INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE GEOLOGÍA–MINAS – INFORMÁTICA

DEPARTAMENTO
DE
MINAS

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

Ingeniero de Minas

Evaluación de las tobas vítreas y zeolitizadas de los yacimientos Guaramanao y San Andrés, para su utilización como aditivo puzolánico.

Carlos Eulicer Hidalgo Céspedes.

Moa – 2014
``Año 56 de la Revolución´´

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE GEOLOGÍA–MINAS – INFORMÁTICA

DEPARTAMENTO
DE
MINAS

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

Ingeniero de Minas

Tema: Evaluación de las tobas vítreas y zeolitizadas de los yacimientos Guaramanao y San Andrés, para su utilización como aditivo puzolánico.

Autor: Carlos Eulicer Hidalgo Céspedes. **Firma:** _____

Tutores: Dr. C. Carlos A. Leyva Rodríguez. **Firma:** _____
Dr. C. Ramón G. Polanco Almanza. **Firma:** _____
Arq. Elia Rosa Duque Iglesias. **Firma:** _____
Ing. José Gracia Sánchez. **Firma:** _____

Moa – 2014
``Año 56 de la Revolución´´

A Carlos Primitivo, Salvador, Josefa Olga y Adelfa Aurea

A mis padres

A mis hermanos y mi hermana

A mi esposa

PENSAMIENTO

Que te importe más tu carácter que tu reputación: porque tu carácter es lo que realmente eres mientras que tu reputación es meramente lo que otros piensan de ti.

John Wooden

Un compañero verdadero ama en todo tiempo y es un hermano nacido para cuando hay angustia.

Proverbios 17:17

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores del ISMM Dr. C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez y Dr. C. Ramón Gilberto Polanco Almanza y los de la producción Arq. Elia Rosa Duque Iglesias e Ing. José Gracia Sánchez por su constancia, por haber sido la fuente de donde surgió este trabajo y por la confianza que han depositado en mí para la realización del mismo.

A Carlos Primitivo Rodríguez Pérez, Salvador Pérez Cintra, Josefa Olga Rodríguez Pérez, Adelfa Aura Rodríguez Pérez, Noemí Francisca Rodríguez Pérez y Carlos Manuel Céspedes Giro por haberme convertido en la persona que soy.

A mis padres Eulicer Abundio Hidalgo Suárez y Caridad Fernanda Céspedes Rodríguez por haberme ayudado a ser un hombre de bien y enseñarme a valorar las cosas que por muy sencillas que sean, siempre son especiales.

A mis hermanos Eulicer Israel, Yordagna y Héctor Elier Mayo Álvarez por haberme apoyado tanto con esta ardua tarea.

A mi esposa Sandra Cruz Rodríguez por haberme ayudado a soportar estar tan lejos de los que más quiero, a seguir adelante a pesar de las dificultades.

A mi gran familia.

A mis compañeros del grupo Minas `09, quienes realmente nos hemos convertidos en una familia en todos estos 5 años de arduas batallas, amarguras y fiestas.

A mi entrañable amiga Ailen, por sus consejos.

A mis amigos Héctor Esparraguera Guilarte, Luis Vega Martínez y Samuel Kwabena Alamisi por su ayuda siempre desinteresada para ayudarme a resolver mis problemas.

A Radames, Hugo, Luis, Blanca y muy especial a Xiomara Rodríguez Milanés.

A todos los profesores de la facultad y otros que contribuyeron con mi formación.

Por la orientación y apoyo que me brindaron. A todos aquellos que han hecho posible la culminación de este trabajo.

Muchas gracias.

RESUMEN

Se determinaron las propiedades puzolánicas de los materiales tobáceos de los yacimientos Guaramanao y San Andrés, para evaluar las perspectivas de utilización de la fracción menor de 0,8 mm como puzolanas naturales, según los parámetros de calidad normalizados, al sustituir el cemento Pórtland en 30 % en peso y polvo de piedra en su totalidad. Se posee la caracterización, basada en la determinación de la composición química, por el método de fluorescencia de rayos X, la caracterización granulométrica y la caracterización mineralógica y la determinación del índice de actividad puzolánica a través de los ensayos de resistencia a la compresión a partir del método indicado en las normas para tales especificaciones y la determinación del rendimiento. Al sustituir el 30 % de cemento con material tobáceo y polvo de piedra, se obtienen morteros cuyas resistencias son suficientes para su utilización en aplicaciones de albañilería.

ABSTRACT

It determined the pozzolanic properties of the tuffs materials of Guaramanao, and San Andrés deposits, to evaluate the perspective of their use like natural pozzolans, according to the standardized parameters of quality, when replacing the Portland cement with percentage of 30 % in weight. It was made a characterization, base to on the determination of the chemical composition, by the x-rays fluorescence method, the grain sized characterization by means of an particles size analyzer, the mineralogical characterization by x-rays diffraction and the determination of the pozzolanic activity index through the tests of compressive strength from the indicated method in the norms for such specifications. When replacing 30 % of cement with tuffs material, obtain mortars whose resistances are sufficient for their use in applications of masonry.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 8

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL 13

1.1. GENERALIDADES 13
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS 14
1.3. CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO 18
1.3.1. Origen del término puzolana 20
1.3.2. Definición de puzolana 20
1.3.3. Clasificación de las puzolanas según su origen 21
1.3.4. Valoración de la puzolanidad 23
1.3.5. Actividad puzolánica 25
1.3.6. Utilización de las puzolanas 25
1.4. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 26

CAPÍTULO 2 GEOLOGÍA Y MINERÍA DE LOS YACIMIENTOS 34

2.1. PARTE GEOLÓGICA DEL YACIMIENTO DE TOBAS ZEOLITIZADAS SAN ANDRÉS 34
2.1.1. Ubicación del yacimiento 34
2.1.2. Características geográficas-económicas de la región 34
2.1.3. Condiciones físico-geográficas 35
2.1.4. Geología del yacimiento 35
2.1.5. Propiedades físico-mecánicas 36
2.2. PARTE MINERA DEL YACIMIENTO DE TOBAS ZEOLITIZADAS SAN ANDRÉS 37
2.2.1. Sistema de explotación 37
2.2.2. Apertura 37
2.2.3. Capacidad de extracción anual y vida útil de la cantera 37
2.2.4. Trabajos de perforación y voladura 38
2.2.5. Plan de extracción 38
2.2.6. Indicadores fundamentales 39
2.2.7. Necesidad de materiales 39
2.3. PARTE GEOLÓGICA DEL YACIMIENTO DE TOBAS VÍTREAS GUARAMANAO 41
2.3.1. Características geográficas y económicas de la región 41
2.3.2. Geología del yacimiento 41
2.3.3. Resultados del estudio de las propiedades físico-mecánicas 43
2.3.4. Condiciones técnicas mineras de explotación del yacimiento 43
2.4. PARTE MINERA DEL YACIMIENTO DE TOBAS VÍTREAS GUARAMANAO 45
2.4.1. Proyecto de apertura del yacimiento 45
2.4.2. Sistema de explotación, parámetros 45
2.4.3. Fundamentación de las pérdidas y dilución 46

2.4.4. Arranque del mineral ... *46*
2.4.5. Escombrera y sus parámetros ... *46*
2.4.6. Régimen de trabajo ... *46*
2.4.7. Tecnología de los trabajos de minería ... *47*
2.4.8. Plan de extracción de mineral ... *47*
2.4.9. Necesidad de materiales ... *47*
CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS ... 49
3.1. TOMA Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA ... 49
3.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS ANALÍTICAS, EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN ... 50
3.2.1. Método utilizado en la investigación ... *50*
3.2.2. Determinación de la composición granulométrica y propiedades físico-mecánica ... *51*
3.2.3. Determinación de la composición química ... *53*
3.2.4. Caracterización mineralógica ... *53*
3.2.5. Determinación del índice de actividad puzolánica con cemento Pórtland ... *54*
3.2.6. Determinación del rendimiento con cemento Pórtland ... *54*
3.2.7. Preparación de los materiales para la conformación de los morteros ... *55*
CAPÍTULO 4 RESULTADOS ... 60
4.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA ... 60
4.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA ... 62
4.3. RENDIMIENTOS Y RESISTENCIAS MECÁNICAS ... 63
4.4. ANÁLISIS DE LAS PERSPECTIVAS DE UTILIZACIÓN DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS, COMO ADITIVOS PUZOLÁNICOS ... 69
4.1.1 Evaluación del índice de puzolanidad ... *69*
4.5. VALORACIÓN SOCIOECONÓMICA Y AMBIENTAL ... 70
CONCLUSIONES ... 74
RECOMENDACIONES ... 75
BIBLIOGRAFÍA ... 76
ANEXOS ... 78

INTRODUCCIÓN

Hasta hace relativamente poco tiempo, los áridos se consideraban como un recurso mineral de escaso valor, razón por la cual las compañías mineras tradicionales no invertían en ese sector. Sin embargo, la acelerada demanda de productos de cantera y las múltiples limitaciones fundamentalmente de tipo ambiental, para la apertura de nuevas canteras, han hecho que estos materiales hayan pasado a tener un carácter agotable y consecuentemente a revalorizarse.

En nuestro país la demanda de áridos cemento crece aceleradamente debido a varios factores, uno de los principales está relacionado con el deterioro del fondo habitacional y las nuevas posibilidades de financiamiento que la actualización del modelo económico que se lleva a cabo permite a las personas naturales para la reparación y construcción de las viviendas, además del desarrollo de obras sociales e industriales.

Una manera de compensar el déficit de materiales de construcción es mediante el aprovechamiento de potencialidades nacionales para la obtención de aditivos, que permitan incrementar los volúmenes de calidad y producción de áridos y cemento.

Según la norma de la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM) C - 618, las puzolanas son materiales silíceos o sílico-aluminosos, que en sí mismos poseen poco o ningún valor como materia prima para la producción de cemento; pero finamente molidos y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) a temperatura ambiente para formar compuestos que tienen en si propiedades cementicias.

Las puzolanas son clasificadas generalmente, según su origen, como rocas naturales y artificiales.

Las tobas volcánicas, las cenizas volcánicas y las tierras diatomeas pueden ser mencionadas como ejemplos de puzolanas naturales. Las cenizas volantes,

humo de sílice, y las escorias granuladas residuales de los altos hornos se pueden contar como materiales puzolánicos artificiales.

Desde hace varias décadas es práctica universal el aprovechamiento de los materiales puzolánicos, ya sea para la producción de cementos mezclados o para la obtención de hormigón mediante la sustitución in situ de una parte del cemento Portland por puzolanas.

La industria del cemento es particularmente susceptible a las características de las materias primas, pues de ellas depende el tipo y las propiedades del cemento producido y la posibilidad de optimización de su 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. Para lograrlo se requiere utilizar en su elaboración sustancias naturales o sintéticas que ofrezcan al cemento las propiedades requeridas (Tobón, 2000). Entre esta variedad de aditivos se encuentran las puzolanas.

De aquí que las puzolanas naturales sean un importante componente para la producción de cementos Portland ordinario y puzolánico que contribuyen a la conservación del medio ambiente, al reducir la emisión de gases nocivos como CO_2 y SO_2, pues no es necesario someter la materia prima (puzolana) a la calcinación.

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 y zeolitizadas son rocas volcánicas que poseen altos contenidos de estos compuestos. Esta propiedad, junto a granulometría fina las hace candidatas para su utilización como puzolana.

En Cuba han sido utilizadas como aditivo para la producción de cementos mezcladas o para obtener hormigón tobas zeolitizadas de los yacimientos Carolina, Siguaney, El Rubio, Palmarito de Cauto y Tasajera; sin embargo las

tobas zeolitizadas de los yacimientos Las Catalinas, El Chorrillo, San Cayetano, Bueycito, Palenque, Las Pulgas, San Andrés y Caimanes y las tobas vítreas de las regiones de Granma, Holguín, Santiago de Cuba y Guantánamo aún no han sido introducidas en la práctica por la carencia de estudios que avalen su utilización.

La provincia de Holguín es uno de los territorios más poblados y con peor situación en cuanto a calidad del fondo habitacional; el 40 % de las viviendas se encuentran en mal estado (Leyva et al. 2008), magnitud que se incrementó considerablemente con el paso del Huracán Sandy. Esto ha conllevado la necesidad de incrementar el ritmo de construcción a pesar del déficit de materiales, particularmente de áridos y cemento, debido a que los centros productores se encuentran distantes de las fuentes de consumo y la producción está por debajo de la demanda real.

Por otra parte se conoce que en esta provincia se explotan yacimientos de tobas vítreas y zeolitizadas ubicados en el poblado de San Andrés, Holguín, que en la actualidad no son utilizados para estas aplicaciones.

Podemos afirmar que en la provincia de Holguín no se aprovecha la disponibilidad de materiales con propiedades puzolánicas que pueden utilizarse como materiales aditivos en la producción de morteros para disminuir el consumo de cemento y áridos convencionales.

El aprovechamiento de estos recursos naturales como aditivo mineral en la sustitución parcial del cemento y áridos finos ha estado limitado, al menos en parte, porque no ha sido resuelto el aspecto que en este trabajo se declara como **problema de la investigación:** Insuficiente conocimiento acerca de las perspectivas de las tobas vítreas del yacimiento Guaramanao y las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés para ser utilizadas en calidad de puzolanas naturales mezcladas con cemento Portland y en sustitución de los áridos convencionales.

Objeto de estudio

Las tobas vítreas del yacimiento Guaramanao y las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés.

Campo de acción

Propiedades puzolánicas de las tobas vítreas del yacimiento Guaramanao y las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés.

Objetivo general

Determinar las propiedades puzolánicas de los materiales tobáceos de los yacimientos Guaramanao y San Andrés empleando la fracción menor de 0.8 mm, para evaluar las perspectivas de su utilización como puzolanas naturales según los parámetros de calidad normalizados.

Hipótesis

Si mediante el análisis químico, granulométrico y de fases se determinan las potencialidades de los materiales tobáceos de los yacimientos Guaramanao y San Andrés como materiales puzolánicos naturales y seguidamente se determina la resistencia mecánica de las probetas obtenidas con morteros, en los que el cemento ha sido sustituido parcialmente por los materiales referidos, se podrá llegar a conclusiones acerca de las perspectivas de utilización de estos materiales como puzolanas naturales, según los parámetros de calidad normalizados.

Objetivos específicos

- Caracterizar la composición sustancial de las tobas vítreas y zeolitizadas a partir de sus características químicas, granulométricas y mineralógicas.
- Determinar los valores de rendimiento y resistencia a la compresión de los morteros con adición de tobas vítreas y zeolitizadas para establecer el índice de actividad resistente.
- Realizar el estudio de las dosificaciones de mortero con cemento Portland y aglomerantes para su uso en albañilería.
- Obtener el catálogo de dosificaciones a implementar en obras en ejecución.

