): Constituida por arcillas calcáreas y compactas de color crema y blanco; calizas organodetríticas, agrietadas, cavernosas de color blanco y crema; margas carbonatadas, nodulares, agrietadas, verde grisácea y dolomitas arcillosas, duras cavernosas, a veces organógenas, color blanco y verde cremoso. Las estructuras son masivas y la estratificación está enmarcada por cambios litológicos.

Edad probable: Mioceno medio.

- Formación Caney: Solo aflora en el borde noroccidental de la Sierra Maestra, o sea, la parte Sur y Este de la cuenca. Está representada por una alternancia de tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, tobas lapíllitas, calizas tobáceas. Se han reportado un conjunto de rocas volcánicas y piroclásticas bien estratificadas: conglobrechas tobáceas, tobas de diferente granulometría de colores desde amarillento, verdes o abigarradas, tufitas y calizas tobáceas de color verdoso, calizas de color gris claro y margas. Se depositó concordantemente sobre la Fm. Pilón y la secuencia indiferenciada del Grupo El Cobre, con la cual transiciona lateralmente también. Está cubierta concordantemente por la Fm. Puerto Boniato y discordantemente por las formaciones Barrancas, Charco Redondo y San Luis.

Edad: Eoceno Medio (parte baja).

-Formación Puerto Boniato (pb): Se desarrolla en forma de franja discontinua en la Sierra Maestra, al S de la Sierra de Cristal y al S de Baracoa, provincias de Santiago de Cuba, Holguín y Guantánamo. Litológicamente presenta una

alternancia de calizas organodetríticas aporcelanadas, algáceas y margas, con intercalaciones de sílice negro- parduzco. Yace concordantemente sobre las formaciones El Caney, Sabaneta y Gr. El Cobre (parte indiferenciada) y discordantemente sobre la Fm. La Picota. Es cubierta concordantemente por las formaciones Mucaral, San Luis y Sierra de Capiro. Se depositó en un ambiente de aguas medianamente profundas.

Edad: Eoceno Medio.

- Depósitos palustres (pQ4): Estos sedimentos costeros se forman en dos ambientes esencialmente diferentes, distinguiéndose dos tipos de depósitos: los pantanos costeros de agua dulce y los pantanos de mangles. Los primeros prácticamente no reciben material terrígeno y sus depósitos están representados fundamentalmente por residuos vegetales y limos carbonatados; y los segundos se representan en facies carbonatado-arcillosas y arcillosas. La facie terrígena de los pantanos de mangles es característica de arcillas de color gris oscuro y pardo oscuro fuertemente salinizadas, y las arcillas arenosas con restos carbonizados de troncos y raíces de mangles. La facie carbonatada de los depósitos de pantanos de mangles es característica de limos finos carbonatado-organógenas con una cantidad variable de detrito vegetal.

- Depósitos aluviales (alQ4): Característicos de arenas, arenas arcillosas y arcillas arenosas, de color carmelita pardusco con manchas rojizas y grises de granulometría media a fina, e intercalaciones de gravas y guijarros pequeños de cuarzo, fragmentos de areniscas cuarzosas, concreciones ferruginosas, y localmente, sedimentos carbonatados con fragmentos de caliza organógena. Su espesor varía de 1-5 m. La composición de los clastos depende directamente de las fuentes de aporte, mientras que la granulometría se vincula con la cercanía de estas, pues a medida que avanza hacia las costas los sedimentos son más finos.

### **Comportamiento tectónico regional**

La tectónica de la parte Suroriental de Cuba está determinada por su posición en la zona de interacción de las placas litosféricas Norteamericana y Caribeña, encontrándose relacionadas indisolublemente con la fosa profunda de Oriente al Sur, la depresión graben sin forma Cauto-Nipe al NW y la depresión Central-

Cuenca de Guantánamo al NE (Flores & Millán 1998). La Cuenca Cauto ubicada al Oeste de Cuba Oriental tiene la forma de un triángulo alargado, representando una zona deprimida rellena de grandes espesores de sedimentos del Terciario y el Cuaternario. Limita tectónicamente al Norte con la Falla Axial y el Elevado de Nipe; al Oeste con el sistema de fallas rumbo deslizantes Cauto-Nipe (Noroeste) que limita a Las Tunas con Granma; al Sur con la falla Bartlett y al Este con el sistema de fallas rumbo deslizantes Cauto-Nipe (Sureste) que limita a la Sierra Maestra de la Cuenca Cauto).

Los movimientos tectónicos recientes de la corteza terrestre han sido objeto de valoraciones según la evaluación ingeniero-geomorfológica de los datos geodésicos de la red altimétrica nacional de alta precisión. El análisis conjunto de los perfiles geólogo-geomorfológicos complejos y de las velocidades relativas de los movimientos (Almirall et al. 1994), permitió la confección del esquema de las tendencias generales de la geodinámica reciente del sector centro-meridional de la cuenca del río Cauto, del cual se infiere que:

- Para la periferia septentrional (incluyendo toda la Llanura Sabanilla, paleosector de la cuenca hidrográfica del Cauto, situada al Sur de Campechuela y Manzanillo) es característico un incremento general de los descensos relativos del SW (-2 a -3 mm/año) al NE (-6 a -7 mm/año), en dirección a la depresión Cauto.
- El carácter general del incremento de los descensos refleja que la Llanura no posee una morfoestructura plicativa sino de bloque-falla. La depresión Cauto se caracteriza por descensos generales, los cuales crecen hacia el Este, alcanzando en su parte central de -12 a -15 mm/año.

Investigaciones sobre la geodinámica de Cuba Oriental reflejan descensos entre -2,5 y -7 para la región axial de la Cuenca del Cauto, las cuales se evidencian en el perfil complejo de la línea geodésica Holguín-Bayamo y en el mapa general de los movimientos de ese móvil territorio.

El análisis de los gradientes de las velocidades relativas de los movimientos tectónicos recientes, refleja una fuerte actividad neotectónica en la depresión, la cual se corresponde con la diferenciación morfoestructural, las manifestaciones sísmicas y los jóvenes procesos de formación de grietas, que determinan en

ocasiones la formación de generaciones de deslizamientos en el joven cañón del río Cauto, como ocurrió pocos años atrás en el poblado La Yaya.

La interpretación de la estructura profunda a través del corte transversal de Cuba Suroriental, refleja la correspondencia entre la diferenciación morfoestructural, el campo gravimétrico y el régimen espacial de la endodinámica reciente de la Cuenca Cauto, región cubana de marcada y sostenida subsidencia durante la segunda parte del presente siglo.

En Cuba, durante la etapa neotectónica (Mioceno-Cuaternario) del desarrollo del relieve se originaron numerosas cuencas superpuestas de subsidencia, entre las que sobresale la depresión Cauto-Nipe, la cual en el Pleistoceno Superior-Holoceno experimentó una inversión de su régimen tectónico, con ascensos débiles que originaron la formación de varios pisos de llanuras y espectros de terrazas marinas, fluvio-marinas y fluviales. De acuerdo a las mediciones geodésicas repetidas se detectó una tendencia actual a los descensos (nueva inversión geodinámica), que alcanza en su zona central valores de hasta -14 mm/año y menos acentuados hacia las partes periféricas de Cabo Cruz-Manzanillo con valores entre -1 y -6 mm/año, y aún más actualizados del orden de -2,5 a -7 mm/año. Paralelamente a los cambios glacioeustáticos, en este caso de sentidos opuestos, el régimen natural de interacciones hidrológicas entre el acuatorio marino del Golfo de Guacanayabo y el potencial freático de la Cuenca Cauto ha sufrido sensibles rupturas de su equilibrio dinámico, debido a la transformación ingenieril del gasto fluvial de esta última por la construcción de embalses con fines socioeconómicos y preventivos ante los riesgos por devastadoras inundaciones. En este contexto, la intrusión salina avanza tierra adentro, lo cual entre otros procesos adversos contribuye a la desertificación de su paisaje geográfico.

Otras evidencias de los descensos continuos de la corteza terrestre de la depresión superpuesta Cauto-Nipe lo constituyen:

- La extensión y ampliación de los geosistemas transicionales litorales (manglares) en la zona de Cabo Cruz, obtenidas mediante cartografía comparativa de la década de los años 50 y la actualidad

- La desaparición de tramos del camino colonial de la región bajo algunos sectores cenagosos o de su acercamiento a la costa actual
- La reconstrucción del poblado de Cabo Cruz en la terraza abrasiva más elevada, al Este del asentamiento original
- La transgresión marina total sobre cayos y formas acumulativas del litoral manzanillero, entre muchas.

### **Geomorfología regional**

Constituye la tercera megamorfoestructura general de Cuba Suroriental, en la cual transcurrieron los descensos neotectónicos más intensos del archipiélago cubano. Esta es una zona marginal transitoria de tipo isostático de compensación, entre las regiones de los arcos insulares septentrional y meridional de Cuba Oriental (Almirall; et. al., 1994).

En esta paleodepresión se depositaron grandes espesores de sedimentos carbonatados y terrígenos durante el Oligoceno-Mioceno. Según los datos de perforación, se distinguen tres depresiones: Guacanayabo (1750 m), Cacocum (1300 m) y Nipe (900 m), divididas por los ascensos de Babiney-Mir y Barajagua-Marcané.

En la etapa neotectónica tardía fue de gran importancia la activación de algunas fallas regionales y zonas de fallas transregionales de dirección SW-NE. Las grandes zonas de morfoalineamientos transverso-diagonales, que dividen el macrobloque montañoso de la Sierra Maestra en mesobloques, atraviesan la morfoestructura longitudinal-sublatitudinal original de la depresión y la fraccionan en un mosaico de mesounidades transverso-diagonales. En la depresión-graben del Cauto predominan amplias llanuras bloque-monoclinales escalonadas, en las cuales, en ocasiones aflora el basamento plegado y cuerpos intrusivos. En la región de Jiguaní, se refleja claramente la continuación de las morfoestructuras montañosas por medio del sistema de fallas que determinan un claro escalonamiento de las llanuras hacia el NE, y en Bayamo hacia el NW. En el relieve de la llanura se destacan el horst lineal El Yarey y una morfoestructura circular, relacionados con el desarrollo de intrusiones basálticas.

En la parte occidental de la depresión-graben están ampliamente desarrolladas las llanuras monoclinales planas, con alto desarrollo de meandrización. En el Pleistoceno Tardío, la depresión experimentó, en esta región, una inversión del régimen tectónico; los descensos fueron sustituidos por ascensos en la zona de intersección de la morfoestructura local, lo que produjo un profundo cortamiento del cauce del río Cauto.

Hacia el Este, las altas llanuras bloque-monoclinales Remanganaguas-Buenaventura constituyen una zona de tránsito hacia la depresión Central, esas grandes morfoestructuras son cortadas por valles tectónico-estructurales como el del río Contramaestre, y más al Este por sectores deprimidos de graben como San Luis-Dos Caminos. Al Norte de estas llanuras el relieve se caracteriza por el diseño paralelo de la red fluvial de los ríos Cauto y Salado, y también en el caso de La Rioja. Las formas fluviales pequeñas y de cárcavas en esta región, son paralelas. Los elementos de disección erosiva en conjunto, cortaron las zonas lineales de formación de grietas recientes, esto permitió una nueva zona sublatitudinal-longitudinal de alineamientos morfoestructurales. La morfoestructura de los flancos septentrional y meridional de la depresión se diferencia claramente en las variaciones de los espectros de terrazas fluviales. En el flanco Norte de los valles fluviales están desarrolladas unas terrazas bajas escalonadas; mientras que en el flanco meridional de los valles predominan terrazas erosivas altas. El extremo más oriental de la cuenca hidrográfica del Cauto, ocupa las llanuras altas de la depresión central ( $H=200-220, 260-280$  m), siendo en el contexto geológico-geomorfológico de Cuba Oriental una de las depresiones más antiguas.

