



**Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia**

PERSPECTIVAS DE UTILIZACIÓN DE TOBAS VÍTREAS Y ZEOLITIZADAS DE LA PROVINCIA HOLGUÍN COMO ADITIVO PUZOLÁNICO

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN METALURGIA

Roger Samuel Almenares Reyes

Moa

2011



**Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia**

PERSPECTIVAS DE UTILIZACIÓN DE TOBAS VÍTREAS Y ZEOLITIZADAS DE LA PROVINCIA HOLGUÍN COMO ADITIVO PUZOLÁNICO

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN METALURGIA

Autor: Roger Samuel Almenares Reyes

Firma.....

Tutor: Dr. C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez

Firma.....

Moa

2011

A mis padres

A mi hijo

A mis Hermanas

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente:

A mi tutor Dr. Carlos Alberto Leyva Rodríguez por su constancia a pesar de su lejanía, por haber sido la fuente de donde surgió este trabajo y por la confianza que ha depositado en mí para la realización del mismo.

A los profesores del departamento por su apoyo y confianza depositada en mí, y en especial al Dr. C Armín Mariño Pérez, por su ayuda desinteresada, y su preocupación por mostrar un trabajo con la mayor calidad.

A mis padres, a mis hermanas, a mis tíos, a mis sobrinas y sobrinos, a mis primos. A mi gran familia.

A mis compañeros y amigos, Orleydis, Yunior, Yennis, Arlenys, Lianis, que realmente me han brindado su apoyo en todos estos años.

A mi entrañable amiga Carmen, por sus consejos, sus regaños y por dejar a un lado lo suyo para apoyarme y ayudarme.

Al amigo Yurislely por su ayuda siempre desinteresada, por privarse de comodidades para ayudarme a resolver mis problemas.

A mis compañeros y amigos de cuarto, por soportar con paciencia mis locuras desestresantes.

A mis diplomantes, por el conocimiento mutuo de las premisas de una investigación.

A alguien muy especial, a mi hijo, por ser la fuerza motriz de las cosas buenas.

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

Muchas gracias.

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

RESUMEN

Se determinaron las propiedades puzolánicas de los materiales tobáceos de los yacimientos Sagua de Tánamo, Guaramanao, Caimanes y San Andrés, para evaluar las perspectivas de su utilización como puzolanas naturales, según los parámetros de calidad normalizados, al sustituir el cemento Pórtland con dos porcentajes diferentes: 15 y 30 % en peso. Se realizó una caracterización, basada en la determinación de la composición química, por el método de fluorescencia de rayos X, la caracterización granulométrica mediante un analizador de tamaño de partículas, la caracterización mineralógica por difracción de rayos X y la determinación del índice de actividad puzolánica a través de los ensayos de resistencia a la compresión de morteros a partir del método indicado en las normas para tales especificaciones. Esto permitió determinar que los morteros elaborados con adiciones de 15 % de tobas vítreas y zeolitizadas, poseen un índice de actividad puzolánica resistente con cemento Pórtland superior a 75 % a los 7 y 28 días de ensayo. Los morteros con adición de 30 %, aunque no alcanzan la actividad puzolánica adecuada, sus valores de resistencia superan los establecidos para los morteros de albañilería (NC 175: 2002); lo cual demuestra las perspectivas de los materiales empleados en la industria de materiales de construcción.

Palabras claves: actividad puzolánica, materiales de construcción, puzolanas, tobas.

ABSTRACT

ÍNDICE

PÁG.

INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	15
1.1. GENERALIDADES	15
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS	16
1.3. CEMENTO PÓRTLAND PUZOLÁNICO.....	21
1.3.1. Origen del término puzolana	23
1.3.2. Definición de puzolana	23
1.3.3. Clasificación de las puzolanas según su origen.....	24
1.3.4. Valoración de la puzolanidad.....	26
1.3.5. Actividad puzolánica.....	28
1.3.6. Utilización de las puzolanas	28
1.4. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	30
CONCLUSIONES PARCIALES	37
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
2.1. CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES TOBÁCEOS DE LA PROVINCIA HOLGUÍN	38
2.2. TOMA Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	40
2.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS ANALÍTICAS, EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN.....	42
2.3.1. Método utilizado en la investigación	42
2.3.2. Determinación de la composición granulométrica.....	43
2.3.3. Determinación de la composición química.....	44
2.3.4. Caracterización mineralógica	45
2.3.5. Pérdidas por ignición	46
2.3.6. Determinación del índice de actividad puzolánica con cemento Pórtland.....	47
2.3.6.1. Determinación de la resistencia mecánica	47
2.3.6.2. Preparación de los materiales para la conformación de los morteros	50
CONCLUSIONES PARCIALES	53
CAPÍTULO 3. RESULTADOS.....	54
3.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU ANÁLISIS	54
3.1.1. Caracterización granulométrica.....	54
3.1.2. Caracterización química.....	57
3.1.3. Composición mineralógica	60
3.1.4. Resistencias mecánicas.....	61

3.2. ANÁLISIS DE LAS PERSPECTIVAS DE UTILIZACIÓN DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS, COMO ADITIVOS PUZOLÁNICOS	66
3.2.1. <i>Evaluación del índice de puzolanidad</i>	66
3.2.2. <i>Análisis de los requisitos químicos y físicos para ser empleados como aditivo puzolánico</i>	70
3.2.3. <i>Valoración socioeconómica y ambiental</i>	72
CONCLUSIONES PARCIALES	76
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	80
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

En Cuba, la situación de la vivienda, junto a la necesidad de desarrollar otras obras sociales es una problemática que crece gradualmente; visto principalmente por el deterioro constante de las existentes y el azote de fenómenos naturales que sin duda, han puesto en desventaja las posibilidades de una respuesta rápida a tal problema, debido a la notable escasez de materiales de construcción a partir de las fuentes ya identificadas.

Una manera de compensar este déficit es mediante el aprovechamiento de potencialidades nacionales para la obtención de aditivos, que permitan incrementar los volúmenes y en la medida de lo posible la calidad del cemento.

Esto ha conllevado a que, a pesar de ser una práctica antigua, en la actualidad el desarrollo de los materiales puzolánicos para diversas aplicaciones dentro del ciclo que abarca la industria de la construcción, es decir, la fabricación de cementos, morteros, hormigones, entre otros, ha adquirido una relevante importancia.

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 cementicio; 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 propiedades cementicias.

Las puzolanas son clasificadas generalmente, según su origen, como 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 de alto horno se pueden contar como materiales puzolánicos artificiales.

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 cierto porcentaje del cemento Pórtland, por puzolanas.

Según Davis (1954); Mather (1982); González (1991) y Howland et al. (2006), estas adiciones confieren al cemento y al hormigón propiedades de gran importancia práctica, principalmente cuando se trata de lograr una mayor estabilidad química y por tanto una mayor durabilidad.

Los trabajos de Lea (1938, 1940, 1954), así como de Soria (1967), Massazza (1974), Calleja (1966 y 1969), Turriziani (1974), Sousa (1959) y Malquori (1960), han confirmado la racionalidad de aprovechar en la práctica las propiedades puzolánicas de algunos materiales. Lo anterior se encuentra determinado, por el bajo costo de las operaciones a las que deben ser sometidas las puzolanas de origen natural, hasta adquirir la forma adecuada para su utilización en la práctica industrial. Por otra parte, cuando los materiales puzolánicos son subproductos y desechos de la industria, su empleo constituye una salida de importancia económica y ambiental.

En Cuba han realizado estudios al respecto, Muñoz y Rabilero (1975), Coutin et al. (1975), Rabilero (1988), Rosell y Gayoso (2001), Gayoso y Rosell (2003); quienes han encontrado puzolanas de excelentes cualidades, aptas para su empleo en la industria del cemento.

La industria del cemento es particularmente susceptible a las características de las materias primas, pues de ellas depende el tipo y propiedades del cemento producido y la posibilidad de optimización del proceso de fabricación. La diversidad de aplicaciones que tiene el cemento en la actualidad hace que sea necesario elaborar productos que obedezcan a las distintas necesidades de resistencia mecánica y química, tiempos de fraguado, costos, entre otras. 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 Pórtland ordinario y puzolánico, que contribuyen a la conservación del medio ambiente, al reducir la emisión de gases nocivos como CO_2 y SO_2 , ya que no es necesario someter la materia prima (puzolana) a la tostación.

Poseen propiedades puzolánicas los materiales con un elevado contenido de componentes ácidos como la sílice, la alúmina y el óxido férrico, con una estructura desordenada o amorfa capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento. Las tobas vítreas y zeolitizadas son rocas volcánicas que poseen altos contenidos de estos compuestos. Esta propiedad, junto a ser finamente divididas, las hace candidatas para su utilización como puzolana.

En Cuba han sido utilizadas, como aditivo para la producción de cementos mezclados 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 de la vivienda: el 40 % de las viviendas se encuentran en mal estado (Leyva et al. 2008), valor que se incrementó indudablemente con el paso del Huracán Ike. Esto ha conllevado a la necesidad de incrementar el ritmo de construcción, a pesar del déficit de materiales, particularmente de cemento, debido a que los centros productores se encuentran distantes de las fuentes de consumo.

Por otra parte se conoce que en esta provincia se cuenta con importantes yacimientos de tobas vítreas y zeolitizadas presentes, principalmente en los territorios de Sagua de Tánamo, Guaramanao, Caimanes y San Andrés, que en la actualidad no son aprovechados para estas aplicaciones. Lo anterior permite partir de la siguiente **situación problemática**: En la provincia Holguín no se aprovecha la disponibilidad de materiales con posibilidades de poseer propiedades puzolánicas, para compensar el déficit de materiales de construcción.

A nuestro juicio, el aprovechamiento de estos recursos naturales como aditivo mineral activo en la sustitución parcial del cemento, ha estado limitado, al menos en parte, porque no ha sido resuelto lo que en este trabajo, se declara como **problema de la investigación**: El insuficiente conocimiento acerca de las perspectivas de las tobas vítreas de los yacimientos Sagua de Tánamo y Guaramanao, y las tobas zeolitizadas de los yacimientos Caimanes y San Andrés, para ser utilizadas en calidad de puzolanas naturales mezcladas con cemento Pórtland.

Objeto de estudio

Actividad puzolánica de las tobas vítreas de los yacimientos Sagua de Tánamo y Guaramanao, y las tobas zeolitizadas de los yacimientos Caimanes y San Andrés.

Campo de acción

Propiedades puzolánicas de las tobas vítreas de los yacimientos Sagua de Tánamo y Guaramanao, y las tobas zeolitizadas de los yacimientos Caimanes y San Andrés.

Objetivo general

Determinar las propiedades puzolánicas de los materiales tobáceos de los yacimientos Sagua de Tánamo, Guaramanao, Caimanes y San Andrés, 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 preliminarmente las potencialidades de los materiales tobáceos de los yacimientos Sagua de Tánamo, Guaramanao, Caimanes 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 referidos materiales, se podrá llegar a conclusiones coherentes, 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 resistencia a la flexotracción, y a la compresión de los morteros con adición de tobas vítreas y zeolitizadas en varias proporciones, para encontrar el índice de actividad resistente.

Tareas de la investigación

- Recopilación y análisis de los trabajos relacionados con los materiales de construcción y puzolánicos, así como la exploración de la problemática mundial, nacional y local de los materiales de construcción.
- Preparación de las muestras; apoyado en la trituración, homogenización, molienda y cribado de las mismas.
- Caracterización de la materia prima desde el punto de vista granulométrico, químico y mineralógico y su comparación con los parámetros normalizados.
- Dosificación de las tobas vítreas y zeolitizadas en el cemento mezclado para la elaboración de morteros.
- Determinación del índice de actividad resistente a través de los ensayos de resistencias mecánicas de los morteros de tobas vítreas y zeolitizadas a los 7, 28, 60, 90 y 120 días.

- Valoración socioeconómica y ambiental.

Métodos de investigación

- Mediante el método histórico – lógico, se realizó el estudio del estado del arte sobre la valoración y el aprovechamiento de las tobas vítreas y zeolitizadas como puzolanas naturales, se logró determinar el alcance de la investigación, así como preseleccionar las principales tendencias de los factores más importantes, que intervienen en la actividad puzolánica de materiales con características potenciales para ser empleados como aditivos puzolánicos. (capítulo 1).
- A partir de los resultados de la tarea anterior, mediante el método lógico, seleccionar la metodología de tratamiento para la caracterización y determinación del índice de puzolanidad para la comprobación de la hipótesis científica planteada. (capítulo 2).
- Comprobar en el nivel de laboratorio los fundamentos teóricos, mediante el método experimental, el método lógico y el método de análisis - síntesis (capítulo 3).

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En el capítulo se realiza un análisis sobre los diferentes aspectos que se encuentran relacionados con los temas discutidos en la bibliografía consultada, 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 compactidad y el contenido de granos finos. Cuando 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 trabajable pero precisan más agua de amasado y de cemento.

El **agua** de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la estricta 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 de 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 Pórtland, por cuyo motivo se justifica centrar el interés en éste y en los cementos a que da lugar, entre ellos se pueden mencionar los cementos Pórtland simples, mezclados y expansivos.