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En este capítulo se realiza un análisis sobre los diferentes aspectos que se encuentran relacionados con los temas discutidos en la bibliografía consultada, acerca de 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

Es importante definir algunos términos empleados en el ámbito de los materiales de construcción, lo cual contribuye a una mejor comprensión de los conceptos que se reflejan a lo largo del trabajo. Las definiciones de hormigón, cemento, mortero, puzolana, entre otros se ilustrarán en el presente acápite.

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

Por su parte se denomina **mortero** a la mezcla de cemento con arena y agua.

El **cemento**, con propósitos constructivos, puede ser descrito como un material calcáreo y silíceo capaz de unir las piedras, 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 ser, por lo tanto, llamados cementos hidráulicos.

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

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

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

El **agua** de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo la resistencia del mismo. Puede estimarse que cada litro de agua de amasado en exceso supone anular dos kilos de cemento en la mezcla. Sin embargo una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua.

1.2. Clasificación de los cementos

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

Teniendo en cuenta las diferencias de la composición química, características mecánicas, comportamiento durante la hidratación, el fraguado y el endurecimiento; ellos se clasifican en, cemento Portland ordinario, cemento puzolánico, cemento aluminoso y cemento siderúrgico.

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

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

La composición química media de un cemento Portland, según Calleja (1974), está formada por un 62,5 % de CaO (cal combinada), un 21 % de SiO_2 (sílice), un 6,5 % de Al_2O_3 (alúmina), un 2,5 % de Fe_2O_3 (hierro) y otros minoritarios. Estos son los cuatro componentes principales del cemento, de carácter básico la cal y de carácter ácido los otros tres. Estos componentes no se encuentran libres en el cemento, sino en forma de silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, que son los componentes hidráulicos del mismo o componentes potenciales. Un clínker de cemento Portland de tipo medio contiene:

- Silicato tricálcico ($3CaO \cdot SiO_2$) .....40% a 50%
- Silicato bicálcico ($2CaO \cdot SiO_2$) .....20% a 30%
- Aluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$) .....10% a 15%
- Aluminatoferrito tetracálcico ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) 5% a 10%

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

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + (x+3)H_2O = 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot x\,H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + (x+1)H_2O = 3CaO \cdot 2SiO_2\ x\,H_2O + Ca(OH)_2$$

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

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

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

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

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

Tiempo de fraguado

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

El tiempo de fraguado de la pasta cementicia es afectada por varios factores, tales como, finura, relación agua/cemento, y la composición química. Existen dos importantes tiempos de fraguado definidos: fraguado inicial (tiempo que dura hasta que a la pasta de cemento comienza a endurecerse considerablemente), y el tiempo de fraguado final (el tiempo en el que el cemento ha endurecido al punto que puede sostener una cierta carga). La pasta de cemento es solamente deformable durante el tiempo de fraguado. De esta forma, el tiempo de fraguado inicial debe ser suficientemente largo, y el tiempo que fraguado final debe ser bastante corto.

Consistencia

Al referirse al cemento Portland, la "consistencia" representa la capacidad de una pasta endurecida de cemento de conservar su volumen después de fraguado sin experimentar la expansión destructiva. Esta expansión es causada por la hidratación lenta (u otra reacción) de algunos compuestos

presentes en el cemento endurecido tal como cantidades excesivas de la cal libre (CaO) u óxido de magnesio (MgO).

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

Resistencia

Las pruebas de resistencia del cemento se llevan a cabo con una muestra de morteros. De acuerdo con la ASTM, para preparar el mortero se mezcla 1 parte de cemento, 2,75 partes de arena con suficiente agua para obtener un flujo de 110 ± 5 en 25 gotas. (Otras normas requieren diferente combinación de estos materiales)

La resistencia del cemento es normalmente definida en tres formas: compresión, tensión y flexión. Existen varios factores que afectan estas resistencias, en los que se incluyen: relación agua/cemento, relación agregado fino/cemento, tipo y clasificación del agregado fino, método de mezclado y de moldeado de los morteros, condiciones de curado, tamaño y forma del mortero, contenido de humedad durante el tiempo de prueba, condiciones de carga y la edad (Erdogan, 2003).

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

Gravedad específica

La gravedad específica del cemento Portland es aproximadamente de 3,15. Las gravedades específicas de los cementos Portland de escoria de alto horno

y los cementos Portland puzolánicos pueden ser más bajos, con valores de 2,90.

Calor de hidratación

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

Pérdida por ignición

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

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

1.3. Cemento Portland Puzolánico

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

Este aglomerante le concede baja resistencia mecánica, y su fraguado es algo más lento que el del cemento Portland ordinario. Por esta razón, puede ser considerado como un cemento para aplicaciones de albañilería. Aunque en los

últimos años ha adquirido aplicación en la fabricación de hormigones, y en especial los ligeros.

La adición de materiales puzolánicos le confiere propiedades ventajosas a los cementos, tales como mayor resistencia a mayor edad, menor calor de hidratación, durabilidad, entre otras. A continuación se explican, cada una de estas propiedades.

Fraguado

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

Fluencia

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

Resistencia

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

Durabilidad

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.

El aditivo mineral, al cual se ha hecho alusión para la producción de cemento puzolánico se le dedican los siguientes acápites.

1.3.1. Origen del término puzolana

Según el Instituto Americano del Hormigón, en su reporte 232.1R (2000), es a la civilización romana a quien se le debe el origen del nombre de 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 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).

1.3.2. Definición de puzolana

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" (Quintana, 2005).

De forma similar se utiliza la definición de puzolanas dada por Massaza (1974), que expresa: "se define como puzolanas a aquellos materiales naturales o artificiales, ricos en sílice y alúmina, capaces de reaccionar con cal en presencia de agua y formar por esta reacción compuestos con propiedades cementicias".

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

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

En Cuba existe un inmenso potencial de puzolanas naturales con numerosos yacimientos de virio volcánico y de rocas zeolitizadas diseminadas, prácticamente, por todo el territorio nacional, generalmente con elevada actividad puzolánica.

Las puzolanas presentan en virtud de su inestabilidad química, reflejo del desorden estructural, alta susceptibilidad de reaccionar con otras sustancias para formar nuevos compuestos más estables, es así como atrapan la cal libre en el clínker. Éstas engloban materiales de diferente naturaleza, por esto cuando se habla de ellas se hace alusión a rocas, suelos, sedimentos o productos artificiales que presentan propiedades puzolánicas.

1.3.3. 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.

Puzolanas Naturales: Son productos minerales con características composicionales (sílico-aluminosos), estructurales (estructura imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento, 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 hayan afectado. En las rocas volcánicas son especialmente interesantes las rocas ácidas (ricas en cuarzo y feldespato).

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

Mineralógicamente las cenizas volantes se componen de:

- Sílico-aluminatos vítreos
- Compuestos cristalinos de hierro, sodio, potasio y magnesio entre otros
- Carbón no quemado

La reactividad de las cenizas volantes como puzolanas depende del tipo y origen del carbón, composición química y mineralógica de éste, del contenido de la fase vítrea después de quemado y de la granulometría principalmente.

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

La factibilidad de que un material arcilloso sometido a un tratamiento térmico permita la formación de compuestos puzolánicamente activos depende principalmente de:

- Estructura y constitución mineralógica
- Composición química
- Temperatura
- Tiempo de cocción y de enfriado

1.3.4. Valoración de la puzolanidad

El hecho de que la puzolanidad pueda deberse a diferentes causas, además de que esta propiedad se manifiesta de diferentes maneras, hace verdaderamente difícil imaginar un único método que con carácter general permita llevar a cabo una estimación del valor puzolánico en condiciones equiparables en materiales distintos. Es importante resaltar que los ensayos que se practiquen en la determinación de la actividad puzolánica solo serán válidos en la medida que reflejen las condiciones reales de su posible uso.

Existen diferentes criterios para su valoración, entre los cuales se encuentran los cualitativos y los cuantitativos.

Criterios Cualitativos

Son bastante empíricos, dudosos y poco precisos.

Químicos: Detecta la capacidad de reacción de los materiales puzolánicos en una solución de hidróxido de calcio. El método consiste en observar la formación de flóculos, su cantidad y velocidad de sedimentación.

Físicos y tecnológicos: Uno es la observación al microscopio del material para definir la perfección de su estructura cristalina. Otro ensayo consiste en la elaboración de pequeñas probetas de mezcla del material con cal hidratada, éstas se conservan durante tres días en ambiente húmedo y sin CO_2, al cabo de los cuales se comprueba si se ha producido algún endurecimiento de la masa. Se considera que el material ensayado es puzolánico cuando las probetas así conservadas resisten, sin deshacerse, dos horas en agua hirviente.

Criterios Cuantitativos

Son más elaborados y precisos, permiten realizar comparaciones entre resultados de un mismo ensayo.

Químicos: También se basan en la reacción de la muestra puzolánica con agua de cal pero se usa la química cuantitativa y los análisis complexométricos. La principal carencia de éstos es que no reproducen las condiciones reales en las que trabajará el material puzolánico.

Físicos y Tecnológicos: Se elaboran probetas y se les hacen ensayos de resistencia a la tracción y a la compresión.

FRATINI: Es el método más difundido para ensayar cementos puzolánicos, consiste en comparar la cantidad de hidróxido de calcio presente en una solución acuosa en contacto con el cemento hidratado, con la cantidad de hidróxido de calcio capaz de saturar un medio de la misma alcalinidad.

En resumen, existen varios métodos recomendados para la determinación de la actividad puzolánica, los cuales se pueden agrupar en químicos, físicos (por difracción de rayos X) y ensayos mecánicos. Aunque ninguna de estas pruebas es considerada completamente satisfactoria, el método más utilizado es el que se recoge en la ASTM C- 618.

1.3.5. Actividad puzolánica

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

$$Ca(OH)_2(s) + SiO_2(s) + H_2O = CaO.SiO_2.2H_2O(s)$$

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

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

- La actividad puzolánica es mayor cuando el contenido de óxido de silicio (SiO2), óxido de aluminio (Al2O3) y óxido de hierro (Fe2O3) o el contenido de material activo es alto.
- Una puzolana para ser químicamente activa, debe tener una estructura amorfa.
- Las partículas puzolánicas deben ser suficientemente finas para reaccionar con el hidróxido de calcio.

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

1.3.6. Utilización de las puzolanas

El primer criterio que apoyó la producción de cementos puzolánicos fue el corregir el cemento Portland tipos I y II, al fijar la cal libre, generada durante la

formación de los silicatos bicálcicos y tricálcicos, la cual es inestable a pH menores de 12, para formar compuestos estables que no son vulnerables a la acción lixiviante de las aguas ácidas. Pero adicionalmente estos materiales tienen otros efectos sobre el cemento y el concreto.

- Reemplazan una buena porción del cemento Portland del 15 al 40 %, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clínker y más económica de moler.
- Reduce el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción exotérmica.
- Evita el agrietamiento del concreto por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse.
- Rebajan en cierto porcentaje los aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente entran a reaccionar de manera perjudicial con los agregados del concreto.
- Aligera las mezclas, debido a la disminución de su densidad.
- A partir del análisis de los efectos que las puzolanas provocan sobre el cemento se puede utilizar en:
- Morteros de albañilería (colocación de ladrillos, bloques, entre otros).
- Estabilización de suelo en bloques prensados.
- Producción de prefabricados ligeros de hormigón (bloques, adoquines, entre otros).
- Fundición de hormigón masivo de baja resistencia.

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

Como parte del estudio del arte de las investigaciones más importantes relacionadas con los materiales puzolánicos, se realiza, en el acápite que sigue, un análisis de los antecedentes de la investigación y de otros aspectos teóricos.

1.4. Antecedentes de la investigación

Saricimen et al. (1992), a través de la realización de estudios de campo y de laboratorio en zonas (en los países árabes del golfo) donde las condiciones

ambientales son agresivas y seriamente corrosivas, demostraron que el concreto en esta región se debe diseñar no solamente para alcanzar alta resistencia sino también para que posea mayor durabilidad. Para esto probaron el uso de las puzolanas naturales, y con ello se logró extender la vida de servicio de las estructuras.

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

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

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

En las últimas décadas existen muchos autores de habla hispana que se han destacado en esta temática.

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.

Costafreda et al. (2007), publicaron un trabajo, donde se da a conocer la importancia de la zeolita como aditivo activo en cementos puzolánicos y en morteros mixtos. Ellos, mediante estudios de difracción, fluorescencia, microscopía electrónica de barrido y ensayos químicos de puzolanidad, demostraron que las propiedades de cementos y morteros con adición de zeolita mejoran notablemente; se alcanzan resistencias mecánicas de hasta 70 MPa a 90 días. Los ensayos químicos de puzolanidad a 7 y 15 días demostraron la capacidad reactiva de esta zeolita, la cual se comporta como un material puzolánico activo.

Costafreda y Calvo (2007), plantean que la mezcla de cemento Portland con agua produce reacciones de hidratación muy activas, dando lugar a la formación de productos estables, tales como portlandita y tobermorita, a partir de la hidratación de fases minerales anhidras que están en su composición primaria. La presencia de zeolita en morteros de cemento, 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. El efecto de ralentización provocado por la zeolita natural puede considerarse como un proceso positivo que permite la coagulación y cristalización del gel cementicio CSH en condiciones físico-

químicas óptimas. La zeolita es capaz de controlar, en la interface cemento-puzolana natural, diversas variables, tales como el pH, la humedad y la velocidad de reacción, y su carácter como intercambiador iónico ejerce profundas influencias en el equilibrio interno de la pasta.

Costafreda (2009), parte de 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 $Ca(OH)_2$ y de la cal libre en disolución a medida que transcurre el tiempo. Llega a la conclusión de que muchas especies de zeolitas interfieren drásticamente en la concentración de $Ca(OH)_2$ 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.

Los materiales puzolánicos son muy conocidos actualmente, así como sus ventajas en la mejora de gran número de cementos. Costafreda et al. (2011), mostraron resultados prácticos, obtenidos de recientes investigaciones de tobas de composición dacítica, capaces de sustituir al cemento Portland 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 et al. (2011), determinan 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 esmécticas que son singenéticas con la mordenita en los yacimientos zeolíticos españoles.

Costafreda (2011), establece la relación que existe entre el diámetro de las partículas de muestras compuestas esencialmente por zeolitas y esmécticas 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.

A partir de la década de los años 70 del siglo XX, en Cuba se han efectuado numerosas investigaciones que han elevado el conocimiento geológico del territorio nacional, así como investigaciones a nivel de laboratorio; semi-industriales e industriales que han validado las tobas meteorizadas, tobas vítreas (vidrio volcánico) y tobas zeolitizadas como puzolanas naturales, aptas para producir aglomerantes como el cemento romano y adiciones o mezclas al cemento Portland, las cuales han dejado el camino abierto a nuevas investigaciones.

