



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

**ACTIVACIÓN TÉRMICA DE LAS TOBAS VÍTREAS DEL  
YACIMIENTO SAGUA DE TÁNAMO PARA SU  
UTILIZACIÓN COMO ADITIVO PUZOLÁNICO**

**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y  
MATERIALES**

**Yasmany Martínez Azahares**

**Moa 2013**



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

# **ACTIVACIÓN TÉRMICA DE LAS TOBAS VÍTREAS DEL YACIMIENTO SAGUA DE TÁNAMO PARA SU UTILIZACIÓN COMO ADITIVO PUZOLÁNICO**

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y  
MATERIALES

Autor: Yasmany Martínez Azahares

Firma.....

Tutores: Prof. Asist. Ms.C. Roger Samuel Almenares Reyes

Firma.....

Prof. Aux. Dr.C. Carlos A. Leyva Rodríguez

Firma.....

Prof. Adies. Ing. Yosbel Guerra González

Firma.....

**Moa 2013**

## **DEDICATORIA**

*A mi hermana; a mi familia; a la memoria de mi abuelo; a mis compañeros y amigos y en especial a mis queridos padres por su dedicación, confianza y paciencia durante todos estos años de vida. Gracias.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco sinceramente:

**A** mi tutor Ms.C. Roger Samuel Almenares Reyes por el apoyo incondicional y sincero que me brindó, 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 que hicieron todo lo posible por forjarme como un profesional

**A** mis padres, a mi hermana, a mi sobrina a mis tíos, a mis primos. A mi gran familia.

**A** mis compañeros y amigos, Danilo, Aníbal, Marnolquis, Shin, Lizandra y Reinier que realmente me han brindado su apoyo en todos estos cinco años de estudio

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

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

Muchas gracias.

**PENSAMIENTO**

*Sobre la tierra y la fuerza de la naturaleza no hay más que un poder definitivo: La prevención humana.*

*José Martí*

## **RESUMEN**

Se determinaron las propiedades puzolánicas del material tobáceo del yacimiento de Sagua de Tánamo, para evaluar las perspectivas de su utilización como puzolanas naturales activadas térmicamente, según los parámetros de calidad normalizados, al sustituir el cemento Pórtland con porcentaje de: 30 % en peso. Se realizó la determinación del índice de actividad puzolánica a través de los ensayos de resistencia a la compresión a partir del método indicado en las normas para tales especificaciones. Lo que permitió determinar que estos materiales, poseen perspectivas para su utilización como aditivo puzolánico, Por su actividad puzolánica, en orden descendente, se destacan las tobas calcinadas a temperaturas de 750, 600 y 450 °C. Al sustituir el 30 % de cemento con material tobáceo activado, se obtienen morteros cuyos índices de actividad resistente son superiores al 75 % que son las exigidas por las normas y son suficientes para su utilización en aplicaciones en la industria de la construcción.

## **ABSTRACT**

Pozzolanic properties were determined tuffaceous material from the site of Sagua de Tánamo to assess the prospects for use as thermally activated natural pozzolans as standardized quality parameters, replacing Portland cement with a percentage of 30% by weight. Determination was performed pozzolanic activity index by testing compressive strength from the method indicated in the rules for such specifications. What established that these materials have prospects for use as pozzolanic additive, for its pozzolanic activity, in descending order highlights the tuffs, calcined at temperatures of 750, 600 and 450 °C. By replacing 30% of cement with tuffaceous material activated mortars are obtained which are resistant activity indices above 75% which are required by the rules and are sufficient for use in applications in the construction industry.

<b>ÍNDICE</b>	<b>PÁG.</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....</b>	<b>5</b>
1.1. TOBAS VÍTREAS.....	5
1.2. PERSPECTIVAS DE UTILIZACIÓN DE LAS TOBAS VÍTREAS.....	6
1.3. PUZOLANAS. ORIGEN DEL TÉRMINO.....	8
1.3.1. Definición de Puzolanas.....	8
1.3.2. Clasificación de las puzolanas según su origen.....	9
1.3.3. Valoración de la puzolanidad .....	10
1.3.4. Reacción Puzolánica.....	13
1.4. INFLUENCIAS DE LAS PUZOLANAS EN LA SUSTITUCIÓN DE CEMENTO.....	14
1.5. INVESTIGACIONES RELACIONADAS CON EL EMPLEO DE MATERIALES PUZOLÁNICO.....	16
1.6. ACTIVACIÓN TÉRMICA DE LAS TOBAS VÍTREAS.....	18
CONCLUSIONES PARCIALES.....	19
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODO.....</b>	<b>20</b>
2.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS TOBAS VÍTREAS DEL YACIMIENTO DEL PICAJO DE SAGUA DE TÁNAMO .....	20
2.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	21
2.3. DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA .....	21
2.4. FUNDAMENTACIÓN Y SELECCIÓN DEL DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS.....	22
2.5. TOMA Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	23
2.5.1. Tobas vítreas.....	23
2.5.2. Arena.....	25
2.6. PREPARACIÓN DE LOS MORTEROS.....	26
2.7. DETERMINACIÓN DE LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS.....	29
2.8. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA.....	33
CONCLUSIONES PARCIALES.....	34

<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
3.1. RESULTADO EXPERIMENTAL Y SU ANÁLISIS.....	35
3.1.1. Caracterización granulométrica.....	35
3.1.2. Resistencias Mecánicas.....	36
3.2. ANÁLISIS DE LAS PERSPECTIVAS DE UTILIZACIÓN DEL MATERIAL ESTUDIADO, COMO ADITIVO PUZOLÁNICO .....	41
3.2.1. Evaluación del índice de puzolanidad .....	41
3.2.2. Valoración socioeconómica y ambiental .....	43
CONCLUSIONES PARCIALES.....	46
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>48</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>50</b>

## **INTRODUCCIÓN**

La Industria Cementera Cubana, pone en práctica numerosos planes constructivos para la rehabilitación de la infraestructura de los sistemas de Salud Pública, Educación, Transportes, Comunicaciones, Vivienda, Turismo, Energía, además de los nuevos compromisos internacionales adquiridos en este campo, los cuales necesitan de grandes volúmenes de cementos, sin que la industria cementera cubana pudiera satisfacerlos en cantidad y calidad. (Batista, 2007).

El cemento Pórtland se encuentra entre los materiales más empleados y con mayor volumen de producción a nivel mundial. Si se le compara con otros materiales de construcción como los plásticos, el aluminio, la madera, el acero o el vidrio, los costos energéticos y de emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de masa del CPO son muy bajos. Sin embargo, por sus altos volúmenes de producción, su elaboración está asociada a un alto consumo energético y a grandes volúmenes de emisiones de CO<sub>2</sub> a escala global, fundamentalmente durante la producción del clínker, factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental (Martirena, 2009). Por lo tanto, sus demostradas ventajas como material de construcción y su necesaria demanda para el desarrollo socioeconómico contrastan con un negativo impacto medioambiental, en un momento en que el cuidado del entorno y la eficiencia en la utilización de los recursos energéticos deben estar entre las principales prioridades de la humanidad. (Alujas, 2010).

Una de las vías para disminuir el impacto negativo al medio ambiente y los altos consumos energéticos de la industria del cemento, es la disminución o sustitución parcial del clínker por puzolanas o materiales puzolánicos, los cuales sin dudas poseen probadas cualidades para estas aplicaciones. Estas y otras razones han

motivado el desarrollo de diversas investigaciones encaminadas a la búsqueda de nuevos materiales que puedan ser utilizados como material puzolánico tanto a nivel regional como local.

Las puzolanas son productos naturales o artificiales, silíceos o sílico-aluminosos que en si mismos poseen poca o ninguna propiedad aglomerante ni de actividad hidráulica, pero finamente molidas, a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos que sí tienen propiedades aglomerantes e hidráulicas (ASTM C - 618).

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.

Las puzolanas naturales en Cuba están representadas principalmente por las tobas con diferente composición mineralógica, alteradas por procesos hidrotermales y meteorización. Desde el punto de vista geólogo – industrial se dividen en: Tobs meteorizadas, Tobs vítreas (vidrio volcánico) y Tobs zeolitizadas. Las tobas vítreas (vidrio volcánico), son de las puzolanas naturales presentes en Cuba, las menos estudiadas para este uso (Batista et al, 2010).

Los recursos pronósticos de tobas vítreas se valoran en unos 400 millones de toneladas métricas, solamente en las provincias de Holguín, Santiago de Cuba y Guantánamo, regiones estas donde las perspectivas son considerables. La importancia de la evaluación de las tobas vítreas como puzolanas naturales, está dada por su elevada reactividad o puzolanidad, a partir del alto por ciento de vidrio volcánico, presente en su composición petrográfica. La puzolanidad de estas rocas en Cuba, solo ha sido estudiada muy puntualmente, no obstante existen resultados alentadores, pero solo a nivel de laboratorio y muestras aisladas (Batista et al. 2010).

