



DEPARTAMENTO DE METALURGIA

*Tesis presentada en opción al  
título de  
Ingeniero Metalúrgico*

*Consumo de combustible en el  
proceso de activación de zeolitas  
para producir un material  
cementicio suplementario*

*Marielly de la Caridad Periche Osorio*

*Moa, 2022*



---

*Tesis presentada en opción  
al título de  
Ingeniero Metalúrgico*

*Consumo de combustible en el  
proceso de activación de zeolitas  
para producir un material  
cementicio suplementario*

*Autora: Marielly de la Caridad Periche  
Osorio*

*Tutor: M.Sc. Yosbel Guerra González*

---

---

## ***Dedicatoria***

*A Dios, por su infinito amor, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y no permitirme desistir de mis sueños.*

*A mis padres, Luz Maida Osorio Sánchez y Justo Periche Hastie por amarme sin medida, hacerme una mujer de principios y darme la oportunidad de estudiar.*

*A mi abuela que a pesar de que no está conmigo físicamente sé que donde quiera que esté, está feliz por todo el logro que he tenido en estos años de carrera.*

*A mis hermanos Darielly Periche y David Periche que con su inocencia hicieron mis días más felices, además de ser mi inspiración para ser cada día mejor*

*A mi padrastro Jorge Hernández y mi madrastra Ana Babastro que también formaron parte de mi educación.*

*A mi familia siempre unida, por estar conmigo constantemente en cada paso que doy.*

*A mis amigas Oslaidis y Osleidis que siempre confiaron en mi y aportaron su granito de arena a mi formación como profesional.*

*A mi amiga Marisneysi, por sus consejos, conocimientos, por su apoyo en las noches de desvelo, y estrés, y por siempre estar conmigo en todo lo que necesité.*

*A mi amigo Daynel, Andy y Dasviel por su apoyo incondicional.*

# *Agradecimientos*

*También quisiera expresar mi reconocimiento y mi gratitud a las siguientes personas por su extraordinario apoyo, contribución y ayuda para lograr este gran propósito:*

*A todas aquellas personas que hicieron posible la realización y culminación exitosa del Trabajo de Diploma.*

*A mi amiga Leanet León Rodríguez y a su madre Marbelina Rodríguez por acogerme en su casa como otra más de la familia y ayudarme a adaptarme a estar lejos de casa.*

*A mis tíos (as), en especial a Leticia Osoria Sánchez y Argenis Osoria Sánchez, por sus consejos de terminar mis estudios y formarme para las nuevas exigencias de la vida profesional.*

*A mis primos por su ayuda en cada uno de los momentos de la vida.*

*A mi tutor Yosbel Guerra por su orientación, cooperación y preocupación en la realización de este Trabajo de Diploma.*

*Al profesor Yuniór Correa Cala por su apoyo en cada uno de mis pasos para culminar la carrera.*

*A todos los profesores del Departamento de Metalurgia por su aporte en la formación técnica profesional.*

*A mi familia, por todo el apoyo ofrecido. Gracias por recordarme que aquel que persevera triunfa y que los sueños no son inalcanzables.*

*A todos mis amigos por sus inestimables contribuciones.*

*A mis vecinos y a todos los que me apoyaron, ayudaron e hicieron posible que me convirtiera en una persona de bien.*

*A todos*

*Muchas Gracias.*

## *Pensamiento*

*El éxito proviene de la curiosidad, la  
concentración, la perseverancia y la autocrítica.*

*Albert Einstein.*

## **Resumen**

En el presente trabajo se realizó el cálculo del índice de consumo de combustible para realizar un análisis técnico, económico y ambiental de la producción de un cemento PZ-35. Se realizó el balance de masa y de energía del proceso de activación de las zeolitas en un horno de tambor rotatorio. La activación térmica de las zeolitas permite producir un cemento PZ35 con porcentajes de sustitución de 30 % de clínquer, la activación térmica de las zeolitas en un horno de tambor rotatorio muestra un índice de consumo de combustible de 4,2 kg de petcoke por cada 100 kg de zeolita a procesar lo que representa una disminución de consumo con respecto a la producción de clínquer de 5,8 kg de combustible por cada 100 kg de clínquer producido y la producción del cemento PZ 35 representa un ahorro de 9,03 USD por cada tonelada de cemento producida.

## **Abstract**

In the present work, the calculation of the fuel consumption index was carried out to carry out a technical, economic and environmental analysis of the production of a PZ-35 cement. The mass and energy balance of the zeolite activation process in a rotary drum kiln was carried out. The thermal activation of the zeolites makes it possible to produce a PZ35 cement with replacement percentages of 30% of clinker. The thermal activation of the zeolites in a rotary drum kiln shows a fuel consumption rate of 4.2 kg of petcoke per 100 kg of zeolite to be processed, which represents a decrease in consumption with respect to clinker production of 5.8 kg of fuel for every 100 kg of clinker produced and the production of PZ35 cement represents a saving of USD 9.03 for each ton of cement produced.

# Índice

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. Marco teórico conceptual .....	5
1.1 Cemento. Generalidades.....	5
1.1.1. Clasificación y usos .....	5
1.2 Cementos puzolánicos.....	7
1.2.1 Propiedades de los cementos puzolánicos .....	7
1.3 Hidratación del cemento .....	8
1.3.1 Procesos de hidratación.....	8
1.3.2 Hidratación de los cementos puzolánicos .....	10
1.4 Materiales cementicios suplementarios .....	10
1.5 Tobas zeolitizadas como material cementicio suplementario .....	11
1.5.1 Características generales de las tobas zeolitizadas.....	11
1.5.2 Uso de las tobas zeolitizadas como material puzolánico natural .....	13
1.5.3 Activación térmica de las tobas zeolitizadas para su utilización como puzolana.....	16
1.6. Aspectos energéticos de la producción de cemento.....	18
1.6.1 Producción mundial.....	20
1.6.2 Producción nacional .....	21
Capítulo 2. materiales y métodos .....	24
2.1 Selección de la materia prima .....	24
2.2 Caracterización de la toba natural y calcinada .....	25
2.3 Descripción del tratamiento .....	28
2.4 Cálculo del Índice de consumo de combustible .....	31
2.4.1 Balance de masa.....	32
2.4.2 Balance de Energía.....	32
Capítulo 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	36