Está ocupada por conglomerados, areniscas y arenas arcillosas de las formaciones molásicas del Eoceno Tardío. En la etapa neotectónica, la depresión experimentó ascensos débiles y la falla "Oriente" la separó de la depresión Cauto-Nipe. Las llanuras del fondo de la depresión representan una formación de zócalo y no existen huellas de acumulación Plioceno-Cuaternaria significativa. Morfológicamente, esta depresión no es un hundimiento intermontañoso típico, sino la depresión de la zona de ascensos.

En el período reciente está deformada por un complejo sistema de bloques morfoestructurales. En su porción central están desarrolladas las llanuras bloque-escalonadas subhorizontales, las cuales al Norte y al Sur transitan al sistema de escalones premontañosos, lo que demuestra el incremento de los ascensos hacia la periferia montañosa. La depresión está fracturada por las fallas diagonales de dirección SW-NE, las cuales también limitan el bloque central más elevado del macizo de la Gran Piedra.

### Características geológicas del yacimiento Jiguaní

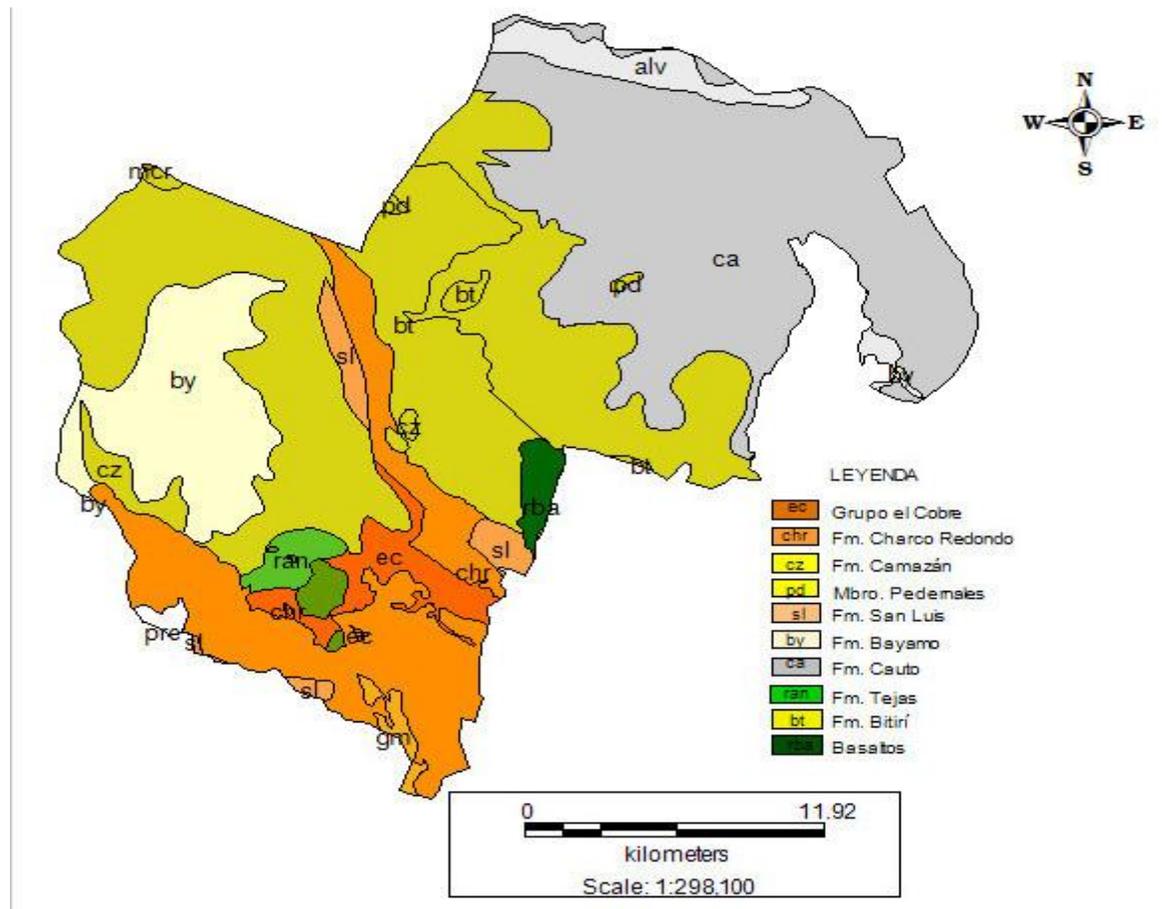


Figura 1.2. Mapa geológico de Jiguaní

**La Fm. Caney** (Eoceno Medio - Inferior) está representada por una alternancia de tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, tobas lapíllitas y calizas tobáceas.

**La Fm. Charco Redondo** (Eoceno Medio) está compuesta por calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable. Pueden aparecer calcarenitas, y algunas areniscas escasas intercaladas.

**La Fm. San Luis** (Eoceno Medio - Eoceno Superior): se compone predominantemente por areniscas polimícticas, limolitas, margas, arcillas, calizas arcillosas, biodetríticas, arenosas y conglomerados polimícticos. Se encuentra muy bien estratificada.

**La Fm. Camazán** (Oligoceno Superior - Mioceno Inferior), se corresponde con una secuencia de calizas coralino-algáceas (biolititas), calizas biodetríticas a veces arcillosas, calcarenitas, calciruditas, limolitas calcáreas, con intercalaciones de margas y arcillas, ocasionalmente yesíferas.

**La Fm. Bayamo** (Plioceno Superior - Pleistoceno Inferior) se compone de arenas grises y amarillo-grisáceas de grano fino, con lentes de areniscas y conglomerados de guijarros finos e intercalaciones de arcillas arenosas.

**La Fm. Cauto** (Pleistoceno Superior.) presentan depósitos mal consolidados de arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada. Coloración gris y gris-parduzca.

**Tectónica:** Atendiendo a las particularidades geológicas en el área del yacimiento, a la forma de ocurrencia y disposición en el corte geológico de las tobas vitroclásticas, se piensa en la presencia de fallas que provocaron la formación de bloques de tipos horstmonoclinales. Movimientos neotectónicos tardíos reactivaron estas fallas y gracias a ello fue posible que aflorara el basamento, en este caso lo constituyen las tobas vitroclásticas.

**Rocas encajantes:** Tobas vitroclásticas de color gris, de granulometría fina a media, en mayor o menor grado abrasivas al tacto. Estructura vitroclástica, roca compuesta por vidrio volcánico en forma de vitroclastos de diferentes formas.

**Características morfológicas del cuerpo mineral:** Por su morfología el yacimiento asemeja un cuerpo con forma de bolsón, se observan acuñamientos del horizonte tobáceo, hacia el Norte y Sur, la potencia de la zona mineralizada, alcanza 17.80 m en la parte de mayor espesor. A lo largo del rumbo, el cuerpo mineral alcanza una extensión aproximada de 285 m. Por el buzamiento el cuerpo mineral se entierra hacia el Este (con buzamiento aproximado de 12°) por debajo del paquete de calizas que sobreyacen el horizonte de tobas y que afloran en la parte más elevada del área del yacimiento.

**Composición mineralógica:** Las tobas vitroclásticas del yacimiento, mineralógicamente están constituidas esencialmente por vidrio volcánico y montmorillonita, subordinadamente contienen, aunque en bajos por cientos, feldspatos, calcita, cuarzo y raramente zeolita.

**Calidad de la materia prima:** 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, potasio y manganeso.

Tabla 1.2. Composición química (media)

Compuesto	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	PPI
Contenido, (%)	61.27	13.20	3.73	3.15	3.58	1.75	2.29	0.05	0.09	0.38	0.1	10.32

- Contenido medio de vidrio volcánico 60.22%
- Contenido medio de montmorillonita 35.06%
- Contenido medio de intercambio catiónico 31.82 meq
- Contenido medio de CaCO<sub>3</sub> 4.09
- Peso volumétrico seco 1.008 t/m<sup>3</sup>
- Peso volumétrico saturado 29.82%

# **CAPÍTULO 2**

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se hace una descripción detallada de la metodología empleada durante la caracterización geológica general y evaluación de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní como material puzolánico.

### 2.1 Metodología de la investigación

La investigación desarrollada contempló una metodología basada en 4 etapas de investigación, las cuales se sintetizan en la recopilación, análisis, procesamiento e interpretación de la información, así como su posterior representación, las cuales son esquematizadas a continuación 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 tres etapas de trabajo.



Figura 2.1 Flujograma de la investigación

## **2.2 Etapa preliminar**

Se desarrolló la consulta de un volumen de literaturas relacionadas con la temática a nivel mundial, nacional y provincial basadas en búsquedas bibliográficas en el Centro de Información Científico–Técnica (ICT) del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y en otros centros docentes del país de artículos científicos, Trabajos de Diploma, Maestrías y Doctorados, etc.; en el Archivo Técnico de la Oficina Nacional de Recursos Minerales en Santiago se procedió a la revisión de la información geológica referente al yacimiento de tobas vítreas en Jiguaní, de conjunto con los especialistas de la Unidad Empresarial Base Laboratorio en Granma perteneciente a la ENIA Holguín, se consultaron las normas referidas a la investigación en particular nacionales e internacionales.

## **2.3 Etapa de trabajo de campo**

### **Toma y preparación de las tobas vítreas**

Para la realización de la investigación las muestras fueron tomadas del yacimiento de tobas vítreas en la localidad de Pozo Viejo en el municipio de Jiguaní. El método aplicado de toma de muestras fue el método por puntos, que consistió en la toma de trozos típicos de la materia prima. Seguidamente fueron sometidas a un proceso de reducción de su tamaño mediante tres etapas de trituración, cada una por separado.



Figura 2.2. Molino de disco U/B Loma de Piedra

En la primera etapa se utilizó la trituración por impacto de forma manual hasta lograr obtener fragmentos máximos de 25 y 30 mm aproximadamente. Después de la trituración manual en que se obtuvieron tamaños máximos de 30 mm, se llevaron a cabo dos etapas de trituración en el molino de disco figura 2.2; el cual

tiene un diámetro de alimentación de 30 mm regulando la salida del material a 3 mm respectivamente.

El material es recirculado en una segunda etapa en el mismo molino de disco regulando la salida del material para la obtención de las clases granulométricas menores de 1 mm. Esta última fracción granulométrica fue la escogida por el colectivo del Departamento de Producción de la Empresa Provincial de Construcción y Mantenimiento Constructivo, después de haberse analizado la factibilidad económica de procesar el mineral con el equipamiento tecnológico con que dicha entidad cuenta, en el caso de una producción a escala industrial para la elaboración de morteros, hormigones y bloques hormigón de 40 x 20 x 15 cm.

#### **2.4 Etapa de laboratorio**

Para el análisis de las muestras seleccionadas en la presente investigación fue necesario realizar trabajos de laboratorio de preparación de muestras donde primeramente todo el material utilizado fue verificado por el tamiz No. 20 de 0.8 mm.

#### **Materiales utilizados**

La aplicación de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní como puzolanas naturales se realiza bajo el concepto de contribuir al ahorro del cemento, abaratar el costo en la producción de morteros y hormigones hidráulicos con el aporte que este hecho realiza al medio ambiente y la economía del país.

Los materiales utilizados en las mezclas de morteros y hormigones son:

- Las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní.
- Cemento Portland Gris P-350, según NC 95: (2001). Cemento Portland. Especificaciones.
- Áridos Finos (5 - 0.15 mm) según NC 251: (2005b) Áridos para Hormigón Hidráulico. Especificaciones.
- Áridos Gruesos (19 - 5 mm) según NC 251: (2005b). Áridos para Hormigón Hidráulico. Especificaciones.