Las zeolitas han tenido un gran desempeño en diversas esferas, es un valioso recurso para la rama de la construcción. Se ha empleado como adición mineral puzolánico en las mezclas con cal en las construcciones antiguas. Estas se utilizan en la construcción como aditivo puzolánicos del cemento (Sarsale, 1985) y hormigones, en la construcción de carreteras, acueductos y edificios, porque el contenido de silicio les permite reaccionar con la cal libre producida durante el fraguado (Gonzáles, 1976).

Rabilero (1988) ha profundizado más en el 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. A partir de los trabajos desarrollados por este investigador, se instauró en Cuba un nuevo tipo de cemento de bajo coste, el cemento romano, que sustituyó parcialmente al cemento Portland tradicional, y con el cual se construyeron casas y edificaciones.

Varios autores como López 2006, De Armas 2008, Muxlanga 2009; han estudiado materiales similares como es el yacimiento tobas vítreas 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.

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 se propone, el empleo de la materia prima para diferentes fines como materiales de construcción alternativos, específicamente áridos y hormigones ligeros. Sin embargo no realiza pruebas encaminadas a su utilización como puzolana natural.

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, Gener y otros, que lo establecen como característica fundamental de los materiales puzolánicos.

De acuerdo con los investigadores del tema el desarrollo de la aplicación de las tobas como una adición mineral, componente alternativo en las mezclas de hormigones y morteros sólo se demuestra mediante ensayos que permitan conocer sus bondades como adición.

Rosell y Galloso (2001); Rosell (2001, 2006, 2007, 2011), han dirigido sus investigaciones al empleo de las zeolitas naturales procedentes del yacimiento de Tasajeras, Provincia de Villa Clara, como material de construcción, principalmente en la producción de cementos y otros aglomerantes, y como aditivos o agregados ligeros, para la producción de hormigones de altas prestaciones con excelentes cualidades técnicas, como la impermeabilidad y durabilidad.

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. En Cuba ha sido frenada al no existir fuentes como las tradicionalmente conocidas y comercializadas como lo son las cenizas volantes y la microsílices. 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. Es conocido que la zeolita tiene actividad puzolánica desde la época romana, y actualmente se utilizan en el mundo para la producción de cementos mezclados, sin embargo la experiencia cubana es el precedente de su uso como adición activa a hormigones. Se han realizado

investigaciones a diferentes escalas del uso de adiciones de zeolita en tecnologías de prefabricado, premezclado y pretensado que han demostrado las mejoras en las prestaciones.

Prado (2006) comparó las características de los morteros tradicionales empleados en las labores de restauración arquitectónica, con otros morteros elaborados a base de adiciones de puzolanas naturales, preferentemente zeolitas naturales, originarias de Tasajeras, donde obtuvo resultados favorables.

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

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

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.

CAPÍTULO 2 GEOLOGÍA Y MINERÍA DE LOS YACIMIENTOS

2.1. Parte geológica del Yacimiento de Tobas Zeolitizadas San Andrés

2.1.1. Ubicación del yacimiento

Se localiza en la provincia y municipio de Holguín, a unos 23 Kms al noroeste de la Ciudad y a 3 Kms al Sur del poblado de San Andrés; en la hoja cartográfica 4978-IV Holguín a escala 1:50000.

El yacimiento cuenta con la Concesión de Explotación y Procesamiento. El área de explotación es de 22.87 ha. y la de procesamiento es de 5.16 ha.

Sus coordenadas según el Sistema Lambert son:

Vértice	Norte	Este
I	254355	541100
II	254900	540500
III	255000	540600
IV	255000	540735
V	254900	540800
VI	254700	541100
VII	254500	541400
VIII	254355	541400

Las coordenadas del centro del yacimiento son:

X: 540300

Y: 254700

2.1.2. Características geográficas-económicas de la región

En el área se encuentran 39 viviendas que están alrededor del yacimiento, además algunas fincas particulares y una cooperativa, aproximadamente a unos 200 m de distancia del área del yacimiento. Cercano están los Caseríos de Loma Blanca, La Mula y Tasajera.

Vías de comunicación.

El acceso principal al yacimiento se realiza por la carretera San Andrés-Tasajera, que se une con la carretera Holguín-San Andrés.

Líneas Eléctricas

El poblado de San Andrés se abastece energéticamente de la línea de 33000 voltios.

2.1.3. Condiciones físico-geográficas

El relieve en la zona del yacimiento es algo ondulado con pequeñas elevaciones en forma de mesetas, localizando en una de ellas el propio yacimiento con cotas superior de alrededor de 100 m S.N.M.

En el yacimiento no existe prácticamente vegetación, por cuanto la capa vegetal es muy poca. El Rio Chaparra constituye la principal corriente superficial, drenando hacia diferentes arroyos y cañadas intermitentes.

En la zona los vientos predominantes soplan generalmente del SE-NE

Las épocas fundamentales de lluvia son de Abril a Junio y Septiembre a Noviembre.

2.1.4. Geología del yacimiento

El yacimiento se localiza en la formación Loma Blanca, la cual se caracteriza por una secuencia de Tobas Vitroclasticas y Vitrocristaloclasticas, además tufitas, margas y calizas lenticulares.

Las Tobas Zeolitizadas presentan color verde claro, crema blancuzca y a veces verde grisáceo. El yacimiento tiene una amplitud que varía desde 55 m hasta 200 m y una longitud de 1200 m.

La amplitud está limitada tanto por el NE como por el SW, por fallas lo cual nos da una idea de un bloque elevado.

Las Tobas presentes tienen diferentes grados de Zeolitización con espesores variables al igual que el buzamiento, todo lo cual se debe a la estructura en forma de pliegues alargados con dirección NO-SE con una flexura en su parte

media. No se observa en ellas estratificación definida, pero sí agrietamiento y trituración debido a la tectónica, con espejos de fricción.

Tectónicamente la región, es atravesada por numerosas fallas que afectan mayormente el piso estructural inferior. Se observan dos sistemas fundamentales, uno con dirección NW-SE y con dirección NE-SW. Esa tectónica según los resultados obtenidos no influye en la calidad de la materia prima. Como minerales acompañantes aparecen: Cuarzo, Calcita, Motmorrillonita y Feldespato.

2.1.5. Propiedades físico-mecánicas

Los valores medios fueron:

Humedad natural	11.62 %
Peso volumétrico húmedo	1.93 t / m^3
Peso volumétrico seco	1.73 t / m^3
Valor de relación de bario	0.35
Saturación	76.04 %
Peso especifico	2.53 g / cm^3
Absorción	2.01 %
Resistencia a la compresión natura	157.36 Kg / cm^2
Resistencia a la compresión saturada	180.00 Kg / cm^2

A pesar de ser una roca estable debe prestarse mucha atención a las zonas de fallas localizadas en el yacimiento.

2.2. Parte minera del Yacimiento de Tobas Zeolitizadas San Andrés

2.2.1. Sistema de explotación

Se propone continuar la explotación del yacimiento por el método a cielo abierto mediante el cual se desarrollara una cantera que comprenderá las reservas en categoría B+C1 fundamentalmente (Medidas +Indicadas)

Esta cantera contara con solo un nivel de extracción en la cota +90 pues producto a los pocos niveles de extracción no es necesario aperturar un segundo nivel. Para realizar la extracción utilizamos perforación y voladura para el arranque del mineral(es válido señalar que los trabajos de perforación y voladura corren a cargo de la Empresa Cobre Santiago en prestación de servicio).

La carga del material arrancado se realiza con un cargador TO-18 directamente a los camiones Kraz de 12 t, los cuales transportaran el material hasta la planta de procesamiento.

Para los trabajos de destape y preparación de los taludes utilizaremos un buldócer Komatsu D-85.

El desagüe de la cantera sé prevé realizar por gravedad dándole un pequeño desnivel al piso de la misma (2%) en sentido contrario al avance del frente.

2.2.2. Apertura

Esta cantera fue aperturada con una trinchera interior en el nivel +90 directamente en el mineral pues las condiciones así lo permiten (este mineral aflora a la superficie y la capa vegetal de cubierta es mínima, la cual se extrae y se deposita en un área escogida para dicho efecto con el objetivo de utilizarla luego en la reforestación del área). Los trabajos de carga de mineral lo realizamos con un cargador frontal TO 18 directamente a los camiones Kraz de 12 t y en los trabajos de acarreo del mineral así como en el desbroce de esta pequeña capa vegetal utilizaremos el buldócer Komatsu D 85.

2.2.3. Capacidad de extracción anual y vida útil de la cantera

Esta actualización al proyecto original la hacemos para el período de años por tanto en este período de extracción se arrancara un total de 84800 t, lo que

implicara una disminución de 86496 t. Por tanto considerando que esta extracción se mantenga sin mucha variación la vida útil de la cantera será de 122 años.

2.2.4. Trabajos de perforación y voladura

Los trabajos de perforación se realizaran con carretillas barrenadoras con diámetros de perforación de 85 mm, además para los trabajo de perforación secundaria utilizaremos el martillo perforador PR-10. Según las características de las rocas presentes en el yacimiento, la productividad de la perforación por turno es de 58.5 m (el turno es de 8 horas). Los barrenos serán distribuidos al Tres-Bolillos pues, es la forma más efectiva. Anteriormente señalamos que estos trabajo corren a cargo de la Empresa Cobre Santiago, pero le mostramos el sistema de carga utilizados por ellos:

- Sustancia explosiva industrial: Senatel Magnafrag.
- Longitud de carga: 4.24 m.
- Longitud de relleno: 1.76 m.
- Longitud de un cartucho: 53 cm.
- Diámetro del cartucho: 65 mm.
- Peso del cartucho: 2.083 kg.
- Nº de cartucho por barrenos: 8 U.
- Carga total por barreno: 16.7 Kg
- Cordón detonante.
- Mecha lente.
- Detonador no eléctrico.

Parámetros de eficiencia de la voladura

Kg de Explosivo x m. lineal ⟶ 6.53

m^3 de roca x m. lineal de barreno ⟶ 4.40

2.2.5. Plan de extracción

Para satisfacer la demanda del año fue necesario preparar un bloque de extracción con las siguientes dimensiones: Altura 6 m, Ancho 25 m, Largo 42 m, esto arroja un volumen de 6300 m3 que multiplicado por el peso volumétrico

de la roca (1.73), se obtiene 10899 t. En este bloque el escalón final de esta etapa queda en 5 m de alto con proyección horizontal de 1.17 m, el sentido de avance de la extracción.

2.2.6. Indicadores fundamentales

- Mineral planta 10800 t.
- Días laborables 48 D
- Días efectivos 36 D
- Horas Camión 576 Horas.
- Horas Buldócer 90 Horas.
- Horas Cargador 288 Horas.
- No de viajes 1080 Viajes.
- Necesidad de metros a perforar 1060 m.
- Consumo de combustible Compresor 1272 L.
- km recorrido por viaje 3 km.

2.2.7. Necesidad de materiales

Tabla Nº 2.2 Combustible Extracción

Equipos	Índice de Consumo	h/Trab. km recorrido	Consumo combustible	Conversión (t)	Precio ($)	Importe (Mp)
Buldócer	26 L/h	90	2340 L	1.9	287.64	0.5
Compresor	1.2 L /mes	1080 m	1296 L	1.1	287.64	0.3
Total				**3.0**		**0.8**

Tabla Nº 2.3 Combustible Acarreo

Equipos	Índice de Consumo	h/Trab. km recorrido	Consumo combustible	Conversión (t)	Precio ($)	Importe (Mp)
Cargador	17.4 L/h	30	522 L	0.4	287.64	0.1
Camiones Kraz	1.8 km/L	3240 km	1800 L	1.5	287.64	0.4
Total				**1.9**		**0.5**

Consumo de combustible (Extracción): 3.0 t 0.8 Mp
Consumo de combustible (Acarreo): 1.9 t 0.5 Mp
Total: 4.9 t 1.3 Mp

Tabla Nº 2.4 Necesidad de materiales

Indicadores	Producción (t)	Índice de Consumo	Cantidad	Precio $	Importe (Mp)
Neumáticos 1200x20	10800	0.00032	3.4	348.81	1.2
Cámara 1200x20	10800	0.00032	3.4	20.48	0.07
Neumáticos 17.5x25	10800	0.0001	1	1590.46	1.6
Cámara 17.5x25	10800	0.0001	1	21.85	0.02
Baterías	10800	0.0001	1	82.50	0.08
Total					**3.0**

Tabla Nº 2.5 Fuerza de trabajo necesaria

Extracción				
Cargo	**H. Trabajadas**	**Tarifa Horaria**	**Importe**	**Mp**
Op. Buldócer	90	1.06	95.40	0.09
Ing. de Minas	288	1.63	469.44	0.5
Total			564.84	0.6
Acarreo				
Op. de Cargador	288	0.93	267.84	0.3
Chofer B (2)	576	0.93	535.68	0.5
Total			803.52	0.8

Tabla Nº 2.6 Costo total

Indicadores	Extracción	Acarreo	Total
Combustible	0.8	0.5	1.3
Materiales	-	3.0	3.0
Salario	0.6	0.8	1.4
Seg. Social	0.08	0.1	0.2
Amortización	0.1	1.3	1.4
25% Fuerza de trab.	0.1	0.2	0.3
Servicios	12.4	-	12.4
Costo Total	14.1	5.9	20.0

2.3. Parte geológica del Yacimiento de Tobas Vítreas Guaramanao

2.3.1. Características geográficas y económicas de la región

El área de los trabajos se encuentra ubicada aproximadamente a 14 km al suroeste del poblado de San Andrés, municipio y provincia de Holguín, en los alrededores de la ESBEC Bartolomé Masó M.

Sus coordenadas en el Sistema Lambert son:

Vértice	Este	Norte
I	535 600	250 350
II	536 600	250 350
III	536 600	249 600
IV	535 600	249 600
V	535 600	250 350

Las coordenadas del centro del yacimiento son:

X: 536 100
Y: 249 950

El relieve es localmente sencillo y permite un fácil acceso en toda su extensión, la cota máxima es 102.24 m y la mínima 96.67 m correspondiendo a una llanura. El clima es templado y las precipitaciones tienen valores medios anuales de 1000 mm, con períodos de lluvias (mayo – octubre) y de seca (noviembre – marzo).La vegetación se caracteriza por pastos, arbustos y malezas (marabú) y cultivos de frutas y viandas, el acceso al área es bueno ya que es atravesado por terraplenes que enlazan a las escuelas del llamado Plan de escuelas en el campo o Plan San Andrés, es un área poblada por pequeños caseríos pertenecientes a cooperativas y contingentes agrícolas. La red hidrográfica es sencilla, observándose que al Este es atravesada por pequeños arroyos de forma intermitentes permanentemente secas y su fuente de alimentación principal son las aguas de precipitaciones atmosféricas.

2.3.2. Geología del yacimiento

La investigación de prospección de las tobas vitroclásticas se acometió teniendo presente el criterio estratigráfico y unido a ello, resultados obtenidos en muestras tomadas en el área de Guaramanao que acarrearon resultados favorables ya que estas tobas tienen altos contenidos de vidrio volcánico.