3.1 Resultados del balance de masa.....	36
3.2 Balance masa para 1 kg de combustible .....	37
3.3 Cálculo de la cantidad de combustible.....	38
3.4 Análisis técnico económico y ambiental.....	39
3.4.1 Análisis técnico.....	39
3.4.2 Análisis económico.....	40
Conclusión.....	42
Recomendación .....	43
BIBLIOGRAFÍA .....	44

## INTRODUCCIÓN

El ahorro de la energía, para las industrias como la del cemento es de vital importancia en los costos de fabricación pues sobrepasan el 40% y por su incidencia en el medio ambiente al generar los gases de efecto invernadero, en especial, el CO<sub>2</sub> por efecto de la combustión y por la descomposición de las materias primas.

La fabricación del cemento se basa en la extracción de las calizas de los yacimientos y reducirlos hasta convertirlo en polvo, mezclándose con arcillas, óxido de hierro y mineral de sílice para que tenga una composición química definida, llamándosele harina cruda que procesado en horno rotativo a temperatura de 1 450 °C se logra obtener el producto intermedio, el clínquer. Luego pasa a la molienda con el yeso obteniéndose el cemento; estos procesos son los que requieren grandes cantidades de energía térmica y eléctrica

El precio del cemento es el factor más importante en el nivel del flujo de caja que tienen las cementeras; los precios son bajos en relación con su peso, por lo que el área de influencia de cualquier planta sobrepasa un radio de 300 km, es solo en estos límites donde existe competencia entre los productores.

En el proceso para lograr las reacciones en la clinkerización es necesario llevar la harina cruda a finezas de 28% de retenido en 200 mallas para favorecer las reacciones a temperatura de 1450°C y en el proceso de molienda del cemento, el clínker es llevado a retenidos de 1.0% para facilitar sus reacciones de hidrólisis durante su utilización.

El calor de formación de los compuestos del clínker es de 428 kcal/kg y en las plantas de cemento sobrepasa las 700 kcal/kg teniéndose un potencial de ahorro de energía térmica, la diferencia se debe a las altas temperaturas de los gases de escape, pudiendo sobrepasar los 360 °C. En una planta de cemento eficiente sus temperaturas están en los 255 °C, otra de las fuentes de ahorro de energía se

encuentra en las pérdidas por convección y radiación del calor en el proceso de Clinquerización a través de las superficies del horno y precalentador; en la molienda, el ahorro dependerá de los equipos a utilizar; siendo los molinos verticales y las prensas de rodillos más eficientes que los molinos de bolas.

La gestión en la adquisición energética y el ahorro permite conseguir la máxima eficiencia en la industria aplicando un uso racional de la energía que permita reducir su consumo sin afectar la calidad del producto, la productividad y la calidad de los servicios

A partir del siglo XX, Cuba ha enfrentado el problema de la dependencia externa en la satisfacción de sus necesidades en materia de energía, o sea, presenta una alta dependencia de portadores energéticos fósiles, en especial el petróleo para todos sus planes de desarrollo. Hasta 1959 el cuadro energético, compuesto por una capacidad instalada de generación de electricidad ascendente a los 397 MW, garantizaba el abastecimiento solo al 56% de la población. La capacidad de refinación de petróleo entonces ascendía a 4 millones de toneladas por año y el consumo de combustible equivalente estaba al nivel anual de 533 kg/habitante.

Desde 1959 hasta 1989, la capacidad de generación instalada creció hasta 3178 MW en centrales termoeléctricas, y se aseguró el suministro de energía eléctrica al 95% de la población, que había ascendido en 1.7 veces con relación a 1958, con la creación del Sistema Electro energético Nacional (SEN). La capacidad de refinación se incrementó en casi tres con respecto a 1958, se puso en marcha un plan para la utilización de la hidroenergía. Desde 1989 a la fecha, el país atraviesa por una etapa crítica en la que su desarrollo, dependiente de las importaciones de petróleo, con tecnologías y esquemas de especialización, se ve sometido a la súbita pérdida de los suministros de petróleo que venía recibiendo y a precios preferenciales, provocando un intenso déficit de energía que impactó en todas las estructuras productivas, de servicios y poblacionales del país.

Una de las variantes que se utilizan en la producción de cemento es la sustitución de clínquer por materiales cementicios suplementarios para así disminuir el consumo de combustible por tonelada de cemento producida.

Las zeolitas son materiales puzolánicos que se utilizan actualmente para la producción de cementos puzolánicos en Cuba y se cuenta con reservas que van en el orden de 430 millones de toneladas métricas, diseminados por todo el país. Según los datos de la Oficina Nacional de Recursos Minerales ONRM, en el período 2007 – 2008, se reportan más de 22 yacimientos, de los cuales alrededor de 8 están siendo explotados para diferentes aplicaciones. El yacimiento Caimanes, situado en la región de Moa, es el tercer depósito en cantidad de reservas con 36 millones de toneladas, sin embargo, aún no se aprovecha todas sus potencialidades para su aplicación. Estudios recientes han confirmado su posibilidad de empleo como aditivo puzolánico en su forma natural (Almenares, 2011), aunque no con una alta reactividad, lo cual limita su utilización para determinada aplicación en la construcción.