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),

Almenares (2011); quienes han estudiado puzolanas de excelentes cualidades, aptas para su empleo en la industria del cemento. Dentro de los depósitos con mayor potencialidades se encuentra el yacimiento El Picado en Sagua de Tánamo, el cual ha sido objeto de estudio para investigadores como, López (2006), De Armas (2008), Muxlanga 2009, Cabrera (2010) y Almenares (2011), con resultados positivos. Sin embargo sus resultados han estado limitados por la poca reactividad puzolánica de este material en determinado grado de sustitución. Estudios realizados por Habert et al, 2009 muestran que la actividad puzolánica de las puzolanas naturales puede incrementarse por un tratamiento térmico. La calcinación a baja temperatura mejora considerablemente el comportamiento de los cementos puzolánicos cuando contiene minerales secundarios tales como arcillas y zeolitas.

Partiendo de estas experiencias, y la composición mineralógica de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo, pues según Almenares 2011, contienen alrededor de 16 a 39 % de arcilla del tipo montmorillonita, posee expectativas de activación térmica, lo cual brinda un mayor grado de reactividad.

Por lo tanto se considera entonces **situación problémica** del presente trabajo: La necesidad de conocer el carácter puzolánico de las tobas vítreas del yacimiento del Picao de Sagua de Tánamo a través del proceso de activación térmica. De esta forma se declara como **problema de la investigación**: El insuficiente conocimiento del carácter puzolánico de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo a partir de su calcinación limita sus posibilidades de utilización como aditivo puzolánico de alta reactividad.

### **Objeto de estudio**

Actividad puzolánica de las tobas vítreas del yacimiento de Sagua de Tánamo después de ser activadas.

### **Objetivo general**

Determinar la actividad puzolánica de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo, a partir de su activación térmica.

### **Objetivos específicos**

- Determinar el carácter puzolánico de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo activadas térmicamente a temperaturas y tiempo prefijados.
- Determinar los valores de resistencia mecánicas de los morteros con adición de tobas vítreas, para determinar el índice de actividad resistente.

### **Tareas de la investigación**

- Recopilación y análisis de los trabajos relacionados con los materiales 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 físico - mecánico.
- Dosificación de las tobas vítreas en el cemento mezclado para la elaboración de morteros.
- Activar térmicamente las tobas a temperaturas de 450, 600 y 750 °C.
- Determinación del índice de actividad resistente a través de los ensayos de resistencias mecánicas de los morteros de tobas vítreas a los 7 y 28 días.
- Análisis de los resultados.

### **Hipótesis**

Si se activan térmicamente las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo es posible obtener un material puzolánico que supere la reactividad de las mismas de forma natural.

### **Campo de acción**

Activación térmica de las tobas vítreas del yacimiento de Sagua de Tánamo.

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

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

### **1.1. Tobas vítreas**

Las tobas vítreas son rocas de origen volcano-sedimentario, son tobas de composición ácida y medias con colores claros grises o beige, muy porosas y ligeras. Predominan las tobas de grano fino y medio, en ocasiones algo alteradas ó montmorillonitizadas, con presencia de carbonato de calcio e interestratificadas con calizas silicificadas, asociados a las rocas de los Arcos Volcánicos (Batista et al., 2010). En la tabla 1.1 se muestran los principales yacimientos de este material tobáceo en Cuba.

Tabla 1.1 Principales yacimientos de tobas vítreas cubanas.

<b>Yacimientos</b>	<b>Localización</b>
Jiguaní	Granma
Ají de la Caldera	Guantánamo
Amansaguapo	Sagua de Tánamo, Holguín
Lirial	Sagua de Tánamo, Holguín

Guaramanao	Holguín
Río Tosca	Matanzas
El Picado	Sagua de Tánamo, Holguín

En otras regiones de Cuba las perspectivas son más limitadas a partir de las características geológicas de las unidades litoestratigráficas que contienen tobas, al presentar un mayor grado de zeolitización, o alteraciones por los procesos tectónicos y el intemperismo, existiendo perspectivas para esta roca, principalmente en los flancos de los yacimientos evaluados para tobas zeolíticas.

### **1.2. Perspectivas de utilización de las tobas vítreas**

En general esta materia mineral se ha estudiado como medio filtrante de diferentes líquidos y gases como: aceites, aguas, cerveza, vinagre, vino, alcohol, combustibles, áridos ligeros, abrasivos. En la actualidad solo se utiliza para fabricar detergentes (Batista 2010).

Los recursos pronósticos de tobas vítreas se valoran en unos 400 millones de toneladas métricas, solamente en las provincias de Holguín, Santiago de Cuba y Guantánamo, regiones estas donde las perspectivas son considerables.

Las tobas vítreas han sido probadas para su utilización como:

1. Aislante térmico en la industria cerámica y en otras industrias como el níquel
2. Material filtrante en la purificación de acetileno
3. Lozas antiácidas
4. Medio filtrante en la planta de cloro sosa
5. Relleno de plástico
6. Filtrante de cerveza, jugo de henequén, ron y vino
7. Decapado de metales
8. Medio filtrante en la industria azucarera
9. Floculante en la potabilización de aguas superficiales

10. Limpiador doméstico

11. Como material puzolánico para cemento romano

Atendiendo a sus parámetros físicos – químicos pueden ser utilizadas en:

1. Abrasivo en los ralladores de las cajas de fósforos
2. Fabricación de lozas de falso techo
3. Fabricación de hormigón celular (Siporex)
4. Para ladrillos aligerados sin quemar

Tabla 1.2 Recursos calculados y principales características de los principales yacimientos de tobas vítreas cubanas.

Yacimientos	Recursos x10 <sup>6</sup> /ton	Consecionario	Características mineralógicas, en %	
			Vidrio Volcánico	Montmorillonita
Jiguaní	0,25	No	>60	34,0
Ají de la Caldera	0,8	No	>62	21,0
Amansaguapo	12,3	No	>60	-
Lirial	50,0	No	>60	-
Guaramanao	0,136	Geominsal	>80	11,0
Río Tosca	1,1	No	>60	16,3
El Picado (Sagua)	1,3	No	>60	15,0
Total	65,88			

Una de las mayores perspectivas para Cuba se ha considerado por muchos autores (Batista 2010), su empleo en la industria del cemento en calidad de puzolanas naturales o aditivo puzolánico, en el que además se podría convertir en

una alternativa local de producción de este tipo de materiales por su gran abundancia y características.

La importancia de la evaluación de las tobas vítreas como puzolanas naturales, esta dada por su elevada reactividad o puzolanidad, a partir del alto por ciento de vidrio volcánico, presente en su composición petrográfica. La puzolanidad de estas rocas en Cuba, solo ha sido estudiada muy puntualmente, no obstante existen resultados alentadores, pero solo a nivel de laboratorio y muestras aisladas.

### **1.3. Puzolanas. Origen del término**

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

#### **1.3.1. Definición de Puzolanas.**

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 molidas y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes (Quintana, 2005).

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

### **1.3.2. 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 para su 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.

### **1.3.3. 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 flósculos, su cantidad y velocidad de sedimentación.

**Físicos y tecnológicos:** Uno es la observación al microscopio del material para definir la perfección de su estructura cristalina. Otro ensayo consiste en la elaboración de pequeñas probetas de mezcla del material con cal hidratada, éstas se conservan durante tres días en ambiente húmedo y sin CO<sub>2</sub>, al cabo de los cuales se comprueba si se ha producido algún endurecimiento de la masa. Se considera que el material ensayado es puzolánico cuando las probetas así conservadas resisten, sin deshacerse, dos horas en agua hirviente.

### **Criterios Cuantitativos**

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

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

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

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

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

En las puzolanas hay dos aspectos de gran interés prácticos: la extensión y la velocidad de fijación de cal. La extensión varía con el tipo de material puzolánico, su composición, constitución y contenido de minerales. La velocidad es, quizás, la indicación más útil, pues las diferentes puzolanas, a largo plazo, tienen pocas diferencias en las resistencias, pero en períodos cortos hay diferencias sustanciales.

Las puzolanas al final de las transformaciones en el cemento, aparecen formando silicato de calcio hidratado del tipo tobermorfítico en forma de gel al igual que los silicatos del clínker y forma además aluminato tetracálcico hidratado. Las reducciones en el calor desprendido en su hidratación dieron otra razón para su uso en grandes masas de hormigón.