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

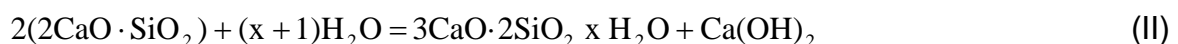
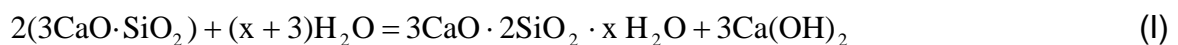
El nombre de cemento Pórtland está dado por su semejanza, una vez fraguado, con la famosa piedra caliza blanco-plateada que se extraía de unas canteras existentes en la pequeña península de Pórtland, en la costa sur del Condado de Dorset, en Inglaterra (Toraya, 1999). El cual se describe como un cemento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

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

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

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

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



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

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

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

Finura

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

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

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

Tiempo de fraguado

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

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

Consistencia

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

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

Según la prueba típica de expansión, una barra pequeña de pasta de cemento se coloca en una autoclave. La autoclave se regula a una presión aproximada de 2 MPa, y después se mantiene a esa presión por tres horas. Posteriormente se regulara 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 Pórtland es aproximadamente de 3,15. Las gravedades específicas de los cementos Pórtland de escoria de alto horno y los cementos Pórtland puzolánicos pueden ser más bajos, con valores de 2,90.

Calor de hidratación

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

Pérdida por ignición

La pérdida por ignición se determina a través de la pérdida de peso de una muestra de cemento después de 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 Pórtland Puzolánico.

1.3. Cemento Pórtland Puzolánico

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

Este aglomerante le concede baja resistencia mecánica, y su fraguado es algo más lento que el del cemento Pórtland 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 Pórtland, 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. Ya que esta adición retarda la ganancia temprana de resistencia, la fluencia específica de cementos puzolánicos es mayor que la de los Pórtland.

Resistencia

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

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 acápite.

1.3.1. Origen del término puzolana

Según ACI 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 celebres 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 Pórtland, principalmente tobermorita.

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

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

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 hallan 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 CO₂, 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 determinativa y los análisis complexométricos. La principal carencia de éstos es que no reproducen las condiciones reales en las que trabajará el material puzolánico.

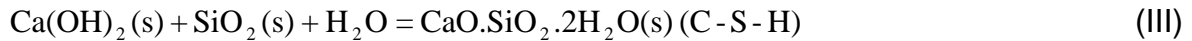
Físicos y Tecnológicos: Se elaboran probetas y se les hacen ensayos de resistencia a la tracción y a la compresión.

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 (I) que tiene lugar en estos sistemas es la que se describe a continuación:



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

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

1.3.6. Utilización de las puzolanas

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

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

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

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

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

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

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

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

En 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 Pórtland 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 interfase 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 Pórtland de alta resistencia inicial en morteros y hormigones. Los contenidos apreciables en sílice y en alúmina, los bajos contenidos en sulfato y materias orgánicas, y una molienda adecuada, entre otros, son las causas, al parecer, de la eficacia de este material a la hora de aportar valores apreciables de resistencias mecánicas a edades cercanas y superiores a los 28 días.

Costafreda 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 esmectitas que son singenéticas con la mordenita en los yacimientos zeolíticos españoles.

En el caso de las zeolitas de México y de Cuba, plantean los autores que puede deducirse su pureza a partir de la gran estabilidad de volumen y del tiempo de fraguado; asimismo, por las resistencias mecánicas elevadas que ofrecen sus probetas ante la compresión.

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

Por tal razón para la utilización de los materiales señalados anteriormente se hace necesaria la realización de pruebas que validen su utilización en los diferentes campos de aplicación.

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 Pórtland, 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 (González, 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 Pórtland 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 principales resultados de la investigación realizada se propone que la materia prima investigada puede ser empleada 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 Pórtland 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.

Conclusiones parciales

Con el estudio del estado de arte se observó lo siguiente:

- Las puzolanas representan un área de oportunidad de gran importancia para nuestro país, las tobas vítreas y zeolitizadas son los materiales de mayores perspectivas las cuales no son debidamente explotadas en la actualidad.
- Para evaluar las puzolanas se deben tener en cuenta diferentes parámetros como la granulometría, resistencias mecánicas adecuadas y la composición química. En este sentido se consideran de particular importancia los altos contenidos de SiO_2 ; Al_2O_3 y Fe_2O_3 y mínimos para los componentes alcalinos y alcalinotérreos.
- La adición de puzolana al cemento Pórtland le confiere propiedades de gran importancia práctica, como son: aumento de su estabilidad química y durabilidad, disminuye el calor de hidratación y la densidad, aumenta su porosidad y disminuye la permeabilidad, además de la disminución del contenido de la portlandita con el aumento de la formación del gel cementicio C-S-H.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar las potencialidades y perspectivas de utilización de las tobas vítreas y 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 de los yacimientos muestreados y los métodos utilizados para la evaluación de las materias primas se describen en los siguientes acápite.

2.1. Características de materiales tobáceos de la provincia Holguín

En el presente acápite se describen las características generales de los yacimientos de tobas objeto de estudio, a partir de los reportes de investigaciones geológicas realizadas.

Tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo

El yacimiento Sagua de Tánamo se localiza a 15 km al Este del la cabecera municipal de Sagua de Tánamo, en la localidad “El Picao”. Este material tobáceo, se caracteriza por ser vitroclástico y vitrocrystalocástico, de color blanco grisáceo, y granulometría fina a media, generalmente, abrasivo al tacto, poroso y ácido por su alto contenido de óxido de silicio. Contiene alrededor de 80 % de vidrio volcánico como promedio, y un 30 % aproximadamente de motmorillonita (Banderas et al., 1997).

Tobas vítreas del yacimiento Guaramanao

El yacimiento se encuentra ubicado a 9 km, al suroeste del poblado de San Andrés. 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. Generalmente las tobas del yacimiento Guaramanao presentan contenidos promedios de montmorillonita de 11,10 % y carbonato de calcio de 2,78 %. Estas tobas presentan bajo grado de alteración a minerales arcillosos, tal como lo demuestra el contenido de montmorillonita (Pérez, 2006).

Tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes

El yacimiento Caimanes se encuentra a 17 km, al suroeste de la ciudad de Moa, cerca del poblado Farallones. Las tobas zeolitizadas de este yacimiento están compuestas principalmente por zeolita del tipo Clinoptilolita - Heulandita cálcicas y ligeramente potásicas con contenidos que varían de 80 a 85 % aproximadamente, presenta cuarzo en forma de calcedonia y contenidos de montmorillonita con valores de hasta 13 y 14 %, mientras el óxido de hierro no llega a constituir fase mineralógica por su bajo contenido. Presenta vidrio volcánico amorfo no cristalizado (Frazao, 2007).

Tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés

El yacimiento está situado aproximadamente a 23 km al noroeste de la capital provincial y a 3 km al sur del poblado San Andrés, en el asentamiento poblacional conocido por Loma Blanca. Está constituido por una secuencia interestratificada variablemente inclinada de tobas vitroclásticas y vitrocrystaloclasticas zeolitizadas, de la formación Loma Blanca. Las tobas zeolitizadas del yacimiento son de color verde claro hasta blanco crema.

El contenido total de zeolita del yacimiento varía desde alrededor de 50 hasta más del 90 %. Las fases minerales que predominan son clinoptilolita - heulandita y mordenita. Sus aplicaciones fundamentales son: agrícolas, productos de consumo, ambientales e industriales (Tapia, 2003).

2.2. Toma y preparación de la muestra

Para la realización de la investigación las muestras fueron tomadas en las regiones de Caimanes (Farallones), Sagua de Tánamo (El Picao), San Andrés y Guaramanao (San Andrés). Para determinar la cantidad de material utilizado en cada caso se tuvo en cuenta la norma cubana correspondiente (NC 178 2002).

La muestra de tobas vítreas de Sagua de Tánamo y de tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes de la región de Farallones se tomaron mediante el método por puntos, que consistió en la toma de trozos típicos de la materia prima, con la ayuda de un martillo geológico. El método en cuestión es sencillo y confiable.

Las muestras fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño mediante dos etapas de trituración, cada una por separado. Donde en la primera etapa se utilizó la trituración por impacto de forma manual con una mandarina hasta lograr obtener fragmentos de 100 mm aproximadamente. Después de la trituración manual en que se obtienen tamaños máximos de 100 mm, se llevan a cabo dos etapas de trituración en trituradoras de mandíbulas (figura 2.1 y 2.2); las cuales tienen un diámetro de alimentación de 100 y 25 mm y de descarga de 25 y 4,76 mm, respectivamente. En la descarga de la segunda etapa del proceso de trituración se usó la operación de cribado de control con un tamiz de 3,15 mm. El material retenido en el tamiz es recirculado en la segunda etapa de trituración, y el cernido, con tamaño inferior a 3,15 mm, fue sometido a un proceso de molienda en un molino de bolas (figura 2.3) de 19,5 cm de diámetro interior y 24 cm de longitud para la obtención de las clases -0,09 mm; esta última fracción se utilizó para la elaboración de los morteros a los cuales se les realizó ensayos para la determinación de la resistencia mecánica.

La toma y preparación de las muestras experimentales, en el caso de las tobas vítreas del yacimiento Guaramanao y las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés, se realizó de forma diferente, ya que estos materiales se procesan para ser empleados para la obtención de polvo limpiador en el caso de las tobas vítreas, y en el caso de las tobas zeolitizadas como fertilizante y otros usos. La muestra fue

tomada en los lotes de producto final, en ambos casos se tomó en los centros de producción de estos materiales para garantizar un muestreo sin desviaciones. La muestra se compuso de tres partes, una tomada en la parte superior, otra en la parte media y la tercera en la parte inferior de la pila principal. Para facilitar el muestreo se empleó una tabla empujada verticalmente dentro de la pila, justamente bajo el punto de muestreo para evitar la posterior segregación. Se separó la capa exterior de la pila y se tomó la muestra de material existente bajo ella con la ayuda de un tubo muestreador de 30 mm de diámetro por 2 m de largo.

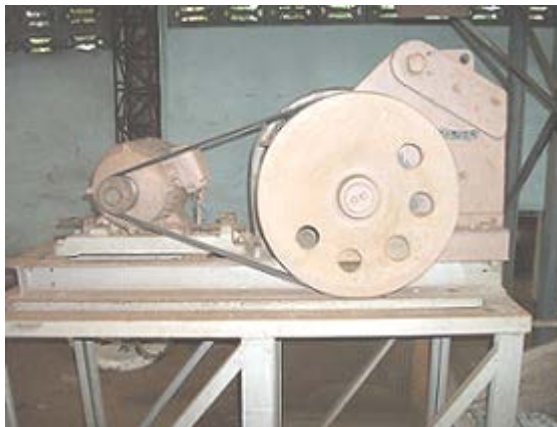


Figura 2.1. Trituradora de mandíbulas TQ (320x165)



Figura 2.2 Trituradora de mandíbulas TQ (150x75)



Figura 2.3. Molino de bolas

Las muestras de tobas vítreas del yacimiento Guaramanao y las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés, poseen tamaño de partículas menores de un milímetro, características que las hace aprovechables para la elaboración de los morteros; ya que más del 95 % del material pasa por este tamiz, solo se hace

necesario un proceso de cribado para la obtención de fracciones de tamaño por debajo de 0,09 mm.

Las arenas empleadas para la elaboración de los morteros con material de Sagua de Tánamo y Caimanes fue la del Jobo en Sagua de Tánamo y para los materiales de San Andrés y Guaramanao, arena del “Molino Doscientos Mil”, en Candelaria, Gibara, 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.

2.3. 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, pérdidas por ignición 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.

2.3.1. 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 Pórtland por tobas se fundamenta, en que la adición de puzolana para la producción de cemento Pórtland 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 donde va a ser utilizado y las especificaciones requeridas (ACI 232. 1R, 2000).

Por lo tanto, al considerar que no es objetivo de este trabajo encontrar la dosificación óptima de material a ser empleado como aditivo sino determinar la existencia de propiedades puzolánicas en estos materiales, se tomó un porcentaje mínimo de 15 % y un porcentaje máximo 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.

2.3.2. Determinación de la composición granulométrica

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

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

Las muestras se obtuvieron por el sistema de cuarteo, mediante cuarteadora mecánica, con el objetivo de lograr una mayor homogenización de las muestras y que esta a su vez sea representativa.

Las muestras de arena se separaron en las clases de tamaño, $-2,36 + 1,18$; $-1,18 + 0,6$; $-0,6 + 0,3$; $-0,3 + 0,15$ y $-0,15 + 0,075$ mm, mediante el proceso de cribado por vía seca.

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

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

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



Figura 2.4. Tamizadora

2.3.3. 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 cual se muestra en la figura 2.5. 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.

Mediante la resolución de un sistema de ecuaciones se calcularon los contenidos de los diferentes elementos, a través de la correspondencia con una serie de muestras patrones con las que se calibra el equipo.



Figura 2.5. Equipo de fluorescencia de rayos X, Axios.

2.3.4. 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 que se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6. Difractómetro Philips X'Pert

2.3.5. Pérdidas por ignición

Las pérdidas por ignición son el agua, el anhídrido carbónico y el material carbonoso que se evapora cuando la muestra es calentada a una temperatura dada.