Las investigaciones de Segura 2013, Guerra 2015 y 2020 demostraron que la activación térmica de las zeolitas del yacimiento caimanes muestra mejores prestaciones de resistencia a la compresión a edades tempranas y se pueden lograr porcentajes de sustitución mayores, pero para activar la zeolita es necesario procesar estas en hornos hasta 350°C donde acarrearía un consumo de combustible. La necesidad del cálculo del índice de consumo de combustible necesario para procesar dichas zeolitas y convertirlas en un material cementicio suplementario con mejores prestaciones que la zeolita natural constituye la **situación problemática** de la presente investigación.

#### **Problema científico de la investigación:**

¿Cómo obtener el índice de consumo de combustible del proceso de activación térmica de las zeolitas del yacimiento Caimanes en un horno de tambor rotatorio que me permita realizar un análisis técnico-económico ambiental del proceso?

**Objetivo general** Realizar los cálculos índices de consumo de comestible que me permita realizar un análisis técnico, económico y ambiental de la producción de un cemento PZ-35.

**Hipótesis:** El cálculo de los principales indicadores de aporte y consumo de energía del horno permiten conocer el Índice de consumo de combustible del proceso de

activación térmica de las zeolitas para poder realizar un análisis técnico-económico y ambiental del proceso de fabricación de un cemento PZ-35.

### **Objetivos específicos**

- Realizar el balance de masa, de energía y el índice de consumo de combustible del proceso de activación térmica de las zeolitas del yacimiento caimanes en un horno de tambor rotatorio
- Realizar un análisis técnico-económico y ambiental del proceso de producción del cemento PZ-35.

### **Tareas de Investigación**

- Búsqueda y análisis de la información bibliográfica relacionada con el empleo de las tobas zeolitizadas calcinadas en la elaboración de aglomerantes.
- Cálculo del balance de masa
- Cálculo del balance de Energía y el índice de consumo de combustible.
- Realización del análisis técnico, económico y ambiental del proceso de activación térmica de las zeolitas para producir un cemento PZ-35 en comparación con la producción de PP-35.

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

### **1.1 Cemento. Generalidades.**

El cemento es un conglomerante hidráulico obtenido como producto en una fábrica, que contiene al clinker portland como constituyente necesario. Es un material inorgánico finamente dividido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Mientras que el clinker de cemento portland es el producto que se obtiene por cocción hasta fusión parcial (clinkerización) de mezclas íntimas, denominadas crudos, preparadas artificialmente y convenientemente dosificadas a partir de materias calizas y arcillas, con la inclusión de otros materiales que, sin aportar elementos extraños a los de composición normal del cemento, facilitan la dosificación de los crudos deseada en cada caso (Betancourt Rodríguez 2013), (Portland 2010).

Los cementos se pueden definir como aquellas sustancias adhesivas, naturales o artificiales con las que se pueden formar masas plásticas, que son capaces de unir entre sí a fragmentos o masas de materiales sólidos con una distribución granulométrica determinada, que generalmente recibe el nombre de agregado, formando un conjunto totalmente compacto. Asimismo, con la masa plástica de cemento pueden unirse distintas piezas entre sí, realizarse recubrimientos, enlucir, realizar reparaciones, etc. La unión se produce mediante el endurecimiento del cemento desde el estado plástico (Francisco 2013a).

#### **1.1.1. Clasificación y usos**

Según Norma UNE-EN 197-1:2000 los cementos pueden clasificarse en cinco tipos principales:

- a) Cemento Portland: es el que más se emplea para fines estructurales siempre y cuando no se requieran propiedades especiales (Guadalupe Reyes Echavarría 2009).
- b) Cementos Portland con adiciones: Hoy en día la mayoría de las mezclas de concreto contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material cementante en el concreto. Estos materiales son generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural. Ellos pueden o no ser procesados antes de ser utilizados

en los concretos. Algunos de estos son denominados puzolanas, que por sí mismos no tienen propiedades cementantes, pero cuando se utilizan con el cemento portland, reaccionan para formar componentes cementantes. Otros materiales, como las escorias sí exhiben propiedades cementantes.

c) Cemento Portland con escorias de alto horno: Se obtiene por enfriamiento brusco en agua de la ganga fundida procedente de procesos siderúrgicos.

Dado su contenido en cal combinada, la escoria no es una simple puzolana, sino que tiene de por sí propiedades hidráulicas, es decir, que es un verdadero cemento, fragua y endurece muy lentamente, por lo que debe ser acelerada por la presencia de algo que libere cal, como el clinker de Portland (Calleja 1983).

Estos cementos presentan poca retracción y un débil calor de hidratación, por lo que pueden ser utilizados sin riesgo en grandes macizos. A cambio y por la misma razón, son muy sensibles a las bajas temperaturas, que retardan apreciablemente su endurecimiento, por lo que no deben utilizarse por debajo de los + 5°C (UCLM 2008).

d) Cemento puzolánico: endurecen más lentamente, en especial en ambiente frío, y requieren en general más agua de amasado que el Portland normal; pero a largo plazo llegan a superar las resistencias de este, confiere al hormigón una elevada densidad, disminuyendo su porosidad y haciéndolo más compacto, lo que aumenta su resistencia química. Todo ello lo hace recomendable para gran número de obras (canales, pavimentos. obras en aguas muy puras o ambientes medianamente agresivos, hormigonados bajo agua, obras marítimas, etc.) (Becker 2001).

Cemento compuesto: Estos cementos consisten en mezclas, que se muelen juntas, de clinker y ceniza muy fina, puzolana natural o calcinada, o bien, escoria, dentro de los límites en porcentaje especificados de los componentes. También pueden consistir en mezclas de cal de escoria y cal de puzolana. En general, pero no necesariamente, estos cementos dan lugar a una resistencia mayor a la reacción álcali-agregado, al ataque por sulfato y al ataque del agua de mar, pero requieren un curado de mayor duración y tienden a ser menos resistentes a los daños por la sal para deshelar y descongelar. Dan lugar a una menor liberación de calor y es posible que ganen resistencia con mayor lentitud, en especial a bajas temperaturas (UNE 2000).