El yacimiento se encuentra dentro de la Formación Vigía ($P_1^3 - P_2^2$).

Está constituido por tobas vitroclásticas de composición ácida, con contenido de vidrio volcánico superior a 87%, las cuales representan la roca útil o cuerpo mineral.

Morfológicamente el yacimiento es un estrato monoclinal con hundimiento hacia el suroeste con un ángulo de buzamiento de 10^o aproximadamente. El ambiente de deposición es marino de aguas poco profundas, con un régimen dinámico de aguas inestables, se considera que estas tobas tienen su origen en una actividad volcánica lejana.

Las rocas que sobre yacen a este paquete de tobas, lo constituyen arenas finas, aleurolitas y margas pertenecientes a la Formación Pedernales ($P_2^2 - N_1^1$) y las que subyacen están compuestas por rocas de la Formación Hatícos (P_1^{2-3}), brechas y conglomerados. Generalmente estas tobas presentan contenidos promedios de vidrio volcánico, montmorillonita y Ca CO_3 para el yacimiento en porciento promedios como sigue:

- Vidrio volcánico 87 %
- Montmorillonita 11.19 %
- $CaCO_3$ 2.78 %

Estas tobas presentan bajo grado de alteración a minerales arcillosos, tal como lo demuestra el contenido de montmorillonita, detectado por análisis de ATD, Rx, Petrográfico y Mineralógico. El valor promedio de Intercambio catiónico Total es de 11.19 meq/100l.

- Emplazamiento Tectónico: Regionalmente la tectónica de la zona ha sido activa pues existen zonas de grandes ocurrencias de fallas que en ocasiones limitan a la Formación Vigía con la Formación Hatícos y con la Formación La Jíquima, la Formación Vigía yace transgresivamente sobre la Formación Hatícos y es cubierta discordantemente por las formaciones post - cubanas como la Formación Pedernales.

- Grado de complejidad

El yacimiento desde el punto de vista geológico es poco complejo corroborado esto por los rasgos estructurales y estratigráficos del yacimiento y la poca variabilidad de los parámetros de calidad de la materia prima

2.3.3. Resultados del estudio de las propiedades físico-mecánicas

Según los resultados de las propiedades físicas–mecánicas de rocas que se estudian las tobas vitroclásticas ponen de manifiesto baja densidad, alta absorción y baja resistencia a la compresión lo que hace esta materia prima útil.

Pozo	Muestra	Desde	Hasta	Peso Volumétrico (g/cm^3)		Absorción %	Humedad %	PER (g/cm^3)	Resistencia a la compresión kg/cm^2	
				seco	saturado				Seco	saturado
Pc-2	M-7	8.10	8.85	1.17	1.56	32.5				
Pc-3	M-13	4.65	6.65	1.13	1.60	41.5	13.3			
Pc-9	M-24	6.70	10.0	1.16	1.50	29.2	9.2	1.97	64.29	-
Pc-11	M-35	11.6	15.4	1.20	1.59	32.7	6.6	1.78	75.91	-
Prom. Pozo				**1.16**	**1.56**	**33.9**	**7.46**	**1.87**	**70.10**	
Corte-1	C-1			1.18	1.62	36.9	24.4	2.17	64.25	-
Prom. Total				**1.20**	**1.61**	**33.6**	**13.**	**2.02**	**68.41**	

2.3.4. Condiciones técnicas mineras de explotación del yacimiento

Desarrollo de los fenómenos y procesos ingenieros geológicos.

El yacimiento de Vidrio Volcánico Guaramanao presenta condiciones favorables para su explotación, su zona mineralizada la constituyen tobas vitroclásticas de granulometría fina media semiduras resistentes a la meteorización y estables a pesar de su baja resistencia a la compresión

Las rocas que sobreyacen el cuerpo de Vidrio Volcánico son rocas del tipo Aleurolitas las cuales por sus características no representarán dificultad alguna para su escombreo conjuntamente con la capa vegetal. El coeficiente de escombreo promedio es de 1.7 m.

En el área de los trabajos no se realizó estudio hidrogeológico pero no contamos en el yacimiento con corrientes de aguas superficiales y en la perforación de los posos no tuvimos la presencia de agua, lo que nos permite pensar que estamos ante un yacimiento que pudiéramos catalogarlo de seco, solo tendríamos que tener en cuenta a la hora de realizar los trabajos de explotación las aguas meteóricas. Estos trabajos se realizarán en forma de operativos en períodos secos.

2.4. Parte minera del yacimiento de tobas vítreas Guaramanao

2.4.1. Proyecto de apertura del yacimiento

En este caso estamos en presencia de un cuerpo mineral con forma de yacencia horizontal y una potencia promedio de cubierta de capa vegetal de 2m, el relieve de la zona no presenta elevaciones considerables casi llano, estas características nos hicieron optar por aperturar el yacimiento a través de una trinchera interna directamente en la zona del mineral avanzando un frente de trabajo.

Las características y propiedades físico-mecánicas del mineral recogidas en el informe geológico nos permiten realizar el arranque del mineral con el empleo de un buldócer no siendo necesaria la utilización de la perforación y voladura.

2.4.2. Sistema de explotación y parámetros

El sistema de explotación lo forman una serie de elementos y parámetros entre los cuales tenemos los siguientes:

Principales elementos:

- Escalón de trabajo.
- Frente de inicio de los trabajos.
- Plataforma de trabajo.

Parámetros fundamentales:

- Altura del escalón.
- Angulo de inclinación del escalón.
- Ancho del frente de inicio de los trabajos.
- Ancho de la plataforma de trabajo.

Para la determinación de la altura máxima del escalón se tienen en cuenta las características del mineral a extraer y la altura máxima de agarre del equipo de carga para nuestro caso Cargador TO-18. Para la determinación del ángulo de inclinación tuvimos en cuenta las características físico-mecánicas del mineral así como la experiencia de trabajo con dicho material y para la

determinación de la dimensión de la plataforma de trabajo es necesario tener en cuenta las dimensiones de los equipos de carga y transporte así como la capacidad de maniobrabilidad de los mismos. (Cargador TO-18, Buldócer Komatsu y Camiones Kraz).

Todos estos parámetros dependen del equipamiento minero a utilizar en nuestro caso serán utilizados los siguientes equipos de acuerdo a la actividad.

- Arranque del mineral, conformación de los escalones y su talud, limpieza y apilado del mineral y la capa vegetal, estas labores serán realizadas por el buldócer.
- La carga del mineral así como la capa vegetal hacia los camiones será realizada con el Cargador TO-18.
- La transportación de la capa vegetal hacia la escombrera y del mineral para la Planta de procesamiento se realizará con Camiones Kraz.

2.4.3. Fundamentación de las pérdidas y dilución

En el caso del yacimiento Vidrio Volcánico Guaramanao planificamos un 2% de pérdidas por dilución, para el caso de la extracción planificamos un 2% de pérdidas, para la transportación planificamos un 1% de pérdidas y un 3% de pérdidas de procesamiento para un total de 8% de pérdidas.

2.4.4. Arranque del mineral

Por las características físico-mecánicas del mineral que hemos visto en epígrafes anteriores llegamos a la conclusión que es un material fácilmente deleznable por lo que no es necesaria la planificación de perforación y voladura pues el arranque del mineral lo efectuaremos con el buldócer.

2.4.5. Escombrera y sus parámetros

La escombrera será de tipo exterior la cual la situaremos fuera de los límites del yacimiento en esta depositaremos la capa vegetal producto de la extracción para luego ser utilizada en la rehabilitación.

2.4.6. Régimen de trabajo

Días laborables	24
Turnos por días	1
Duración de un turno	8 horas

2.4.7. Tecnología de los trabajos de minería

La tecnología y mecanización de los procesos de producción según la clasificación utilizada en la URRS por su estructura es ETD, es decir Excavadora, Transporte y Depósito, aunque en nuestro caso debemos señalar que en vez de Excavadora vamos a utilizar Cargador frontal, Camiones Kraz y Buldócer.

El orden de las operaciones es el siguiente:

- Preparación del área donde se va a realizar la extracción con el Buldócer, es decir separar la pequeña capa vegetal.
- El arranque del minera con el Buldócer.
- Realizar la carga del mineral con el Cargador.
- Transportación hasta la unidad de procesamiento con los camiones Kraz.

2.4.8. Plan de extracción de mineral

Es válido señalar que estos trabajos los realizamos en forma de operativos y por lo general en los períodos de seguía. Las dimensiones del bloque que nos permitió realizar esta extracción son las siguientes: 20mx11mx2m.

Indicadores fundamentales:

- Mineral Planta: 700 t.
- Días laborables: 24 D.
- Días efectivos: 7 D.
- Horas camión: 112 H.
- Horas buldócer: 15 H.
- Horas cargador: 56 H.
- Kilómetros recorridos por viajes: 22 km.
- Número de viajes 70

2.4.9. Necesidad de materiales

Tabla Nº 2.7 Combustible Extracción

Equipos	Índice de Consumo	h/Trab. km recorridos	Consumo combustible	Conversión (t)	Precio ($)	Importe (Mp)
Buldócer	30 L/h	15 h	450 L	0.4	384.00	0.2
Total				**0.4**		**0.2**

Tabla Nº 2.8 Combustible Acarreo

Equipos	Índice de Consumo	h/Trab. km recorridos	Consumo combustible	Conversión (t)	Precio ($)	Importe (Mp)
Cargador	25 L/h	21 h	525 L	0.5	384.00	0.2
Camiones Kraz- 2	1.8 km/L	1500.40 km	855 L	0.8	384.00	0.3
Total				**1.3**		**0.5**

Consumo de combustible extracción: 0.4 t – 0.2 M.P.
Consumo de combustible acarreo: 1.3 t – 0.5 M.P.
Total: 1.7 t – 0.7 M.P.

Tabla Nº 2.9 Costo total de las operaciones en el mineral

Indicadores	Por año		
	Extra.	**Acar.**	**Total**
Combustible	0.2	0.5	0.7
Materiales	0	0.6	0.6
Salario	0.2	0.15	0.35
Seguridad social	0.03	0.02	0.05
Amortización	0	0	0
25 % Fza de trab	0.05	0.04	0.09
Servicios	0	0	0
Sub. Total	0.48	1.3	1.8
Total	**1.8**		

Tabla Nº 2.10 Costo total de las operaciones en el estéril

Indicadores	Por año		
	Extra.	**Acar.**	**Total**
Combustible	0.3	0.3	0.6
Materiales	0	0	0
Salario	0.09	0.09	0.18
Seguridad social	0.01	0.01	0.02
Amortización	0	0	0
25 % Fza de trab	0.02	0.02	0.04
Servicios	0.3	0.3	0.6
Sub. Total	0.7	0.7	1.4
Total	**1.4**		

Tabla Nº 2.11 Costo total del proyecto

Indicadores Fundamentales	U/M ($)
Costo de las Operaciones en el Mineral	11.0
Costo de las Operaciones en el Estéril	8.8
Costos en Procesamiento	75.8
Costos en Rehabilitación	5.5
Total	101.1

CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar las potencialidades y perspectivas de utilización de las tobas zeolitizadas como puzolanas naturales se realizaron los ensayos correspondientes que aparecen descritos en la norma ASTM C – 618; que establece los parámetros de calidad para ser empleados como aditivos puzolánicos.

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

3.1. Toma y preparación de la muestra

Para la realización de la investigación las muestras fueron tomadas en la Planta de Procesamiento de la UEB GEOMINERA Holguín, San Andrés. Para determinar la cantidad de material utilizado en cada caso se tuvo en cuenta la norma cubana correspondiente (NC 178 2002).

La toma y preparación de las muestras experimentales, de las tobas vítreas del yacimiento Guaramanao y las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés, fue tomada en los lotes de producto final, en ambos casos se tomó en el centro de producción de estos materiales para garantizar un muestreo sin contaminación de otros agentes.

Las muestras de los yacimientos de tobas vítreas y zeolitizadas, poseen tamaño de partículas menores de un milímetro, características que las hace aprovechables para la elaboración de los morteros, sin la necesidad de ser molidos; pues más del 95 % del material pasa por este tamiz de diámetro 0,8 mm.

Las arenas empleadas para la elaboración de los morteros con los materiales de San Andrés y Guaramanao, fue del “Molino Doscientos Mil”, en Candelaria, Gibara y la arenera “Las Parras”, Buenaventura, ambas en la provincia Holguín, por la cercanía de las fuentes abastecedoras de áridos a los yacimientos de tobas y de esta forma hacer racional y económicamente rentable su utilización

si se proyecta la posible utilización de estos materiales para su empleo como puzolana.

3.2. 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, determinación de la composición química y el índice de actividad resistente.

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

3.2.1. 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 fijo de 30 %. Para ello se partió del análisis previo, realizado en las investigaciones de: Meral 2004; De Armas 2008; Muxlanga 2009; Cabrera 2010; Solís com. esc. 2011 y Almenares 2011.

3.2.2. Determinación de la composición granulométrica y propiedades físico-mecánica

Se realizaron un conjunto de ensayos para la determinación de la composición granulométrica y propiedades físico-mecánicas de los materiales, los cuales aportaron la información necesaria para su caracterización lo cual fue utilizado en los cálculos de los diseños de los morteros para albañilería. Los resultados de estos ensayos se ofrecen a continuación.

Tabla 3.1. Cemento P-350 (A Granel) producción nacional. Ensayos físico-mecánicos

Consistencia normal	25.1 %.
Fraguado inicial:	1 hora y 8 minutos
Fraguado final:	2 horas y 5 minutos
Finura de molido:	4.19 %.
Peso específico real	3.13 g/cm^3.
Estabilidad de volumen:	1.10 mm.
Peso Volumétrico Suelto	1.046 g/cm^3

Tabla 3.2. Árido fino, fracción de (5 a 0.15) mm, Planta Productora 200 Mil. Ensayos físicos

Granulometría	
Tamiz (mm)	% pasado
9.52	100
4.76	100
2.38	93.2
1.19	68.0
0.59	41.2
0.297	22.0
0.149	9.3

Material más fino que la malla 0.074 mm (# 200)…….	0.61 %
Módulo de finura…….	2.7
Partículas de arcilla……..…….	No contiene
Impurezas orgánicas…….	Placa I
Masa volumétrica suelta…….	1582 kg./m^3
Masa volumétrica compactada……	1668 kg./m^3
Porcentaje de vacío…….	34.8%
Peso específico corriente……	2.560 g/cm^3
Peso específico saturado…….	2.610 g/cm^3
Peso específico aparente…….	2.700 g/cm^3
Absorción de agua ……	2.2 %

Tabla Nº 3.3. Árido fino, fracción de (5 a 0.15) mm, Planta Productora Buenaventura. Ensayos físicos

Granulometría	
Tamiz (mm)	% pasado
9.52	100
4.76	100
2.38	95.5
1.19	70.7
0.59	38.6
0.297	16.4
0.149	8.5

Material más fino que la malla 0.074 mm (# 200)……	3.3 %
Módulo de finura……	2.72
Partículas de arcilla……	3.6
Impurezas orgánicas……	Placa I
Masa volumétrica suelta……	1342 kg./m^3
Masa volumétrica compactada……	1396 kg./m^3
Porcentaje de vacío……	45.6 %
Peso específico corriente……	2.567 g/cm^3
Peso específico saturado……	2.609 g/cm^3
Peso específico aparente……	2.679 g/cm^3
Absorción de agua ……	3.2 %

Toba Zeolitizada Natural, fracción de (0.8) mm, Planta Productora San Andrés. Ensayos físicos

Peso Volumétrico Suelto: 1544.0 Kg/m^3

Tova Vítrea Natural, fracción de (0.8) mm, Planta Productora San Andrés. Ensayos físicos

Peso Volumétrico Suelto: 761.0 Kg/m^3

Para el caso de la arena, el procedimiento se basa en la determinación de las fracciones granulométricas mediante la utilización de la tamizadora mostrada en la figura 3.1.