Los áridos provienen del molino Ramón Viamonte (El Cacao) de la Empresa de Materiales de la Construcción de Granma.

#### **2.4.1 Métodos y técnicas analíticas, empleados en la investigación**

La investigación se desarrolló siguiendo el método tradicional de experimentación, el cual estuvo apoyado para su valoración en técnicas de análisis de caracterización granulométrica, el índice de actividad resistente y en la determinación de las resistencias mecánicas de morteros y hormigones hidráulicos.

La elección del método y las técnicas analíticas se fundamentan en los aspectos teóricos a los cuales se hizo referencia en el capítulo 1.

#### **2.4.2 Método utilizado en la investigación**

La obtención de los resultados a partir del método tradicional de experimentación, en las investigaciones exploratorias, hacen de este método, candidato para ser utilizado en esta investigación. Los porcentajes escogidos para la sustitución de cemento Portland por tobas se fundamenta, en que la adición de la puzolana para la producción de cemento Portland Puzolánico, constituye entre un 15 y 40 %, de acuerdo a lo establecido en la ASTM C 595, no obstante, los cementos puzolánicos más difundidos llegan hasta un 30 % en contenido de puzolana.

Por otro lado, la cantidad de material utilizado como aditivo varía frecuentemente según su actividad puzolánica. Algunas puzolanas naturales son utilizadas en un rango de 15 a 30 %, con respecto al peso total del cemento Stanton (1950). La cantidad óptima de material puzolánico depende de dónde va a ser utilizado y las especificaciones requeridas ACI 232. 1R, (2000).

Por lo tanto, al considerar que no es objetivo de este trabajo encontrar la dosificación óptima de material a ser empleado como aditivo sino determinar la existencia de propiedades puzolánicas en estos materiales, se tomó un porcentaje mínimo de 10 % y un porcentaje máximo de 20 %. Para ello se partió del análisis previo, realizado en las investigaciones de: (De Armas, 2008); (Muxlanga, 2009); (Cabrera, 2010) y (Almenares, 2011).

#### **2.4.3 Determinación de la composición granulométrica**

El análisis granulométrico realizado se empleó para la determinación de la

composición granulométrica y la distribución sumaria por clases de los áridos y del material tobáceo en la elaboración de los morteros y hormigones hidráulicos 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, mediante la utilización de la tamizadora mostrada en la figura 2.3, 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,  $-4.76 + 2.38$ ;  $-2.38 + 1.19$ ;  $-1.19 + 0.59$ ;  $-0.59 + 0.297$  y  $-0.297 + 0.149$ ; las muestras del árido grueso se separaron en las clases de tamaño,  $-19.1 + 9.52$ ;  $-9.52 + 4.76$  y  $-4.76 + 2.38$ , realizándose mediante el proceso de cribado por vía seca.



Figura 2.3. Tamizadora

Para determinar los porcentajes granulométricos de las tobas vítreas se tuvo en cuenta el tratamiento de muestras utilizando el método de tamizaje para el mezclado de una muestra de 1000g de tobas vítreas logrando un control de la homogenización y que esta a su vez sea representativa dando lugar a la posterior reducción del 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 para la obtención de los porcentajes granulométricos utilizando la tamizadora que se muestra en la figura 2.3, la cual fue programada para 10 minutos.

#### **2.4.4 Determinación del índice de actividad puzolánica**

Para la determinación de este índice se tomaron los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión a los 28 días del ensayo, calculándose a través de la ecuación (2):

$$I.A.R = \frac{A}{B} \cdot 100 \quad (2)$$

Dónde:

IAR: Índice de actividad resistente

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

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

El método de ensayo para la determinación del índice de actividad puzolánica de las muestras de morteros con adiciones del aditivo mineral, se recoge en la norma cubana NC TS 527 (2007c), mediante el ensayo de resistencia a la compresión de mezclas de cemento y arena normalizada (arena sílice).

#### **2.4.5 Determinación de resistencias mecánicas en morteros**

Los ensayos de la resistencia a la flexotracción y a la compresión de las tobas vítreas a través de pruebas de morteros se detallan a continuación.

##### **Preparación de los materiales para la conformación de los morteros**

Se elaboraron un total de 45 probetas con material tobáceo del yacimiento analizado; en la adición del 10 y 20 % de material tobáceo se confeccionaron un total de 30 probetas, además de 15 probetas sin adición de tobas (patrones o de referencia). Para garantizar la calidad de la arena primeramente se tomó la arena y se sometió a un proceso de tamizado por el tamiz 2,36 mm, se lavó para eliminar las partículas extrañas y contaminantes, se puso en la estufa por 24 horas para eliminar su humedad. Luego se procedió a la dosificación para la elaboración de los morteros.

Las probetas prismáticas de dimensiones 40x40x160 mm se fabrican con una mezcla plástica, en la figura 2.2 se observa que en todos los casos se utilizó una

relación cemento/arena 1:4 determinándose una relación agua-cemento-tobas por la necesidad de alcanzar la fluidez requerida según los ensayos de consistencia normal para cada material, debido a que en la práctica el agua se añade en la mezcla hasta obtener la plasticidad y consistencia de la masa requerida. Se conservan en atmósfera húmeda durante 24 h, las probetas desmoldadas se sumergen inmediatamente en agua hasta el momento de los ensayos de resistencia.

Tabla 2.1. Dosificación para la conformación de los morteros

Material	Sustitución (%)	Dosificación			
		Cemento (g)	Arena (g)	Tobas (g)	Agua (mL)
Patrón	-	268.4	1632	-	245
Tobas Vítreas	10	241.6	1632	26.84	245
Tobas Vítreas	20	214.7	1632	53.75	245

Tabla 2.2. Relación (cemento: arena: tobas vítreas)

Muestra Patrón	1: 4
Muestra con adición de 1	1: 3: 1
Muestra con adición de 1.5	1: 2.5: 1.5

Para la elaboración de los morteros se usó la mezcladora que aparece en la figura 2.4, en la cual se vertió el agua previamente medida con una probeta graduada en correspondencia con la cantidad a utilizar en cada una de las mezclas diseñadas que aparecen en la tabla 2.1. Luego se realizó la adición del cemento en las cantidades previamente calculadas, según las sustituciones (10 y 20 % de material tobáceo) y con el 100 % para la elaboración de los morteros de referencia o patrón, y se procedió a la mezcla de los mismos durante 30 segundos a velocidad lenta, hasta lograr la mezcla homogénea, luego se vertió la arena y sin detener la mezcladora, se mezcló por 30 segundos más. Después se dejó en reposo durante 90 segundos y se mezcló nuevamente a una velocidad rápida por 60 segundos. Lo que permitió una buena homogenización de los materiales.

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

que seguidamente fueron compactados manualmente y situados en un local donde se garantizaba la buena conservación de los mismos, y pasadas 24 horas se extrajeron los morteros y se colocaron en el área de curado hasta las edades correspondientes a los ensayos de resistencia.



Figura 2.4. Mezcladora para morteros

### **Ensayo de resistencia a la flexotracción**

El ensayo de la resistencia a la flexotracción, se realizó con la ayuda de tres cilindros de acero de 10 mm de diámetro figura 2.5; dos de ellos, sobre los cuales se apoya el mortero, situados en un mismo plano y paralelos a la distancia de 100 mm el tercero equidista de los dos primeros y se apoya sobre la cara opuesta de la probeta.

Uno de los cilindros de soporte y el cilindro de carga serán capaces de oscilar ligeramente con relación a sus centros para mantener una distribución uniforme de la carga a todo lo ancho del mortero sin someterlo a esfuerzos de torsión.

La máquina empleada para el ensayo a compresión posee una precisión de 2,5 kN, se encuentra calibrada por la Oficina Territorial de Normalización de Holguín acreditada por la norma NC ISO 17025: 2005. Requisitos Generales para la Competencia de Laboratorios de Prueba y Calibración, lo cual asegura una adecuada trazabilidad en sus mediciones. No se observaron anomalías en el funcionamiento del equipo de medición durante la realización del ensayo.

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

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

El módulo de rotura  $R$ , está dado por la ecuación (3).

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

Dónde:

$b$ : lado de la sección cuadrada de la probeta

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

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

Dónde:

$P$ : Carga de rotura aplicada en el medio del mortero

$l$ : Distancia entre los cilindros de soporte

Si  $l$  y  $P$  se expresan en  $\text{cm}$ , la fórmula se transforma en:

$$R = 0,234 P \text{ para } l = 10,00 \text{ cm}$$

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

$R$  se expresa en  $\text{kgf/cm}^2$ , cuando  $P$  está en  $\text{kgf}$  o en  $\text{kN/cm}^2$  cuando  $P$  está en  $\text{kN}$ .

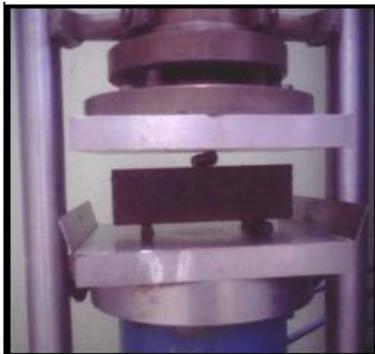


Figura 2.5. Plato superior e inferior

### Ensayo de resistencia a la compresión

En el ensayo de resistencia a la compresión cada probeta se sometió a un

esfuerzo sobre las dos caras laterales de la misma. Para ello se utilizaron dos placas de acero de dureza no inferior a HRC 60, de  $40 \pm 0,1$  mm de ancho y largo, y de espesor mínimo de 10 mm, las cuales son planas con un error menor de 0,02 mm.

El conjunto se colocó entre los platos de 10x10 cm de la prensa que aparece en la figura 2.5, cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión. Los platos se guiaron sin fricción apreciable durante el ensayo para poder mantener siempre la misma proyección horizontal. En el aditamento la placa inferior fue introducida en la platina inferior. La placa superior con rótula recibe la carga transmitida por el plato superior de la prensa a través del conjunto de deslizamiento el cual debe ser capaz de oscilar verticalmente, sin apreciable fricción en el aditamento que guía.

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

La resistencia a la compresión R se calculó mediante la ecuación (4):

$$R = \frac{P}{S} = \frac{P}{l \cdot b} \quad (4)$$

Dónde

P: carga aplicada a la probeta.

S: superficie de la sección transversal de la probeta, cm<sup>2</sup>

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

Los ensayos de resistencia a la flexotracción y compresión se realizaron a las edades de rotura de 3, 7, 28, 60 y 90 días.

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

#### 2.4.7 Determinación de resistencias mecánicas en hormigones

Se elaboraron tres series de probetas, la primera fue la del patrón, las otras dos fueron para las muestras con adiciones del 10 y 20 % de tobas vítreas a las edades de 3, 7, 28, 60 y 90 días, todas las series se elaboraron con 6 probetas por días de ensayo para un total de 90 probetas.

##### Preparación de los materiales para la conformación de los hormigones

Se diseñó un hormigón que requiere una resistencia característica a compresión de 25 MPa, con fluidez de 75 -100 mm y compactación manual. Para preparar el hormigón se utiliza una hormigonera de tiro forzado de 50 litros figura 2.6. La cantidad de amasadas propuestas son seis, la primera amasada de cada serie se utiliza para ajustar la cantidad de agua requerida para la mezcla de hormigón, mediante el cono de Abrams.

Las restantes cinco se toman como repeticiones a las que se le verifica el asentamiento, las probetas a utilizar son cilíndricas de 150 x 300 mm para realizar ensayos de resistencia mecánica a compresión a las edades de 3, 7, 28, 60 y 90 días, aplicando una carga axial de compresión figura 2.7, hasta llegar a la rotura en la prensa hidráulica de 125 tn. Este ensayo se realizó de acuerdo con NC ISO 6275: 2005 y NC 244: 2002.