## **1.2 Cementos puzolánicos**

Las puzolanas pueden usarse de dos formas fundamentales, en las llamadas mezclas cal-puzolana o como adiciones al cemento Portland o al clínquer de cemento Portland. Las mezclas de puzolanas con cemento Portland reciben el nombre de cementos puzolánicos. En este caso, debe destacarse que la cal con la que reaccionan las puzolanas es la denominada cal de hidrólisis, procedente de la hidratación de la alita y la belita (Betancourt Rodríguez 2013).

La incorporación de puzolanas a las mezclas con Portland se puede realizar en distintos momentos. Desde la propia fabricación del cemento hasta durante la elaboración de los morteros y hormigones. La cantidad de puzolana a añadir no debe exceder el 30% de sustitución por cemento y depende de las propiedades físicas y químicas y de las características del cemento utilizado (Betancourt Rodríguez 2013).

### **1.2.1 Propiedades de los cementos puzolánicos**

Poseen una mayor lentitud en el desarrollo de su resistencia en comparación con sus semejantes sin sustitución, alcanzando valores similares e incluso superiores viéndose reflejado con mayor evidencia en las mezclas pobres. Para el curado es necesario de un ambiente húmedo si se quiere lograr una correcta hidratación. Ofrece una alta resistencia a los sulfatos debido a la disminución de la proporción de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) en el cemento, lo que conlleva también al control del calor de hidratación en elementos constructivos (Becker 2001).

Los hormigones elaborados son más resistentes a la corrosión provocadas por las aguas blandas a partir de las reacciones ocurridas entre las puzolanas y la cal derivada de las reacciones de hidratación del cemento ( $C_3S$  y  $C_2S$ ) (Becker 2001).

El uso de una puzolana de buena calidad asegura, no solamente una menor cantidad de cal libre en la pasta de cemento, sino que además se obtiene un mayor volumen de productos sílico-calcáreos-hidratados, por lo cual se obtiene, a igual relación a/c, una menor porosidad de la pasta debido a un refinamiento de poros y,

consecuentemente, menor permeabilidad respecto del cemento portland normal producido a partir del mismo clínker portland. Esto significa la obtención de una pasta de cemento más compacta, resistente y durable (Donatello, Tyrer et al. 2010).

### **1.3 Hidratación del cemento**

La hidratación del cemento es el proceso mediante el cual este material, al mezclarse con el agua, reacciona y empieza a generar enlaces o estructuras cristalinas, que lo convierten en un material aglutinante. Los componentes principales del Clinker son: el silicato tricálsico (C3S), silicato dicálsico (C2S), aluminato tricálsico (C3A), ferro aluminato tetracálsico (C4AF), óxido de magnesio (MgO), Cal libre (CAO) y sulfatos de Alcalis.

La composición anteriormente relacionada va en orden de mayor a menor proporción dentro del clinker. Todos ellos se pulverizan conjuntamente con el yeso y otras adiciones que le proporcionan características particulares en cuanto a su color, fraguado y progreso en las resistencias a la compresión. Cada uno de los constituyentes tiene diferentes comportamientos en cuanto a generación de calor de hidratación, fraguado y su reacción ante la presencia de agua (Aite 2010).

#### **1.3.1 Procesos de hidratación**

La reacción química inicial la efectúa el C<sub>3</sub>S, también denominada fase Alita, que además de aportar la mayor resistencia mecánica desarrolla un mayor calor de hidratación, fragua rápido y afecta la resistencia inicial.

El C<sub>2</sub>S, denominada fase belita desarrolla su resistencia lentamente con la acción del agua, por lo cual su calor de hidratación es más bajo y su resistencia a compresión se empieza a desarrollar a los 7 días. El aporte en cuanto a resistencia mecánica de los otros componentes del clinker, como el aluminato tricálsico y el ferro aluminato tetracálsico es relativamente poco significativo.

La hidratación del cemento, por lo tanto, es un proceso físico-químico que cambia a medida que pasa el tiempo. Comienza cuando el cemento entra en contacto con el agua y se distinguen cuatro etapas:

##### **Etapas 1**

Cuando el cemento entra en contacto con el agua, se produce una rápida disolución de los minerales del clinker (principalmente C<sub>3</sub>S y C<sub>3</sub>A), así como de los sulfatos presentes en el cemento. Las especies iónicas pasan a la fase líquida, produciéndose, por lo tanto, un aumento de la concentración de  $\text{AlO}^{54-}$ ,  $\text{SiO}^{44-}$  y  $(\text{Ca})^{2+}$  y los iones

(SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup> procedentes del yeso y los sulfatos alcalinos. En los primeros minutos se produce una hidratación inicial del C3S, así como la formación de etringita por reacción del C3A con el yeso y el agua.

## **Etapas 2**

A medida que la hidratación evoluciona, la velocidad de la misma disminuye de manera significativa durante unas horas. En este periodo, la concentración de iones (Ca)<sup>2+</sup> en la fase líquida alcanza la sobresaturación y se inicia la nucleación y crecimiento del gel C-S-H y la formación y precipitación de portlandita, Ca (OH)<sub>2</sub>. La concentración de iones (SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup> permanece constante, ya que la fracción consumida en la formación de etringita es reemplazada por la disolución progresiva de los sulfatos cálcicos.

## **Etapas 3**

Comienza el fraguado. El proceso de hidratación se acelera de nuevo y es controlado por la nucleación y crecimiento de los productos de hidratación. Se forman grandes cantidades de gel C-S-H, y la portlandita continúa precipitando, produciéndose un descenso de la concentración de iones (Ca)<sup>2+</sup> en la disolución, lo que provoca una nueva aceleración en la velocidad de disolución del C3S. Debido a la formación masiva de etringita, la concentración de iones (SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup> empieza a descender.