El análisis granulométrico del material tobáceo no se ha realizado, pues se tomó como granulometría el 0,8 mm que certifica la UEB GEOMINERA Holguín.

Figura 3.1. Tamizadora

3.2.3. Determinación de la composición química

La composición química cualitativa y cuantitativa de las muestras de tobas utilizadas en los experimentos, se realizó por el método de fluorescencia de rayos X (FRX) en un equipo de la marca Axios. El método consiste en hacer incidir un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al pasar al estado normal emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento, y la intensidad de su fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento en la muestra. El espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad. Los resultados fueron tomados de Almenares 2011.

3.2.4. Caracterización mineralógica

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

3.2.5. Determinación del índice de actividad puzolánica con cemento Pórtland

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

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

donde:

IAR: índice de actividad resistente

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

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

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

Dado que para determinar el índice de puzolanidad se necesita conocer la resistencia a la compresión de las probetas tanto de los morteros con adición como de los morteros de referencia, y que para confirmar parámetros de calidad de los mismos, se necesita conocer la resistencia a la flexotracción, se realizaron pruebas de resistencias mecánicas que tributan a su determinación.

3.2.6. Determinación del rendimiento con cemento Pórtland

Para la determinación del rendimiento se tomaron los resultados de los diseños para las mezclas y se obtuvo a través de la siguiente ecuación:

$$V_R = \frac{\sum D_G * V}{P_m}$$

$$V_A = \sum D_V * 1\,000$$

$$R = \frac{V_R}{V_A}$$

donde:

V_R: volumen real.

$\sum D_G$: sumatoria de las dosificaciones gravimétricas $\left({}^{g}/_{cm^3}\right)$.

P_m: peso de la mezcla (g).

V: volumen del molde donde es pesada la mezcla (cm^3).

V_A: volumen aparente.

$\sum D_G$: sumatoria de las dosificaciones volumétricas $\left({}^{cm^3}/_{cm^3}\right)$.

R: rendimiento.

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

Se elaboraron 36 probetas (morteros) con material tobáceo de los dos yacimientos y los dos tipos de arenas analizados, 12 para cada porcentaje de sustitución de cemento por tobas y 24 probetas en sustitución del polvo de piedra por tobas, 12 para mortero grueso y 12 para mortero fino.

Para garantizar la calidad de la arena primeramente se somete a un proceso de lavado para eliminar las partículas extrañas y contaminantes, se colocó en la estufa por 24 horas para eliminar su humedad. Luego se procedió a la dosificación para la elaboración de los morteros.

Para la elaboración de los morteros se empleó una mezcladora (figura 3.2 a), en la cual se vertió el cemento en las cantidades previamente calculadas, según las sustituciones (30 % de material tobáceo), las arenas y los materiales tobáceos, según el caso. Para el caso de la sustitución del polvo de piedra por el material tobáceo se añadió el cemento, las arenas y por último el material tobáceo para cada tipo de mezcla, luego se procedió a la mezcla de los mismos durante 30 s a velocidad lenta, hasta lograr la mezcla homogénea, luego se vertió la arena y sin detener la mezcladora, se mezcló por 30 s más. Después se dejó en reposo durante 90 s y se mezcló nuevamente a una velocidad rápida por 60 s. 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 s se expulse el aire atrapado en el material y la humedad

suba a la superficie. La segunda capa permite emparejar y enrasar los moldes. Estos se colocaron en el equipo que se muestra en la figura 3.2 b, para ser compactados. Luego fueron situados en un local donde se garantizaba buena conservación de los mismos, y pasadas 24 horas se extrajeron los morteros y se colocaron en el área de curado hasta la edad correspondiente a los ensayos de resistencia aplicados a los 28 días.

El diseño de las dosificaciones estuvo enmarcado en dos etapas. En la primera se utilizó la Toba zeolitizada natural y Toba vítrea natural en función de sustitución de un 30% de Cemento, identificadas con los códigos (T-1, T-2, T-3 y T-4) todas para mortero grueso. La segunda etapa estuvo enmarcada en la utilización de la Toba zeolitizada natural y Toba vítrea natural en sustitución del Polvo de Piedra identificadas con los códigos (T-5, T-6, T-7, T-8, T-9, T-10, T-11, T-12), todas para la elaboración de mortero grueso y fino.

Tabla 3.4. Diseño de las dosificaciones para la conformación de los morteros.

Tipo de mortero	Cmto	AA	AB	Zn	Vn
G-4,76 mm	1	3	-	0,43	-
G-4,76 mm	1	3	-	-	0,43
G-4,76 mm	1	-	3	0,43	-
G-4,76 mm	1	-	3	-	0,43
G-4,76 mm	1	5	-	3	-
G-4,76 mm	1	5	-	-	3
G-4,76 mm	1	-	5	3	-
G-4,76 mm	1	-	5	-	3
F-2,38 mm	1	2	-	5	-
F-2,38 mm	1	2	-	-	5
F-2,38 mm	1	-	2	5	-
F-2,38 mm	1	-	2	-	5

Leyenda:

Cmto – cemento.

AA - arena artificial del Molino 200 mil-Gibara.

AB - arena de la arenera Las Parras-Buenaventura.

Zn - toba zeolitizada natural.

Vn - toba vítrea natura.

G – mortero grueso.

F - mortero fino.

Para el mejor entendimiento del trabajo realizado se procedió a la codificación de los tipos de morteros estudiados, como se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.5. Código para las dosificaciones

Código	Tipo de mortero	Materiales a utilizar		
		Cemento	Arena	Árido fino
T-1	Grueso Tamiz 4.76mm	P-350	200 mil	Toba zeolitizada natural
T-2	Grueso Tamiz 4.76mm	P-350	200 mil	Toba vítrea natura
T-3	Grueso Tamiz 4.76mm	P-350	Buenaventura	Toba zeolitizada natural
T-4	Grueso Tamiz 4.76mm	P-350	Buenaventura	Toba vítrea natura
T-5	Grueso Tamiz 4.76mm	P-350	200 mil	Toba zeolitizada natural
T-6	Grueso Tamiz 4.76mm	P-350	200 mil	Toba vítrea natura
T-7	Grueso Tamiz 4.76mm	P-350	Buenaventura	Toba zeolitizada natural
T-8	Grueso Tamiz 4.76mm	P-350	Buenaventura	Toba vítrea natura
T-9	Fino Tamiz 2.38mm	P-350	200 mil	Toba zeolitizada natural
T-10	Fino Tamiz 2.38mm	P-350	200 mil	Toba vítrea natura
T-11	Fino Tamiz 2.38mm	P-350	Buenaventura	Toba zeolitizada natural
T-12	Fino Tamiz 2.38mm	P-350	Buenaventura	Toba vítrea natura

Tabla 3.6. Dosificación para la conformación de los morteros sustituyendo el 30% del cemento.

Código	Material	Porcentaje de sustitución %	Dosificación				
			Cmto (g)	Arena A. (g)	Arena B. (g)	Tobas (g)	Agua (mL)
T-1	Tobas vítreas Guaramanao	30	289	1311	-	90	331
T-2	Tobas zeolitizadas San Andrés	30	271	1230	-	172	337
T-3	Tobas vítreas Guaramanao	30	314	-	1208	98	390
T-4	Tobas zeolitizadas San Andrés	30	302	-	1162	192	375

Tabla 3.7. Dosificación para la conformación de los morteros sustituyendo el polvo de piedra para mortero grueso

Código	Material	Dosificación				
		Cmto (g)	Arena A. (g)	Arena B. (g)	Tobas (g)	Agua (mL)
T-5	Tobas vítreas Guaramanao	160	1210	-	350	291
T-6	Tobas zeolitizadas San Andrés	121	916	-	536	336
T-7	Tobas vítreas Guaramanao	141	-	905	308	432
T-8	Tobas zeolitizadas San Andrés	108	-	693	479	403

Tabla 3.8. Dosificación para la conformación de los morteros sustituyendo el polvo de piedra para mortero fino

Código	Material	Dosificación				
		Cmto (g)	Arena A. (g)	Arena B. (g)	Tobas (g)	Agua (mL)
T-9	Tobas vítreas Guaramanao	173	524	-	1279	464
T-10	Tobas zeolitizadas San Andrés	118	171	-	869	405
T-11	Tobas vítreas Guaramanao	177	-	453	1303	540
T-12	Tobas zeolitizadas San Andrés	119	-	305	876	420

Figura 3.2. a) Mezcladora b) Compactadora

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

Se presentan los resultados experimentales que confirman la hipótesis científica sobre las potencialidades de los materiales tobáceos de los yacimientos, Guaramanao y San Andrés, a través de sus características granulométricas, químicas y mineralógicas, de ser empleados como puzolanas naturales, y el análisis de las perspectivas de utilización a partir de los resultados de los ensayos mecánicos que permitieron la determinación de su actividad puzolánica.

4.1. Caracterización química

La composición química de las tobas empleadas, determinada a partir del método Fluorescencia de rayos X (FRX) se presenta en la tabla 4.1. En el anexo 4 se muestra el contenido de los elementos trazas que presentan las tobas.

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

Tabla 4.1 Composición química de la muestra de tobas empleadas

Compuesto	Contenido, %	
	Tobas Guaramanao	Tobas San Andrés
SiO_2	71,59	70,27
Al_2O_3	12,57	13,79
MnO	0,09	0,05
MgO	1,38	2,96
Na_2O	2,67	1,73
CaO	5,31	5,56
TiO_2	0,37	0,52
P_2O_5	0,06	0,08
K_2O	2,75	1,88
Fe_2O_3	3,05	2,95
SO_3	0,08	0,08
PPI	8,73	8,59

Como se puede observar la suma de SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3 supera el 70 % que se establece como mínimo en la norma ASTM C - 618 para las puzolanas naturales. Muestran un carácter ácido, con contenido de SiO_2 mayor que 65 %. En el diagrama de las puzolanas que se muestra en la figura 4.1, se ubican los materiales analizados dentro de esta categoría.

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 Banderas (1997); Tapia (2003); Pérez (2006); Frazao (2007); Solís com. esc. (2011), los cuales determinaron su composición para otros estudios.

Sobre la base de la composición química de las tobas analizadas se pueden clasificar geológicamente como rocas ígneas, de composición dacítica, como se puede observar en la figura 4.2, realizada a partir del diagrama TAS construido con la ayuda del software SigmaPlot. Según las investigaciones de Ramachandran, (1995), se conoce que las tobas de composición dacítica tienen buena puzolanidad.

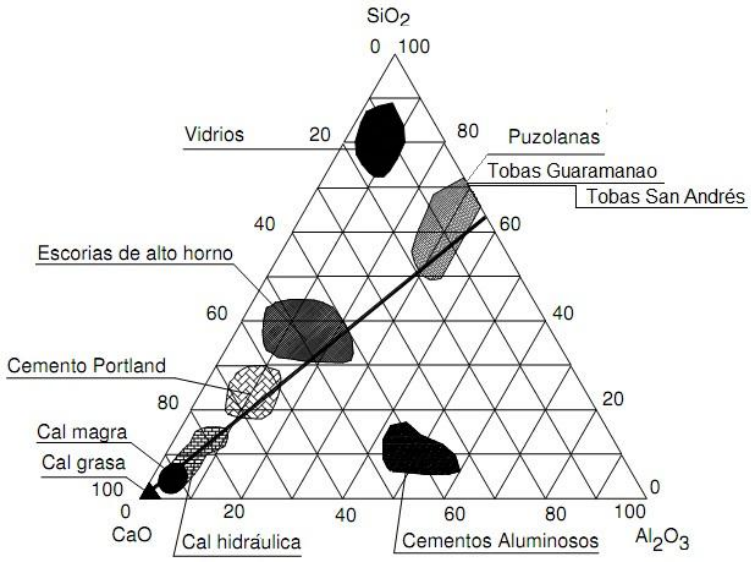


Figura 4.1 Diagrama de puzolanas. Fuente: Deloye, 1993

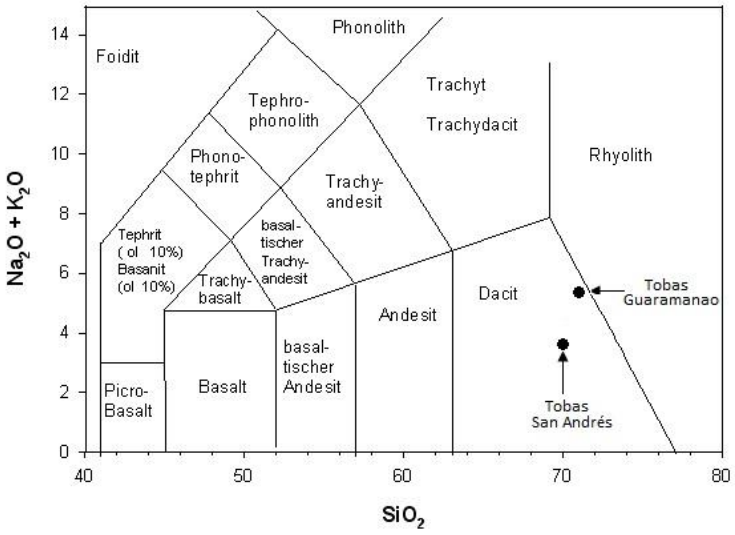


Figura 4.2 Origen de los materiales tobáceos analizados

4.2. Composición mineralógica

En la tabla 4.2 se muestran los porcentajes de la matriz vítrea y/o el contenido de zeolita, así como el contenido de arcilla y las principales fases mineralógicas cristalinas encontradas. Se observa que las tobas vítreas de Guaramanao que tienen mayor contenido de matriz vítrea y menor contenido de arcilla que las tobas de San Andrés, y son las de mejores características.