Las propiedades de las puzolanas dependen de la composición química y la estructura interna. Se prefiere puzolanas con composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sea mayor del 70 %. Se trata de que la puzolana tenga una estructura amorfa. Es esencial que la puzolana esté finamente molida, para que la sílice pueda combinarse con los óxidos e hidróxidos de calcio, liberados durante las reacciones de hidratación del cemento Portland en presencia de agua, para formar silicatos de calcio estables con propiedades cementantes. Las adiciones al cemento Portland varían de un 3 % hasta más de un 35 %.

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

Como se puede observar, existen diversos métodos para evaluar la reactividad puzolánica, casi todos basados en la medición durante un intervalo de tiempo más o menos largo de distintas propiedades físicas o químicas directamente relacionadas con la reacción puzolánica. En dependencia de las propiedades a evaluar o de los tiempos de ensayo requeridos, pueden ser empleados sistemas CPO-Puzolana, o  $\text{Ca(OH)}_2$ -Puzolana, bajo la forma de pastas, morteros u hormigones.

Los ensayos de resistencia mecánica son insustituibles, en tanto aportan valiosos datos directamente relacionados con el desempeño del material en la práctica y representan el aporte de todos los factores relacionados con la reacción puzolánica, aunque si bien estos por sí solos ofrecen poca información sobre los procesos responsables de la reactividad puzolánica, pueden ser utilizados como una vía para determinar el comportamiento puzolánico de nuevos materiales.

#### **1.3.4. Reacción Puzolánica.**

Las bases para el empleo de los materiales puzolánicos como sustitutos parciales del clínker en el CPO o como materiales mezclados con el propio CPO, se fundamentan en las reacciones ácido-base en su concepción más general. El ataque químico de los iones  $\text{OH}^-$  que provienen de la disolución del  $\text{Ca(OH)}_2$  y de los iones alcalinos liberados en la hidratación del CPO (componentes básicos) a las redes aluminosilíceas (componentes ácidos) que se encuentran en un estado de alto desorden estructural dentro de las puzolanas, provoca la ruptura de los enlaces Si-O y Al-O y la liberación de oxianiones a la solución. Ya que la solución de poros del cemento es esencialmente alcalina, el producto inmediato de la reacción es un gel amorfo donde el  $\text{K}^+$  y el  $\text{Na}^+$  son los cationes dominantes. Sin embargo, la abundante presencia de  $\text{Ca}^{2+}$  y la baja solubilidad de los CSH (silicato de calcio hidratado) aseguran que este gel sea solo un producto intermedio. Los nuevos productos de hidratación, formados a partir de la reacción de las puzolanas con la CH (Portlandita) generada durante la hidratación del CPO, son

los responsables de la mejora en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón. (Taylor, 1990)

La composición de los CSH formados durante la reacción puzolánica es similar a la de los CSH formados durante la reacción de hidratación del cemento, pero con una relación Ca/Si generalmente más baja. Si existen apreciables cantidades de alúmina reactiva en la puzolana, tal y como es el caso de las arcillas calcinadas, esta tiende a favorecer no solo la formación de fases de aluminato de calcio, sino también la sustitución parcial del Si por Al en la estructura de los CSH, incrementando así la relación Al/Ca en los CSH. Al igual que las principales reacciones de hidratación del CPO, las reacciones puzolánicas son exotérmicas, pero como se verifican bajo una cinética más lenta, su aporte al calor de hidratación para un instante determinado es menor, aunque la contribución al calor total acumulado puede llegar a ser significativa. (Ramachandran, et al.2002)

La reacción principal que tiene lugar en estos sistemas es la que se describe en la reacción (I), donde se obtiene como producto el silicato de calcio hidratado, también comúnmente formulado en esta rama con las siglas C-S-H:



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

#### **1.4. Influencias de las puzolanas en la sustitución de cemento.**

La adición de puzolanas confiere al cemento Pórtland, propiedades de gran importancia práctica, como son: aumento de su estabilidad química y por tanto aporta una mayor durabilidad al hormigón, así como otras no menos importantes, tales como:

- Disminuye la liberación del calor de hidratación confiriendo menor permeabilidad en los hormigones, que los hace idóneos para la construcción de presas y obras que necesiten grandes masas de este material.
- Mejora la trabajabilidad de la mezcla de hormigón, con menor tendencia a la segregación de sus componentes;
- Mayor homogeneidad del hormigón.

El resultado del remplazo parcial del CPO por un material puzolánico puede ser descrito como la combinación lineal de varios efectos físicos y químicos. Dentro de los efectos físicos, el efecto de dilución implica, para una misma relación  $V_{H_2O}/V_{Aglomerante}$ , un mayor espacio para la formación y crecimiento de las fases hidratadas y un aumento de la relación  $V_{H_2O} / V_{CPO}$ , lo cual favorece además la reacción de hidratación. También se incluyen el aumento de la compactidad y la nucleación heterogénea por el aporte de las puzolanas de una superficie adicional que favorece la nucleación y crecimiento a edades tempranas de los productos de hidratación del CPO. Estos efectos no dependen de la reactividad química de la adición mineral, sino de la cantidad de superficie disponible y del por ciento de sustitución. Son efectos muy importantes a edades tempranas y pueden ser cuantificados a partir de las diferencias entre los valores de resistencia de morteros con adiciones puzolánicas y morteros con el mismo por ciento de sustitución por un material inerte de similar granulometría. (Cyr et al, 2006.)

El efecto químico fundamental está dado por la reactividad puzolánica de la adición mineral. La CH aportada durante la hidratación del CPO puede representar en una pasta completamente hidratada hasta un 28% en masa respecto a la masa inicial de CPO. La CH no contribuye a la resistencia mecánica y puede ser extraída de la masa del hormigón en sucesivos ciclos de humedecimiento y secado, aumentando la porosidad e incrementando la permeabilidad y la susceptibilidad al ataque de agentes químicos externos como las aguas de ambientes marinos saturadas de cloruros, o las aguas subterráneas ricas en sulfatos (Taylor, 1990). La alta concentración de grandes cristales de CH

alineados a lo largo de la zona de transición interfacial localizada entre el agregado y la pasta, conducen a la aparición de zonas con alta porosidad y baja resistencia mecánica que son el camino usual de fractura en el hormigón. (Justice et al. 2005).

Las puzolanas pueden reaccionar con parte de la CH presente en la pasta hidratada, densificando la microestructura de la pasta y refinando la estructura de poros, con el consiguiente incremento de la impermeabilidad y la resistencia mecánica (Zhang et al. 2000). Al mismo tiempo, como la CH presente en la pasta es susceptible a formar fases con potencial expansivo al reaccionar con agentes externos como los sulfatos, su reducción favorece la resistencia al ataque químico. También se ha reportado la disminución en la aparición de grietas por retracción (Souza y Molin, 2005). Puede afirmarse que con la sustitución del CPO por materiales puzolánicos, se mantienen o mejoran las propiedades físicas y de durabilidad.

Las principales desventajas reportadas para el empleo de puzolanas son las bajas resistencias mecánicas alcanzadas a edades tempranas y la necesidad del empleo de superplastificantes o de relaciones agua/ aglomerante mayores que para la pasta que contiene solo CPO, si se quiere mantener una laborabilidad constante de la mezcla. Para el caso de sistemas con altos volúmenes de sustitución por puzolanas muy reactivas también pueden manifestarse fenómenos asociados al agotamiento de la CH, con la consiguiente desestabilización de las fases hidratadas ricas en Ca y, para el caso de hormigones reforzados, la desestabilización de la capa pasiva que protege al acero como consecuencia de la disminución del pH. (Martirena 2003)

### **1.5. Investigaciones relacionadas con el empleo de materiales puzolánico.**

Day y Shi (1994), 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.

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.

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.

Un grupo de investigadores como López 2006; De Armas 2008; Muxlanga 2009; Cabrera 2010; Solís 2011; Almenares 2011 han estudiado materiales similares las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo y otros similares a este 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, se plantea las limitaciones que tienen estos materiales por su gran contenido de arcillas, lo cual imposibilita que los porcentajes de sustitución sean bajos.

### **1.6. Activación térmica de las tobas vítreas.**

La activación térmica o calcinación de las tobas, es una importante vía para la producción de puzolanas. Este es el proceso que ocurre cuando se le entrega calor a un material, de manera que el agua estructural que contienen es eliminada, modificándose la estructura cristalina original. Esta modificación provoca que el material se vuelva muy reactivo. Este proceso es conocido como dehidroxilación y consiste en la eliminación de los grupos hidroxilos para crear un material meta estable. Un estudio encontró que la temperatura de activación variando entre 450 °C y 900 °C era la más adecuada para el proceso de calcinación cuando se buscaba mayor reactividad (He et al. 1996). Durante la calcinación de las tobas pueden distinguirse varias etapas. Con el calentamiento desde temperatura ambiente hasta 250 °C ocurre la pérdida (reversible en algunos casos) del agua adsorbida y absorbida en las superficies externas e internas de la toba (deshidratación). Entre los 400 °C y los 950 °C ocurre la remoción de los OH<sup>-</sup> estructurales (desoxhidrilación) acompañada por el desorden parcial de la estructura cristalina y la formación de fases metaestables, caracterizadas por una alta reactividad química (Heller 2006).