Figura 2.6. Mezcladora para hormigones



Figura 2.7. Prensa hidráulica

Para la determinación de la resistencia de cada una de las probetas ensayada se empleó la siguiente expresión recogida en la NC 244: (2005a).

$$f_{ci} = \frac{10 * F}{A} \quad (\text{MPa})$$

F= Carga en rotura (kN)

A = Área de la sección transversal de la probeta (cm<sup>2</sup>)

f<sub>ci</sub> = Resistencia de la probeta (MPa)

Todas las probetas se compactan por vía manual utilizando una varilla normalizada y se mantienen en cámara de curado por inmersión, hasta la edad del ensayo, en la tabla 2.3 se muestran las dosificaciones de las adiciones mineral y química utilizadas en la investigación.

Tabla 2.3. Dosificación de hormigones de 25.0 MPa, con Tobas vítreas al 10 y 20 %.

Materiales	U/M	Serie Patrón		Serie 10 %		Serie 20 %	
		1m <sup>3</sup>	0.045m <sup>3</sup>	1m <sup>3</sup>	0.045m <sup>3</sup>	1m <sup>3</sup>	0.045m <sup>3</sup>
Cemento Portland P -350	Kg	415	18.7	373	16.8	332	14.94
Toba como MCS	Kg	-	-	42	1.89	83	3.73
Gravilla 19-5 mm	Kg	1007	45.3	1007	45.3	1007	45.3
Arena 0.15-5 mm	Kg	706	31.8	706	31.8	706	31.8
Agua	Litros	201	9.0	201	9.0	201	9.0
A/C		0.52	0.52	a/c+p = 0.62		a/c+p = 0.72	
Asentamiento Abrams		75-100		75-100		75-100	

#### 2.4.8 Ensayo de resistencia a la compresión en bloques

En la investigación se realizaron pruebas con adición del material puzolánico al 10 % del material tobáceo en bloques hormigón de 40x20x15 cm con compactación mecánica figura 2.8, las características granulométricas de las tobas con las que se realizaron estas pruebas son las mismas con las que se trabajaron los morteros y hormigones hidráulicos.

Estos ensayos se tomaron como punto de partida de la aplicación de las tobas vítreas como material puzolánico, a continuación en la tabla 2.4 se muestran la dosificación que se utilizaron en su confección, los materiales fueron premezclados y compactados mecánicamente en la máquina de producción de bloques que se presenta en la figura 2.8.

Para llegar a estas dosificaciones se procedió a sustituir pesando 50 kg del cemento P-350 el 10 % de tobas vítreas, representando 5 kg del cemento pesado,

la granulometría de las tobas vítreas es la misma utilizada en morteros y hormigones hidráulicos. Se usó un cubo metálico con 10 litros de capacidad representando un volumen de  $0.01 \text{ m}^3$ . Se realizaron dos series de bloques que fueron mezclados en la parte superior de la máquina de bloques, donde se encuentra el cajón con eje rotatorio en su interior, permitiendo una mejor homogenización de los materiales, obteniéndose un total de 12 bloques.

Tabla 2.4. Dosificación para la conformación de los bloques de 40x20x15 cm

Cemento	Arena	Polvo de piedra	Granito
6.5 kg	$0.015\text{m}^3$	$0.005\text{m}^3$	$0.015\text{m}^3$



Figura 2.8. Máquina compactadora de bloques

## 2.5 Etapa de gabinete

En la cuarta etapa de la investigación se procesaron los datos obtenidos en los análisis realizados durante la ejecución del trabajo, lo que permitió una representación visual de los parámetros de resistencias mecánicas, rendimiento del cemento e índice de puzolanidad en figuras y tablas, se desarrolló una interpretación conjunta de estos resultados lo que resultó de gran ayuda para conocer si se cumplieron los objetivo trazados.

# **CAPÍTULO 3**

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados experimentales que confirman la hipótesis científica sobre las potencialidades de los materiales tobáceos del yacimiento Jiguaní como material puzolánico; mediante el análisis granulométrico de los áridos, el material tobáceo y los ensayos mecánicos a las probetas de morteros y hormigones hidráulicos, para ser empleados como material puzolánico.

### 3.1 Resultados experimentales y su análisis

#### 3.1.1 Caracterización granulométrica

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

#### Características generales y normativas del cemento P-350.

Tabla 3.1. Resultados comparativos, obtenidos en los ensayos físicos – mecánicos.

Especificaciones NC 95: 2001				Resultados obtenidos		
Índice	Requisitos	UM	P-350	Cemento P-350 a granel		
Físicos	Retenido en el tamiz 4900	%	(máximo) 10	3.7		
	Tiempo fraguado inicial	minuto	(minuto) 45	70		
	Tiempo fraguado final	hora	(máximo) 10	3h 15 min		
Mecánicos	Resistencia a la flexotracción (mínima)	MPa				
	3 días				3.0	5.30
	7 días				4.0	8.28
	28 días	6.0	9.44			
	Resistencia a la compresión (mínima)	MPa				
	3 días				17.0	22.8
7 días	25.0				26.8	
28 días	35.0	38.0				

En la tabla 3.1 se puede apreciar los resultados del análisis comparativo de los ensayos físicos – mecánicos realizados al cemento P-350 con la NC 95: (2001)

donde este cumple con las especificaciones para ser utilizado en nuestra investigación para la obtención de hormigones hidráulicos de 25 MPa.

### Caracterización granulométrica de los áridos

El conocimiento de la granulometría de los áridos, ya sean finos o gruesos es una cuestión primordial para el diseño y la elaboración de las mezclas de hormigón, ya que nos permite determinar la distribución del tamaño que poseen los áridos, aspecto importante en las propiedades de los hormigones que lo contienen.

En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran los resultados comparativos de los ensayos realizados a los áridos finos fracción 5 – 0.15 mm proveniente del molino Ramón Viamonte (El Cacao) con las especificaciones establecidas en la NC 251: (2005b).

Tabla 3.2. Análisis granulométrico, fracción 5-0,15 mm (Árido Fino) vs NC 251: (2005b).

Resultados obtenidos		Especificaciones de la NC 251:2005	
		Rangos de calidad	
Tamiz	% pasado	Rango mínimo	Rango máximo
4.76	95	90	100
2.38	60	70	100
1.19	34	45	80
0.59	20	25	60
0.297	8	10	30
0.149	3	2	10

Tabla 3.3. Resultados comparativos, fracción 5-0,15 mm (Árido Fino) vs. NC 251: (2005b).

Ensayos		Resultados obtenidos	Especificaciones de la NC 251: 2005
Peso específico corriente		2.65g/cm	Superior 2.5 g/cm
Absorción		1 %	No supera 3 %
Más fino que el tamiz 200		1.80 %	Hasta un 5%
Partícula arcilla		0	No superará 1%
Peso de volumen	Peso unitario suelto	1.560 Kg/m <sup>3</sup>	-
	Peso unitario compactado	1.760 Kg/m <sup>3</sup>	-
Módulo de finura		3.72	Será entre 2.2 y 3.58

La desviación que se aprecia en el Módulo de Finura promedio es de un 0.14 % con relación al límite superior del rango especificado en la NC 251: (2005b), lo

cual es aceptable teniendo en cuenta la Nota incorporada en la mencionada Norma, que cita: “Para el suministro continuo de áridos finos de una fuente dada, el Módulo de Finura promedio admitirá una desviación (mayor o menor) en el orden de un 0,20 (20%)”.

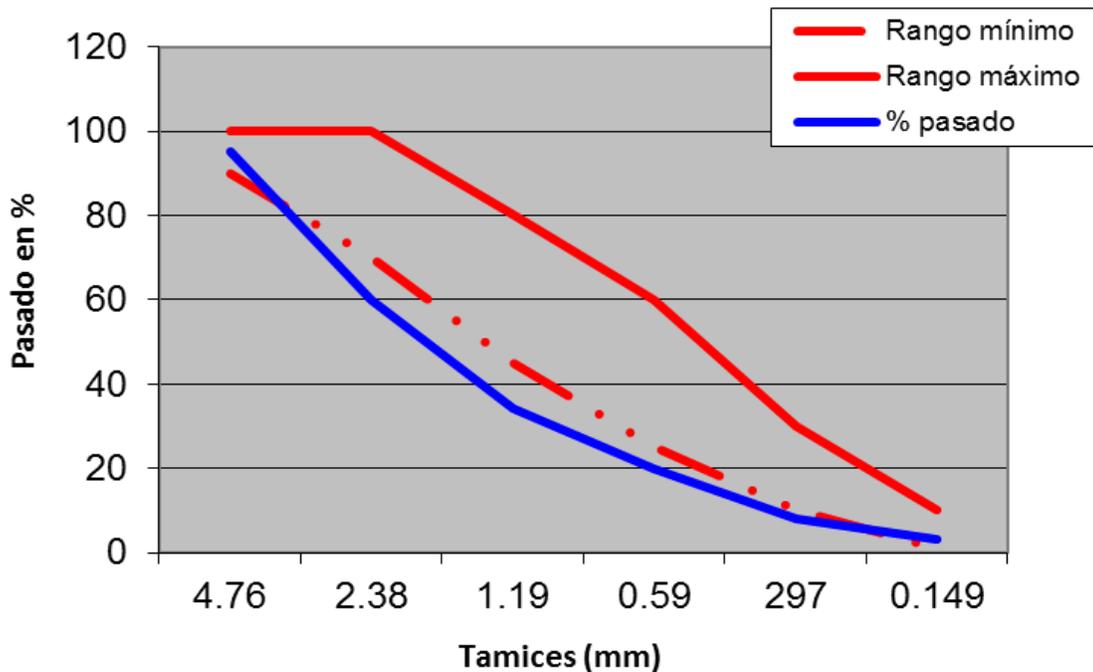


Figura 3.1. Curva granulométrica del árido fino

Según los resultados obtenidos, los mayores porcentajes de material retenido forman las tres clases significativas cuyos diámetros se encuentran ubicados en las fracciones - 2.38 + 1.19; - 1,19 + 0,59 y - 0,59 + 0,297 mm respectivamente.

En la tablas 3.4 y 3.5 se muestran los resultados comparativos obtenidos en la fracción 5 – 19 mm (Árido Grueso) vs la NC 251: (2005b).

Tabla 3.4. Análisis Granulométrico, fracción 5-19 mm (Árido Grueso) vs NC 251: (2005b).