La muestra de ensayo se pulverizó hasta una granulometría máxima de 0,07 mm, se secó durante 1 h, a una temperatura de 105 °C, se pesó 1 g de la muestra seca, se transfirió a un crisol de platino previamente tarado. Se calcinó en la mufla a 750 °C durante 20 minutos, se extrajo de la mufla y se enfrió en una desecadora a temperatura ambiente, se pesó y se le restó la tara. Luego se determinó las pérdidas por ignición en las muestras por la ecuación (1):

$$PPI = \frac{M_1}{M_2} \cdot 100 \quad (1)$$

donde:

PPI: pérdida por ignición, %

M₁: pérdida de masa entre 105 y 750 °C, g.

M₂: Masa de la muestra libre de humedad, g.

2.3.6. Determinación del índice de actividad puzolánica con cemento Pórtland

Para la determinación de este índice se tomaron los resultados de las pruebas de compresión simple a las diferentes edades y se obtuvo a través de la ecuación (2):

$$IAR = \frac{A}{B} \cdot 100 \quad (2)$$

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 resistencia mecánicas que tributan a su determinación.

2.3.6.1. Determinación de la resistencia mecánica

La determinación de la resistencia a la flexotracción y a la compresión de las tobas se realizó a través de pruebas de morteros.

Ensayo de resistencia a la flexotracción

El ensayo de la resistencia a la flexotracción, se realizó con la ayuda de tres cilindros de acero de 10 mm de diámetro; dos de ellos, sobre los cuales se apoya el mortero, situados en un mismo plano y paralelos a la distancia de 100 mm el tercero equidista de los dos primeros y se apoya sobre la cara opuesta de la probeta. Uno de los cilindros de soporte y el cilindro de carga serán capaces de oscilar ligeramente con relación a sus centros para mantener una distribución

uniforme de la carga a todo lo ancho del mortero sin someterlo a esfuerzos de torsión.

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

La carga P será aplicada verticalmente por el cilindro de carga sobre la cara lateral de la probeta y deberá crecer progresivamente a razón de $(5 \pm 1 \text{ kgf} / \text{s} [49 \pm 10] \text{ N} / \text{s})$. El módulo de rotura R , está dado por la ecuación (3).

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

(3)

donde:

b : lado de la sección cuadrada de la probeta

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

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

donde:

P : carga de rotura aplicada en el medio del mortero

l : distancia entre los cilindros de soporte

Si l y P se expresan en cm, la fórmula se transforma en:

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

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

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

Ensayo de resistencia a la compresión

En el ensayo de resistencia a la compresión cada probeta se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales de la misma. Para ello se utilizaron dos placas de acero de dureza no inferior a HRC 60, de $40 \pm 0,1$ mm de ancho y largo, y de espesor mínimo de 10 mm, las cuales son planas con un error menor de 0,02 mm. El conjunto se colocó entre los platos de 10x10 cm de la prensa que aparece en la figura 2.7, cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión. Los platos se guiaron sin fricción apreciable durante el ensayo para poder mantener siempre la misma proyección horizontal. Uno de los platos se mantuvo ligeramente inclinado con el objetivo de obtener un perfecto contacto con la probeta. Estas condiciones se obtuvieron con un aditamento especial para el ensayo de compresión colocado entre los platos de la prensa, ya que estos son mayores que el tamaño establecido por lo que es recomendable usar el mismo aditamento que permita transmitir la carga de la máquina sobre las superficies de las probetas sometidas al esfuerzo de compresión. En el aditamento la placa inferior fue introducida en la platina inferior. La placa superior con rótula recibe la carga transmitida por el plato superior de la prensa a través del conjunto de deslizamiento el cual debe ser capaz de oscilar verticalmente, sin apreciable fricción en el aditamento que guía.

Después de triturada la probeta el conjunto retorna automáticamente a la posición inicial. La velocidad de carga estará comprendida entre 10 y 20 kgf·s/cm² (0,10 a 0,20 kN·s/cm²) pero se reducirá en caso necesario para que el ensayo no dure más de 10 segundos.

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

$$R = \frac{P}{S} = \frac{P}{l \cdot b}$$

(4)

donde

P: carga aplicada a la probeta.

S: superficie de la sección transversal de la probeta, cm^2

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

Los ensayos de resistencia a la flexotracción y compresión se realizaron a las edades de rotura de 7; 28; 60; 90 y 120 días.

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



Figura 2.7. Prensa hidráulica

Para la realización de los ensayos de resistencia a la flexotracción y compresión, es necesario conformar los morteros. El procedimiento se describe en el siguiente acápite.

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

Se elaboraron 120 probetas (morteros) con material tobáceo de los cuatro yacimientos analizados, 15 para cada porcentaje de sustitución de cemento por tobas. Se confeccionaron además, 30 probetas sin adición de tobas (patrones o de referencia). Para las probetas realizadas con material de los yacimiento Sagua de Tánamo y Caimanes se empleó arena de la planta del Jobo en Sagua de Tánamo, y para el caso de los realizados con material de San Andrés y Guaramanao, se empleó arena de la arenera “Molino Doscientos Mil, en Aguas Claras, Holguín.

Para garantizar la calidad de la arena primeramente se tomó la arena y se sometió a un proceso de tamizado por el tamiz 2,36 mm, se lavó para eliminar las partículas extrañas y contaminantes, se puso en la estufa por 24 horas para eliminar su humedad. Luego se procedió a la dosificación para la elaboración de los morteros.

Para la elaboración de los morteros se usó la mezcladora que aparece en la figura 2.8 a, en la cual se vertió el agua previamente medida con una probeta graduada en correspondencia con la cantidad a utilizar en cada una de las mezclas diseñadas que aparecen en la tabla 2.1. Luego se realizó la adición del cemento en las cantidades previamente calculadas, según las sustituciones (15 y 30 % de material tobáceo) y con el 100 % para la elaboración de los morteros de referencia, y 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 segundos se expulse el aire atrapado en el material y la humedad suba a la superficie. La segunda capa permite emparejar y enrasar los moldes. Estos se colocaron en el equipo que se muestra en la figura 2.8 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 las edades correspondientes a los ensayos de resistencia aplicados a los 7, 28, 60, 90 y 120 días.

Como se observa en la tabla 2.1; en todos los casos se utilizó una relación arena/cemento 3:1. La relación agua/cemento-tobas quedó determinada, por la necesidad de alcanzar la fluidez requerida según los ensayos de consistencia normal para cada material, debido a que en la práctica el agua se añade en la mezcla hasta obtener la plasticidad y consistencia de la masa requeridas, y puede variar para cada tipo de material según sus características, fundamentalmente la

capacidad de absorción como consecuencia de las condiciones de almacenamiento, situación climatológica y prestación de la mezcla.

Tabla 2.1. Dosificación para la conformación de los morteros

Material	Porcentaje de sustitución	Dosificación				Relación Agua/Cemento-Tobas
		Cemento (g)	Arena (g)	Tobas (g)	Agua (mL)	
Patrón Sagua		450	1350	-	240	0,53
Patrón Holguín		450	1350	-	240	0,53
Tobas vítreas Sagua de Tánamo	15%	382,5	1350	67,5	270	0,60
	30%	315	1350	135	290	0,64
Tobas zeolitizadas Caimanes	15%	382,5	1350	67,5	260	0,58
	30%	315	1350	135	280	0,62
Tobas vítreas Guaramanao	15%	382,5	1350	67,5	260	0,58
	30%	315	1350	135	280	0,62
Tobas zeolitizadas San Andrés	15%	382,5	1350	67,5	260	0,58
	30%	315	1350	135	280	0,62

En el anexo 2 se muestra una fotografía de los morteros elaborados para la determinación de la resistencia a la flexotracción y a la compresión.

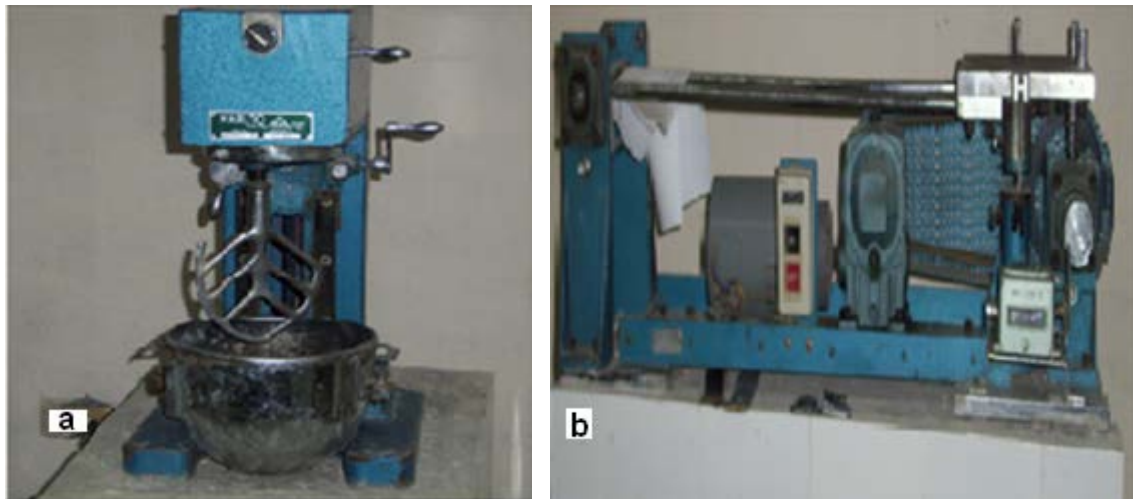


Figura 2.8. a) Mezcladora Maruto. b) Compactadora.

Conclusiones parciales

- Las muestras de tobas vítreas y zeolitizadas seleccionadas para ser caracterizadas se consideran representativas.
- Las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicados en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos según las normas cubanas e internacionales.
- Los materiales tobáceos tienen presencia de arcilla, la de mayor contenido es la toba de Sagua de Tánamo, seguida de la toba de Caimanes, Guaramanao y San Andrés, en ese orden.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Se presentan los resultados experimentales que confirman la hipótesis científica sobre las potencialidades de los materiales tobáceos de los yacimientos, Sagua de Tánamo, Caimanes, 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.

3.1. Resultados experimentales y su análisis

3.1.1. Caracterización granulométrica

El procedimiento utilizado para la determinación de la composición granulométrica de la arena y del material tobáceo empleado en la elaboración de los morteros se realizó según las metodologías descritas en el acápite 2.3.2.

Caracterización granulométrica de la arena

El d_{80} de la arena de Sagua de Tánamo según el material cernido (Figura 3.1) se encuentra en el diámetro del tamiz 1,33 mm. De forma análoga, pero con partículas más gruesas, se comporta la arena de Aguas Claras en Holguín, donde el 80 % del material cernido se observa en el diámetro del tamiz 1,86 mm, y un módulo de finura de 4,05. Aunque el comportamiento de ambas arenas es similar, se verifica indudablemente un apreciable predominio de granos más finos en la arena del Jobo en Sagua de Tánamo, con un módulo de finura de 3,21. Según estos resultados, los mayores porcentajes de material retenido forman tres clases significativas cuyos diámetros se encuentran ubicados en las fracciones + 1,18 -1,18 + 0,6 y - 0,6 + 0,3 mm.

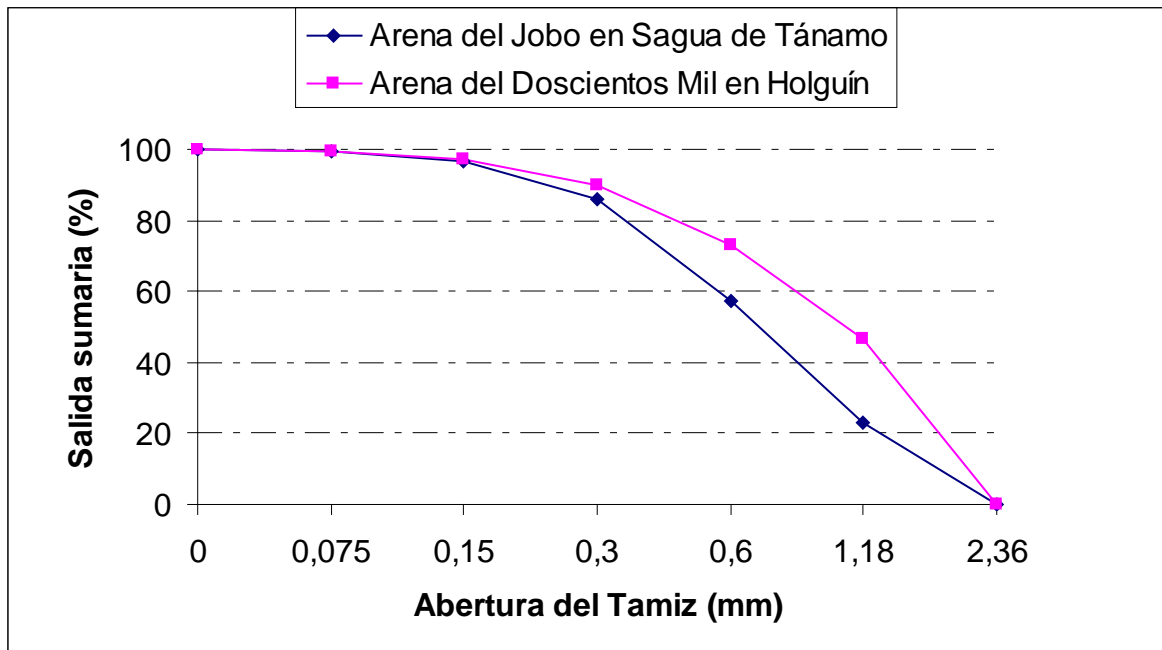


Figura 3.1. Característica de tamaño de la arena del Jobo en Sagua de Tánamo y Aguas Claras en Holguín

En la primera clase, para la arena del Jobo se retiene el 23 % del material, mientras que en la segunda el 34,4 %, que representan los tamaños adecuados para la preparación del mortero. Se desechan las clases finas, que están constituidas por el 2,80 % en la fracción $- 0,15 + 0,075$ y 0,8 % en la fracción de 0,075 mm. La arena de Holguín, es la que posee las características más adecuadas. En esta, el 46,8 % está formado por la clase $+ 1,18$ mm, mientras que para las clases $-1,18 + 0,6$ y $- 0,6 + 0,3$ mm, se retiene 26,4 y 16,6 %, respectivamente. Las clases finas formadas por la fracción $- 0,15 + 0,075$ y $- 0,075$ mm, se retienen 2,2 y 0,6 %, respectivamente.