Trezza et al. 2007, realiza un estudio de caracterización de una toba, de la zona de Olavarría (Loess pampeano) en Argentina, su activación térmica y posteriormente su utilización en la producción de cementos puzolánicos por técnicas de difracción de rayos X (DRX), espectroscopia infrarroja (IR), calorimetría diferencial, distribución de tamaño de poro y resistencia mecánica. En la investigación el autor partiendo del hecho de que las fases cristalinas no poseen

actividad puzolánica, sin embargo, aquellas que se encuentran desordenadas o en estado metaestable, presentan algo de actividad puzolánica. Valdez et al. 2004 somete la toba a un proceso de calcinación desde temperatura ambiente hasta 700 °C y se dejó a esa temperatura por un lapso de 30 minutos con la finalidad de activarla. Investigadores como; (Calleja, 1969 y Sabir et al, 2001) también realizaron estudios para definir la activación térmica de las puzolanas.

### **Conclusiones parciales**

Las tobas vítreas constituyen una importante alternativa para su empleo como aditivo puzolánico a partir de la valoración de las características y reservas existentes.

La activación térmica de las tobas vítreas permite obtener un material puzolánico de elevada reactividad, con los consiguientes beneficios energéticos, ambientales, económicos y de prestación.

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para determinar la actividad puzolánica de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo, a partir de su activación térmica mediante los valores de resistencia mecánicas de los morteros donde fue sustituido 30 % de cemento por toba calcinada, fue necesario el estudio de la caracterización del yacimiento muestreado, la selección y fundamentación del diseño de experimento así como la selección de los métodos y técnicas utilizados para la evaluación de las materias primas involucradas en el estudio, los cuales se ilustran en los siguientes acápites.

### **2.1. Características de las tobas vítreas del yacimiento del Picao de Sagua de Tánamo**

El yacimiento Sagua de Tánamo se localiza a 15 km al este de la cabecera municipal de Sagua de Tánamo, en la localidad “El Picao”. Este material tobáceo, se caracteriza por ser vitroclástico y vitrocrystaloclastico, de color blanco grisáceo, y granulometría fina a media, generalmente, abrasivo al tacto, poroso y ácido por su alto contenido de SiO<sub>2</sub>, conteniendo vidrio volcánico superior a 50 %. (Informe Prospección Preliminar y Detallada vidrio volcánico Sagua de Tánamo. Prov. Holguín, 1997). Su composición fundamental se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química promedio del Yacimiento El Picado. Fuente: Almenares, 2011.

<b>Composición química</b>	<b>Contenido (%)</b>
TiO <sub>2</sub>	0,49
MnO	0,06
K <sub>2</sub> O	2,27

MgO	0,06
Na <sub>2</sub> O	1,87
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,58
CaO	5,34
SO <sub>3</sub>	0,11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,63
SiO <sub>2</sub>	68,86

## 2.2. Composición mineralógica

En la tabla 2.2 se muestran los porcentajes de la matriz vítrea, así como el contenido de arcilla y las principales fases mineralógicas cristalinas encontradas. Se observa que se destaca el alto contenido de arcilla que presentan las tobas de Sagua de Tánamo.

**Tabla 2.2 Características mineralógicas del material tobáceo estudiado. Fuente: Almenares, 2011**

Material puzolánico	Matriz vítrea, %	Contenido de arcilla, %	Principales fases cristalinas
Tobas vítreas Sagua de Tánamo	54 - 80	16 - 39	Montmorillonita, albita, anortita, apatito, dióxido, hematina, hyperstena, Ilmenita, ortoclasa, cuarzo, esfena, X-magnesio

## 2.3. Determinación de la composición granulométrica

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

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 del material tobáceo.

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

#### **2.4. Fundamentación y selección del diseño de los experimentos**

De acuerdo con la literatura consultada, los principales ensayos que determinan la actividad puzolánica de las tobas calcinadas son: las resistencias mecánicas, específicamente la resistencia a la flexotracción y a la compresión. Siendo este último el de mayor importancia a la hora de analizar el índice de actividad resistente.

Por la sencillez y la rapidez de la obtención de los resultados, el método tradicional de experimentación, en las investigaciones exploratorias, lo hacen candidato para ser utilizado en esta investigación. El mismo consiste en realizar experimentos en los cuales varía solamente un parámetro y se mantienen constantes todos los demás. De este modo, la variación de las respuestas se puede atribuir entonces a un solo factor. Para el presente estudio, se analizará solo la influencia de la temperatura de calcinación en la resistencia mecánica de los morteros con sustitución parcial del 30 % de cemento Pórtland por tobas calcinada.

La selección de los parámetros de experimentación está dada fundamentalmente por la experiencia de investigadores en estudios de materiales similares. Los porcentajes escogidos para la sustitución de cemento Pórtland por toba se fundamenta, en que los cementos puzolánicos más difundidos llegan hasta un

30 % en contenido de puzolana (Stanton, 1950). No obstante, 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 actividad puzolánica en este material una vez activado térmicamente, se tomó un porcentaje máximo de 30 %, partiendo de la experiencia y el análisis previo, realizado en las investigaciones de: Meral 2004; De Armas 2008; Muxlanga 2009; Cabrera 2010; Solís 2011, Almenares 2011; Heller 2006 y Valdez et al 2004. La selección de la temperatura de calcinación se fundamenta en los trabajos de (He et al. 1996) y (Trezza et al 2007); donde estos investigadores mediante un amplio estudio realizado declararon que el rango de temperatura para el proceso de activación térmica variaba en los límites de 450 °C a 900 °C y para un tiempo prefijado aproximadamente de 60 minutos. Por lo tanto este intervalo de temperatura es la más adecuada para el proceso de calcinación cuando se busca una mayor reactividad.

La granulometría de las tobas se prefija de acuerdo a las características granulométricas del cemento. El cual se encuentra en la clase – 0,09 mm.

## **2.5. Toma y preparación de la muestra**

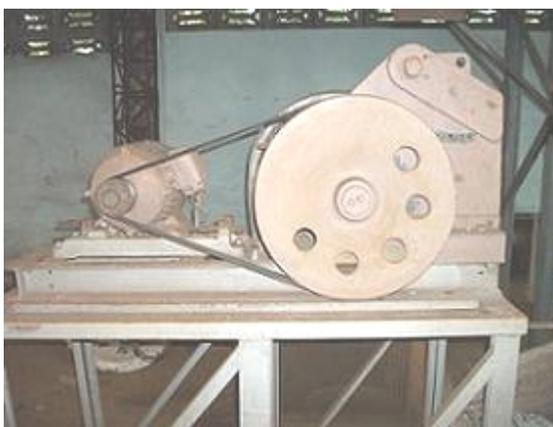
### **2.5.1. Tobas vítreas**

Para la realización de la investigación la muestra fue tomada en el yacimiento Sagua de Tánamo (El Picao). Para determinar la cantidad de material utilizado se tuvo en cuenta la norma cubana correspondiente (NC 178 2002).

Las muestras de tobas vítreas 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. La muestra general se constituyó con una masa de 100 kg.

Las muestras fueron trasladadas hacia el laboratorio de Beneficio de Minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico para ser 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 fue calcinada en un horno eléctrico J.P Selecta 2000 367 de fabricación española con un rango de temperatura de  $0$  °C a  $1000$  °C (Figura 2.4) a temperaturas prefijadas de 450, 600 y  $750$  °C y tiempo prefijado de 60 minutos y se dejó una pequeña porción para confeccionar morteros con adición en su forma natural; una vez obtenido el material calcinado se utilizó para la elaboración de los morteros a los cuales se les realizó ensayos para la determinación de la resistencia mecánica.



**Figura 2.1. Trituradora de mandíbulas TQ (320x165)**



**Figura 2.2 Trituradora de mandíbulas TQ (150x75)**



**Figura 2.3. Molino de bolas**



**Figura 2.4. Horno eléctrico J.P Selecta**

### **2.5.2. Arena**

Las arenas empleadas para la elaboración de los morteros con material de tobas vítreas de yacimiento de Sagua fue tomada de una pila depositada en el patio de la cocina comedor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, procedente de “El Molino Cayo Guam”. El muestreo de la arena se realizó por puntos, 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 pala empujada horizontalmente 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 la pala. La masa total de la muestra de arena fue de 50 kg. Todo el material fue trasladado al laboratorio de beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para ser homogeneizada y normalizada.