Los componentes cristalinos mayoritarios (sin tener en cuenta los minerales de zeolita, reportados por Frazao (2007); Tapia (2003)) están determinados principalmente por cuarzo, anortita, albita, ortoclasa, hyperstena y hematita, y con menor contenido esfena, ilmenita, apatito, diópsido y X – magnesio. En las tobas de Guaramanao, constituye una fase mineralógica la wollastonita. El porcentaje de cada una de estas fases se muestra en el anexo 7.

Tabla 4.2 Características mineralógicas de los materiales tobáceos estudiados. Fuente: **Tapia, 2003

Material puzolánico	Matriz vítrea y/o contenido de zeolita, %	Contenido de arcilla, %	Principales fases cristalinas
Tobas vítreas Guaramanao	65 - 90	7 - 11	Albita, anortita, apatito, diópsido, hematina, wollastonita, Ilmenita, ortoclasa, cuarzo, esfena, X-magnesio
Tobas zeolitizadas San Andrés	50 – 90**	9 – 13**	Albita, anortita, apatito, diópsido, hematina, hyperstena, Ilmenita, ortoclasa, cuarzo, esfena, X-magnesio

4.3. Rendimientos y resistencias mecánicas

En las siguientes tablas, se ofrecen los resultados de los rendimientos y los ensayos mecánicos a la compresión por muestras preparadas con tobas naturales, a la edad de 28 días. Los patrones utilizados para establecer la comparación sustituyendo el 30% de cemento y el polvo de piedra por tobas, fueron extraídos del informe de la ENIA entregado a la ECOA-19 resultados de un proyecto en el 2010 basado en las normas cubanas NC.

Tabla 4.3. Rendimiento y resistencia mecánica sustituyendo el 30% del cemento

Código	**Material**	**Porcentaje de sustitución %**	**Rendimiento**	**Resistencia a la Compresión MPa 28 días**
-	NC	-	0,65	12,4
-	Patrón con AA	-	0,64	16,7
-	Patrón con AB	-	0,55	13,2
T-1	Tobas zeolitizadas San Andrés	30	0,65	8,2
T-2	Tobas vítreas Guaramanao	30	0,67	8,5
T-3	Tobas zeolitizadas San Andrés	30	0,58	5,6
T-4	Tobas vítreas Guaramanao	30	0,60	5,5

Tabla 4.4. Rendimiento y resistencia mecánica sustituyendo el polvo de piedra para mortero grueso

Código	Material	Rendimiento	Resistencia a la Compresión MPa 28 días
-	NC	0,65	5,2
-	Patrón con AA	0,62	5,0
-	Patrón con AB	0,54	4,3
T-5	Tobas zeolitizadas San Andrés	0,60	4,2
T-6	Tobas vítreas Guaramanao	0,72	4,5
T-7	Tobas zeolitizadas San Andrés	0,61	4,0
T-8	Tobas vítreas Guaramanao	0,75	3,7

Tabla 4.5. Rendimiento y resistencia mecánica sustituyendo el polvo de piedra para mortero fino

Código	Material	Rendimiento	Resistencia a la Compresión MPa 28 días
-	NC	0,65	5,2
-	Patrón con AA	0,64	4,0
-	Patrón con AB	0,59	5,8
T-9	Tobas zeolitizadas San Andrés	0,55	3,0
T-10	Tobas vítreas Guaramanao	0,76	3,9
T-11	Tobas zeolitizadas San Andrés	0,53	3,2
T-12	Tobas vítreas Guaramanao	0,76	3,8

Los resultados de las pruebas de las resistencias mecánicas son de gran importancia para las posibles aplicaciones y control de la calidad de los cementos y morteros, principalmente la resistencia a la compresión, la cual puede ser utilizada como criterio principal para seleccionar el tipo de

mortero, pues 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.

Rendimiento

Como se puede observar en los gráficos representados en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 existe un aumento del rendimiento en algunos casos con respecto a los patrones a la edad de 28 días de los morteros ensayados.

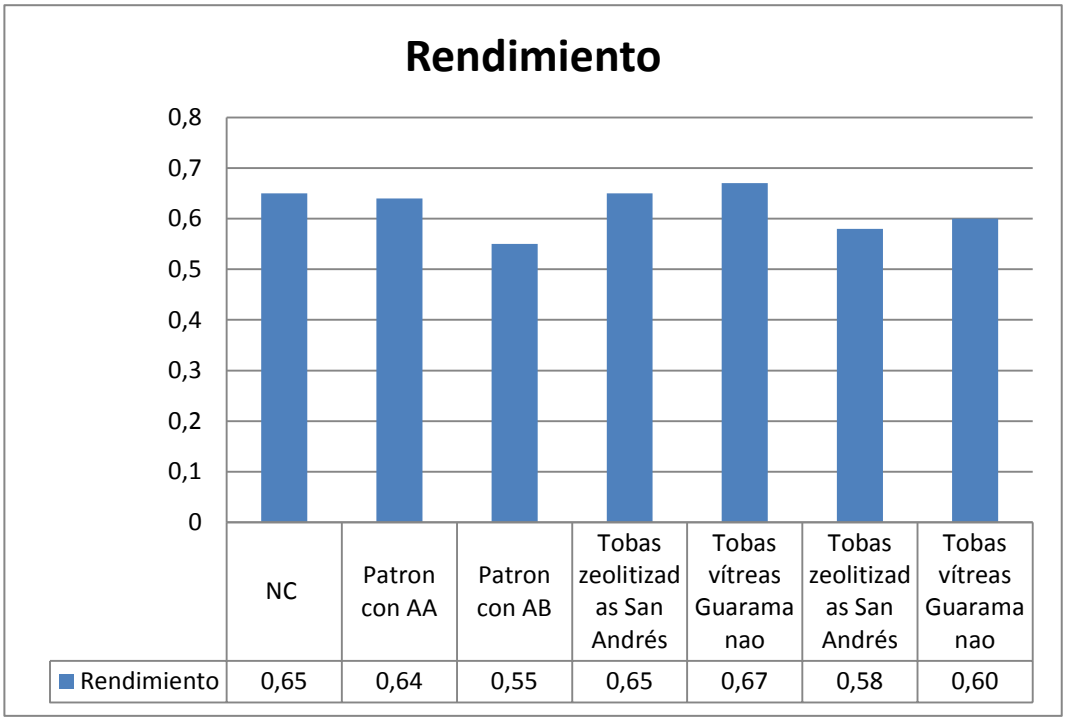


Figura. 4.3. Rendimiento de los materiales tobáceos sustituyendo el 30% del cemento y patrones de referencia

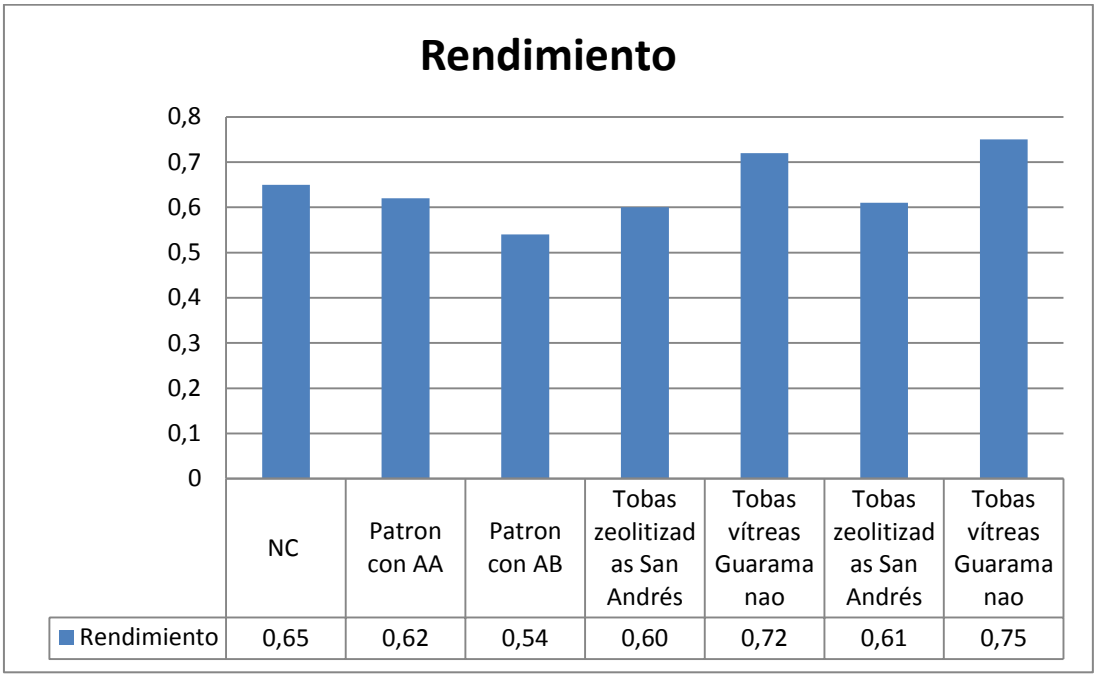


Figura. 4.4. Rendimiento de los materiales tobáceos sustituyendo el polvo de piedra y patrones de referencia para mortero grueso

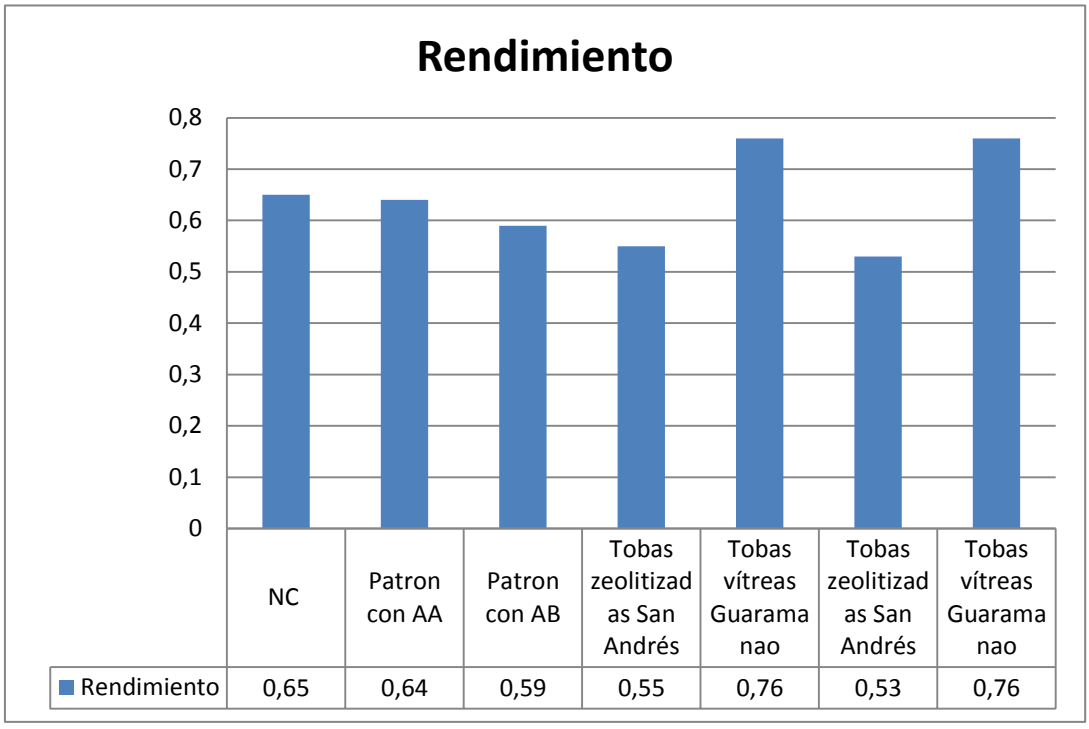


Figura. 4.5. Rendimiento de los materiales tobáceos sustituyendo el polvo de piedra y patrones de referencia para mortero fino

Resistencia a la compresión

En las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión de los morteros con adición de tobas naturales, y los patrones de referencia. Se puede observar que la resistencia a la compresión de los morteros con adición de tobas naturales en sustitución del 30% cemento no alcanzan resistencias superiores a las normas y patrones, pero si oscilan entre los valores 12,5 y 3,2 MPa que son las resistencias a la compresión mínimas alcanzadas a la edad de 28 días y se pueden utilizar como morteros de albañilería. Según investigaciones anteriores la resistencia mecánica aumenta en el tiempo y alcanza una mayor velocidad de recuperación que la mezcla convencional (Almenares 2011).

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 cemento 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).

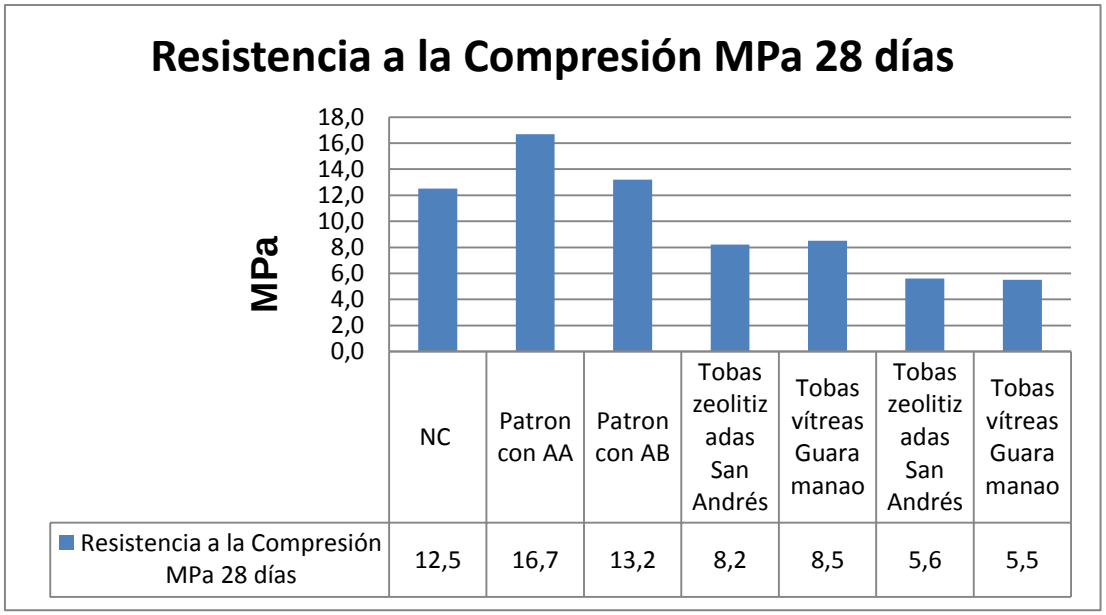


Figura. 4.6. Resistencia a la compresión de los materiales tobáceos sustituyendo el 30% del cemento y patrones de referencia