## **Etapas 4**

La pasta ya ha fraguado, comienza a endurecer. Se produce una disminución de las velocidades de reacción y la etringita puede transformarse en monosulfoaluminato cálcico hidratado como consecuencia del descenso de iones sulfato en disolución. En este periodo de desaceleración, la hidratación del C<sub>2</sub>S puede empezar a ser significativa. En esta última etapa, las partículas anhidras de los silicatos están rodeadas por una densa capa de hidratos y, por lo tanto, la velocidad de reacción pasa a estar controlada por la difusión de los iones a través de dicha capa. Se produce en esta etapa la condensación y densificación del gel C-S-H (Orcasitas 2015).

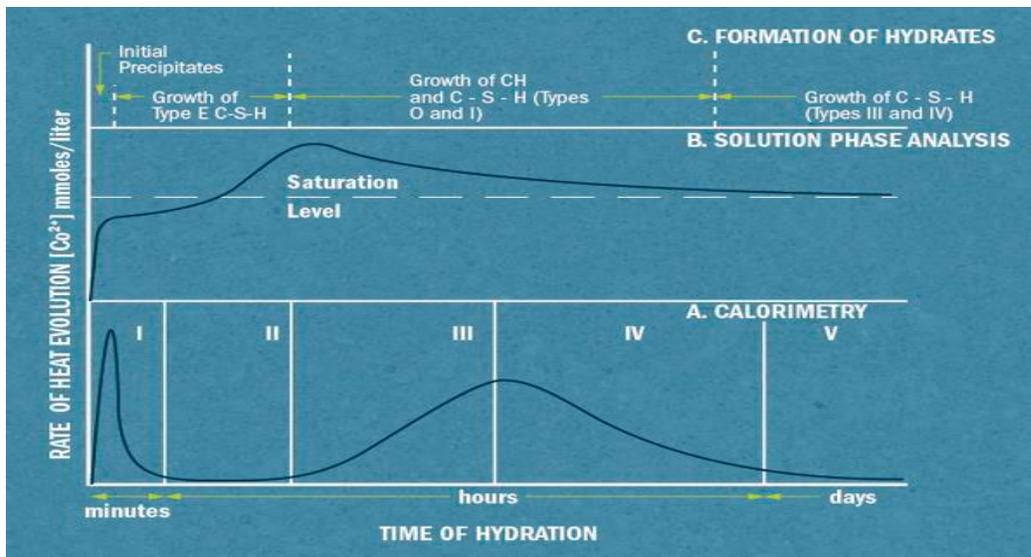


Fig. 4 Etapas del proceso de hidratación del cemento. Fuente (Silva 2017)

### 1.3.2 Hidratación de los cementos puzolánicos

Las interacciones que producen las puzolanas sobre las reacciones de hidratación de los componentes mineralógicos del clínker Portland y su regulación de fraguado, en los sistemas puzolana-silicato tricálsico ( $C_3S$ ) y puzolana-aluminato tricálsico ( $C_3A$ ), aceleran la reactividad de los componentes. Además, dichas interacciones resultan estimuladas por la elevación de la temperatura y por el aumento de la relación cal/puzolana. No obstante, con la variación del porcentaje de adición puzolánica se ha determinado que la misma se ha comportado para los menores porcentajes de incorporación, como estimuladora de las reacciones de hidratación, y para los mayores, a modo de focos de disipación de calor. Por otra parte, se ha determinado también que, en coincidencia con la disminución del calor de hidratación al aumentar el porcentaje de reemplazo, han aumentado los tiempos de fraguado, disminuyendo la trabajabilidad y la resistencia mecánica a las primeras edades (Soria 1972).

### 1.4 Materiales cementicios suplementarios

En la actualidad la sustitución del clínker por materiales cementicios suplementarios, la mayor parte lo constituyen: subproductos del sector industrial como las cenizas volantes (subproducto de la quema del carbón en las plantas de generación eléctrica), las escorias de altos hornos (subproducto de la industria siderúrgica), y el humo de sílice (subproducto de la producción de silicio y ferrosilicio). Mientras

tanto, otras abundantes reservas de materiales puzolánicos permanecen sin explotación, como las puzolanas naturales, la ceniza de la cáscara de arroz y las arcillas activadas térmicamente. (Alujas, 2010, MARTIRENA, 2003)

En la antesala de un mercado donde los materiales de carácter puzolánico comenzarán a ser explotados para ser empleados con mayor intensidad en la fabricación de CPO, las reservas y los potenciales de producción de los productos tradicionalmente empleados no podrán suplir su creciente demanda. En este contexto, existe una potencialidad en el empleo de zeolitas activadas por constituir una potencial reserva natural de materiales puzolánicos, con amplia disponibilidad en casi todas las regiones, independientemente del grado de desarrollo económico.

## **1.5 Tobas zeolitizadas como material cementicio suplementario**

### **1.5.1 Características generales de las tobas zeolitizadas**

Las tobas zeolitizadas son rocas de origen volcano-sedimentario, asociadas a los Arcos Volcánicos, donde el vidrio volcánico se ha transformado en minerales zeolíticos, con una composición predominante mordenítica - clinoptilítica con variables contenidos de celadonita, montmorillonita y cuarzo, predominando en algunas regiones la mordenita y en otras la clinoptilolita. Son rocas vitroclásticas y cristalovitroclásticas, ligeras, porosas y masivas, colores claros gris - verde, presentándose en el perfil sin inclusiones con otras rocas o con alternancia de areniscas, tufitas y conglomerados o sobrecorridas por lavas. (Costafreda 2008).

Las zeolitas comprenden un grupo de aluminosilicatos cristalinos e hidratados de aluminio, con cationes alcalinos y alcalino - térreos, y con una ordenación tridimensional (tectosilicatos) donde predomina una estructura abierta que les aporta gran capacidad para incorporar y ceder agua y cationes, sin cambios importantes en el edificio cristalino. Constituyen el grupo mineral más variado y extenso de los que forman la corteza terrestre (Bosch, P. y Schifter, I. 1997).