Para garantizar la calidad de la arena primeramente se tomó la arena y se sometió a un proceso de tamizado, se lavó para eliminar las partículas extrañas y contaminantes, se puso en la estufa DHG 9146A (figura 2.5) con rango de temperatura de 0 a 400 °C por 24 horas para eliminar su humedad.

Con el objetivo de obtener una arena con características granulométricas de arena natural para morteros según ASTM C 897 – 00, se procedió, con ayuda de los tamices la separación según 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, para garantizar la cantidad de arena adecuada por cada clase de tamaño en los límites permisibles, como se muestra en la tabla 2.1, con lo cual se obtiene una arena normalizada. Luego se procedió a la dosificación para la elaboración de los morteros.



**Figura 2.5. Estufa eléctrica**

Tabla 2.2. Especificaciones de la arena natural para morteros según norma ASTM C 897 – 00.

Diámetro del tamiz, mm	Límite inferior según retenido, %	Límite superior según retenido, %
2,36	0	10
1,18	10	40
0,6	30	65
0,3	70	90
0,15	95	100
0,075	97	100

## 2.6. Preparación de los morteros

Se elaboraron 9 probetas (morteros) con material tobáceo activado térmicamente para el yacimiento analizado. Se confeccionaron además, 6 probetas sin adición

de tobas (patrones de referencia) y 6 con adición de toba natural para las edades correspondientes.

Para la elaboración de los morteros se mezcló 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 2.3. Luego se realizó la adición del cemento en las cantidades previamente calculadas, según el porcentaje de sustitución (30 % de material tobáceo) y con el 100 % para la elaboración de los morteros de referencia. Luego se procedió a la mezcla de los mismos, hasta lograr la homogeneidad de la pasta, luego se vertió la arena y se continuó mezclando hasta obtener un mortero homogéneo.

El material mezclado se vertió en dos capas en el molde. La primera capa permite que 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 la compactadora eléctrica que se muestra en la figura 2.6, 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 (figura 2.7) hasta las edades correspondientes a los ensayos de resistencia aplicados (7 y 28 días). En la (figura 2.8) se muestran los morteros elaborados.

Como se observa en la tabla 2.3; en todos los casos se utilizó una relación arena/cemento 3:1. La relación agua/cemento-toba quedó determinada, por la necesidad de alcanzar la fluidez requerida según los ensayos de consistencia normal.

**Tabla 2.3. 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	-	250	1
Tobas vítreas Sagua de Tánamo	30	315	1350	135	250	1



**Figura 2.6. Compactadora**



**Figura 2.7. Curado de los morteros**



**Figura 2.8. Morteros para las edades 7 y 28 días**

### **2.7. Determinación de las resistencias mecánicas**

Luego de preparados los morteros y llegadas las edades de ensayo se le determinó la resistencia a la flexotracción y a la compresión. El procedimiento seguido se describe a continuación.

La determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión de los morteros realizados se llevó a cabo a través de una prensa hidráulica de 10 t (Figura 2.9 a), la cual arroja los valores en la unidad de medida kN, no obstante los resultados finales se dan en megapascal. El equipo cuenta con los aditamentos (Figura 2.9 b y 2.9 c) necesarios para dichos ensayos, uno para realizar la flexión y otro para la compresión cada aditamento se colocan por separado en el equipo para realizar los ensayos.

#### **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 (2).

$$R = \frac{6 \cdot M}{b^3} = \frac{1,5 \cdot P \cdot l}{b^3} \quad (2)$$

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

## 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 2.9 a), 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/cm<sup>2</sup> (0,10 a 0,20 kN·s/cm<sup>2</sup>) pero se reducirá en caso necesario para que el ensayo no dure más de 10 segundos.

La resistencia a la compresión R se calculó mediante la ecuación (3):

$$R = \frac{P}{S} = \frac{P}{l \cdot b} \quad (3)$$

donde

P: carga aplicada a la probeta.

S: superficie de la sección transversal de la probeta,  $\text{cm}^2$

R: se expresará en  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  cuando P esté en kgf o en  $\text{kN}/\text{cm}^2$ , cuando P esté en kN.

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

Para este 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 2.9 a). Prensa hidráulica de 10 toneladas**



**Figura 2.9 b). Aditamento para la flexión** **Figura 2.9 c). Aditamento para la compresión**

## 2.8. Determinación del índice de actividad puzolánica

Para la determinación de este índice se tomaron los resultados de las pruebas de compresión simple a las diferentes edades y se obtuvo a través de la ecuación (1):

$$IAR = \frac{A}{B} \cdot 100 \quad (1)$$

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.

### **Conclusiones parciales**

- La muestra de toba vítrea seleccionada para ser caracterizadas se considera representativa.
- Las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicados el material y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos según las normas cubanas e internacionales.
- El material tobáceo del yacimiento analizado posee una composición química y mineralógica que la hace potencialmente apta para su uso como puzolana, favorecido por su contenido de matriz vítrea.
- El material tobáceo del yacimiento estudiado contiene alta presencia de arcilla conteniendo de 16 a 39 % principalmente del tipo montmorillonita.

## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS**

Se presentan los resultados experimentales que confirman la hipótesis científica sobre las potencialidades del material tobáceo del yacimiento, Sagua de Tánamo, a través de sus características granulométricas, de ser empleada como puzolana natural, 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. Resultado experimental y su análisis**

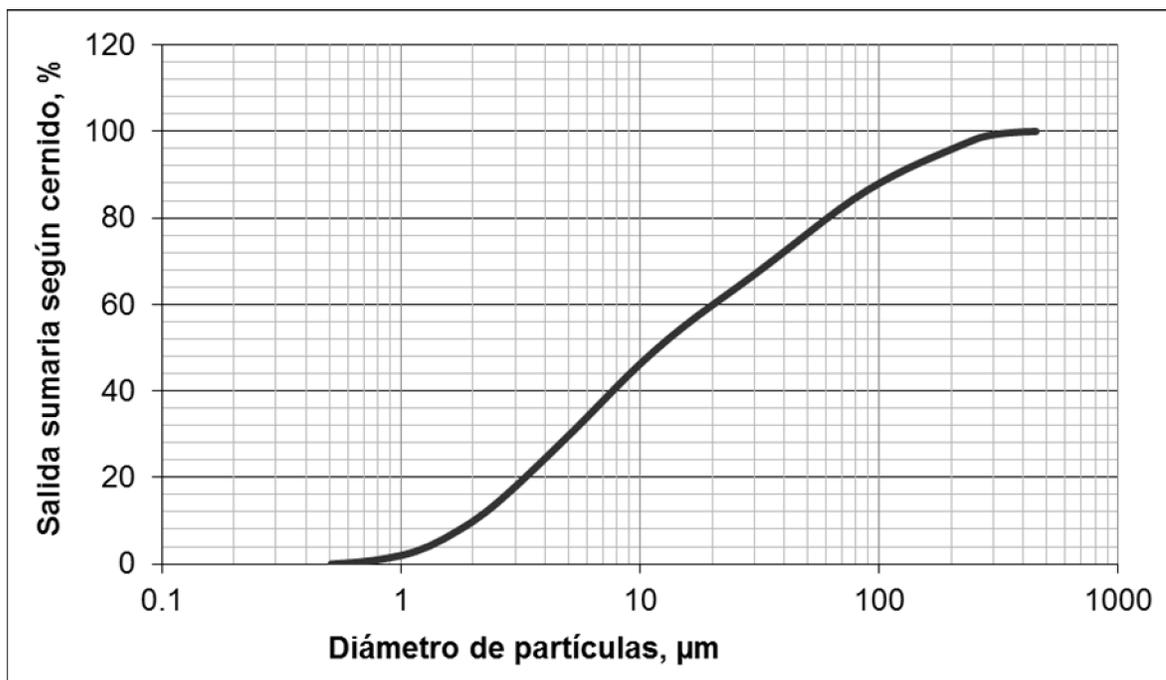
#### **3.1.1. Caracterización granulométrica**

El procedimiento utilizado para la determinación de la composición granulométrica del material tobáceo empleado en la elaboración de los morteros se realizó según las metodologías descritas en el acápite 2.3.

Se puede apreciar en la figura 3.1 que las tobas vítreas de Sagua de Tánamo una vez molidas durante 20 minutos, poseen una distribución granulométrica fina, el 80 % del material cernido se encuentra en el tamiz de diámetro 59  $\mu\text{m}$ , con un diámetro medio de partículas de 40  $\mu\text{m}$ , se observa que el tamaño de partículas en el 50 % del material cernido está en el tamiz 12  $\mu\text{m}$ .