El análisis granulométrico ha permitido eliminar el material fino cernido a través de los tamices de menor abertura, y conservar la cantidad adecuada de los gruesos con diámetros cercanos, con lo cual se obtiene una arena normalizada.

Este procedimiento se fundamenta en las investigaciones de González 1991, 2000; Gili 2000, los cuales plantean que la granulometría gruesa sirve para crear cuerpo sólido en la mezcla y, aparejado a ello, mayor resistencia en el tiempo; y a diferencia de los agregados finos que poseen gran propensión por el agua, los

áridos naturales gruesos se hidratan lentamente. Esto permite que la reacción de hidratación se prolongue en el tiempo; y se obtengan resistencias mecánicas elevadas

Por ello las características granulométricas de ambas arenas influyen de manera positiva en la calidad de los morteros.

Caracterización granulométrica de los materiales tobáceos

Se puede apreciar en la figura 3.2, que las tobas vítreas de Guaramanao son las de distribución granulométrica más gruesa, el 80 % del material cernido se encuentra en el diámetro del tamiz 0,070 mm (70 μm), con un diámetro medio de partículas de 0,045 mm, seguida de las tobas zeolitizadas de Caimanes y las tobas vítreas de Sagua de Tánamo con d_{80} del material cernido en el diámetro del tamiz 0,051 mm y diámetro medio de partícula de 0,041 y 0,033 respectivamente. Mientras que las tobas zeolitizadas de San Andrés presentan un tamaño de partículas más fina de acuerdo con el d_{80} del material cernido cuyo valor es de 0,050 mm (50 μm) pero su diámetro medio de partícula 0,042 mm, esto las hace tener una composición un tanto más gruesa en las clases de 9 a 30 μm .

Se observa que las curvas están prácticamente superpuestas, lo que quiere decir que la distribución granulométrica de los materiales son muy similares, sus rangos de tamaños en el tamiz 50 μm oscilan de 17 a 19, excepto para las tobas vítreas de Guaramanao, que su valor se separa hasta 34 μm .

En comparación con el valor máximo de 34 % establecido por la norma ASTM C 618, para su utilización como puzolana natural se puede plantear, que tres materiales analizados presentan características granulométricas adecuadas, que le confieren perspectivas para ser empleados como aditivos puzolánicos al cemento, dado que el retenido en el tamiz 0,045 mm es igual 24 % para las tobas de Caimanes, Sagua de Tánamo y San Andrés, mientras que para las tobas de Guaramanao, llega a 39 %. No obstante, quien podría definir la utilización de este último como aditivo puzolánico es su índice de actividad resistente.

Además de estas características se puede conocer los resultados de la superficie específica que brinda el análisis granulométrico en el analizador de partículas

HORIBA LA – 910, cuyos resultados son 4 694,4; 7 782,9; 8 151,9 y 8 320,6 cm^2/cm^3 para las tobas de Guaramanao, Sagua de Tánamo, Caimanes y San Andrés, respectivamente. Esta propiedad superficial analizada permite argumentar con mayor precisión los resultados de la caracterización granulométricas del material investigado.

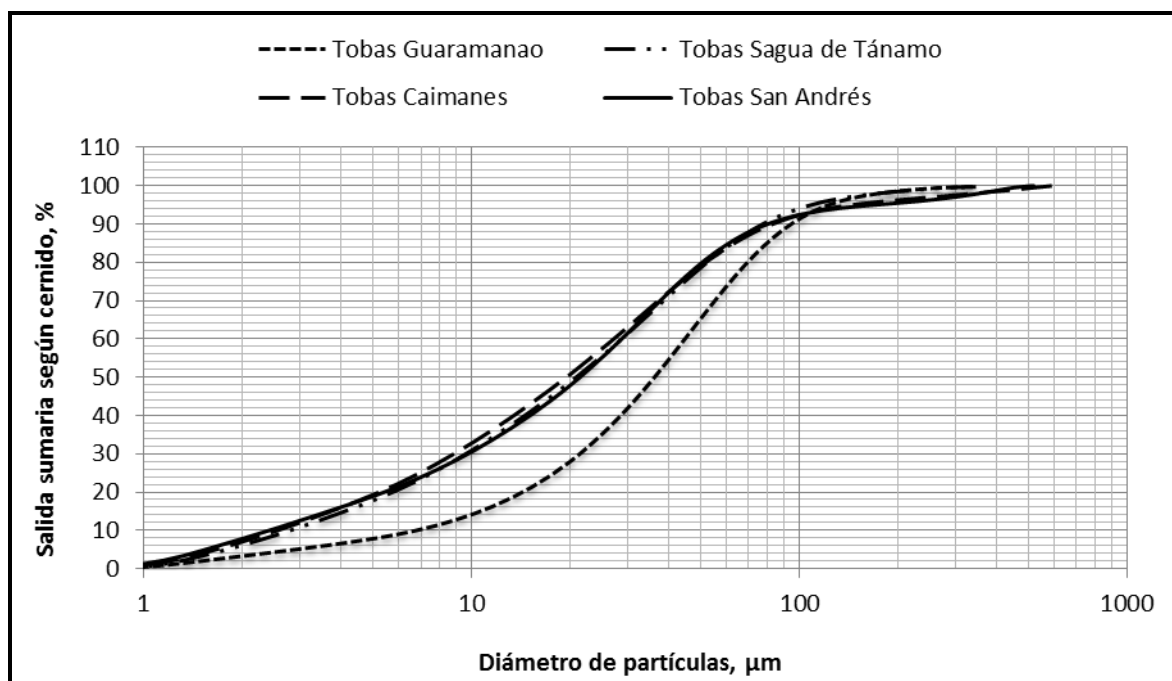


Figura 3.2. Características de tamaño de las tobas vítreas y zeolitizadas

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

3.1.2. Caracterización química

La composición química de las tobas empleadas, determinada a partir del método Fluorescencia de rayos X (FRX) se presenta en la tabla 3.1. 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 3.1. Composición química de la muestra de tobas empleadas

Compuesto	Contenido, %			
	Tobas Sagua	Tobas Caimanes	Tobas Guaramanao	Tobas San Andrés
SiO ₂	68,86	68,95	71,59	70,27
Al ₂ O ₃	13,63	13,57	12,57	13,79
MnO	0,06	0,07	0,09	0,05
MgO	2,64	2,54	1,38	2,96
Na ₂ O	1,87	1,83	2,67	1,73
CaO	5,34	6,12	5,31	5,56
TiO ₂	0,49	0,49	0,37	0,52
P ₂ O ₅	0,10	0,09	0,06	0,08
K ₂ O	2,27	2,12	2,75	1,88
Fe ₂ O ₃	4,58	4,03	3,05	2,95
SO ₃	0,11	0,11	0,08	0,08
PPI	8,83	8,57	8,73	8,59

Como se puede observar la suma de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ supera el 70 % que se establece en la norma para las puzolanas naturales que se evalúan. Muestran un carácter ácido, con contenido de SiO₂ mayor que 65 %. En el diagrama de las puzolanas que se muestra en la figura 3.3, 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 3.4, 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.

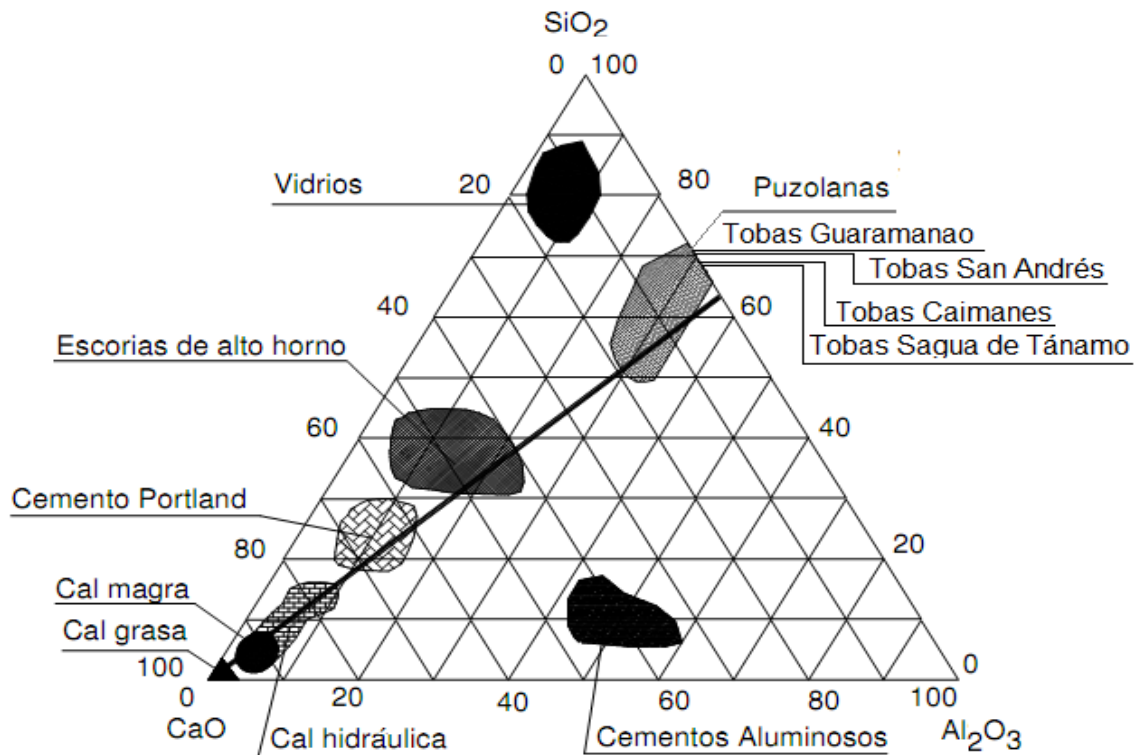


Figura 3.3. Diagrama de puzolanas. Fuente: Deloye, 1993

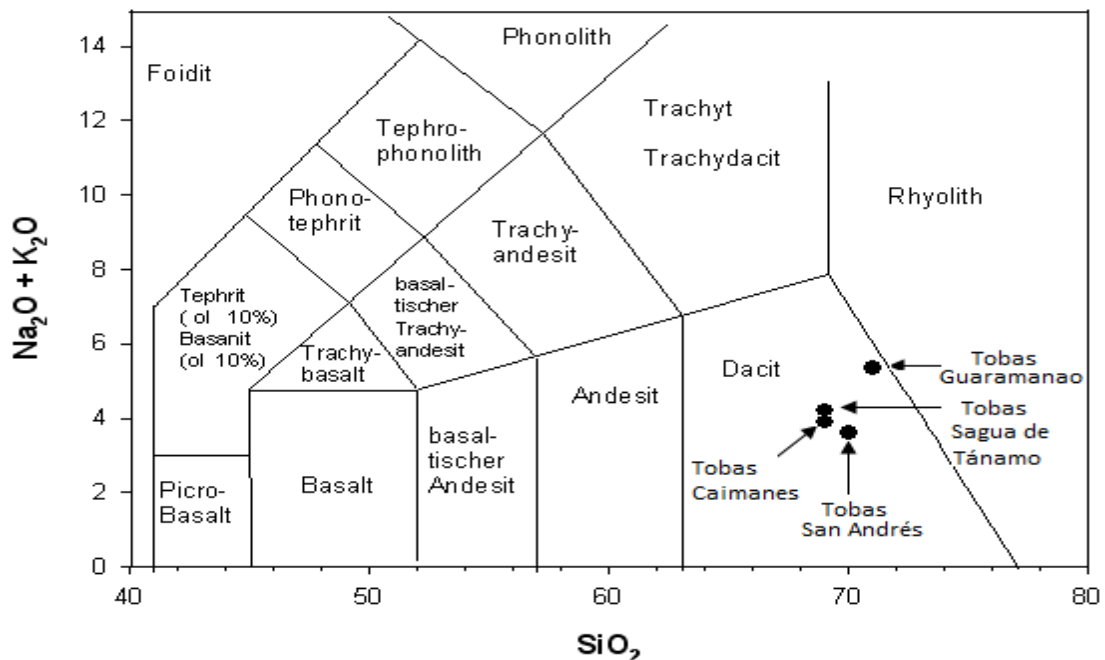


Figura 3.4. Origen de los materiales tobáceos analizados

3.1.3. Composición mineralógica

En la tabla 3.2 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 son las que poseen mayor contenido de matriz vítrea y menor contenido de arcilla y por las zeolitas, las tobas de San Andrés son las de mejor características. Se destaca el alto contenido de arcilla que presentan las tobas de Sagua de Tánamo.