Resultados obtenidos		Especificaciones de la NC 251: 2005	
		Rangos de calidad	
Tamiz	% pasado	Rango mínimo	Rango máximo
19.1	99	90	100
9.52	22	20	55
4.76	3	0	10
2.38	2	0	5

Tabla 3.5. Comparación del árido Molino Ramón Viamonte, Fracción 5-19 mm (Árido Grueso) vs. NC 251: (2005b)

Ensayos		Resultados obtenidos	Especificaciones de la NC 251:2005
Peso específico corriente		2.65 g/cm	Superior 2.5 g/cm
Absorción		1 %	No supera 3 %
Más fino que el tamiz 200		0.64 %	Hasta un 1 %
Partícula arcilla		0	No superará 1 %
Peso de volumen	Peso unitario suelto	1.464 Kg/m <sup>3</sup>	-
	Peso unitario compactado	1.579	-
Partículas Planas y Alargadas		2.38	No superará 10 %
% de vacíos		40.4	-

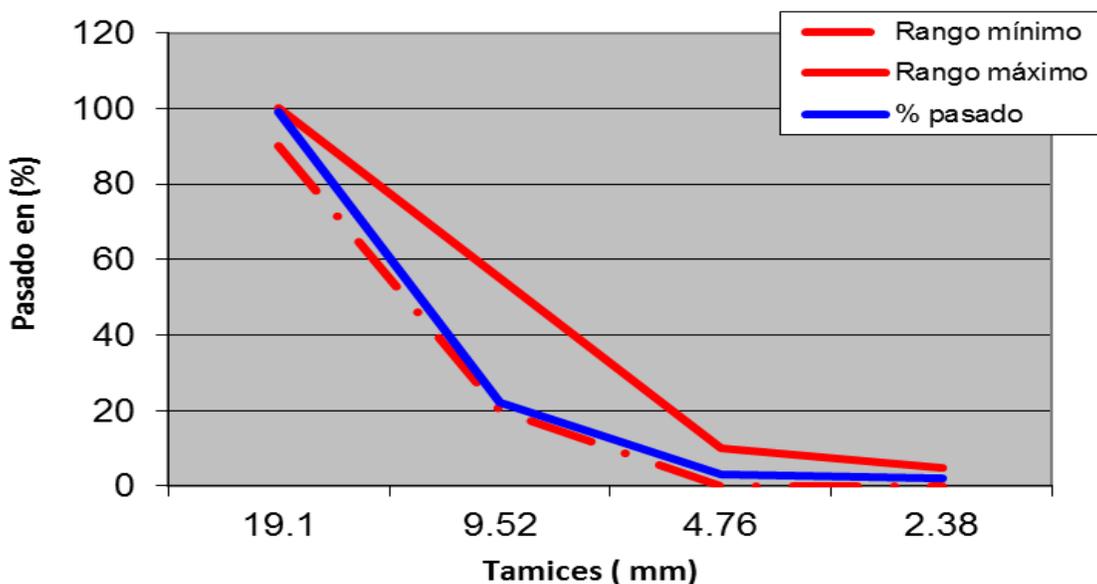


Figura 3.2. Curva granulométrica fracción 5 – 19 mm (Árido Grueso)

Como se observa en el gráfico anteriormente expuesto la fracción 5 – 19 mm cumple con los requisitos especificados por la NC 251: (2005b).

Las características de los áridos responden en gran medida a la trituración de la roca, es por ello que se recomienda que en el caso de aplicar una clase de áridos tanto finos como gruesos que no tengan precisamente una naturaleza caliza y

estos a su vez no dieran resultados satisfactorios, no desecharlo como material para los áridos sino solicitar una revisión al proceso de trituración de estos así como las mallas de clasificación de las distintas fracciones, las cintas transportadoras del material y el lavado de los mismos.

### **Caracterización granulométrica de las tobas vítreas**

Para la obtención de las clases granulométricas deseadas a utilizar en la investigación se utilizó el cribado de las mismas por el tamiz No. 20 de 0.8 mm. Esta fracción granulométrica ha sido estudiada por Pérez; Carballo y Ruiz (2013) en la confección de hormigones hidráulicos, lo cual fue analizado por el colectivo del Departamento de Producción; teniendo en cuenta la factibilidad de su elaboración o procesamiento 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 hormigón y prefabricados con hormigones armados.

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

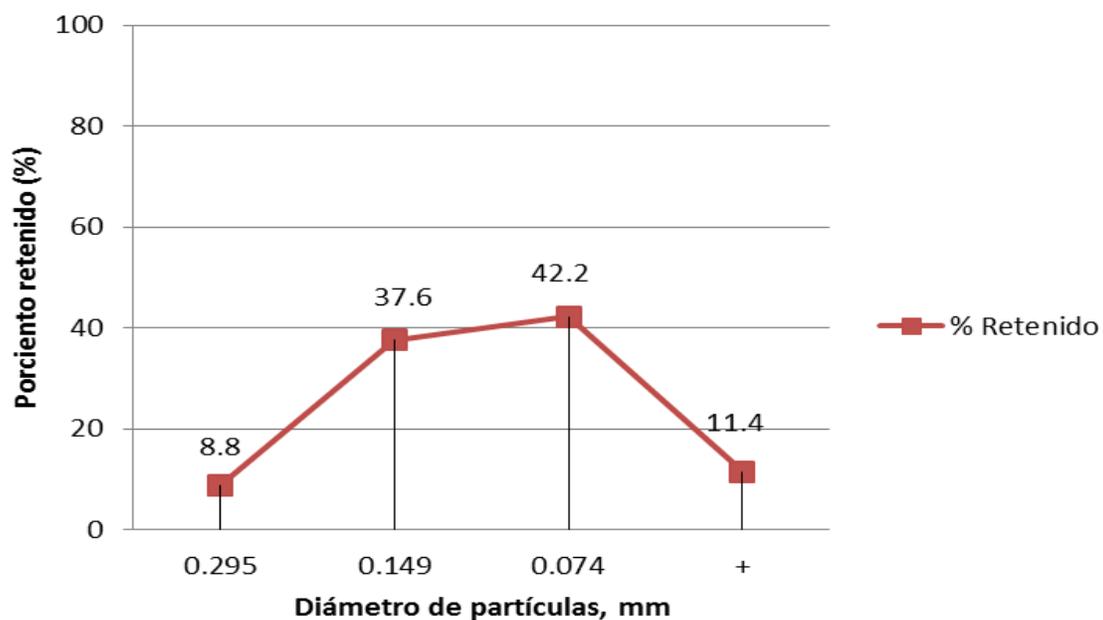


Figura 3.3. Características de tamaño de las tobas vítreas

Se evidencia que el tamaño medio de las partículas está en el rango de 0,074 a 0,149 mm y que es mayoritario el contenido de partículas mayores a 0.074 mm

según expresa la figura 3.3.

Las condiciones actuales de trituración y molienda que existen en la entidad permiten obtener una granulometría comparable con un filler que posibilita el uso de este material según las pruebas realizadas en esta investigación.

Tabla 3.6. Análisis granulométrico de las tobas vítreas

PESO INICIAL		500 g	
TAMICES			
mm	ASTM	Peso (g)	% Retenido
0.295	No. 50	44	8.8
0.149	No. 100	188	37.6
0.074	No. 200	211	42.2
+	Fondo	57	11.4
	Σ	500	100

### 3.1.2 Resistencias mecánicas en morteros

Se ofrecen los resultados de los ensayos mecánicos a la flexotracción y a la compresión por muestras con tobas y muestras patrones, a las edades de 3, 7, 28, 60 y 90 días (ver anexo 1).

Los resultados de las resistencias mecánicas son de gran importancia para las posibles aplicaciones y control de la calidad de cementos, morteros y hormigones, principalmente la resistencia a la compresión, la cual puede ser utilizada como criterio principal para seleccionar el tipo de mortero de colocación (ver anexo 2), ya que es relativamente fácil de medir y comúnmente se relaciona con otras propiedades, como la adherencia y absorción del mortero. En el trabajo se emplea precisamente, para verificar cómo se comportan las resistencias en el tiempo, y para determinar el índice de puzolanidad de los materiales con adición de tobas.

#### Resistencia a la flexotracción

La comparación de los diferentes resultados obtenidos según la adición del 10 y el 20 % del material tobáceo es representado en la figura 3.4, lo que permite confirmar un incremento de la resistencia a la flexotracción en el tiempo transcurrido entre los 3 y 90 días, período en el cual los valores medios calculados de las edades han pasado de los 3.03, 4.08, 5.29, 5.93 y 6.42 MPa para el patrón;

de 2.94, 3.07, 4.29, 5.29 y 5.94 MPa para el caso del 10 % y de 1.69, 1.91, 3.58, 3.86 y 4.23 MPa para la sustitución del 20 % de tobas vítreas respectivamente, lo que indica que el aumento de las resistencias mecánicas a la flexotracción es directamente proporcional al incremento de la magnitud tiempo.

Los morteros de referencia, muestran un aumento de resistencia, las cuales varían de 1.05 a 1.21 MPa, pero el incremento es menor en comparación con los morteros con adición de tobas al 10%.

Se puede observar que tanto para las tobas con adición de 10 % como para las de 20 % de adición existe un crecimiento ascendente, desde el punto de vista cualitativo. Se refleja una tendencia al acercamiento de la resistencia a la flexotracción de la mezcla patrón cuando se sustituye el 10 % del cemento el material tobáceo, aunque estas no lograsen alcanzar valores superiores a los patrones a partir de los 28 días. Se observa que los morteros con adición del 10 % de tobas ofrecen mejor resistencia a la flexotracción que los elaborados con 20 %.

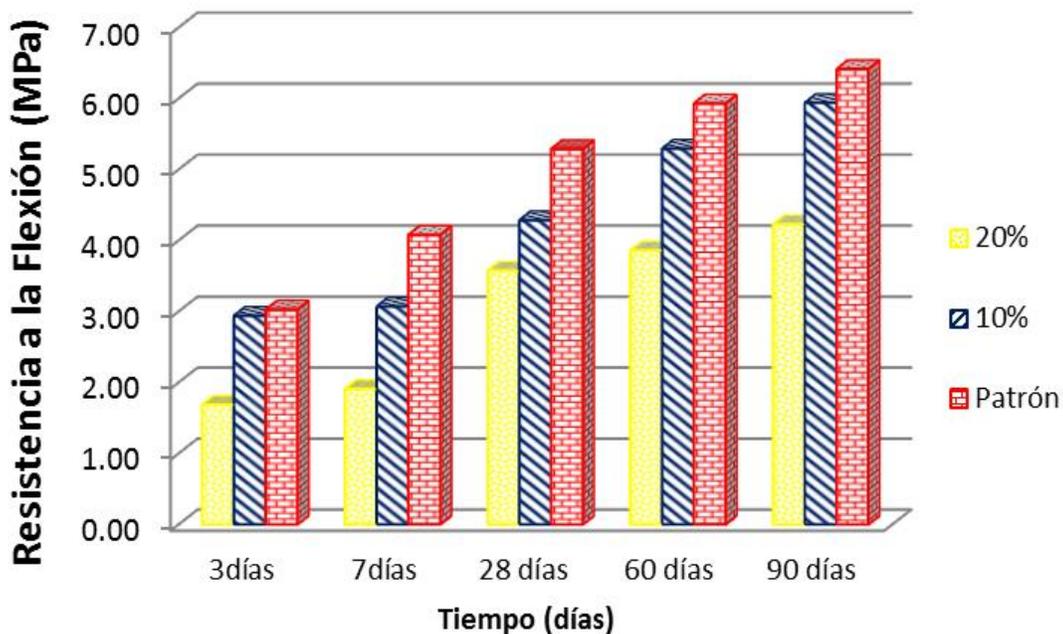


Figura 3.4. Resistencia a la flexotracción de los morteros

## **Resistencia a la compresión**

La observación de la figura 3.5 permite distinguir un desfase ascendente experimentado por todas las muestras en comparación con la muestra patrón. De forma similar a los resultados de la resistencia a la flexotracción, se puede observar que la resistencia a la compresión de los morteros con adición de tobas, muestran un incremento de 3 a 90 días, y los morteros con 10 % de tobas poseen mayor resistencia a la compresión que los de la sustitución al 20 % del material tobáceo durante todos los ensayos realizados.

Las muestras de morteros al 10 % de adición de tobas con una relación de cemento/arena de 1: 4 no logran igualar la resistencia del cemento de referencia a los 60 días; aunque Almenares (2011) hace referencia en su investigación que al sustituir el 15 % del cemento con una relación de cemento/arena de 1: 3 sí logra igualar la resistencia a la compresión del mortero de referencia a los 60 días. Esto puede estar referido a que una de las propiedades de las puzolanas es la de aportar resistencias mecánicas muy bajas a edades tempranas, sin embargo, adquieren altas resistencias a edades superiores, generalmente a partir de los 28 días de fraguado; 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, y que el fraguado del mortero de referencia, se considera prácticamente completo a los 28 días, lo cual da lugar a la reacción puzolánica y, por consiguiente, la resistencia mecánica crece a partir de este tiempo (Rabilero, 1988).