En comparación con el valor máximo de 34 % retenido en el tamiz 45  $\mu\text{m}$ , establecido por la norma ASTM C 618, para su utilización como puzolana natural se puede plantear, que el material analizado presenta características granulométricas adecuadas, que le confieren perspectivas para ser empleados como aditivos puzolánicos al cemento, dado que el cernido en este tamiz sobre pasa el 75 %.

Además de estas características se pudieron conocer los resultados de la superficie específica que brinda el análisis granulométrico en el analizador de partículas HORIBA LA – 910, cuyo resultado de  $11087 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ . Esta propiedad superficial analizada permite argumentar con mayor precisión los resultados de la caracterización granulométrica del material investigado y su potencialidad como material puzolánico. 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 Erdogan (1996), para la utilización como puzolana natural de materiales similares.



**Figura 3.1. Características de tamaño de las tobas vítreas**

### **3.1.2. Resistencias Mecánicas**

Se ofrecen los resultados de los ensayos mecánicos a la flexotracción y a la compresión por muestras con tobas calcinadas, tobas naturales y muestras patrones, a las edades de 7 y 28 días (ver tabla 3.1).

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 cómo se comportan las resistencias en el tiempo, y para determinar el índice de puzolanidad de los materiales con adición de tobas calcinadas.

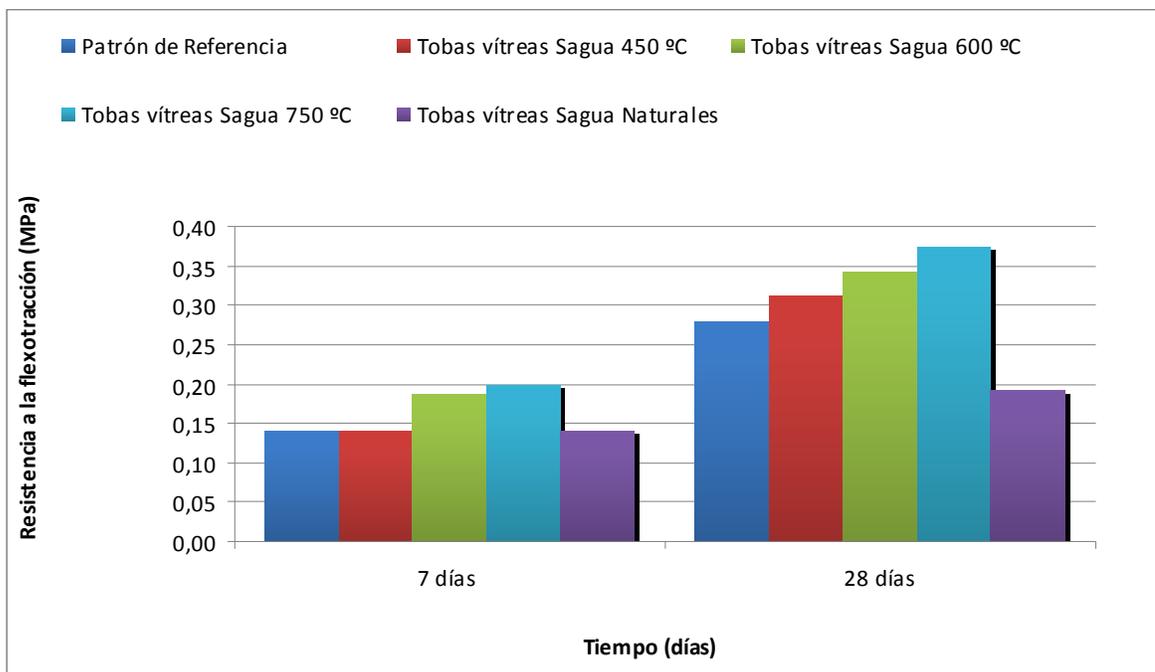
### **Resistencia a la flexotracción**

Al observar la figura 3.2 donde se representa la resistencia a la flexotracción promedio de los morteros elaborados con adición de tobas calcinadas y naturales, y los morteros de referencia, se distingue que los valores de resistencia se desarrollan con el incremento de la temperatura y del tiempo, entre los 7 y 28 días, en este período, los valores medios calculados para ambas edades han pasado de los 0,14 MPa a los 0,31 MPa, para los morteros elaborados con 30 % de tobas calcinadas a temperatura de 450 °C, de 0,19 MPa a 0,34 MPa para morteros con material calcinado a 600 °C, de 0,20 MPa a 0,37 MPa para los de temperatura de 750 °C y de los 0,14, MPa a los 0,19 MPa para 30 % de tobas naturales, lo que indica que el aumento de las resistencias mecánicas a la flexotracción es directamente proporcional al incremento de la magnitud tiempo, y de la temperatura para el caso de las tobas calcinadas.

El mortero de referencia, muestra un aumento de resistencia, el cual varía de 0,14 a 0,28 MPa, pero el incremento es menor en comparación con los morteros con adición de tobas calcinadas.

Se puede observar que para las tobas calcinadas, a los intervalos de temperaturas de 450, 600 y 750 °C y las ensayadas de forma natural existe un crecimiento semejante, desde el punto de vista cualitativo. Se refleja una tendencia al

crecimiento y al aumento de la resistencia a la flexotracción para ambas adiciones con respecto a la mezcla patrón, sin embargo se observa que los morteros con adición de tobas calcinadas ofrecen mejor resistencia a la flexotracción que los elaborados con tobas naturales, los cuales sobrepasan la resistencia de los morteros de referencia, con excepción de las tobas calcinadas a 450 °C poseen una resistencia similar a la desarrollada por los patrones de referencia. Lo que confirma la hipótesis de que la activación térmica de las tobas podría ser una variante para incrementar su resistencia.



**Figura 3.2. Resistencia a la flexotracción de los morteros con 30 % de tobas**

### **Resistencia a la compresión**

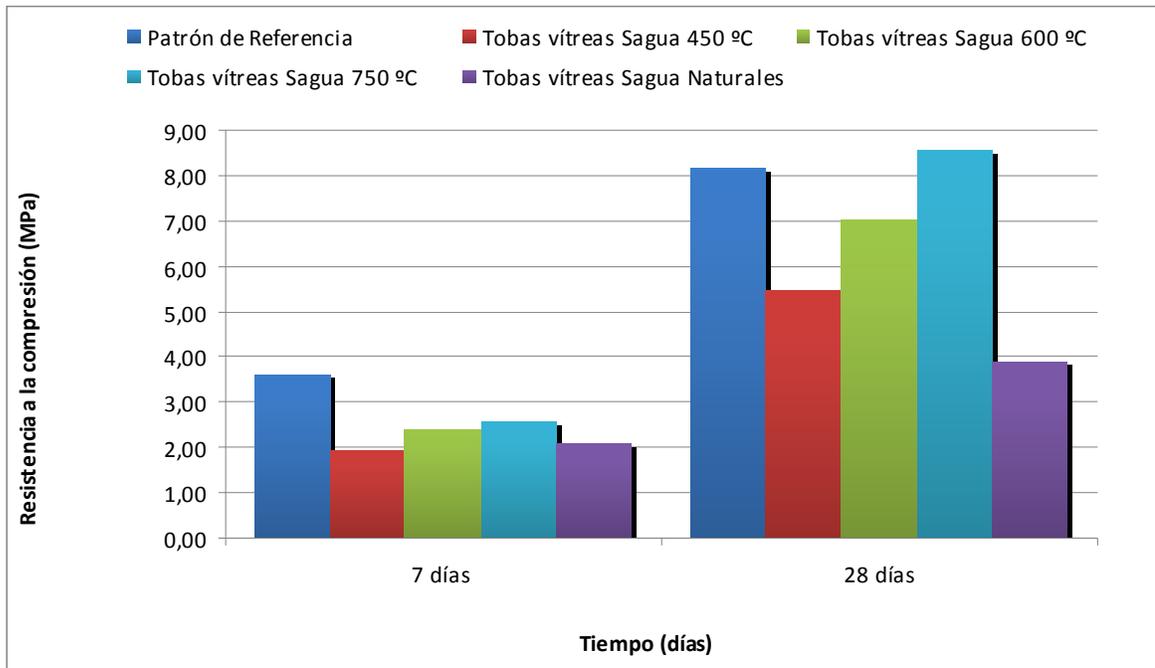
En la figura figura 3.3 se observa un comportamiento similar a los resultados de la resistencia a la flexotracción, se puede observar que existe una ganancia de resistencia a la compresión de los morteros de tobas calcinadas, con el incremento de la temperatura, y el tiempo, de igual forma se favorece la resistencia en el tiempo de las tobas naturales y los patrones de referencia.