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, dióxido 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 3.

Se ha reportado que las fases cristalinas no poseen actividad puzolánica (Odler, 2000), sin embargo, aquellas que se encuentran desordenadas o en un estado metaestable presentan algo de actividad (Valdez, 2004), como es el caso de la albita y la anortita las cuales pueden presentarse con cierta alteración.

Según Rabilero (2005), es importante hacer notar que existe la posibilidad, por lo menos teóricamente, de que algunos feldespatos alcalinos de muy baja cristalización y elevada concentración de defectos en la estructura cristalina puedan presentar determinada actividad puzolánica, acentuada por una molienda intensa y efectiva que de lugar a un producto de elevada superficie específica.

La estructura desordenada que posee el vidrio volcánico presenta una mayor oportunidad de encontrar tetraedros superficiales, con vértices libres, lo cual explica la gran reactividad de los vidrios con respecto a los feldespatos u otros minerales cristalinos (Dron, 1978) y las zeolitas a pesar de poseer una estructura cristalina, su actividad puzolánica está dada por las estructuras cristalinas muy abiertas y/o marcadamente desordenadas, con una elevada porosidad interna (Rabilero, 2005).

Tabla 3.2. Características mineralógicas de los materiales tobáceos estudiados.
Fuente: * Frazao, 2007. **Tapia, 2003

Material puzolánico	Matriz vítrea y/o contenido de zeolita, %	Contenido de arcilla, %	Principales fases cristalinas
Tobas vítreas Sagua de Tánamo	54 - 80	16 - 39	Albita, anortita, apatito, diópsido, hematina, hyperstena, Ilmenita, ortoclasa, cuarzo, esfena, X-magnesio
Tobas zeolitizadas Caimanes	80 – 85*	13 – 14*	Albita, anortita, apatito, diópsido, hematina, hyperstena, Ilmenita, ortoclasa, cuarzo, esfena, X-magnesio
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

3.1.4. Resistencias mecánicas

Se ofrecen los resultados de los ensayos mecánicos a la flexotracción y a la compresión por muestras con tobas y muestras patrones, a las edades de 7, 28, 60, 90 y 120 días (ver anexo 1).

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

Resistencia a la flexotracción

La comparación de los gráficos representados en las figuras 3.5 y 3.6 permite confirmar un incremento de la resistencia a la flexotracción en el tiempo transcurrido entre los 7 y 120 días, período en el cual los valores medios calculados para ambas edades han pasado de los 0,37, 0,38, 0,47 0,81 Mpa a los 0,77, 0,73, 1,05 y 1,19 Mpa, para los morteros elaborados con 15 % de tobas, y de los 0,32, 0,34, 0,48 0,56 Mpa a los 0,69, 0,68, 1,00 y 1,02 Mpa con 30 %, para las tobas de Sagua de Tánamo, Caimanes, Guaramanao y San Andrés, respectivamente, lo que indica que el aumento de las resistencias mecánicas a la flexotracción es directamente proporcional al incremento de la magnitud tiempo.

Los valores de resistencia a la flexotracción para ambas dosificaciones se han prácticamente duplicado pero su incremento es discreto.

Los moteros de referencia, muestran un aumento de resistencia, las cuales varían de 0,5 a 0,88 Mpa para los morteros patrones de Sagua de Tánamo y de 0,89 a 1,15 Mpa para los morteros patrones de Holguín, pero el incremento es menor en comparación con los morteros con adición de tobas.

Se puede observar que tanto para las tobas con adición de 15 % como para las de 30 % de adición tienen un crecimiento semejante, desde el punto de vista cualitativo. Se refleja una tendencia al acercamiento de la resistencia a la flexotracción de la mezcla patrón cuando se sustituye 15 % de cemento por tobas, de forma acentuada para las tobas de San Andrés, las cuales alcanzan valores superiores a los patrones a partir de los 28 días. Se confirma que los morteros con adición de un 15 % de tobas ofrecen mejor resistencia a la flexotracción que los elaborados con 30 % de éstas.

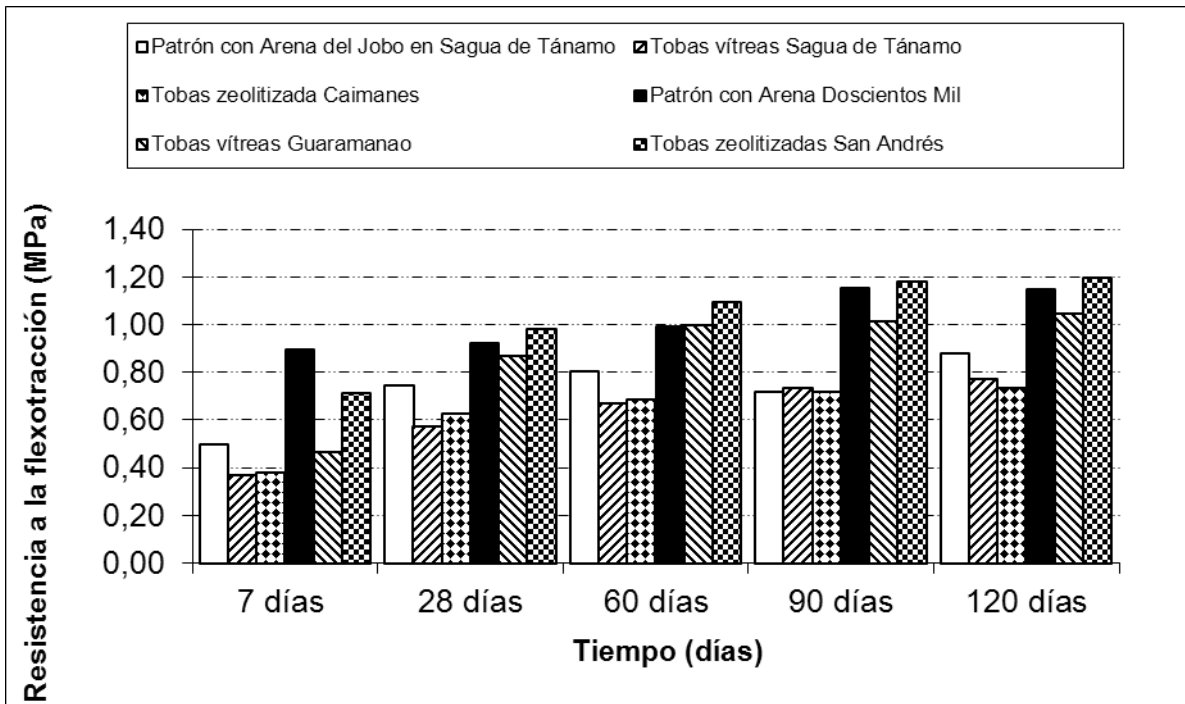


Figura 3.5. Resistencia a la flexotracción de los morteros con 15 % de tobas

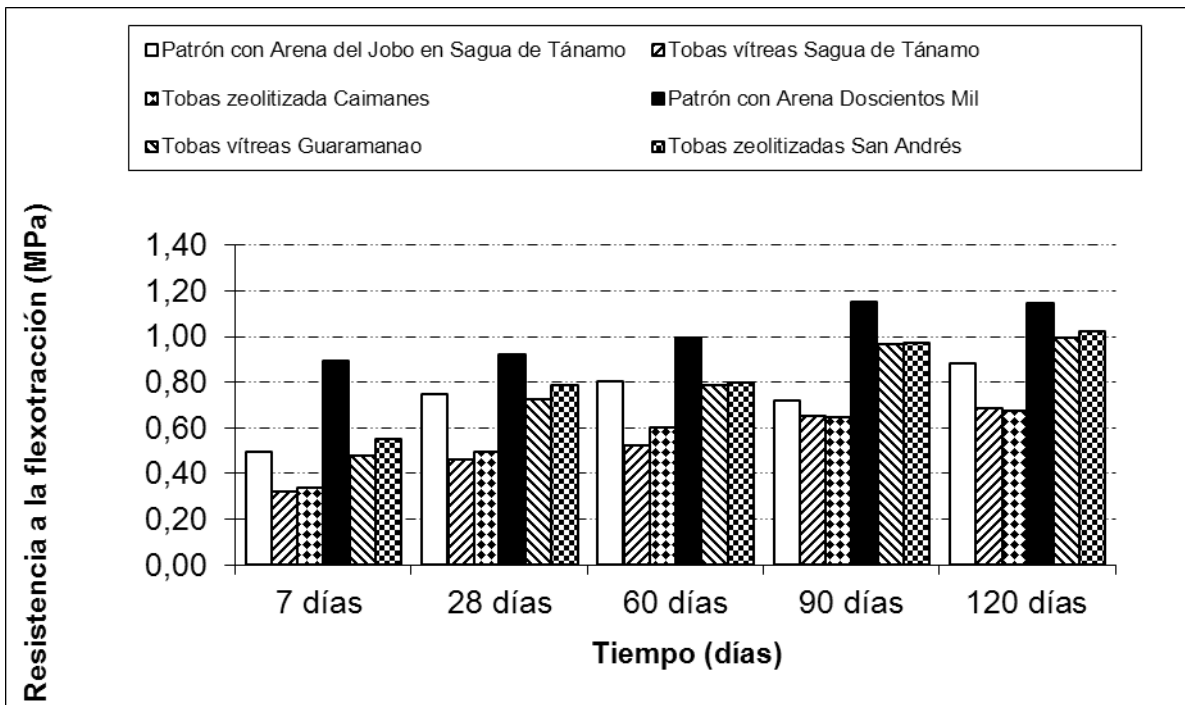


Figura 3.6. Resistencia a la flexotracción de los morteros con 30 % de tobas

Resistencia a la compresión

La observación de la figura 3.7 y 3.8 permite distinguir un desfase ascendente experimentado por todas las muestras. De forma similar a los resultados de la resistencia a la flexotracción, se puede observar que la resistencia a la compresión de los morteros con adición de tobas, muestran un incremento de 7 a 120 días, y los morteros con 15 % de tobas poseen mayor resistencia que los de 30 % durante todos los ensayos realizados.

Las muestras de San Andrés para un 15 % de adición, igualan la resistencia del cemento de referencia a los 60 días, para este caso, otra de las propiedades principales de las puzolanas en el sentido de que aportan valores de resistencias mecánicas muy bajas a edades tempranas, sin embargo, adquieren altas resistencias a edades superiores, generalmente a partir de los 28 días de fraguado.

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).

A la edad de 120 días, las muestras de morteros con adición de 15 % de puzolana, muestran resistencias a la compresión cercanas a la del mortero de referencia y en el caso de las tobas de San Andrés y Guaramanao, lo superan en 0,35 y 0,71 MPa, respectivamente. No así para 30 % de adición de tobas, que aunque exhiben un comportamiento similar, las resistencias no alcanzan, para ninguna edad, las resistencias desarrolladas por los patrones.

A pesar de que los valores de las resistencias mecánicas aportadas por todas las muestras guardan cierta uniformidad, se destaca la muestra de tobas de San Andrés, seguidas por las tobas de Guaramanao, y con resistencia menores las tobas de Caimanes y Sagua de Tánamo, en ese orden. La primera, a partir de los

90 días superó la resistencia a la compresión de los patrones, al sustituir 15 % del material por cemento. Esto pudiera estar dado por las características granulométricas, al ser el material más fino, resultado que está en correspondencia con las investigaciones realizadas por Day y Shi 1994; Rosell 2007; Muxlhangha 2009; Costafreda 2011; entre otros, los cuales obtuvieron valores de resistencias más acentuados a menor tamaño de partícula del material, lo que permite una mayor posibilidad de reacción del óxido de silicio, con el hidróxido de calcio que se libera durante las reacciones de hidratación del cemento Pórtland, con la formación de silicatos de calcio estables con propiedades cementantes.