En la figura 1.1 se representa la armazón estructural de la zeolita en la que el  $Al^{3+}$  sustituye al  $Si^{4+}$  en el centro de los tetraedros estructurales, y los cationes de intercambio se sitúan en diversas posiciones equilibrando las cargas eléctricas;

ocasionalmente otros cationes pueden ocupar posiciones estructurales o de intercambio

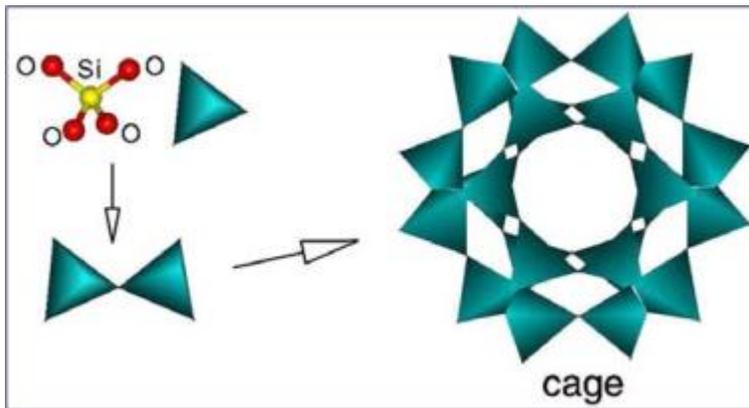


Figura 1.1 Unidad estructural básica de una zeolita, mostrando la disposición de los átomos de oxígeno y de silicio en el tetraedro fundamental, así como la estructura compleja formada por la unión de varios tetraedros. Fuente: (Bosch y Schifter, 1997)

Las zeolitas poseen redes tridimensionales, en las que todos los átomos de oxígeno pertenecen simultáneamente a dos tetraedros de  $\text{SiO}_4$  (que forman redes unidas tridimensionalmente) (Costafreda, 2008).

Las zeolitas poseen una estructura cristalina muy abierta, con una elevada porosidad interna.

La zeolita tiene diferentes tipos de aplicaciones en el mundo, en lo concerniente a los siguientes aspectos:

1. Cargas en la industria del papel para la mejora de la calidad de impresión, relleno de poros y fibras, aporte de brillo, opacidad, retención y blancura (Castellanos, y Soca, 2002).
2. Áridos ligeros en construcción (Rosell, 2007; Fuentes y Martínez, 2007; Costafreda y Calvo, 2007).
3. Intercambiadores iónicos en purificación de aguas (Morante, 2004).
4. Descontaminantes de residuos sólidos, líquidos y gaseosos (Febles, et al. 2007).
5. Catalizadores y soportes de catalizadores mediante: craqueo catalítico, hidrocrqueo, hidroisomerización, transformación del metanol en gasolina,

- alquilación, isomerización de aromáticos C8, polimerización, síntesis orgánica y química inorgánica (Bosch y Schifter, 1997).
6. Aportes de fertilizantes y acondicionadores de suelos en sistemas de zeopónicos (Febles, et al. 2007).
  7. Adsorbentes resistentes a los ácidos en secado de gases (Velázquez, et al. 2007).
  8. Trampas para elementos radioactivos en efluentes líquidos de instalaciones nucleares y como materiales de relleno y cubierta de residuos radioactivos en sus almacenamientos (Benvindo da Luz, A. 1995).
  9. Como intercambiadores iónicos mediante: ablandamiento de aguas industriales y domésticas (remoción de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ); eliminación de iones de  $\text{NH}_4^+$  en aguas servidas (Giannetto, et al. 2000).
  10. En la fabricación de vidrios sódico-cálcicos (Jordán, et al. 2007).
  11. En la fabricación de cosméticos y en la industria de los fármacos para la elaboración de productos donde actúan como sustancias portadoras-liberadoras de principios activos (Febles, et al. 2007).
  12. Como aditivo puzolánico (Rabilero, 1988; Rosell, 2011; Costafreda, 2011; Alemenares, 2011).

### **1.5.2 Uso de las tobas zeolitizadas como material puzolánico natural**

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. Se utilizan en la construcción como aditivos puzolánicos del cemento (Sersale, 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.

La adición de estos materiales a los hormigones es cada día más usual, no solo debido a razones económicas, sino porque los efectos que se desarrollan son beneficiosos para la durabilidad y resistencias mecánicas. Algunos minerales

industriales nacionales de génesis ígnea como los vidrios volcánicos, las tobas vítreas y las zeolitas, han demostrado su actividad puzolánica. (Rosell et al, 2011).

La importancia de la zeolita como aditivo en cementos puzolánicos y en morteros mixtos se da a conocer en la publicación de Costafreda et al. (2007). Mediante estudios demostraron que las propiedades de cementos y morteros con adición de zeolita mejoran notablemente y la zeolita se comporta como un material puzolánico activo.

Costafreda y Calvo (2007), plantean que la presencia de zeolita en morteros de cemento produce ciertas influencias en el comportamiento de esta reacción, que favorecen la formación de productos estables y duraderos. Los morteros preparados con adición de zeolita natural exhiben valores bajos de resistencias iniciales a edades tempranas (2 y 7 días), lo que demuestra que la presencia de zeolita natural produce un evidente retardo 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.

Costafreda et al (2011), indican que cada variedad de zeolita natural aporta diferente reactividad, probablemente influenciado por la sutil variabilidad de su composición química y mineralógica de los minerales zeolíticos y acompañantes, con frecuencia se encuentran en paragénesis con filosilicatos, fundamentalmente montmorillonita, como especie mayoritaria del grupo de las esmectitas.

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; 0,063 y 0,045 mm, demuestra que la superficie específica y la puzolanidad aumentan en la medida en que disminuye el diámetro de las partículas.

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 zeolitizadas como puzolanas naturales, aptas para producir aglomerantes como el cemento romano y adiciones o mezclas al cemento Portland, las cuales han dejado el camino abierto a nuevas investigaciones. (Batista, 2007).