Las muestras superan la resistencia del cemento de referencia a los 28 días, especialmente el material calcinado a temperatura de 750 °C. Para estos casos, muestra una de las propiedades principales de las puzolanas en el sentido de que aportan valores de resistencias mecánicas muy bajos a edades tempranas, sin embargo, adquieren altas resistencias a edades superiores.

El hecho de que la resistencia a la compresión se favorezca con el incremento de la temperatura está relacionado con que la temperatura específica reportada para cada caso depende de las características morfológicas y estructurales particulares de cada muestra y de la presencia y tipo de los minerales acompañantes (Alujas, 2010). Pues, estas materiales poseen gran contenido de arcilla que varía entre 16 y 39 % del tipo montmorillonítica (Almenares, 2011), la cuales se activan a temperaturas entre 730 y 830 °C (He, et al 1994 y 1996) además de poseer alto contenido de cuarzo y feldspatos que pueden sin dudas aumentar la temperatura de activación de las mismas. Además esto contribuye a corroborar que estos materiales no poseen alteración a minerales de zeolitas, dado que estos se activan a temperaturas más bajas y proporcionan mejores resistencia a la compresión a los morteros (Habert, et al 2008).

El incremento de las resistencias de los materiales puzolánicos activados a los 28 días está vinculado a que existe una fuerte tendencia a reaccionar con el hidróxido de calcio y otras sales cálcicas en presencia de agua a temperatura ambiente, presentes en las a los 28 días de fraguado pues se considera que el cemento prácticamente completa este proceso a esa edad de fraguado, lo que sin dudas, da lugar a la reacción puzolánica y, por consiguiente, la resistencia mecánica debe incrementarse con el tiempo (Rabilero, 1988).

Estos resultados reafirman la hipótesis de que la activación térmica de las tobas podría ser una variante para incrementar su resistencia y obtener un material puzolánico con mayor actividad que el natural.



**Figura 3.3. Resistencia a la compresión de los morteros con 30 % de tobas**

**Tabla 3.1. Resistencia a la flexotracción y compresión de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo.**

Resistencia a la flexotracción (30 %)		Tiempo de fraguado	
		7 días	28 días
Patrón		0,14	0,28
Tobas vítreas calcinadas a 450 °C		0,14	0,31
Tobas vítreas calcinadas a 600 °C		0,19	0,34
Tobas vítreas calcinadas a 750 °C		0,20	0,37
Tobas vítreas Sagua naturales		0,14	0,19
Resistencia a la compresión (30 %)		Tiempo de fraguado	
		7 días	28 días
Patrón		3,60	8,16
Tobas vítreas calcinadas a 450 °C		1,94	5,48
Tobas vítreas calcinadas a 600 °C		2,40	7,03
Tobas vítreas calcinadas a 750 °C		2,56	8,54
Tobas vítreas Sagua naturales		2,08	3,88

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

### 3.2.1. Evaluación del índice de puzolanidad

En la tabla 3.2 se representan los valores de los diferentes índices de actividad resistente por muestras de morteros, con relación al valor de resistencia mecánica a la compresión del mortero patrón para las dos edades de ensayo.

Se debe destacar que la reacción puzolánica prevalece en el tiempo, es decir, esto puede estar relacionado con la reacción que ocurre con los productos de la hidratación de cemento, particularmente el hidróxido de calcio, con las fases activas de la puzolana, por lo que se puede considerar un proceso de larga duración, que puede continuar a partir de esta edad. Según Campolat et al. (2003), en el aspecto práctico, este proceso es beneficioso, ya que con la neutralización del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se obtendrán morteros y hormigones cada vez más resistentes, lo cual representa un aporte de estabilidad para las estructuras que se proyecten con el empleo de estas adiciones.

**Tabla 3.2. Índice de puzolanidad del material tobáceo**

Morteros	Índice de Puzolanidad	
	7 días	28 días
Sustitución de 30 %		
Tobas vítreas calcinadas a 450 °C	54	67
Tobas vítreas calcinadas a 600 °C	67	86
Tobas vítreas calcinadas a 750 °C	76	105
Tobas vítreas Sagua naturales	58	48

Como se puede apreciar, los valores del índice de actividad resistente calculados para cada muestra, con porcentajes de adición de 30 %, supera solo el 75 % que es el mínimo exigido por la norma, los morteros con adicción de tobas calcinadas

a 600 °C, para la edad de 28 días y 750 °C para la edad de 7 y 28 días, siendo más intenso para esta última temperatura.

De acuerdo a los resultados mostrados, 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 respuesta a que a las mayores temperaturas se obtenga un mayor índice de actividad puzolánica, está directamente relacionada con el mecanismo de activación de las tobas, debido a su composición mineralógica. Pues como se planteó en el acápite anterior estos materiales poseen alto contenido de montmorillonita, cuarzo y feldespatos muy estables a esas temperaturas (Almenares, 2011), en el caso de la fase arcillosa puede activarse en el rango de temperaturas entre 730 y 830 °C (He, et al 1994 y 1996).

A pesar de que las normas no especifican la estructura y la morfología que deben tener estos materiales, Gener (2002); Valdez et al (2004), han demostrado su influencia sobre la actividad puzolánica. De tal forma, otro aspecto que puede influir en la actividad puzolánica de las tobas calcinadas son sus propiedades morfológicas (granulométrica, superficie específica) la cual puede llegar a afectarse por el proceso de activación térmica. 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). Por lo que durante la activación se debe llegar al compromiso de la temperatura de activación con estos parámetros.

De acuerdo a estos resultados se confirma, que los materiales tobáceos activados de Sagua de Tánamo, poseen actividad puzolánica, a las temperaturas de activación por encima de 600 °C. El mejor comportamiento lo exhiben las tobas calcinadas a 750 °C.

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

El actual trabajo establece un paso muy significativo para el perfeccionamiento de nuevos materiales con excelentes posibilidades de ser utilizado como materiales aditivos.

Se ha podido constatar de manera particular que dentro de la provincia Holguín existen municipios con posibilidades de explotar recursos minerales para la construcción, uno de ellos es el municipio de Sagua de Tánamo. Lo cual puede ser de gran beneficio para el desarrollo local del mismo.

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.

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 calcinada y la reducción de gases nocivos a la atmósfera 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. Además plantea que en el proceso de clinkerización para producir una tonelada de clínker se necesita consumir aproximadamente 150 kilogramos de combustible equivalente a 100 USD. 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 3.3.

**Tabla 3.3 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

La adición de diferentes cantidades de puzolanas, ahorra combustible, ya que en el caso de su empleo de forma natural no se someten al proceso de calcinación, sino que se muelen al final conjuntamente con el clínker, yeso y otros aditivos y además la molibilidad de estos materiales es buena. Algunos investigadores recomiendan la molienda por separado, con una mezcla final con el objetivo de controlar la molienda y ganar en calidad. Por otra parte, si las puzolanas son activadas, su temperatura de activación se reduce a la mitad, en comparación con la producción de cemento Pórtland, lo que se asumiría que los gastos de consumo de combustible se reducen a la mitad, en tabla 3.4 se muestra una relación entre gastos combustible vs% de adición de puzolana. Tomando como referencias la fabricación de una tonelada de clínker de cemento.

**Tabla 3.4. Relación entre gastos combustible vs% de adición de puzolana. Tomando como referencias la fabricación de una tonelada de clinker de cemento.**

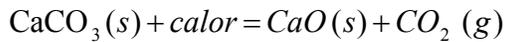
<b>% de adición de puzolana</b>	<b>Puzolana (t)</b>	<b>Ahorro de combustible (kg)</b>	<b>Ahorro (USD)</b>
30 % de puzolana natural	0,3	45	30
30 % de puzolana calcinadas	0,3	22,5	15

Cuba cuenta con una capacidad de producción de cemento Portland o gris de 3,376 millones de toneladas, con una media de un 30 % de adición de puzolanas en estado natural, se ahorrarían unos 135 000 017 kg de combustibles (por concepto de no quema de la materia mineral), equivalentes a 90 597 161,35 USD, tomando como referencia que una tonelada de combustible cuesta unos 671,09 USD, ya que un barril cuesta en el mercado mundial unos 95,87 USD y una tonelada es equivalente a 7 barriles, (<http://www.preciopetroleo.net/petroleo-hoy.html>) y en el caso de ser activadas se ahorraría 67 500 008,5 kg de combustible y unos 45 298 580,68 USD.

Lo anterior permite comprender el ahorro considerable de energía al practicar la producción de puzolanas a nivel local ya que mientras más cerca este la fuente de la materia prima de la industria, menores serán los gastos en cuanto al transporte y con ello el consumo de combustibles.