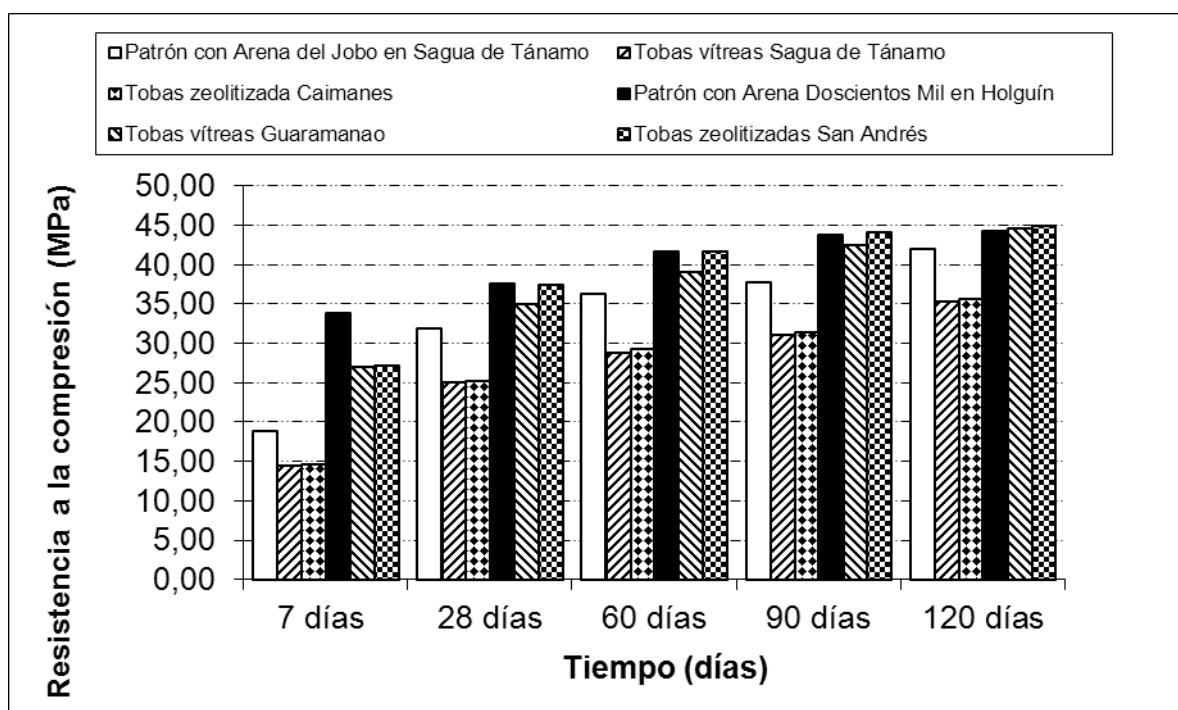


Figura 3.7. Resistencia a la compresión de los morteros con 15 % de tobas

Los morteros elaborados con adición de tobas vítreas de Sagua de Tánamo son los que experimentan menor resistencia a la compresión. Si se tiene en cuenta que a partir de la dosificación fue la mezcla que mayor agua consumió para alcanzar la consistencia adecuada, se puede justificar sus bajos valores de resistencia a la compresión, con la consideración de que al añadir más agua a la

mezcla disminuye su resistencia (Gener y Cabrera, 2002), además de la influencia que puede tener el gran contenido de arcilla que poseen estas tobas.

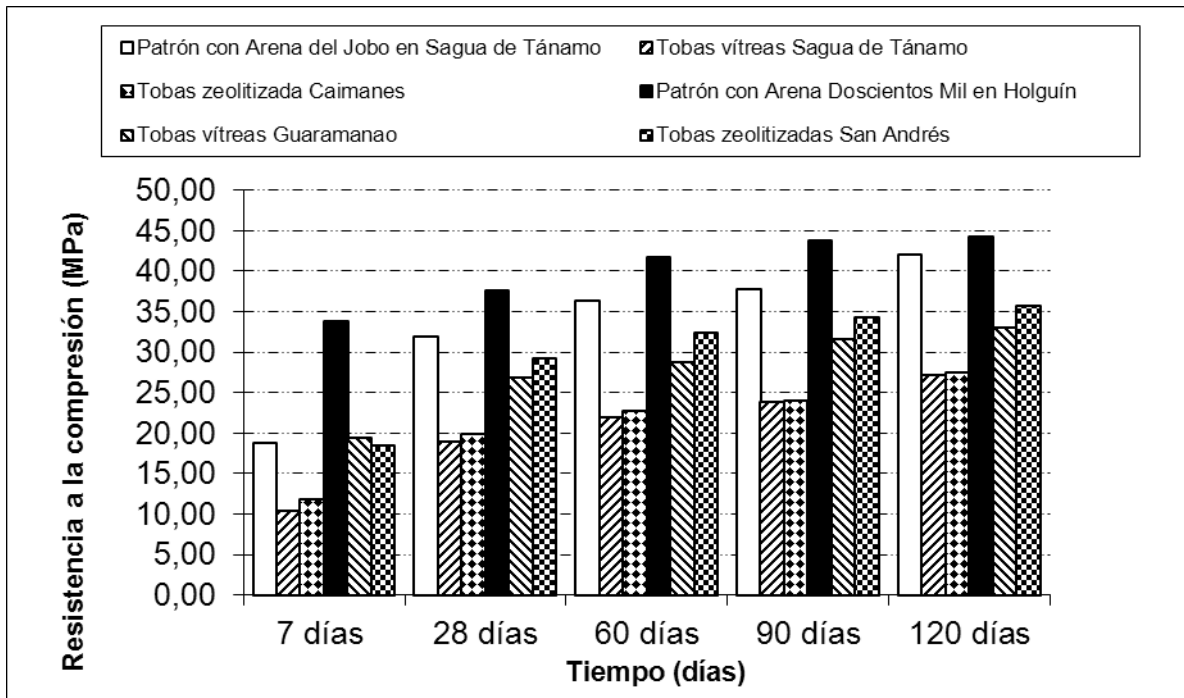


Figura 3.8. Resistencia a la compresión de los morteros con 30 % de tobas

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

3.2.1. Evaluación del índice de puzolanidad

En la tabla 3.3 se representan los valores de los diferentes índices de actividad resistente por muestras de morteros, en relación al 75 % del valor de resistencia mecánica a la compresión del mortero patrón para las cinco edades 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, ya que 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.

Como se puede apreciar, los valores del índice de actividad resistente calculados para cada muestra, con porcentajes de adición de 15 %, superan el 75 % que establece la norma. Sin embargo, en muestras con adición de 30 % de tobas, se alcanzan valores inferiores a los normalizados; para esta dosificación alcanzan un índice de actividad igual a 77,78 % el material tobáceo de San Andrés a los 28 días.

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

La 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 y Valdez 2004, han demostrado su influencia sobre la actividad puzolánica.

La sílice amorfa reacciona con el hidróxido de calcio y los álcalis más rápido que la sílice en forma cristalina (ACI 232. 1R, 2000). La cantidad de material amorfo es lo que generalmente determina la reactividad de una puzolana natural ya que a la combinación de la estructura pobremente cristalina o vítrea se le atribuye la reactividad de los materiales puzolánicos (Malhotra y Mehta, 1996), además de la estructura cristalina muy abierta y/o desordenadas, con elevada porosidad interna de las zeolitas (Rabilero, 2005). De esta manera en el trabajo se podría inferir que

la influencia determinante está dada por el porcentaje de las fases vítreas (contenido de vidrio volcánico) y porcentaje de zeolita que lo constituyen.

Otro factor que pudiera influir en la baja actividad resistente, es el contenido de arcilla en los materiales tobáceos, y por otros constituyentes asociados a este, los cuales no poseen actividad puzolánica conocida. Esto se observa en las tobas de Sagua de Tánamo, con el mayor contenido de arcilla.

Por ello para cada caso, los materiales tobáceos, donde el material es más rico en contenido vítreo, contenido de zeolita y menor porcentaje de arcilla, es más activo. Las de mejor comportamiento son las tobas vítreas de Guaramanao y las tobas zeolitizadas de San Andrés. Lo cual está en correspondencia con lo reportado por Costafreda et al. 2011.

La cuantificación de 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 composición similar. Entiéndase que lo que si pudiera determinar esta diferencia es la forma en que se encuentran los compuestos químicos.

La disminución del diámetro de las partículas, favorece el proceso de aglomeración que se desarrolla en la mezcla con el cemento según se ha planteado por Rabilero 1988; Gonzales de la Cotera 1996; Erdogdu, 1996; Gener, 2002; entre otros, pero al parecer para el conjunto de materiales analizados no ejerce una marcada influencia, ya que las tobas de Guaramanao, con una distribución más gruesa, y de menor superficie específica, muestran buena actividad.

Por otro lado se explica la influencia que tienen los diferentes porcentajes de adición de material puzolánico utilizados en el trabajo (15 y 30 %), lo cual se comporta de manera similar a lo reportado por Massazza y Costa 1979; Mehta 1981; Rabilero 1988, con tierra de Santorin en Grecia, una puzolana italiana y tobas de la región de Santiago de Cuba, respectivamente; los cuales variaron las

proporciones de cemento Pórtland con puzolana natural. La resistencia aumenta en el tiempo, sin embargo disminuye con el porcentaje de adición de puzolana.

El análisis conduce a plantear que la diferencia en la actividad puzolánica de los morteros elaborados con los cuatro materiales tobáceos, podría estar dada por el contenido de agua de la mezcla, la composición mineralógica, composición granulométrica y por último, a su composición química general. Es evidente que los procesos que se verifican aquí parecen ser muy complejos, por lo que se debe profundizar en el conocimiento de su naturaleza.

De acuerdo a estos resultados se confirma, que los materiales tobáceos de Sagua de Tánamo, Caimanes, Guaramanao y San Andrés poseen actividad puzolánica, al menos para la dosificación donde se sustituye 15 % de tobas por cemento. El mejor comportamiento lo exhiben las tobas de San Andrés y las tobas de Guaramanao y con menores actividades las tobas de Caimanes y Sagua de Tánamo.

Tabla 3.3. Índice de puzolanidad de los materiales tobáceos

Morteros	Índice de Puzolanidad				
	7 días	28 días	60 días	90 días	120 días
Sustitución de 15 %					
Tobas vítreas Sagua de Tánamo	77,14	78,83	79,33	82,42	84,21
Tobas zeolitizadas Caimanes	77,91	79,26	81,02	83,36	84,75
Tobas vítreas Guaramanao	80,09	92,95	93,84	96,97	100,80
Tobas zeolitizadas San Andrés	80,69	99,44	100,00	100,90	101,61
Sustitución de 30 %					
Tobas vítreas Sagua de Tánamo	55,38	59,34	60,57	63,52	64,92
Tobas zeolitizadas Caimanes	62,36	62,82	62,89	63,96	65,63
Tobas vítreas Guaramanao	57,55	71,57	68,86	72,14	74,76
Tobas zeolitizadas San Andrés	54,59	77,78	77,95	78,44	80,85

3.2.2. Análisis de los requisitos químicos y físicos para ser empleados como aditivo puzolánico

A continuación, en la tabla 3.4 se muestra la relación entre los requerimientos establecidos por la norma ASTM C 618, y los resultados obtenidos a partir de los materiales evaluados.

Estos materiales, dada su composición química, cumplen con las exigencias establecidas, en lo que respecta a sus contenidos de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , cuyos valores superan el 70 % en todos los casos, que es el valor mínimo exigido. Los contenidos de SO_3 y las pérdidas por ignición, también están en correspondencia con lo normalizado pues sus valores están por debajo del valor máximo establecido.

En cuanto a su composición granulométrica, los materiales analizados cumplen con las normas establecidas para su utilización como aditivo puzolánico, con la excepción de las tobas de Guaramanao donde se retiene el 39 % en el tamiz 0,045 mm, pero no se afectada su índice de actividad puzolánica.

Se demuestra que el índice de actividad resistente (IAR) de cada una de las muestras de morteros con adición de 15 % de tobas es sensiblemente alto, con porcentajes que superan el 75 % del valor de resistencia mecánica a la compresión del cemento de referencia a las edades de 7 y 28 días.

De esta forma, se confirma que los materiales tobáceos de los yacimientos Sagua de Tánamo, Caimanes, Guaramanao y San Andrés poseen actividad puzolánica, al menos al sustituir 15 % de cemento por tobas.

A pesar de que los morteros con adición de 30 % de tobas no alcanzan el índice de actividad exigido por las normas, sus valores de resistencia varían para todo el conjunto de muestras de 19 a 29 MPa, los cuales superan la resistencia que se exige para los morteros de albañilería del tipo V, cuya resistencia a la compresión a los 28 días debe ser 12,4 MPa, según la norma cubana NC 175: 2002.

Si se tienen en cuenta las recomendaciones para morteros de coloración que aparecen en el anexo 5, podrían tener diversas aplicaciones de forma satisfactoria, ya que se ha obtenido una capacidad resistente favorable, en

comparación con los morteros normalizados y que al sustituir 30 % de cemento, se obtendría un abaratamiento de los costos, reducción de consumos energéticos inherentes al proceso de fabricación de cemento y disminución de los índices de contaminación medioambiental; aspectos que se analizarán en el próximo acápite. No obstante, para asegurar su uso definitivo, es necesario conocer y evaluar otras propiedades como adherencia, retención de agua, entre otras.

Como consideración adicional se debe añadir que las tobas vítreas y zeolitizadas, al poseer actividad puzolánica, podrían formar parte del cemento con propiedades ventajosas, tales como: mayor estabilidad química, menor calor de hidratación y mayor durabilidad. Se podrían mezclar el cemento Pórtland con puzolanas para su utilización en zonas donde se exijan adiciones resistentes a los sulfatos y al agua de mar, cementos puzolánicos con adiciones, idóneos para la construcción de zapatas, pisos, columnas, muros y registros y como cementos compuestos, que presentan una gran durabilidad.

Se puede considerar entonces que los materiales tobáceos de los yacimientos Sagua de Tánamo, Caimanes, Guaramanao y San Andrés pueden ser utilizado como aditivo puzolánico, ya que el índice de actividad resistente de los morteros elaborados con adiciones de 15 % de tobas en sustitución de cemento, a los 7 y 28 días de fraguado es superior a 75 %, que es el mínimo requerido por la ASTM C – 618.