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 fundamentalmente por la hidratación del silicato tricálcico ( $C_3S$ ) reacciona con los aluminosilicatos presentes en la zeolita, para dar lugar a una fase tobermorítica secundaria densificando la microestructura de la pasta y refinando la estructura de poros, con la disminución de la permeabilidad y el aumento de la resistencia mecánica. 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. A partir de los trabajos desarrollados por este investigador, se instauró en Cuba un nuevo tipo de cemento de bajo costo, el cemento romano, que sustituyó parcialmente al cemento Portland tradicional, y con el cual se construyeron casas y edificaciones.

Las zeolitas naturales procedentes del yacimiento de Tasajeras, Provincia de Villa Clara han sido investigadas por Rosell y Galloso (2001) y Rosell (2006, 2007, 2011) para la utilización como material de construcción, 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 y también se ha comparado con éxito las características de los morteros tradicionales empleados en las labores de restauración arquitectónica, con otros morteros elaborados a base de adiciones de puzolanas naturales elaboradas con zeolita de dicho yacimiento .

Rosell, M. (2007), demostró la influencia del tamaño de grano de la clinoptilolita-heulandita en el desarrollo de la reacción puzolánica, donde estableció la correspondencia directa que existe entre la cinética de reacción puzolánica y el desarrollo de las resistencias mecánicas en morteros con adición de puzolanas.

Los materiales tobáceos de los yacimientos Caimanes y San Andrés fueron objetos de estudios de investigadores como Cabrera (2010), Solís (2011), Almenares (2011), Justo (2012), para valorar su utilización como puzolana natural. 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. El material se analizó a los 7, 28, 90 y 120 días, lo que permitió conocer que la resistencia se incrementa en el tiempo, como se ha planteado por investigadores como Rabilero y Gener, que lo establecen como característica fundamental de los materiales puzolánicos.

### **1.5.3 Activación térmica de las tobas zeolitizadas para su utilización como puzolana**

Muchos investigadores como Türkmenoğlu y Tankut (2002), Shi y Day (2001), Perraki y Kakali (2003), Osbaeck y Makovicky (1995), han estudiado la actividad puzolánica de minerales zeolíticos, sin embargo, lo han hecho con minerales secundarios o acompañante de otras puzolanas naturales como son los vidrios volcánicos. No obstante, con estos estudios es posible conocer el efecto de la activación de los minerales zeolíticos, aplicando la activación térmica. Estos minerales se alteran a temperaturas relativamente bajas. Por lo que el análisis térmico diferencial (ATD) permite encontrar la desestabilización de estos minerales a diferentes temperaturas. Y finalmente estos autores han comprobado el efecto de la actividad puzolánica a partir de la evaluación de su resistencia en morteros normalizados (Brussels, 1995).

Diferentes estudios concluyen que la presencia de zeolita influye positivamente en la actividad puzolánica de las tobas en su estado natural Türkmenoğluy Tankut (2002), Perraki y Kakali (2003), Poon, Lam y Lin, (1999). Sin embargo, los resultados de investigadores como Costa y Massazza (1977), Liebig y Althaus(1998), Habert et al. (2008), concluyen que la activación de los minerales zeolíticos, produce una desestabilización de su estructura e incrementa su reactividad. Resultados que fueron comprobados a partir de los ensayos de resistencia mecánica. El aumento de la resistencia se correlaciona claramente con

la desestructuración de los minerales de heulandita y de forma similar también ocurre con la filipsita.

El proceso de activación puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, siendo este último el candidato más fuerte para modificar la estructura cristalina de las zeolitas y alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica. La activación del material zeolitizado se refiere al proceso de lograr, a partir del aumento de la temperatura, la ruptura de los enlaces químicos y la desestabilización resultante de la estructura cristalina de las fases mineralógicas que la contienen y obtener un material con propiedades puzolánicas superiores a su estado natural.

Durante la calcinación de estas, pueden distinguirse varias etapas. Con el calentamiento desde temperatura ambiente hasta 220 °C ocurre la pérdida del agua adsorbida en las superficies externas e internas de la zeolita (deshidratación). A los 300°C comienza la desestructuración de la heulandita y la clinoptilolita a 450°C (Habert, 2008). La presencia de minerales no zeolíticos tiende a aumentar la temperatura de activación, tal es el caso de las fases arcillosas que es a temperaturas superiores a 750°C donde ocurre la destrucción de sus fases mineralógicas. Si la temperatura alcanza valores de 800°C toma lugar la reorganización de la estructura para formar nuevas fases cristalinas estables a altas temperaturas y químicamente poco reactivas. Frazao (2007).

Por tanto, la temperatura de calcinación a la cual se obtiene la mayor reactividad puzolánica debe situarse dentro del intervalo que se extiende entre el final de la deshidratación y el inicio de la recristalización.

## **1.6. Aspectos energéticos de la producción de cemento**

El descubrimiento del Cemento Portland Ordinario (CPO) como material cementante, patentado en el año 1824 por Joseph Aspdin, ha sido sin lugar a dudas uno de los acontecimientos más importantes en la historia de los materiales de construcción. Su uso prácticamente en todos los trabajos de la construcción, su costo relativamente bajo, la posibilidad de lograr una producción industrial masiva y los buenos resultados obtenidos en sus aplicaciones han sido la causa de que hoy en día este aglomerante haya desplazado a todos los que le antecedieron, los cuales han quedado relegados a aplicaciones menores en trabajos de albañilería (Martirena, 2009).

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. El cual se describe como un cemento hidráulico producido al pulverizar el clínquer, 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 clínker, se muele conjuntamente con una cantidad adecuada de regulador de fraguado, que suele ser piedra de yeso natural.

En la actualidad el cemento Portland se encuentra entre los materiales más empleados y con mayor nivel de producción a nivel mundial (más de 2500 millones de toneladas en el 2006) (Castillo, 2010).