En cuanto a los beneficios ambientales que trae consigo el empleo de las puzolanas como adición mineral al cemento Portland. Tenemos que durante la fabricación del clinker de cemento, se despiden a la atmósfera, grandes cantidades de gases, entre ellos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y uno de los responsables del efecto invernadero. Para producir un millón de toneladas de clinker se necesitan calcinar cerca de dos millones de toneladas de calizas o margas portadoras de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), por lo que se emitirán a la

atmósfera un aproximado de medio millón de toneladas de CO<sub>2</sub>, al descomponerse el CaCO<sub>3</sub>.



Otro de los gases nocivos que se emiten a la atmósfera durante la fabricación del clinker es el SO<sub>2</sub> responsable de las lluvias acidas, este gas es un producto de la quema de combustibles con determinados porcentajes de azufre (S).

De lo anterior se deduce que es vital desde el punto de vista económico y medio ambiental para la industria del cemento, reducir los volúmenes de materias primas minerales a calcinar y una de las formas de lograrlo es localizando y fomentando el uso de puzolanas naturales de alta calidad, lo cual elevaría los porcentajes de adición o mezclas sin afectar la calidad y prestaciones de los cementos producidos.

### **Conclusiones parciales**

- La distribución granulométrica de las tobas vítreas del yacimiento de Sagua de Tánamo son adecuadas de acuerdo a los requisitos normalizados para su utilización como puzolana natural.
- El índice de actividad resistente de los morteros elaborados con adiciones de 30 % de tobas calcinadas a 750 °C en sustitución de cemento, a los 7 y 28 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.
- A pesar de que los morteros elaborados con adiciones de tobas naturales, 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 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 con las temperaturas de

calcinación de 450, 600 y 750 °C respectivamente y con las edades de ensayos de 7 a 28 días con respecto a los morteros patrones, lo que demuestra que las resistencias continúan su incremento con el aumento de la temperatura y el tiempo. Características propias de los materiales puzolánicos.

- La perspectiva de utilización de los materiales tobáceos activados muestra un campo de aplicación como puzolana en la industria de la construcción.

## CONCLUSIONES

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, lo que se confirma con la determinación de la actividad puzolánica de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo, a partir de su activación térmica, en este sentido se concluye que:

- Las tobas calcinadas a temperaturas de 750 °C poseen un adecuado carácter puzolánico dado que su índice de actividad resistente es superior a 75 %, que es el mínimo requerido para que el material pueda considerado como aditivo puzolánico sin afectar en exceso la resistencia del mortero.
- La resistencia a la flexotracción y a la compresión de los morteros elaborados con material tobáceo, muestra un incremento con las temperaturas de calcinación de 450, 600 y 750 °C, respectivamente y con las edades de ensayos de 7 a 28 días con respecto a los morteros patrones, lo que demuestra que las resistencias continúan su incremento con el aumento de la temperatura y el tiempo. Características propias de los materiales puzolánicos.

## **RECOMENDACIONES**

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

- Completar el estudio sobre la base de la determinación del mecanismo de activación de la reacción puzolánica aplicando las técnicas adecuadas para la caracterización de los materiales naturales y los productos de la calcinación.
- Investigar la actividad puzolánicas en pastas y hormigones.
- Determinar los parámetros de calcinación adecuados, para la obtención de un producto con características puzolánicas adecuadas desde el punto de vista estructural y tecnológico.
- Proponer una tecnología para la explotación de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo, con el aparejado estudio de factibilidad económica.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**ALMENARES, R. R. S. 2011:** Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como aditivos puzolánicos. Carlos A. Leyva Rodríguez (Tutor). Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 77 p.

**ALUJAS, A. 2010.** Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente. Tesis Doctoral. Santa Clara. Cuba

**AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 232.1R. 2000:** Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete. Committee Report, American Concrete Institute. 24p.

**ASTM 595- 13, 2009:** Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, blended hydraulic cement, fly ash cement, hydraulic cement, portland blast-furnace slag.

**ASTM C – 311, 2002:** Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete.

**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 calcinated Natural Pozzolan for use as mineral admixture in Concrete.

**ASTM C 897- 00, 2009:** standard specification for aggregate for job-mixed portland cement-based plasters.

**BANDERAS, D.; NARANJO., V.; RODRÍGUEZ., J. & 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; SABORIT M; HERNÁNDEZ R; GENER M; CORREA D Y BRITO A. 2010:** El uso de las puzolanas naturales cubanas, una alternativa para el ahorro energético y el cuidado del medio ambiente.

**BATISTA, R. 2007.** Valoración del Potencial de Los Recursos Minerales para la Industria del Cemento en Cuba. Tesis Maestría. Inédito. IGP.

**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. 1969.** Las puzolanas. Monografía del I.E.T.C.C. 281. 95 p.

**CAMPOLAT, F.; YILMAZ, K., KÖSE, E., SİMER( M y YUURDUSEÒ, A. 2003:** Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash asreplacement materials If cement production. Cements and Concrete Research. 1 - 6.

**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 dácíticas 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.

**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.

**CYR, M., P. LAWRENCE, AND E. RINGOT:** Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. Cement and Concrete Research, 2006. 36(2): p. 264-277.

**DAVIS, R. E., 1954:** Pozzolanic Materials with Special Reference to Their Use in Concrete Pipe,” Technical Memorandum, American Concrete Pipe Associate, Vienna, Va, Sept., pp. 14-15.

**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.

**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.

**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 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.

**GONZÁLES DE LA COTERA, S. M. 1996:** Apreciación de la actividad pozzolánica. 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.

**HABERT G., N. CHOUPAY, J.M. MONTEL, D. GUILLAUME, G. ESCADEILLAS:** Effects of the secondary minerals of the natural pozzolans on their pozzolanic activity. Cement and Concrete Research 38 (2008) 963–975.

**HABERT, G, ET AL,** Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. Applied Clay Science, 2009. 43(3-4): p. 322-330.

**HE C, MAKOVICKY E., OSBAECK B (1996).** Thermal treatment and pozzolanic activity of Na and Ca-montmorillonite. Applied Clay Science, 10, 351-368).

**HE, C., E. MAKOVICKY, AND B. OSBAECK,** Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. Applied Clay Science, 1994. 9(3): p. 165-187.

**HELLER-KALLAI, L.** Handbook of clay science. 2006: Elsevier Ltd.

**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.

**[HTTP://WWW.PRECIOPETROLEO.NET/PETROLEO-HOY.HTML](http://www.preciopetroleo.net/petroleo-hoy.html)**

**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.

**JUSTICE, J.M., ET AL.** Comparison of Two Metakaolins and a Silica Fume Used as Supplementary Cementitious Materials. in Seventh International Symposium on Utilization of High-Strength/High Performance Concrete. 2005. Washington D.C.

**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.

**MARTIRENA, J.** Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. 2009: p. 65.).

**MARTIRENA, J.F.,** Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal - puzolana como adición mineral activa, in Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones. 2003, Universidad Central de Las Villas: Santa Clara, Villa Clara, Cuba

**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.

**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 178:** 2002 Áridos. Análisis granulométrico.

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

**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.

**RAMACHANDRAN, V.S., ET AL, EDS.** Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials. First ed. Construction Materials Science and Technology Series, ed. V.S. Ramachandran. 2002, William Andrews Publishing/Noyes Publications: New York, U.S.A.

**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.

**SABIR B.B., S.W., J. BAI,** Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Cement and Concrete Composites, 2001. 23: p. 441-454.

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

**SOLÍS, M. S. 2011:** Valoración de las tobas vítreas y zeolitizadas de guaramanao y san andrés para su utilización como puzolana natural en la construcción. Roger Samuel Almenares (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 38 p.

**SOUZA, P.S.L. AND D.C.C. DAL MOLIN,** Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity. Cement and Concrete Research, 2005. 35(10): p. 1993-1998.

**STANTON, T. E., 1950:** Use of pozzolans for counteracting excessive concrete expansion resulting from reaction between aggregates and alkalis 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.

**TAYLOR, H.F.W, ED.** Cement Chemistry. 1990, Academic Press: London, U.K. 491

**TREZZA, M. A; FERNÁNDEZ, L.I Y SCIAN, A.N. 2007:** Molienda conjunta de toba calcinada con clínker de cemento pórtland, estudio de su acción puzolánica, Olavarría, Argentina, 4 – 7 Septiembre.

**VALDEZ P. TAMEZ, K.TUSHAR, R. RIVERA VILLARREAL:** “Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales- portlandita”. Ciencia UANL, Vol. VII, nº2 (2004).

**ZHANG, Y.M., W. SUN, AND H.D. YAN:** Hydration of high-volume fly ash cement pastes. Cement and Concrete Composites, 2000. 22(6): p. 445-452.