Tabla 3.4. Requerimientos normalizados que cumplen los materiales ensayados

Ensayo	Requerimientos	Resultados							
		Tobas Sagua		Tobas Caimanes		Tobas Guaramanao		Tobas San Andrés	
		Dosificación, %							
		15	30	15	30	15	30	15	30
Índice de puzolanidad, %	A los 7 días - 75 %	77	55	78	62	80	58	81	55
	A los 28 días - 75 %	79	59	79	63	93	72	99	78
Demanda de agua	máx., % del control 115	112	119	108	116	108	116	108	116
Análisis químico	Contenido de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ y Fe ₂ O ₃ , % - mín., 70 %	87,07		86,55		87, 21		87,01	
	Pérdida por ignición, % - máx., 10 %	8,83		8,57		8,73		8,59	
	Trióxido de azufre (SO ₃), máx., 4 %	0,113		0,110		0,081		0,082	
Finura	Retenido en el tamiz 0,045 mm, % - máx.,34 %	24		24		39		24	

3.2.3. 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 con anterioridad, no obedecen a un trabajo de valoración que permita orientar su desarrollo de acuerdo con las condiciones establecidas para su uso. Todo esto, unido al déficit de materiales de construcción para acometer los diferentes programas de construcción de viviendas y obras sociales, llevó a la realización de esta investigación.

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

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

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

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

La industria cubana de cemento presenta altos consumos de energía, tanto eléctricas como de portadores energéticos (combustibles), el consumo anual de las seis fábricas con las que cuenta el país, están en alrededor de 240 000 MW·h y 250 000 t de combustible. De acuerdo a las operaciones y procesos involucrados en la obtención de cemento se establece el balance de consumo energético que se muestra en la tabla 3.5.

En la actualidad el consumo de combustible y energía eléctrica se ha incrementado debido a las transformaciones de expansión que se ha llevado a cabo en estas empresas cementeras. Se han incrementado los costos del petróleo y la importación de insumos y materiales auxiliares, unido a la lejanía y escasez de recursos minerales que se emplean como materia prima para la producción de cemento.

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

Lo anterior permite comprender el ahorro considerable de energía al practicar la producción de puzolanas a nivel local y una razonable disminución del impacto negativo al hombre y al medio ambiente; con la disminución del número de operaciones en comparación con el proceso productivo del cemento Pórtland, junto a la reducción de las emisiones de gases nocivos (CO₂, SO₂ y otros), de polvos finos calcinados, que se producen durante el proceso de clinkerización, que para la producción de puzolana a partir de los materiales tobáceos analizados no es necesario, así como la reducción de la exposición del hombre a las altas temperaturas.

Tabla 3.5. 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 clinker	24
Servicios generales y auxiliares	23
Iluminación	3

El precio del cemento en la actualidad es alrededor de los 75, 82 CUC y 6, 18 CUP en bolsas y a granel 82,65 CUC y 16,04 CUP la tonelada. El mortero fino cuesta 181,54 CUC y 96,57 CUP la tonelada. Por lo cual, si se sustituye cemento por tobas de acuerdo a los porcentajes probados, se obtienen los beneficios que se muestran en la tabla 3.6, donde se toma como base una tonelada de cemento a granel.

Tabla 3.6. Beneficios generados por la sustitución de tobas por cemento

Sustitución de 15 % (150 kg de tobas por cemento)		Sustitución de 30 % (300 kg de tobas por cemento)	
CUC	MN	CUC	MN
12,4	2,4	24,8	4,8

Si se tiene en cuenta que una empresa como la ECRIN de Moa consume 3000 toneladas de cemento anualmente se dejaría de invertir en la compra de cemento 37 193 CUC y 7218 CUP si se sustituye el 15 % de cemento por tobas y 74 385 CUC y 14 436 CUP si se sustituye el 30 %. 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.

Por otro lado, 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 cercanía de las extracciones y su procesamiento permite un ahorro considerable de combustible por concepto de transportación.

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.

Otro aspecto que pudiera hacerse referencia, es la racionalidad de explotar integralmente estos yacimientos, con la posibilidad de realizar producciones variadas, dentro de las cuales se pueden mencionar la producción de áridos ligeros, bloques naturales, polvo limpiador, abrasivos para pulir prótesis dentales, entre otros.

Conclusiones parciales

- La distribución granulométrica de las tobas vítreas y zeolitizadas son adecuadas de acuerdo a los requisitos normalizados para su utilización como puzolana natural, excepto para las tobas de Guaramanao, sin embargo, se comporta como un material puzolánico.
- La composición química de las tobas analizadas demuestran que presentan alto contenido de óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, que es superior al 85 %, con contenidos bajos de componentes alcalinos y alcalinos térreos.
- Los materiales tobáceos de los yacimientos analizados poseen composición mineralógica que las hace potencialmente aptas para su uso como puzolana. Las tobas de Guaramanao y de San Andrés presentan las mejores características favorecido por su contenido de matriz vítrea y contenido de zeolita, respectivamente; y bajos contenidos de arcilla. Se señala el alto contenido de arcilla que presentan las tobas de Sagua de Tánamo.
- El índice de actividad resistente de los morteros elaborados con adiciones de 15 % de tobas en sustitución de cemento, a los 7 días de fraguado es superior a 75 %, que es el mínimo requerido para que el material pueda ser utilizado como aditivo puzolánico sin afectar en exceso la resistencia del mortero. Por su actividad puzolánica, en orden descendente, se destacan las tobas de San Andrés, seguidas por las tobas de Guaramanao, las tobas de Caimanes y Sagua de Tánamo.
- A pesar de que los morteros elaborados con adiciones de 30 % de tobas, no alcanzan el índice de actividad puzolánica igual al 75 %, ni a los 7 ni a los 28

días, que son las exigidas por la ASTM C 618, las resistencias mecánicas alcanzan el valor de 12,4 MPa, que es el exigido para su empleo como morteros de albañilería.

- La resistencia a la flexotracción y a la compresión de los morteros elaborados con material tobáceo, muestra un incremento de 7 a 120 días con respecto a los morteros patrones, lo que demuestra que las resistencias continúan su incremento en el tiempo. Características propias de los materiales puzolánicos.
- Para porcentajes de sustitución de 15 y 30 % las tobas zeolitizadas de San Andrés son las que poseen mejores valores de resistencia a la compresión, superior a 45 y 36,5 MPa a los 120 días de ensayo, respectivamente, y un índice de puzolanidad a los 7 y 28 días igual a 80,69 y 99,44 % para 15 % de adición, lo que demuestra su actividad puzolánica.
- Los materiales tobáceos, como agregados activos en morteros elaborados con dosificación de 15 % de tobas en lugar de cemento Pórtland P-350 aportan resistencia mecánica a la mezcla, cuyos valores se incrementan desde los 7 hasta los 120 días, hasta superar el valor de resistencia mecánica del cemento de referencia en los intervalos de edades entre los 60 y los 120 días.
- Las perspectivas de utilización de los materiales tobáceos muestra resultados alentadores para los programas de construcción de viviendas y otras obras sociales, lo cual permite influir positivamente en el desarrollo local.

CONCLUSIONES

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

- Desde el punto de vista teórico, al considerar la composición química, granulométrica y mineralógica, se predice que los materiales reúnen las condiciones para ser considerados potencialmente materiales puzolánicos.
- Experimentalmente se confirma que estos materiales se comportan como puzolanas naturales. En este sentido se especifica lo siguiente:
 - Los materiales tobáceos de Sagua de Tánamo, Caimanes, Guaramanao y San Andrés, pueden ser empleados como aditivos puzolánicos, por lo menos al ser utilizados en sustitución de un 15 % de cemento. Por su actividad puzolánica, en orden descendente, se destacan las tobas de San Andrés, seguidas por las tobas de Guaramanao, las tobas de Caimanes y Sagua de Tánamo.
 - Al sustituir el 30 % de cemento con material tobáceo, se obtienen morteros cuyas resistencias son suficientes para su utilización en aplicaciones de albañilería.

RECOMENDACIONES

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

- Determinar las características y parámetros de la molienda para proponer una tecnología de explotación de estos materiales.
- Estudiar la cinética de la reacción química, lo que al ser vinculado a los ensayos mecánicos, permitirá establecer las dosificaciones correspondientes a cada aplicación específica.
- Investigar acerca de la posibilidad de utilizar las tobas vítreas y zeolitizadas como aglomerante cal – puzolana.
- Estudiar la posibilidad de aprovechar integralmente los referidos materiales tobáceos.
- Completar el estudio sobre la posibilidad de sustituir el 30 % de cemento para la obtención de morteros que puedan ser utilizados en trabajos de albañilería.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI Committee Report. ACI 232.1R. 2000: Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete. American Concrete Institute. 24 p.
- Álvarez D. R. y Leyva R. C. 2009: Modelo de Gestión de la Innovación Tecnológica para la Exploración de los Recursos Minerales Territoriales y su Contribución al Desarrollo Local Sostenible. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2009. Memorias. [CD - ROM], La Habana, Cuba.
- ASTM C – 311. 2008: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete.
- ASTM C – 618, 2008: Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined Natural Pozzolan for use as mineral admixture in Concrete.
- BANDERAS, D.; NARANJO, V.; RODRÍGUEZ, J. y ROJAS, J. 1997: Informe Prospección Preliminar y Detallada vidrio volcánico "Sagua de Tánamo". Prov. Holguín. Cálculo de Reservas realizado en Nov. 1997. Inédito. Inv. 4743, ONRM.
- BATISTA, R. 2007: Valoración del Potencial de Los Recursos Minerales para la Industria del Cemento en Cuba. Donis Pablo Cautín Correa (Tutor). Tesis de Maestría. Instituto de Geología y Paleontología. Universidad de Pinar del Río. 77 p.
- CABRERA, M. R. 2010: Valoración de las tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín para su utilización como puzolana natural en la construcción. Roger Samuel Almenares Reyes (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 40 p.

- CALLEJA, J. 1966: Apología de los conglomerantes puzolánicos. Revista Cemento – Hormigón. (386): 3.
- CALLEJA, J. 1969. Las puzolanas. Monografía del I.E.T.C.C. 281. 95 p.
- CALVO, B.; ESTÉVEZ, E. y COSTAFREDA, J. L. 2005: Estudio de las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España. En: V Congreso Ibérico de Geoquímica. Memorias. España, 20 - 23 de septiembre.
- CAMPOLAT, F.; YILMAZ, K., KÖSE, M., SÜMER, M y YUURDUSEV, A. 2003: Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. Cements and Concrete Research. 1 - 6.
- COSTAFREDA, J. L. 2011: Granulometría y reacción puzolánica. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2011. Memorias [CD - ROM], La Habana, Cuba, 4 – 8 de abril.
- 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. Industria y Minería, número especial (371): 20 p
- COSTAFREDA, J. L.; CALVO, B. y PARRA, J. L. 2011: Criterios para el aprovechamiento de tobas dáciticas en la sustitución de cemento Pórtland en morteros y hormigones. INTEREMPRESAS - OBRAS PÚBLICAS: 162- 780/2011.
- COSTAFREDA, J. L.; DÍAZ, J. J. y CALVO, B. 2011: Propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2011. Memorias [CD - ROM], La Habana, Cuba, 4 – 8 de abril.
- COSTAFREDA, J. L.; ROSELL, M. y CALVO, B. 2009: Estudio del comportamiento puzolánico de algunas zeolitas de Iberoamérica empleando el método de la conductividad eléctrica. En: VII Congreso Ibérico. X Congreso Nacional de Geoquímica. Memorias. Soria, España, 21 - 23 de septiembre.

- Coutin, D.P., Alexeiev, B. y Brito, A. 1975: Los yacimientos de puzolanas naturales de Las Villas, Camagüey y Oriente. Serie Geológica (24). 24 p.
- Davis, R. E., 1950: A Review of Pozzolanic Materials and Their Use in Concretes. En: Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concrete, STP 99, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa.
- DAY, ROBERT L. Y SHI, CAIJUN. 1994: Effect of initial water curing on the hydration of cements containing natural pozzolan. Cement and Concrete Research 24(3):463-472.
- DAY, ROBERT L. Y SHI, CAIJUN. 1994: Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-pozzolan cement pastes. Cement and Concrete Research 24(8):1485 – 1491.
- De Armas, J. 2006: Reevaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo como puzolanas naturales. Rolando Batista González (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 70 p.
- DELOYE, F. 1993: Hydraulicité et pouzzolanicité. Bulletin Liaison Lab. Ponts.
- ELLERBROCK, H.G., MATHIAK, H. 1994: Ögütme Teknolojisi ve Enerji Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Cemento Bulletin, Vol. 336.
- ERDOGAN, T.Y. 1997: Admixture for Concrete. Middle East Technical University. Press. Ankara.
- ERDOGAN, T.Y. 2002: Materials of construction. Middle East Technical University. Press. Ankara.
- ERDOGAN, T.Y. 2003: Beton. Middle East Technical University Press, Ankara.
- ERDOGDU, K. 1996: Effects of pozzolanic cements of different fineness values and some mechanical properties of pozzolanic cements of different fineness values. Thesis. Middle East Technical University, Ankara.
- FRAZAO, M. 2007: Concentración de fases zeolíticas de las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes. Alfredo Lázaro Coello Velásquez (Tutor). Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 105 p.