A la edad de 90 días, las muestras de morteros con adición de 10 % de puzolana, muestran resistencias a la compresión cercanas a la del mortero de referencia. No así para el 20 % de adición de tobas, que aunque exhiben un comportamiento similar, las resistencias no alcanzan las resistencias desarrolladas por los morteros con adición del 10 % de tobas vítreas.

Esto pudiera estar dado por las características granulométricas de las tobas vítreas utilizadas en esta investigación, resultado que está en correspondencia con las investigaciones realizadas por Day y Shi (1994); Costafreda; Calvo y Parra (2011a); Rosell; et. al. (2011) y Muxlanga (2009); entre otros, los cuales obtuvieron

valores de resistencias más acentuados a menor tamaño de partícula del material, lo que permite una mayor posibilidad de reacción del óxido de silicio, con el hidróxido de calcio que se libera durante las reacciones de hidratación del cemento Pórtland, con la formación de silicatos de calcio estables con propiedades cementantes.

### 3.1.3 Resistencia mecánica en hormigones.

Se puede observar en la figura 3.6 que los valores de resistencias mecánicas en función del tiempo con adiciones del 10 y 20 % de tobas vítreas van teniendo un aumento discreto en los primeros 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.

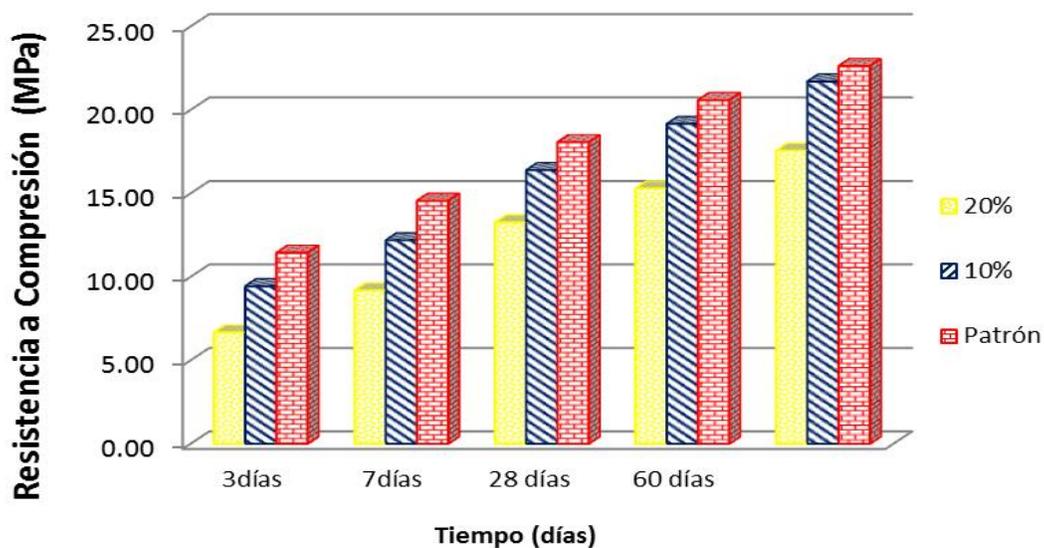


Figura 3.5. Resistencia a la compresión de los morteros

Los valores de resistencias a la compresión de los hormigones con la adición del 10 % de tobas vítreas alcanzan la resistencia diseñada en la investigación de 25 MPa a los 28 días (ver anexo 3); no siendo el caso con la adición del 20 % del material tobáceo, lo cual puede estar dado muy significativamente por la granulometría seleccionada en la investigación, la cual fue tomada en cuenta para la producción en una industria local con características tecnológicas propias donde

sería muy costo a la vez que imposible alcanzar tal nivel de finura del material donde según la norma NC 528: (2007d), la cantidad máxima retenida de todo el material a evaluar sería de un 34 %, aunque se debe hacer especial mención sobre la presencia en el yacimiento de las arcillas del tipo montmorillonita con un contenido medio del 35.06 % las cuales podrían estar afectando dicha resistencia a medida que se realiza el aumento de las tobas vítreas. Estos valores de resistencias a la compresión se deben tomar en cuenta a la hora de la toma de decisión en cuanto a su aplicación de las estructuras que la requieran, en el caso de una vivienda las resistencias características son de 20 MPa para los elemento que van a recibir la mayor carga dígase, las columnas, los cimientos, la placa.

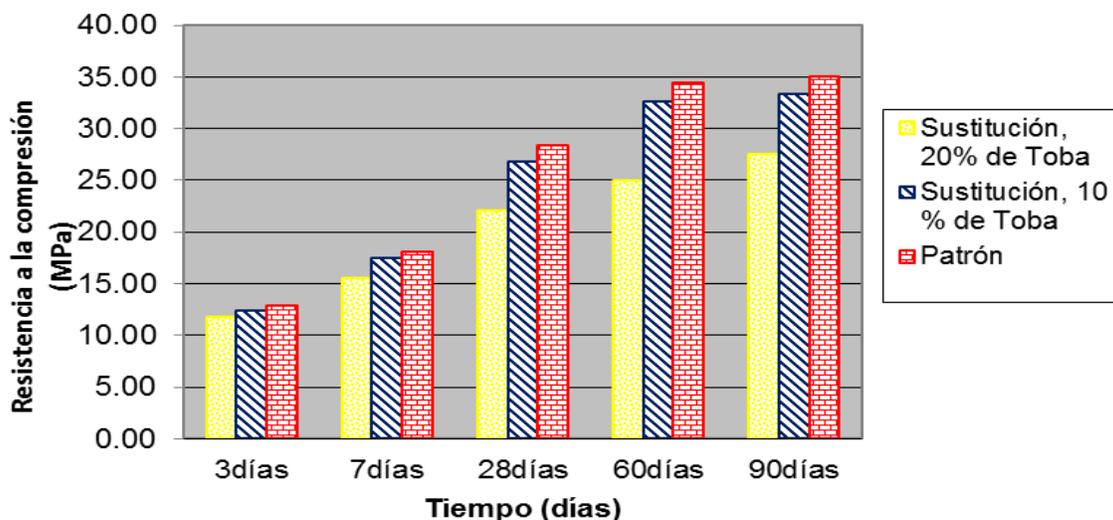


Figura 3.6 Resistencia a la compresión con adición de tobas

La composición promedio de las muestras del material tobáceo se corresponde con la exigida para su utilización como puzolana según la norma NC 528: (2007d), donde la suma de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  supera el 70 %. Se muestra un carácter ácido, con contenido de  $\text{SiO}_2$  mayor que el 60 %.

La composición promedio de las muestras de tobas analizadas se corresponde con la exigida para su utilización como puzolana, y corrobora además, los resultados obtenidos por investigadores como Tapia (2003); Pérez (2006) y (Frazao, 2007), los cuales determinaron su composición para otros estudios.

### 3.1.4 Determinación de la resistencia a la compresión en bloques

Los resultados obtenidos en los valores de resistencia a compresión de los bloques de 40x20x15 cm nos permite determinar que las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní, puede ser utilizado en la sustitución de cemento Portland P-350 al menos en un 10 %, al ser la dosificación que mejores resultados experimento en morteros y en hormigones. En orden ascendente se observa en la figura 3.7 el crecimiento de las resistencias a la compresión de los bloques con adición del 10 % de tobas vitreas, alcanzando a los 28 días una resistencia de 5.04 MPa que es la resistencia característica de estos bloques.

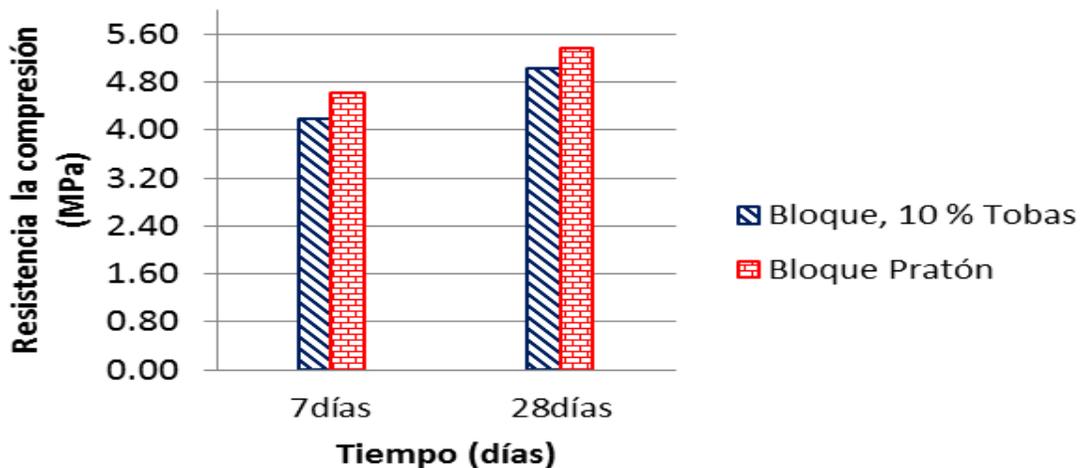


Figura 3.7. Resistencia a la compresión con adición de las tobas al 10 %

## 3.2 Análisis de las perspectivas de utilización del material estudiado como aditivo puzolánico

### 3.2.1 Evaluación del índice de actividad puzolánica

En la tabla 3.7 se representa el valor del índice de actividad resistente por muestras en morteros al sustituir el 35 % del volumen absoluto del cemento a los 28 días de ensayo según lo establece la referida norma cubana NC TS 527: (2007); se establece una comparación en relación al 75 % del valor del índice de actividad puzolánica establecido en la norma cubana NC TS 528: 2007 a la compresión del mortero patrón.

Se debe destacar que la reacción puzolánica prevalece en el tiempo, mucho después de los períodos de fraguado vigentes en las normas cubanas de (28 días) para realizar dichos ensayos, es decir, mientras se produzca hidróxido de calcio la acción inhibitoria de la puzolana persiste, por lo que se puede considerar un proceso de larga duración. Según Campolat; et. al. (2003), en el aspecto práctico, este proceso es beneficioso, ya que con la neutralización del hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  se obtendrán morteros y hormigones cada vez más resistentes, lo cual representa un aporte de estabilidad para las estructuras que se proyecten con el empleo de estas adiciones.

Tabla 3.7. Índice de actividad puzolánica

								Índice de Actividad Puzolánica	NC TS 528: 2007
Muestras	1	2	3	4	5	6	Media	%	%
Patrón (MPa)	41.6	41.3	40.9	40.3	39.9	39.5	40.58	67	75
Prueba (MPa)	26.8	26.9	26.07	28.68	27.3	26.8	26.43		

Como se puede apreciar, el valor del índice de actividad puzolánica obtenido, con adición del 35 % del material tobáceo en sustitución del volumen absoluto del cemento en peso a los 28 días del ensayo, no llega a superar el valor de 75 % que establece la norma NC TS 528: (2007d).

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 Rabilero (1988); Erdogdu (1996); Gener y Alonso (2002); entre otros. Por otro lado se explica la influencia que tiene dicho porcentaje de adición

de material puzolánico utilizado para este ensayo, lo cual se comporta de manera similar a lo reportado por Massazza y Costa (1979); Mehta (1981) y Rabilero (1988), los cuales variaron las proporciones de cemento Pórtland con puzolana natural. La resistencia aumenta en el tiempo, sin embargo disminuye con el porcentaje de adición de puzolana.

Otro factor que pudiera influir en la baja actividad resistente en la adición del 35 %, es la composición mineralógica del mineral, con un contenido medio arcilloso de 35.06 % y por otros constituyentes asociados a este.

En su tesis doctoral Alujas (2010) obtiene un material puzolánico a partir de la activación térmica de la fracción arcillosa multicomponente de un yacimiento arcilloso cubano; teniendo identificadas las principales fases arcillosas, caolinita (~40%), montmorillonita (~30%) e Illita (~10%), lo cual avalan la utilización de la fracción arcillosa del yacimiento como fuente para la obtención de materiales puzolánicos. En el caso del yacimiento estudiado se presenta un contenido de 35.06 % de arcilla montmorillonita. Por ello para cada caso, los materiales tobáceos, donde el material es más rico en contenido vítreo, y menor porcentaje de arcilla, es más activo.