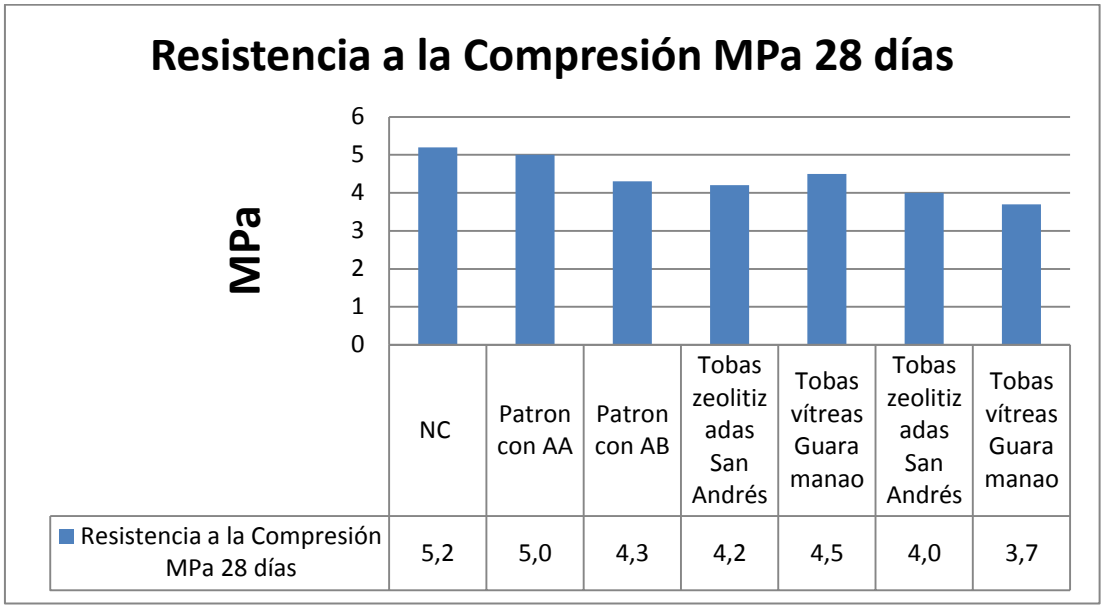


Figura. 4.7. Resistencia a la compresión de los materiales tobáceos sustituyendo el polvo de piedra y patrones de referencia para mortero grueso

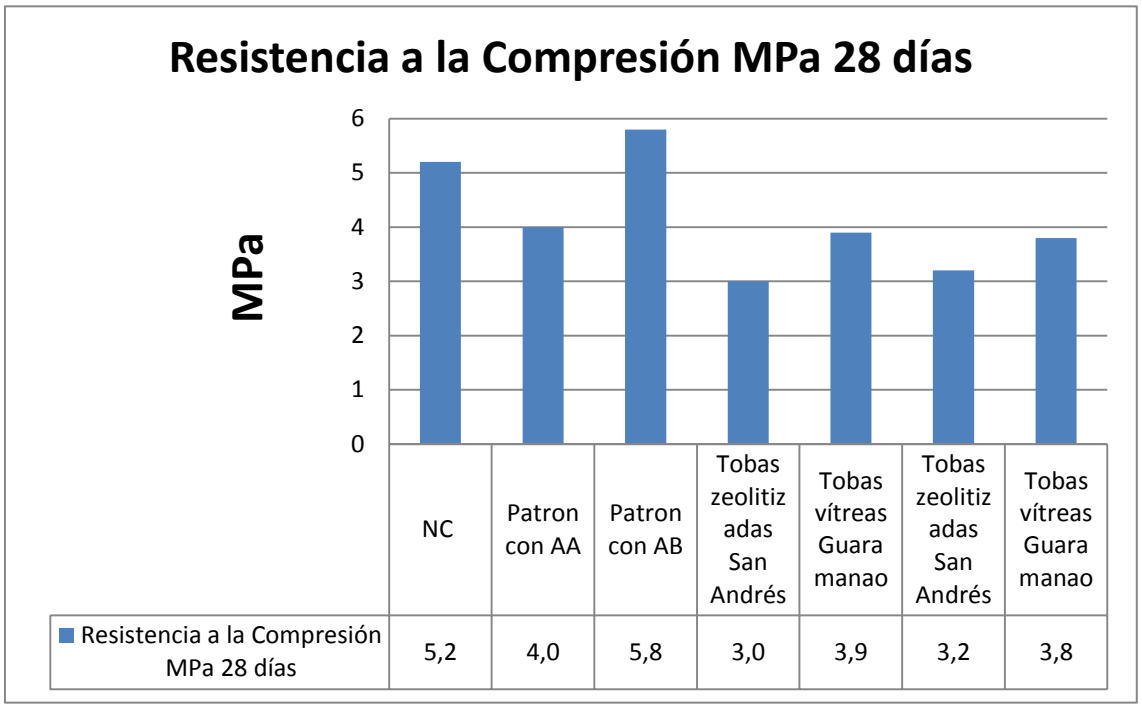


Figura. 4.8. Resistencia a la compresión de los materiales tobáceos sustituyendo el polvo de piedra y patrones de referencia para mortero fino

Figura 4.9. Prensa hidráulica

4.4. Análisis de las perspectivas de utilización de los materiales estudiados, como aditivos puzolánicos

4.1.1 Evaluación del índice de puzolanidad

En la tabla 4.9 se representan los valores de los diferentes índices de actividad resistente por muestras de morteros, en relación al valor de resistencia mecánica a la compresión del mortero patrón para la edad de ensayo.

Se debe destacar que la reacción puzolánica prevalece en el tiempo, mucho después de los períodos normales de fraguado (hasta 28 días), es decir, mientras se produzca hidróxido de calcio la acción inhibidora de la puzolana persiste, por lo que se puede considerar un proceso de larga duración. Según Campolat et al. (2003), en el aspecto práctico, este proceso es beneficioso, pues con la neutralización del $Ca(OH)_2$ 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 4.9. Índice de puzolanidad de los materiales tobáceos

Código	Morteros	Índice de Puzolanidad
		28 días
T-1	Tobas zeolitizadas San Andrés	70,83
T-2	Tobas vítreas Guaramanao	66,12
T.3	Tobas zeolitizadas San Andrés	44,35
T-4	Tobas vítreas Guaramanao	45,16

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.

A pesar de que las normas no especifican la estructura y la morfología que deben tener estos materiales, Gener (2002); Valdez (2004), se han demostrado su influencia sobre la actividad puzolánica.

La composición química, al parecer no tiene incidencia significativa en la diferencia de la actividad puzolánica de los materiales tobáceos analizados debido a que presentan una composición similar. Entiéndase que lo que si pudiera determinar esta diferencia es la forma en que se encuentran los compuestos químicos.

El análisis conduce a plantear que la diferencia en la actividad puzolánica de los morteros elaborados con los dos materiales tobáceos, podría estar dada por el contenido de agua de la mezcla y composición granulométrica.

4.5. Valoración socioeconómica y ambiental

El presente trabajo constituye un paso muy importante para el desarrollo de nuevos materiales, que a pesar de haber sido estudiados no obedecen a un trabajo de valoración que permita orientar su desarrollo de acuerdo con las condiciones establecidas para su uso.

Las puzolanas como aditivos son de vital importancia dentro de la industria del cemento, pues 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 de cemento presenta altos consumos de energía, tanto eléctricas como de portadores energéticos (combustibles), el consumo anual de las seis fábricas con las que cuenta el país, están en alrededor de 240 000 MW·h y 250 000 t de combustible. De acuerdo a las operaciones y procesos involucrados en la obtención de cemento se establece el balance de consumo energético que se muestra en la tabla 4.10.

La implantación industrial de la producción de materiales puzolánicos de los yacimientos analizados en este trabajo, sería necesario únicamente, una operación de clasificación, para el control estricto del tamaño de las partículas, 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_2, SO_2 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 4.10. Balance de consumo de energía eléctrica de las empresas cubanas de cemento. Fuente: Inspección estatal energética, 2000

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

Tabla 4.11. Precios tobas zeolitizadas y víteras -0,8 mm

Material	u/m	Precio MN	Precio CUC	Precio Total
Zeolita -0,8 mm a granel	T	18,30	23,60	41,90
Zeolita -0,8 mm a secado en vasado	T	17,56	34,24	51,80
Vidrio -0,8 mm a granel	T	19,50	25,65	45,15
Vidrio -0,8 mm a secado en vasado	T	18,45	35,30	53,75

Tabla 4.12. Precios del cemento P-350, arena artificial, arena de mina y polvo de piedra

Material	u/m	Precio MN	Precio CUC	Precio Total
Polvo de piedra	m^3	13,55	9,52	23,07
Cemento a granel	T	123,86	-	123,86
Arena de Buenaventura	m^3	11,98	8,83	20,81
Arena del 200 Mil	m^3	16,24	9,38	25,62

Si se tiene en cuenta que la ECOA-19 de Holguín que consume 1 716 toneladas de cemento anualmente e invertir en la compra de cemento 212 537 CUP, en la siguiente tabla con los beneficios generados.

Tabla 4.13. Beneficios generados por la sustitución de tobas por cemento

CM	CA	AAC	Costo del cemento			CAZS	CAVS	AEASZ	AEASV
			Mensual	Anual	Ahorrado				
143	1.716	515	17.711	212.537	63.761	21.570	23.243	42.191	40.518

Leyenda:

CM: Consumo Mensual de cemento.

CA: Consumo Anual de cemento.

AAC: Ahorro del 30% Anual de Cemento.

CAZS: Costo Anual de la Zeolita en Sustitución.

CAVS: Costo Anual del Vidrio en Sustitución.

AEASZ: Ahorro Económico Anual por Suministro de Zeolita.

AEASV: Ahorro Económico Anual por Suministro de Vidrio.

De forma general los resultados son alentadores, de ahí la necesidad de continuar el estudio de estos materiales y fundamentar la viabilidad económica de una tecnología de explotación y procesamiento.

Otro impacto económico lo constituye el uso de estos materiales alternativos por el polvo de piedra, por no contar con la disponibilidad de este recurso y que está en precios aproximados a los de los aglomerantes propuestos.

El empleo de las tobas vítreas y zeolitizadas 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 y de las grandes ciudades, contribuye al desarrollo de nuevas producciones de la Industria Local, a 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. Y basado en las propiedades de estas materias primas de ser aislantes térmicos y acústicos, contribuiría al mejoramiento de la calidad de vida de las personas.

CONCLUSIONES

- Al sustituir el 30 % de cemento con material tobáceo se obtienen morteros cuyas resistencias son suficientes para su utilización en aplicaciones de albañilería.
- Al sustituir todo el árido fino por tobas vítreas y zeolitizadas se obtuvo un mortero que cumple con las especificaciones normalizadas para su utilización en labores de albañilería.
- Se obtuvo un catálogo de dosificaciones listo para realizar la corrección industrial e implementar en obras.

RECOMENDACIONES

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

- Investigar acerca de la posibilidad de utilizar las tobas vítreas y zeolitizadas como aglomerante cal – puzolana y yeso – puzolana.
- Analizar el comportamiento de diferentes dosificaciones de estos materiales como aditivos en la producción de morteros.
- Estudiar el comportamiento de diferentes dosificaciones de estos materiales en sustitución del cemento para la obtención de hormigón en la fracción 0,8 mm.

BIBLIOGRAFÍA

ALMENARES, R. 2011. *Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como aditivo puzolánico.* Instituto Superior inero Metalúrgico. Moa : s.n., 2011.

ASTM_C–311. 2008. *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Pórtland-Cement Concrete.* 2008.

ASTM_C–618. 2008. *Standard Specification for coal fly ash and raw or calcinaned Natural Pozzolan for use as mineral admixture in Concrete.* 2008.

CABRERA, M. R. 2010. *Valoración de las tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín para su utilización como puzolana natural en la construcción.* Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2010. p. 40.

CALVO, B. and ESTÉVEZ, E. y COSTAFREDA, J. L. 2005. *Estudio de las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España.* 2005. V Congreso Ibérico de Geoquímica. Memorias. España.

COSTAFREDA, J. L. and CALVO, B. y PARRA, J. L. 2011. *Criterios para el aprovechamiento de tobas dáciticas en la sustitución de cemento Pórtland en morteros y hormigones.* 2011.

COSTAFREDA, J. L. and ROSELL, M. y CALVO, B. 2009. *Estudio del comportamiento puzolánico de algunas zeolitas de Iberoamérica empleando el método de la conductividad eléctrica.* 2009.

COSTAFREDA, J. L. 2011. *Granulometría y reacción puzolánica.* La Habana : s.n., 2011. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2011..

COSTAFREDA, J. L. y CALVO, B. 2007. *Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución del fraguado de morteros de cemento.* s.l. : Industria y Minería, 2007. p. 20. 371.

DAY, ROBERT L. Y SHI, CAIJUN. 1994. *Effect of initial water curing on the hydration of cements containing natural pozzolan. Cement and Concrete Research .* 1994.

DE ARMAS, J. 2006. *Reevaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo como puzolanas naturales.* Instituto Superior Minero Metalúrgico. . Moa : s.n., 2006. p. 70, Trabajo de Diploma. .

ENIA. 2010. *Dosificaciones de morteros para albañileria con cemento P-350 y la utilización de áridos procedentes de las plantas productoras Buenaventura, Pilón y 200 Mil.* Holguín : s.n., 2010.

HERRERA H, J. 2007. *Diseño de explotación de canteras.* Universidad Politécnica de Madrid. Madrid : s.n., 2007.

M., GAYOSO R. Y ROSELL. 2003. *Zeolita utilizada como aditivo mineral activo para hormigones. .* Universidad de La Habana. La Habana : s.n., 2003.

NC_170-2002. *Mortero fresco. Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas.*

NC_173-2002. *Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión.*

NC_175-2002. *Mortero de albañilería. Especificaciones.*

NC_178-2002. *Áridos. Análisis granulométrico.*

NC_251-2005. *Áridos para hormigones hidráulicos—requisitos.*

NC_54–207-1980. *Cemento. Ensayo físico – mecánicos.*

NC_TS_527-2007. *Cemento hidráulico. Método de ensayo. Evaluación de las puzolanas.*

PÉREZ, R. Y. 2006. *Características geológicas y perspectivas de utilización como material de construcción del vidrio volcánico del sector Guaramanao, San Andrés, Municipio Calixto García.* Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2006. p. 62, Trabajo de Diploma.