- Gayoso R. y Rosell M. 2003: Zeolita utilizada como aditivo mineral activo para hormigones. V Conferencia Internacional de zeolita. Memorias [CD - ROM], Universidad de la Habana, Cuba, marzo 2003.
- GENER R. M. y CABRERA, J. 2002: Influencia de la relación agua/cemento en la elaboración del mortero normalizado de los cementos con puzolana. *Materiales de Construcción*, ISSN 0465-2746 (265): 77-84.
- GENER, R. M y ALONSO, L. J. M. 2002: Influencia de la composición mineralógica de puzolanas naturales en las propiedades de los cementos con adiciones. *Materiales de construcción*, ISSN 0465-2746 (267): 73-78.
- GENER, R. M. 2008: Actividad puzolánica de una roca volcánica zeolítica. *Materiales de construcción*. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja". Madrid.
- GILI, G. 2000: Cementos. Definiciones, clasificación y prescripciones. Hormigón armado. Barcelona. 21 p.
- GONZÁLES DE LA COTERA, S. M. 1996: Apreciación de la actividad puzolánica. VI Coloquio de Química del Cemento. Memorias. Lima, Perú. 10 p.
- GONZÁLEZ, M. 1991: Ataque químico al concreto. Exposición en el ciclo organizado por el ACI. Capítulo peruano sobre corrosión en estructuras de concreto. 17 p.
- GONZÁLEZ, M. 2000: Requerimientos del cemento en los reglamentos de construcción. Memorias. ASOCEM-2000. 30 p.
- HOWLAND, J. J.; BLANCO-VARELA, M. T.; GENER, M. y MARTÍN, A. R. 2006: Investigación sobre la durabilidad de los hormigones elaborados con cemento Pórtland y adición de puzolanas naturales, en ambiente marino. *Cemento Hormigón*, ISSN 0008-8919 (891): 2-10.
- INSPECCIÓN ESTATAL ENERGÉTICA. 2000: Diagnóstico Energético. Rama Cemento. Ministerio de Economía y Planificación. Dirección de Energética, Departamento de la Inspección Estatal Energética. Ciudad de la Habana, 30 de enero del 2000. 83 p.

- JIMÉNEZ, M. P.; GARCÍA, M. A. y MORÁN, C. F. 1982: Hormigón armado. Tomo I. Barcelona, España. Editorial Gustavo Gili S.A. ISBN 84 - 252 – 0758 – 4: 13–18.
- LEA, F. M.1938: The chemistry of pozzolans, Proc. Symp on the Chemistry of Cement. Estocolmo. 460 – 504 p.
- LEA, F. M.1940: Investigation on pozzolans, building research tech. His Majesty's Stationary Office, Londres. Paper (27): 63 p
- LEA, F. M.1954: Mecanismo dell'azione puzolánica, Estratto dagli anali di chimica. Roma. Vol. 44.
- LEYVA, R. C; CARMENATE F. J.; ÁLVAREZ, D. R. y CASTELLANOS, P. E. 2008: Valoración de los recursos minerales territoriales en Cuba y sus perspectivas para potenciar la pequeña minería a nivel local. Taller Iberoamericano de Recursos Minerales y apoyo a la pequeña minería. [en línea], junio 2008
Consulta: 21 marzo 2010. Disponible en:
<http://petitamineria.com/comunicaciones/valoraciondelosrecursosmineralesterritorialesencuba/leyvarodriguezetal.pdf>
- LÓPEZ P., L. M. 2006: Caracterización geológica de las materias primas mineras de los municipios Moa – Sagua de Tánamo para su empleo como material de construcción. Carlos Leyva Rodríguez (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 87 p.
- MALHOTRA, V.M. y MEHTA, P. K. 1996: Pozzolanic and Cementitious Materials. Gordon and Greca Publishers, Preface.
- MALQUORI, G. 1960: Pórtland Puzzolanic Cements. Proc. IV Int. Symposium of the Chemistry .of Cements Washington.
- MARTÍNEZ, J.; PÉREZ, N.; PONCE, N.G.; BATISTA, R. 1994: Pronóstico de Materias Primas No Tradicionales de la República de Cuba. IGP. La Habana. Inédito.
- MASSAZZA, F. 1974: Chemistry of Puzzolanic Adition and Mixed Cements. En: VI International Congress on the Chemistry of Cements. Moscú.

- MASSAZZA, F., y COSTA, V. 1979: Aspects of the Pozzolan Activity and Properties of Pozzolan Cements, *Il Cemento* (76): 3-18, Jan.-Mar.
- Mather, K., 1982: Current Research in Sulfate Resistance at the Waterways Experiment Station, George Verbeck. En: *Symposium on Sulfate Resistance of Concrete*, SP-77, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich: 63-74.
- MEHTA, P. K., 1981: Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin-Earth," *Cement and Concrete Research*, 11: 507-518.
- MITROFÁNOV, S. I. 1982: Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Moscú, Editorial Mir. 435 p.
- Muñoz, J. A. y Rabilero, A. C. 1975. Actividad puzolánica. Evaluación de una toba cubana". *Revista Tecnológica*; 12(5): 47-58.
- MUXLANGA, R. J. 2009: Evaluación de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo para su utilización como árido y puzolana natural en la construcción. Roger Samuel Almenares Reyes (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico 48 p.
- 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.
- ODLER, I. 2000: *Special Inorganic Cement*, E and Fn Spon. 150 p.
- 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. Carlos Leyva Rodríguez (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 62 p.
- QUINTANA, C. E. 2005: Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Emilio R. Redolfi (Tutor). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba. 308 p.
- RABILERO, A. C. 1988: Las Puzolanas. Cinética de Reacciones. Editorial Oriente. Santiago de Cuba. Santiago de Cuba. 114 p.
- RABILERO, A. C. 2005: Mineralogía de las puzolanas. VI Congreso de Geología. Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GOCIENCIAS'2005. Memorias [CD-ROM], La Habana, Cuba, 5 - 8 de abril.
- RAMACHANDRAN, V. S. 1995: Concrete Admixtures Handbook. Second Edition, Noyes. 670 p.
- ROSELL, M. 2006: Zeolitas naturales cubanas. Reactividad puzolánica. Uso en adiciones para hormigones. Centro Técnico para el desarrollo de Materiales de Construcción. 123 p.
- ROSELL, M. 2007: Influencia del tamaño de partícula de zeolita en su actividad puzolánica. II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GOCIENCIAS'2007. Memorias [CD - ROM], La Habana, Cuba, marzo 2007.
- ROSELL, M. y Gayoso, R. 2001: Utilización de la zeolita como material de construcción. Experiencia cubana. I Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Red CYTED XIII-C. 10 p.
- ROSELL, M; COSTAFREDA, J. L., PARRA, J. L. y CALVO, B. 2011: Influencia de la adición de zeolita en las propiedades micro y macroestructurales en pastas y morteros. En: IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Memorias [CD - ROM]. Soria, España, 9 - 10 de agosto.
- SARICIMEN, H.; MASLEHUDDIN, M. AL-MANA, A. y I.EID, O. 1992: Effect of field and laboratory curing on the durability characteristics of plain and pozzolan concretes. Cement and Concrete Composites. 14(3):169-177.

- SHANNAG, M. JAMAL y YEGINOBALI, ASIM. 1995: Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*. 25(3): 647-657.
- SORIA, F. 1967: Panorama de los cementos puzolánicos en el futuro. Premio Luzán. Compañía española de puzolanas. Madrid. 46 p.
- SOUSA CONTINHO, A. 1959: Las puzolanas y sus propiedades. *Revista Cemento – Hormigón*. (306).
- STANTON, T. E., 1950: Use of pozzolans for counteracting excessive concrete expansion resulting from reaction between aggregates and alkales in cement. En: *Symposium on use of pozzolanic materials in mortars and concrete*, STP 99, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 178-201.
- TAPIA, M. E. 2003: Valoración de la gestión geominera ambiental en el yacimiento Zeolita San Andrés. Hugo Ivonnet Borrero (Tutor). Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico 70 p.
- TOBON, J. I. 2000. Puzolanas en los alrededores de Irra. Departamento de Recursos Minerales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, *Dyna* 129.
- TURRIZIANI, R. 1964: Aspects of the Chemistry of Puzzolanas. *The Chemistry of Cements*. Vol. 2. Cap. XIV. Academic Press. 69 p.
- VALDEZ, P. L; DAS ROY, T K y RIVERA, R. 2004: Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales – portlandita. *Ciencia UANL*, VII(002): 190 - 195.

ANEXOS

Anexo 1. Resistencia a la flexotracción y compresión de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo y Guaramanao, y las tobas zeolitizadas de Caimanes y San Andrés

Resistencia a la flexotracción (15 %)		Tiempo de fraguado				
		7 días	28 días	60 días	90 días	120 días
Patrón Sagua		0,49	0,76	0,80	0,72	0,88
Patrón Holguín		0,89	0,92	0,99	1,15	1,15
Tobas vítreas Sagua de Tánamo		0,37	0,57	0,67	0,73	0,77
Tobas zeolitizadas Caimanes		0,38	0,63	0,69	0,72	0,73
Tobas vítreas Guaramanao		0,47	0,87	1,00	1,01	1,05
Tobas zeolitizadas San Andrés		0,71	0,98	1,09	1,18	1,19
Resistencia a la flexotracción (30 %)		Tiempo de fraguado				
		7 días	28 días	60 días	90 días	120 días
Patrón Sagua		0,49	0,76	0,80	0,72	0,88
Patrón Holguín		0,89	0,92	0,99	1,15	1,15
Tobas vítreas Sagua de Tánamo		0,32	0,46	0,52	0,66	0,69
Tobas zeolitizadas Caimanes		0,34	0,50	0,60	0,65	0,68
Tobas vítreas Guaramanao		0,48	0,73	0,79	1,00	1,02
Tobas zeolitizadas San Andrés		0,56	0,79	0,80	0,97	0,98
Resistencia a la compresión (15 %)		Tiempo de fraguado				
		7 días	28 días	60 días	90 días	120 días
Patrón Sagua		18,83	31,87	36,27	37,69	42,01
Patrón Holguín		33,77	37,63	41,71	43,78	44,31
Tobas vítreas Sagua de Tánamo		14,53	25,12	28,77	31,06	35,38
Tobas zeolitizadas Caimanes		14,67	25,26	29,39	31,42	35,60
Tobas vítreas Guaramanao		27,05	34,97	39,14	42,46	44,66
Tobas zeolitizadas San Andrés		27,25	37,42	41,71	44,17	45,02
Resistencia a la compresión (30 %)		Tiempo de fraguado				
		7 días	28 días	60 días	90 días	120 días
Patrón Sagua		18,83	31,87	36,27	37,69	42,01
Patrón Holguín		33,77	37,63	41,71	43,78	44,31
Tobas vítreas Sagua de Tánamo		10,43	18,91	21,97	23,94	27,27
Tobas zeolitizadas Caimanes		11,83	19,87	22,81	24,10	27,57
Tobas vítreas Guaramanao		19,44	26,93	28,72	31,58	33,13
Tobas zeolitizadas San Andrés		18,44	29,27	32,51	34,34	35,82

Anexo 2. Morteros para la determinación de la resistencia mecánica a los 28 días



Anexo 3. Composición mineralógica cuantitativa de las fases cristalinas de las tobas analizadas

Tobas Sagua de Tánamo		Tobas Caimanes		Tobas Guaramanao		Tobas San Andrés	
Fases minerales	Contenido, %	Fases minerales	Contenido, %	Fases minerales	Contenido, %	Fases minerales	Contenido, %
Albita	16,02	Albita	15,21	Albita	22,68	Albita	14,41
Anortita	22,79	Anortita	23,88	Anortita	14,97	Anortita	25,00
Apatito	0,24	Apatito	0,21	Apatito	0,14	Apatito	0,19
Diópsido	0,97	Diópsido	3,33	Diópsido	7,47	Diópsido	0,59
Hematita	4,58	Hematita	3,99	Hematita	2,98	Hematita	3,00
Hyperstena	6,00	Hyperstena	4,67	Wollastonita	0,05	Hyperstena	7,21
Ilmenita	0,13	Ilmenita	0,15	Ilmenita	0,19	Ilmenita	0,11
Ortoclasa	13,54	Ortoclasa	12,39	Ortoclasa	16,42	Ortoclasa	11,25
Cuarzo	34,66	Cuarzo	35,13	Cuarzo	34,38	Cuarzo	37,15
Esfena	1,06	Esfena	1,03	Esfena	0,73	Esfena	1,09
X-Magnesio	1,00	X-Magnesio	1,00	X-Magnesio	1,00	X-Magnesio	1,00

Anexo 4. Composición química cuantitativa de los elementos trazas

Elementos	Contenido, ppm			
	Tobas Sagua	Tobas Caimanes	Tobas Guaramanao	Tobas San Andrés
Ba	666	725	827	762
Ce		33	47	
Co	4,8		4,6	
Cr	54	38	4,6	46
Cu	49	37	57,3	39
La		41,5	19,5	
Nb	5,9	5,9	9,2	7,1
Ni	40	46	16	100
Ga	17	14	18	15
Pb	24	23	19	26
Pr		4,7	2,3	
Sr	232	263	151	414
Th	14	7,1	3,4	5,9
V	55	47	25	53
Y	27	34	42	36
Zr	262	253	256	207
Zn	92	80	86	68
U			8,0	

Anexo 5. Recomendaciones para morteros de colocación. Fuente: NC 175-2000

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