La composición química, al parecer no tiene incidencia significativa en la diferencia de la actividad puzolánica del material tobáceo analizado. Entiéndase que lo que si pudiera determinar esta diferencia es la forma en que se encuentran los compuestos químicos.

El análisis de estos resultados conduce a plantear que la diferencia en la actividad puzolánica de los morteros ensayados respecto al 75 % normado en la NC TS 528: 2007, 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 mineralógica. 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.

### **3.2.2 Valoración socioeconómica y ambiental**

El presente trabajo constituye un paso muy importante para la implementación de este material puzolánico, es por ello que una correcta valoración socioeconómica y ambiental contribuya a orientar su desarrollo de acuerdo con las condiciones establecidas para su uso. Todo esto, unido al déficit de materiales de construcción para acometer los diferentes programas de construcción de viviendas y obras sociales, llevó a la realización de esta investigación.

Se ha podido constatar de manera particular que en la provincia de Granma en especial en el municipio de Jiguaní existen las posibilidades de explotar recursos minerales para la construcción, donde la valoración técnica ha resultado positiva. En muchos casos, bajo una valoración de su consumo local, esto puede resultar de un impacto importante para estas comunidades.

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

El uso de puzolanas permite el diseño de mezclas de concretos más impermeables, cuyo período de deterioro por el lixiviado de la cal libre se reduce. Además aportan resistencia al concreto contra el ataque del agua de mar, sulfatada, ácida o que contengan dióxido de carbono en solución.

Con los resultados obtenidos del trabajo y con el objetivo de tener una idea acerca de los aportes económicos de estos por concepto de sustitución de cemento por tobas; se tiene en cuenta lo siguiente:

La industria cubana del cemento presenta altos consumos de energía, tanto eléctricas como de portadores energéticos (combustibles), el consumo anual de las seis fábricas con las que cuenta el país, están en alrededor de 240 000 MW·h y 250 000 t de combustible. De acuerdo a las operaciones y procesos involucrados en la obtención de cemento se establece el balance de consumo energético que se muestra en la tabla 3.8.

En la actualidad el consumo de combustible y energía eléctrica se ha incrementado debido a las transformaciones de expansión que se ha llevado a

cabo en estas empresas cementeras. Se han incrementado los costos del petróleo y la importación de insumos y materiales auxiliares, unido a la lejanía y escasez de recursos minerales que se emplean como materia prima para la producción de cemento.

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

Lo anterior permite comprender el ahorro considerable de energía al practicar la producción de puzolanas a nivel local y una razonable disminución del impacto negativo al hombre y al medio ambiente; con la disminución del número de operaciones en comparación con el proceso productivo del cemento Pórtland, junto a la reducción de las emisiones de gases nocivos (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y otros), de polvos finos calcinados, que se producen durante el proceso de clinkerización, que para la producción de puzolana a partir de los materiales tobáceos analizados no es necesario, así como la reducción de la exposición del hombre a las altas temperaturas.

Tabla 3.8. Balance de consumo de energía eléctrica de las empresas cubanas de cemento. Fuente: (ENERGÉTICA, 2000)

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

Tabla 3.9. Precios de tobas vítreas menores de 0,8 mm

Material	U/M	Precio CUP	Precio CUC	Precio Total
Material tobáceo a granel (Ø -- 0,8 mm)	T	230.34	24.27	275.49

Tabla 3.10. Beneficios generados por la sustitución de tobas por cemento

CM	CA	AAC	Costo del cemento			CATS	AEAST
			Mensual	Anual	Ahorrado		
T	T	T	CUP	CUP	CUP	CUP	CUP
143	1716	172	17711	212537	21253	47384	26131

Si se tiene en cuenta que la Empresa Provincial de Construcción y Mantenimiento Constructivo del Poder Popular de Granma consume 1716 toneladas de cemento anualmente e invertir en la compra de cemento 212 537 CUP, en la siguiente tabla con los beneficios generados.

Leyenda:

CM: Consumo Mensual de cemento.

CA: Consumo Anual de cemento.

AAC: Ahorro del 10 % Anual de Cemento.

CATS: Costo Anual de Tobas en Sustitución.

AEAST: Ahorro Económico Anual por Suministro de Tobas.

De forma general los resultados son alentadores, de ahí la necesidad de continuar el estudio de este material y fundamentar la viabilidad económica de una tecnología de explotación y procesamiento adecuado. El empleo de las tobas vítreas estudiadas en la presente investigación contribuye al desarrollo de nuevos materiales de construcción y con ello, ahorrar un volumen importante de recursos minerales.

La posibilidad de efectuar una producción descentralizada, en zonas alejadas de los grandes centros industriales como el caso del municipio Jiguaní, contribuiría al desarrollo de nuevas producciones de la Industria Local, al obtener bajos costos de producción en comparación con la producción de cemento Pórtland y propiciar el comercio local del producto.

Además fundamenta la creación de nuevas fuentes de empleo, con oportunidades para la ocupación de fuerza de trabajo de poca calificación. El incremento sustancial de la construcción de nuevas viviendas y otras obras sociales, con indicadores económicos de racionalidad.

Otro aspecto que pudiera hacerse referencia, es la racionalidad de explotar integralmente estos yacimientos, con la posibilidad de realizar en el mismo ciclo productivo variadas producciones con diversos fines de aplicación, dentro de las cuales se pueden mencionar la producción de áridos ligeros, bloques naturales, polvo limpiador y como abrasivo para el pulido de las prótesis dentales. La Empresa Provincial de Construcción y Mantenimiento Constructivo del Poder Popular en Granma durante todo el 2014 ha venido incursionando en varias de estas producciones con los riesgos que estos conllevan pero sacando de ellas las mejores experiencias para ser a partir de este año 2015 en lo adelante la producción local de materiales de la construcción fortaleza de nuestra producción.

## CONCLUSIONES

Se evaluaron las propiedades puzolánicas de las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní, a través de ensayos físico-mecánicos. En este sentido se especifica lo siguiente.

- El índice de actividad puzolánico obtenido del material tobáceo del yacimiento Jiguaní en morteros fue de 67 %.
- El yacimiento de tobas vítreas en Jiguaní es parte del Grupo El Cobre y específicamente la Fm. El Caney y tiene como una composición química media superior al 70 % de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y mineralógica (vidrio volcánico, montmorillonita, feldespatos, calcita cuarzo y raramente zeolita).
- Al sustituir el 10 y 20 % en peso del cemento con material tobáceo, se obtuvieron morteros cuyas resistencias son suficientes para su utilización en aplicaciones de albañilería.
- Al sustituir el 10 % de cemento con material tobáceo, se obtuvieron hormigones hidráulicos de 25 MPa cuyas resistencias pueden ser aprovechadas en la industria de prefabricado de la provincia Granma, mientras que con el 20 % de sustitución se obtuvieron resistencias de 20 MPa, las que pueden ser empleadas por las empresas constructoras del municipio Jiguaní.
- Al sustituir el 10 % de cemento con material tobáceo, se obtuvieron resistencias a la compresión en bloques de 40x20x15 cm, que permiten su aplicación en la producción local de materiales de la construcción.

## **RECOMENDACIONES**

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

- Determinar las características y parámetros de la molienda para proponer una tecnología de explotación de estos materiales.
- Estudiar la cinética de la reacción química, lo que al ser vinculado a los ensayos mecánicos, permitirá establecer las dosificaciones correspondientes a cada aplicación específica.
- Investigar acerca de la posibilidad de utilizar las tobas vítreas como aglomerante cal – puzolana.
- Evaluar las tobas vítreas del yacimiento Jiguaní como material puzolánico, activadas térmicamente.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACI 232. 1R-00 Use of Raw or processed Natural Pozzolans in Concrete. 2000
- AITCIN, C. Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow, Review. En *Cement Concrete Research*. 2000, vol. 30, p. 1349-1359.
- ALMENARES, R.S. *Perpectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitas de la provincia de Holguin como aditivo puzolánico*. LEYVA RODRÍGUEZ, C.A. (tutor). Tesis en Opción de Grado a Master en Ciencias Técnicas. ISMMM, Departamento de Metalurgia, 2011.
- ALMIRALL, J.J.; R. GUERRA y A. TRIANA. Caracterización Ingeniero-Geológica e Hidrogeológica de la Cuenca Hidrográfica del Cauto y otros aspectos en la provincia Granma. Granma: INRH, 1994.
- ALUJAS, A. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*. Tesis en Opción de Grado a Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Departamento de Ingeniería Civil, 2010.
- AUTORES, C.D. Léxico Estratigráfico Digital. En. Instituto de Geología y Paleontología, 2007.
- BABAK, A. y S. MOHAMMAD. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. En *Cement & Concrete Composites*. 2010, vol. 32, p. 134–141.
- BATISTA, R.; et. al. El uso de las puzolanas naturales cubanas, una alternativa para el ahorro energético y el cuidado del medio ambiente. En: *IX CONGRESO CUBANO DE GEOLOGÍA. Geología y Prospección de Minerales no Metálicos* La Habana. 2011, p. 15.
- BRULL, M.; A. TRIANA y B. GONZÁLEZ. Características hidroquímicas de las aguas subterráneas del Valle del Cauto y su vinculación con la salinidad de los suelos. Granma: 1998.
- CABRERA, M.R. *Valoración de las tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguin para su utilización como puzolana natural en la construcción*. LEYVA RODRÍGUEZ, C.A.; R.S. ALMENARES REYES y R. ÁLVAREZ DÍAZ (tutor). Tesis de Diploma. ISMM, Departamento de Geología, 2010.
- CALVO, B.; E. ESTÉVEZ y J.L. COSTAFREDA. Estudio de las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España. En: *V Congreso Ibérico de Geoquímica*, España. 2005.
- CALLEJA, J. Apología de los conglomerantes puzolánicos. *Revista Cemento – Hormigón*, 1966, 386(3).
- CAMPOLAT, F.; et. al. Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. En *Cements and Concrete Research*. 2003, p. 1 - 6.
- COSTAFREDA, J.L. Granulometría y reacción puzolánica. En: *IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*, La Habana, Cuba. GEOCIENCIA'2011:Memorias [CD - ROM], 2011.
- COSTAFREDA, J.L. y B. CALVO. Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución del fraguado de morteros de cemento. En *Industria y Minería*. 2007, vol. 371, p. 20.

COSTAFREDA, J.L.; B. CALVO y J.L. PARRA. Criterios para el aprovechamiento de tobas dácíticas en la sustitución de cemento Pórtland en morteros y hormigones. *INTEREMPRESAS - OBRAS PÚBLICAS*, 2011a, 162-780.

COSTAFREDA, J.L.; J.J. DÍAZ y B. CALVO. Propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España. En: *IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*, La Habana, Cuba. GEOCIENCIAS'2011. Memorias [CD - ROM], 2011b.

COSTAFREDA, J.L.; M. ROSELL y B. CALVO. Estudio del comportamiento puzolánico de algunas zeolitas de Iberoamérica empleando el método de la conductividad eléctrica. En: *VII Congreso Ibérico. X Congreso Nacional de Geoquímica*, Memorias. Soria, España, 21 - 23 de septiembre. 2009.

DAY, R.L. y C. SHI. Effect of initial water curing on the hydration of cements containing natural pozzolan. *Cement and Concrete*, 1994, 24(3): 463-472.

DE ARMAS, J. *Reevaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo como puzolanas naturales*. BATISTA GONZÁLEZ, R.; N. DÍAZ BRITO y C.A. LEYVA RODRÍGUEZ (tutor). Tesis de Diploma. ISMMM, Departamento de Geología, 2008.