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

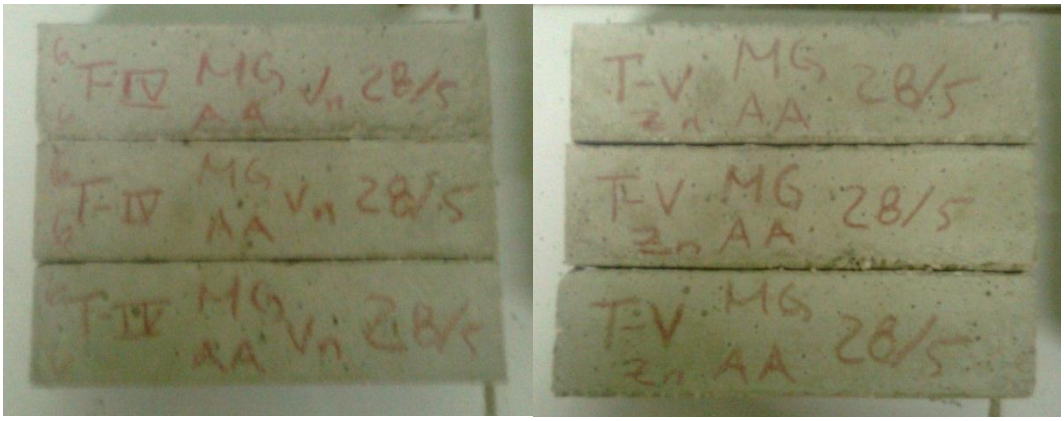
ROSELL, M. 2006. *Zeolitas naturales cubanas. Reactividad puzolánica. Uso en adiciones para hormigones.* 2006. p. 123.

TAPIA, M. E. 2003. *Valoración de la gestión geominera ambiental en el yacimiento Zeolita San Andrés.* Instituto Superior Minero Metalúrgico . 2003. p. 70, Tesis de Maestría.

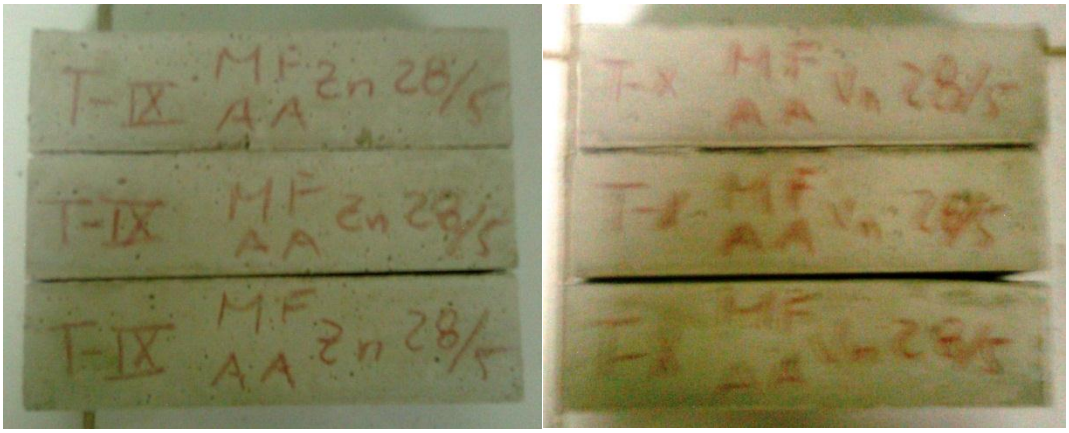
ANEXOS

Anexo 1. Morteros con sustitución del 30% del cemento por Zeolita y Vidrio Volcánico, arena del "Molino Doscientos Mil"

Anexo 2. Morteros con sustitución de polvo de piedra por Zeolita y Vidrio Volcánico en mortero grueso, arena del "Molino Doscientos Mil"

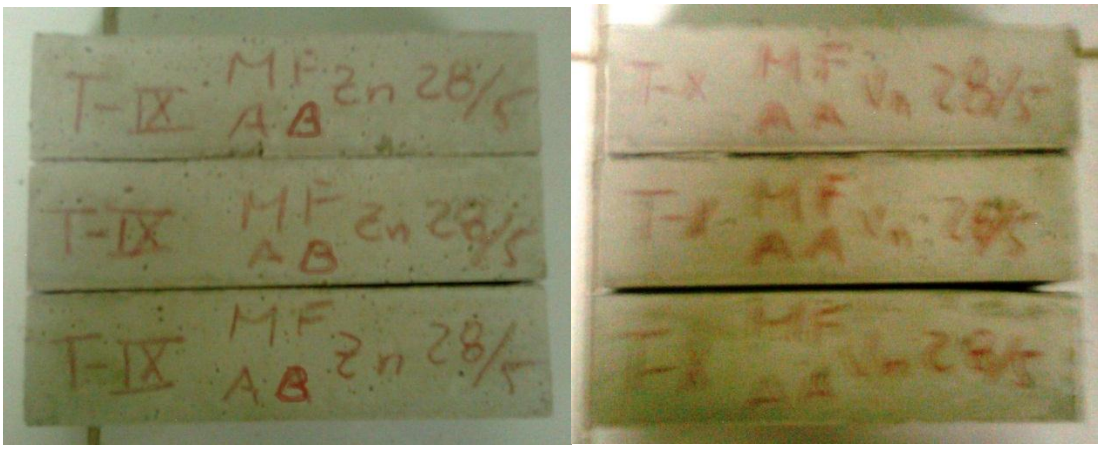


Anexo 3. Morteros con sustitución de polvo de piedra por Zeolita y Vidrio Volcánico en mortero fino, arena del "Molino Doscientos Mil"



Anexo 4. Morteros con sustitución del 30% del cemento por Zeolita y Vidrio Volcánico, arena de las "Parras"

Anexo 5. Morteros con sustitución de polvo de piedra por Zeolita y Vidrio Volcánico en mortero grueso, arena de las "Parras"



Anexo 6. Morteros con sustitución de polvo de piedra por Zeolita y Vidrio Volcánico en mortero fino, arena de las "Parras"

Anexo 7. Composición mineralógica cuantitativa de las fases cristalinas de las tobas analizadas

Tobas Guaramanao		Tobas San Andrés	
Fases minerales	**Contenido, %**	**Fases minerales**	**Contenido, %**
Albita	22,68	Albita	14,41
Anortita	14,97	Anortita	25,00
Apatito	0,14	Apatito	0,19
Diópsido	7,47	Diópsido	0,59
Hematita	2,98	Hematita	3,00
Wollastonita	0,05	Hyperstena	7,21
Ilmenita	0,19	Ilmenita	0,11
Ortoclasa	16,42	Ortoclasa	11,25
Cuarzo	34,38	Cuarzo	37,15
Esfena	0,73	Esfena	1,09
X-Magnesio	1,00	X-Magnesio	1,00

Anexo 8. Composición química cuantitativa de los elementos trazas

Elementos	Contenido, ppm	
	Tobas Guaramanao	**Tobas San Andrés**
Ba	827	762
Ce	47	
Co	4,6	
Cr	4,6	46
Cu	57,3	39
La	19,5	
Nb	9,2	7,1
Ni	16	100
Ga	18	15
Pb	19	26
Pr	2,3	
Sr	151	414
Th	3,4	5,9
V	25	53
Y	42	36
Zr	256	207
Zn	86	68
U	8,0	

Anexo 9. Recomendaciones para morteros de colocación

Fuente: NC 175 Morteros de albañilería 2000

Dosificaciones generales y propiedades de los morteros de albañilería.

Tipos de morteros	R_c 28 días (MPa)	A_{dh} 28 días (MPa)	Cementos			Arena	Hidrato de cal
I	2,4	0,15 ± 0,05	1			8	2
				1		6	2
					1	4	1,5
II	3,5	0,25 ± 0,05	1			6	2
				1		5	1
					1	4	1
III	5,2	0,40 ± 0,05	1			4	2
				1		4	1
					1	3	1
IV	8,9	0,50 ± 0,05	1			4	1
				1		4	0,5
					1	3	0,5
V	12,4	0,65 ± 0,05	1			3	1
				1		3	0,5
					1	2,5	-

Espesor de recubrimiento recomendado.

Revestimiento	Espesor (mm)
Pared interior	5 – 20
Pared exterior	20 – 30
Techos	20

Lugar de colocación de morteros

Lugar de colocación			R_c 28 días (MPa) valor mínimo		Relación agua (%) valor mínimo
			Recomendada	Alternativo	
Exterior	Sobre el nivel del terreno	Muro portante	III	IV - V	90
		Muro no portante	I	II - III	
		Antetecho	III	IV - V	
	Bajo el nivel del terreno	Muro de fundición	V	IV > V	90
		Muro de contención			
		Pavimentos, caminos y patios			
Interior		Muro portante	III	IV - V	90
		Muro no portante	I	II - III	

Anexo 10. Resistencia a la compresión a la edad de los 28 días de los morteros para diferentes actividades de albañilería

Usos	Resistencia mínima a la compresión. 28 días (MPa)
Muro portante bloque o ladrillo	3,5 a 5,2
Tabiques: Muros de cierre de bloque o ladrillo	
REVESTIMIENTO DE MUROS	
Resano	3,5 a 5,2
Fino	2,4 a 5,2
ENCHAPES	
Azulejos	5,2
Losetas hidráulicas	3,5
Baldosas de terrazo	3,5
Piezas de cerámica	5,2
Piedra natural	12,4
Pisos de mortero	12,4
ENLUCIDOS	
Cisternas y tanques	12,4
COLOCACIÓN DE PISOS	
Losetas hidráulicas	2,4
Baldosas de terrazo	3,5
Gress cerámico	12,4
Piedra natural	3,5 a 5,2
Azulejos	5,2
OTROS MORTEROS	
Salpicado	5,2
Rustico en paredes	5,2
Arenado	3,5
Colocación de carpintería de madera o hierro	5,2
Junta de tubo de hormigón o asbesto	5,2
Revestimiento de tubería plástica en pisos	5,2
Protección de tubería plástica, galvanizada y de cobre en pared	3,5
Junta de elementos prefabricados	12,4

Anexos 11. Dosificaciones patrones utilizadas

Código	Dosificación	Cemento	Arena 200 mil	Polvo 200 mil	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
1-A Grueso 4.76mm	Gravimétrica (Kg/m^3)	197.0	1179.0	713.0	286.0	187.0	0.62	5.0
	Volumétrica (m^3/m^3)	0.146	0.730	0.438	0.286			
	Proporciones	1	5	3	2			

Código	Dosificación	Cemento	Arena Buenaventura	Polvo 200 mil	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
2-A Grueso 4.76mm	Gravimétrica (Kg/m^3)	250.0	1097.0	602.0	370.0	200.0	0.54	4.3
	Volumétrica (m^3/m^3)	0.185	0.925	0.370	0.370			
	Proporciones	1	5	2	2			

Código	Dosificación	Cemento	Arena 200 mil	Polvo 200 mil	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
4-A Fino 2.38mm	Gravimétrica (Kg/m^3)	215.0	514.0	1293.0	286	192.0	0.64	5.0
	Volumétrica (m^3/m^3)	0.159	0.318	0.795	0.286			
	Proporciones	1	2	5	1.8			

Código	Dosificación	Cemento	Arena Buenaventura	Polvo 200 mil	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
5-A Fino 2.38mm	Gravimétrica (Kg/m^3)	222.0	389.0	1334.0	295.0	200.0	0.59	4.0
	Volumétrica (m^3/m^3)	0.164	0.328	0.820	0.295			
	Proporciones	1	2	5	1.8			

Código	Dosificación	Cemento	Arena 200 mil	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
8-A Grueso 4.76mm	Gravimétrica (Kg/m^3)	398.0	1484.0	337.0	191.0	0.64	16.7
	Volumétrica (m^3/m^3)	0.306	0.918	0.337			
	Proporciones	1	3	1.1			

Código	Dosificación	Cemento	Arena Buenaventura	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
9-A Grueso 4.76mm	Gravimétrica (Kg/m^3)	446.0	1220.0	446.0	195.0	0.55	13.2
	Volumétrica (m^3/m^3)	0.343	1.129	0.446			
	Proporciones	1	3	1.3			

Anexos 12. Dosificaciones obtenidas sustituyendo el cemento y el polvo de piedra

Código	Dosificación	Cemento	Arena 200 mil	Toba zeolitizada natural	Agua	Fluidez(mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-1 Grueso 4.76mm	Proporciones	1	3	0,43	1,3	193.0	0.67	8.5
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,259	0,778	0,111	0,337			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	271.0	1230.0	172.0	337.0			

Código	Dosificación	Cemento	Arena 200 mil	Toba vítrea natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-2 Grueso 4.76mm	Proporciones	1	3	0,43	1,2	198	0,65	8.2
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,276	0,829	0,119	0,331			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	289.0	1311.0	90.0	331.0			

Código	Dosificación	Cemento	Arena Buenaventura	Toba zeolitizada natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-3 Grueso 4.76mm	Proporciones	1	3	0,43	1,3	195	0,60	5.5
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,289	0,866	0,124	0,375			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	302.0	1162.0	192.0	375.0			

Código	Dosificación	Cemento	Arena Buenaventura	Toba vítrea natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-4 Grueso 4.76mm	Proporciones	1	3	0,43	1,3	185	0,58	5.6
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,300	0,900	0,129	0,390			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	314.0	1208.0	98.0	390.0			

Código	Dosificación	Cemento	Arena 200 mil	Toba zeolitizada natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-5 Grueso 4.76mm	Proporciones	1	5	3	2,9	197	0,72	4.5
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,116	0,579	0,347	0,336			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	121	916	536	336			

Código	Dosificación	Cemento	Arena 200 mil	Toba vítrea natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-6 Grueso 4.76mm	Proporciones	1	5	3	1,9	182	0,60	4.2
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,153	0,765	0,459	0,291			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	160	1210	350	291			

Código	Dosificación	Cemento	Arena Buenaventura	Toba zeolitizada natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-7 Grueso 4.76mm	Proporciones	1	5	3	3,9	187	0,75	3.7
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,103	0,517	0,310	0,403			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	108	693	479	403			

Código	Dosificación	Cemento	Arena Buenaventura	Toba vítrea natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-8 Grueso 4.76mm	Proporciones	1	5	3	3,2	195	0,61	4.0
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,135	0,675	0,405	0,432			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	141	905	308	432			

Código	Dosificación	Cemento	Arena Buenaventura	Toba vítrea natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-9 Fino 2.38mm	Proporciones	1	2	5	1	192	0,76	3.8
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,113	0,227	0,567	0,113			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	119	173	876	119			

Código	Dosificación	Cemento	Arena 200 mil	Toba zeolitizada natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-10 Fino 2.38mm	Proporciones	1	2	5	2,8	195	0,55	3.9
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,168	0,335	0,838	0,469			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	175.0	530.0	1293.0	469.0			

Código	Dosificación	Cemento	Arena 200 mil	Toba vítrea natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-11 Fino 2.38mm	Proporciones	1	2	5	3,7	185	0,76	3.0
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,113	0,225	0,563	0,417			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	118.0	302.0	869.0	417.0			

Código	Dosificación	Cemento	Arena Buenaventura	Toba zeolitizada natural	Agua	Fluidez (mm)	Rendimiento	Resistencia compresión (MPa) 28 Días
T-12 Fino 2.38mm	Proporciones	1	2	5	3,2	193	0,53	3.2
	Volumétrica (m^3/m^3)	0,167	0,334	0,835	0,534			
	Gravimétrica (Kg/m^3)	175.0	448.0	1289.0	534.0			