DELOYE, F. Hydraulicité et pouzzolanicité. En *Bulletin Liaison Lab. Ponts*. 1993.

DOPICO, J.J. *Contribución al uso de la adición mineral cal puzolana como sustituto parcial de altos volúmenes de cemento portland en la obtención de un hormigón estructural*. Universidad Central de las Villas, DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL, 2009.

ENERGÉTICA, I.E. Diagnóstico Energético. Rama Cemento. Ministerio de Economía y Planificación. Dirección de Energética

En ENERGÉTICA., D.D.L.I.E. Ciudad de la Habana, Cuba, 2000, p. 83.

ERDOGAN, T.Y. Materials of construction. En. Press. Ankara: Middle East Technical University, 2002.

ERDOGDU, K. *Effects of pozzolanic cements of different fineness values and some mechanical properties of pozzolanic cements of different fineness values*. Thesis de Grado. Middle East Technical University, 1996.

FRAZAO, M. *Concentración de fases zeolíticas de las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes*. VELÁSQUEZ, A.L.C. (tutor). Doctoral. 2007.

GAYOSO, R. y M.B. ROSELL. Non-conventional aggregates and mineral admixture in high performance concrete. En: *Seventh International Symposium on utilization of high-strength/high-performance concrete. ACI SP-228*. 2005.

GENER, R.M. Los cementos mezclados con puzolanas, una necesidad para el ahorro de energía y la durabilidad. En: *II Taller nacional "Las Geociencias y el Medio Ambiente"*, La Habana. Memorias, 2006.

GENER, R.M. y L.J.M. ALONSO. Influencia de la composición mineralógica de puzolanas naturales en las propiedades de los cementos con adiciones. En *Materiales de construcción*. 2002, vol. 52 (267): , p. 73-78.

HAROLD, T. Cement chemistry. En *Academic Press*. London, 1990.

HOWLAND, J.J.; et. al. Investigación sobre la durabilidad de los hormigones elaborados con cemento Pórtland y adición de puzolanas naturales, en ambiente marino. En *Cemento Hormigón*. 2006, vol. 891, p. 2-10.

JIMENÉZ, O. Uso de las escorias ultrabásicas de los hornos de fundición de arco eléctrico de la provincia Las Tunas para obtener un material puzolánico. 1999. Informe Técnico. Desarrollo Tecnológico.

LÓPEZ, L.M. *Caracterización geológica de las materias primas mineras de los municipios Moa – Sagua de Tánamo para su empleo como material de construcción*. RODRÍGUEZ, C.L. (tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2006.

LLULL, E. Informe de Prospección Detallada y Exploración Orientativa de vidrio volcánico en el yacimiento Jiguaní. Prov. Granma. Cálculo de reservas 1995.

MARTIRENA, J.F. Lime-pozzolan binder as a very fine mineral admixture in concrete. En: *Proceeding of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Universitaet Kassel. 2004.

MASSAZZA, F. y V. COSTA. Aspects of the Pozzolanic Activity and Properties of Pozzolanic Cements. *II Cemento*, 1979, 76(3-18).

MATHER, K. Current Research in Sulfate Resistance at the Waterways Experiment Station, George Verbeck. En: *Symposium on Sulfate Resistance of Concrete*, SP-77, Farmington Hills, Mich. American Concrete Institute 1982, p. 63-74.

MEHTA, P.K. Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin-Earth. *Cement and Concrete Research*, 1981, 11(507-518).

MEHTA, P.K. Chp 1 Natural Pozzolans. Supplementary cementing materials for concrete. En V. M. Malhotra. *CANMET*. Ottawa Canada, 1987.

MUXLANGA, R.J. *Evaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo para su utilización como árido y puzolana natural en la construcción*. ALMENARES, R.S. (tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2009.

NC 95: Cemento Portland. Especificaciones. 2001

ASTM C 618-02. Standard Specification for coal fly ash and raw or calcinated Natural Pozzolan for use as mineral admixture in Concrete. 2002a

NC 175: Morteros de Albañilería. Especificaciones. 2002b

NC 244: Hormigón endurecido – Determinación de la resistencia a la compresión en probetas cilíndricas. 2005a

NC 251: Áridos para hormigones hidráulicos—requisitos. 2005b

NC 120: Hormigón Hidráulico-Especificaciones. 2007a

NC TS 527: Cemento Hidráulico-Métodos de Ensayo-Evaluación de Las Puzolanas. 2007b

NC TS 527: Cemento hidráulico. Método de ensayo. Evaluación de las puzolanas. 2007c

NC TS 528: Cemento Hidráulico. Puzolanas. Especificaciones. 2007d

PÉREZ, O.; D. CARBALLO y S. RUIZ. Generalización de la utilización de zeolita menor de 0.8 mm en la elaboración de hormigones En: *V CONGRESO CUBANO DE MINERIA*, La Habana, Cuba. GEOCIENCIAS'2013. Memorias [CD - ROM] 2013.

PÉREZ, R.Y. *Características geológicas y perspectivas de utilización como material de construcción del vidrio volcánico del sector Guaramanao, San Andrés*,

Municipio Calixto García. RODRÍGUEZ, C.L. (tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2006.

QUINTANA, C.E. *Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos*. REDOLFI, E. (tutor). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, 2005.

RABILERO, A.C. Las Puzolanas. Cinética de Reacciones. *Editorial Oriente*, 1988: 114.

RABILERO, A.C. Empleo de los aglomerantes cal-puzolana en la construcción. En *Forum Nacional de Ciencia y Técnica*. La Habana, 1992.

RABILERO, A.C. Mineralogía de las puzolanas. En: *VI Congreso de Geología. Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2005*, La Habana, Cuba. Memorias [CD-ROM], 2005.

RABILERO, A.C. y J.A. MUÑOS. Actividad puzolánica: Evaluación de una toba cubana. En *Rev Tecnológica*. 1974, vol. 12, p. 47-58.

ROSELL, M.B. *Zeolita natural cubana del tipo clinoptilolita-heulandita como material cementicio suplementario en hormigones*. GAYOSO, R.A. y J.F. MARTIRENA (tutor). Tesis en Opción de Grado a Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Departamento de Ingeniería Civil, 2010.

ROSELL, M.B.; et. al. Influencia de la adición de zeolita en las propiedades micro y macroestructurales en pastas y morteros. En: *IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción*, Soria, España. Memorias [CD - ROM]. , 2011.

ROSELL, M.B. y R. GAYOSO. Utilización de la zeolita como material de construcción. Experiencia cubana. En: *I Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción*. Red CYTED XIII-C, 2001, p. 10.

SARICIMEN, H.; et. al. Effect of field and laboratory curing on the durability characteristics of plain and pozzolan concretes. En *Cement and Concrete Composites*. 1992, vol. 14(3), p. 169-177.

SHANNAG, M.J. y A. YEGINOBALI. Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(3): 647-657.

STANTON, T.E. Use of pozzolans for coneracting excessive concrete expansion resulting from reaction between aggregates and alkales in cement. En: *Symposium on use of pozzolanic materials in mortars and concrete, STP 99*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, 1950, p. 178-201.

TAPIA, M.E. *Valoración de la gestión geominera ambiental en el yacimiento Zeolita San Andrés*. BORRERO, H.I. (tutor). Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico, 2003.

XING., S.; I.M. YUN. y G.Y. JUN. A study on the effect of fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete. En *Cement and Concrete Research*. 2004, vol. 34.

ZALDIVAR, R. *Zeolita natural del yacimiento Angostura como material cementicio suplementario para su utilización en hormigones hidráulicos y morteros* CALDERIUS, L. y J.J. ORAMAS (tutor). Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Civil, 2011.

## ANEXOS

### Anexo 1. Resistencia a la flexotracción y compresión de los morteros con tobas vítreas.

Días	Flexión					Compresión				
	3	7	28	60	90	3	7	28	60	90
<b>Patrón</b>	3.03	4.08	5.29	5.93	6.42	11.44	14.56	18.07	20.59	22.63
<b>10 %</b>	2.94	3.07	4.29	5.29	5.94	9.44	12.19	16.39	19.16	21.70
<b>20 %</b>	1.69	1.91	3.58	3.86	4.23	6.67	9.19	13.26	15.30	17.56

### Anexo 2. Recomendaciones para morteros de colocación. Fuente: NC 175: 2002

Lugar de colocación			Rc 28 d.(MPa) (valor mínimo)		Retención de agua (%) Valor mínimo
			Recomendada	Alternativo	
Exterior	Sobre el nivel del terreno	Muro portante	III	IV - V	90
		Muro no portante	I	II - III	
		Antepecho	III	IV - V	
	Bajo el nivel del terreno	Muro de fundición	V	IV > V	90
		Muro de contención			
Interior		Muro portante	III	IV - V	90
		Muro no portante	I	II - III	90

### Anexo 3. Resistencia a la compresión de los hormigones con tobas vítreas

Día	Cemento Kg/cm3	Rel. A/C	Toba Kg	Serie Patrón						
				fc1	fc2	fc3	fc4	fc5	fc6	fci
3	415	0.52	-	12.85	13.25	12.90	12.80	13.10	12.50	12.90
7	415	0.52	-	17.50	17.80	18.20	17.90	18.20	18.90	18.08
28	415	0.52	-	28.20	27.80	28.70	28.10	27.90	29.70	28.40
60	415	0.52	-	33.20	34.50	34.80	33.90	35.10	35.40	34.48
90	415	0.52	-	34.80	35.10	35.60	34.90	35.80	34.20	35.07

**Anexo 3. Resistencia a la compresión de los hormigones con tobas vítreas  
(Continuación)**

Día	Cemento Kg/cm3	Rel. A/C	Toba Kg	C+T	Serie con 10 % Tobas vítreas						
					fc1	fc2	fc3	fc4	fc5	fc6	fc7
3	373	0.62	42	415	12.40	12.45	12.80	11.00	12.55	13.20	12.40
7	373	0.62	42	415	17.53	17.20	16.57	17.80	18.20	17.50	17.47
28	373	0.62	42	415	26.50	26.60	27.10	26.30	26.91	27.50	26.82
60	373	0.62	42	415	32.40	33.10	31.30	33.80	33.60	31.80	32.67
90	373	0.62	42	415	32.00	33.30	33.90	32.40	34.60	33.60	33.30
Día	Cemento Kg/cm3	Rel. A/C	Toba Kg	C+T	Serie con 20 % Tobas vítreas						
					fc1	fc2	fc3	fc4	fc5	fc6	fc7
3	332	0.72	83	415	10.90	12.10	11.80	11.40	12.60	11.90	11.78
7	332	0.72	83	415	14.90	15.90	16.30	15.00	16.00	15.20	15.55
28	332	0.72	83	415	22.70	22.40	21.90	22.20	22.50	21.10	22.13
60	332	0.72	83	415	25.40	26.00	24.90	23.30	24.80	25.70	25.02
90	332	0.72	83	415	26.90	28.60	27.20	26.40	27.50	28.40	27.50

**Anexo 4. Resistencia a la compresión de los bloques**

Bloque Patrón									
Día	Cant.	Cant.	Resultados						
	cemento	Toba							
	Kg	Kg	fc1	fc2	fc3	fc4	fc5	fc6	fc7
7días	12.96	-	4.70	4.43	4.73	4.48	4.71	4.69	4.62
28días			5.42	5.34	5.48	5.28	5.42	5.31	5.38
Bloque con 10 % Tobas									
Día	Cant.	Cant.	Resultados						
	cemento	Toba							
	Kg/cm3	Kg	fc1	fc2	fc3	fc4	fc5	fc6	fc7
7días	11.66	1.296	4.25	4.20	4.06	4.32	4.22	4.12	4.20
28días			5.23	5.12	4.97	4.94	5.19	4.80	5.04