Contrariamente a sus relativos bajos consumos energéticos por tonelada de material en comparación con otros materiales de construcción, los altos volúmenes de producción a escala global lo hacen responsable de cerca del 7 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera y del 5 % del consumo de energía en el sector industrial (Humphreys, 2002, Worrell, 2009). Al mismo tiempo, es uno de los principales responsables de la degradación ambiental del planeta,

debido que su proceso productivo en lo fundamental está montado sobre la base de la explotación intensiva de recursos no renovables (Martirena, 2009).

Por tanto, trae como consecuencia que existan contradicciones entre sus demostradas ventajas como material de construcción y su necesaria demanda para el desarrollo socioeconómico con un negativo impacto medioambiental.

En el proceso de producción del CPO, la producción de clínquer es la responsable del mayor consumo de energía (temperaturas cercanas a los 1450°C) y también de los mayores volúmenes de emisiones de CO<sub>2</sub>. Más del 50 % del CO<sub>2</sub> liberado se debe a la descomposición de la caliza durante el proceso de fabricación del clínquer (Alujas, 2010). Ante esta problemática, la tendencia del CPO será hacia la disminución del contenido de clínquer por el empleo de materiales cementicios Suplementarios (MCS) y al aumento del uso de combustibles alternativos para su fabricación (Aitcin P, 2000).

La producción de CPO se ve limitada principalmente por el alto consumo de energía necesario en la fabricación del clínquer y las emisiones de gases de efecto invernadero. Dado que las tecnologías utilizadas no son las más eficientes y el volumen de emisiones debido a las actividades del sector industrial y residencial son más bajas que en los países desarrollados, el volumen de CO<sub>2</sub> emitido durante la fabricación del CPO representa una fracción mayor de las emisiones totales, y otro tanto sucede para el consumo energético (Hendriks 1998). Por lo tanto, el sustancial incremento requerido en la producción del aglomerante debe partir también de las bases para un desarrollo sustentable. Por otra parte, la disponibilidad de subproductos industriales para ser empleados como puzolanas en estos países es escasa.

El desplazamiento en el consumo y en la producción del aglomerante hacia naciones menos industrializadas implica también el desarrollo de tecnologías y estrategias que permitan la obtención y empleo de materiales puzolánicos bajo las condiciones propias de estos países. Incluso en los países desarrollados el suministro de subproductos industriales con carácter puzolánico a la industria del

cemento ha disminuido, con el resultante encarecimiento de estos productos (Ambroise et al 1994).

### **1.6.1 Producción mundial**

El ahorro de energía en la industria del cemento debe comprender la modernización de la planta, en la mayoría del mundo se lucha por una producción con la mejor eficiencia energética posible, tanto para el consumo de energía térmica que para la eléctrica. En muchos casos se cambian los procesos de producción de clínquer de vía húmeda a seca, aumentando la capacidad de producción de la fábrica y reduciendo el consumo térmico. También para mejorar la eficiencia térmica del horno se instalan intercambiadores de calor y se acorta el horno, así como el uso de aditivos en el cemento y elevando la eficiencia en la molienda. (Anónimo, 2009).

Los combustibles alternativos usados en la producción de cemento son los subproductos provenientes de otras actividades como aceites usados, disolventes, neumáticos usados, etc. Toda esta gestión se realiza teniendo en cuenta un estricto control de aceptación de estos combustibles de manera que no se vea afectada ni la calidad del cemento ni se incrementen los niveles de emisión a la atmósfera.

Algunas de estas iniciativas han sido clasificadas por Naciones Unidas como “Mecanismos de Desarrollo Limpio”(Anónimo, 2010)

Por ejemplo, la cementera de Arasmeta (India) utiliza la ceniza volante de las centrales eléctricas para la fabricación del cemento.

- Malasia, el 5% de la energía térmica necesaria para las plantas de cemento de Lafarge de Rawang y Kanthan se produce a partir de biomasa.
- Marruecos, un parque eólico proporciona el 50% de la electricidad requerida por la cementera de Tetuán.

La industria cementera tiende a que cada día su producción sea cada vez más rentable económica y ambientalmente, grandes compañías toman de la mano la posibilidad que brinda el desarrollo industrial e implementan este desarrollo a la producción de cemento. Industrias como California Portland Cement Company (CPC) han revolucionado esta idea, en Mojave, California, una fábrica perteneciente

a esta compañía implementó esta idea al extremo que logró independizar esta industria de la red eléctrica nacional con la implementación de energías renovables y uso de las pérdidas energéticas de la industria, como son las pérdidas de calor recuperándolas e implementando las tecnologías de cogeneración, pero además usa también combustibles alternativos, posibilitando un uso mínimo de combustibles básicos para la producción de cemento.

### 1.6.2 Producción nacional

En nuestro país hasta el año 2010 se cuenta con la existencia de 6 fábricas de Cemento, entre estas, cuatro producen cemento mediante un proceso de vía húmeda, la “José Merceron” de Santiago de Cuba, “Mártires de Artemisa” de La Habana, “26 de Julio” de Nuevitas, Camagüey y “Siguane y” de Sancti Spíritus, las otras dos son de proceso seco, “Mariel” en La Habana y “Cienfuegos” en dicha ciudad. A continuación, se muestra la ubicación geográfica de las fábricas en nuestro país (Autores, 1998)



*Fig. 1.2 - Ubicación geográfica de las fábricas de cemento cubanas. Fuente: (Autores, 1998)*

La industria del cemento Portland en Cuba, ha sido de atención fundamental lograr los mayores rendimientos, elevar la productividad del trabajo (con la consiguiente disminución de los costos de producción), elevar el estado técnico de los equipos

de esta industria, mejorando las condiciones y calidad del mantenimiento de los mismos, para obtener de ellos el máximo de eficiencia.

En la actualidad la industria del cemento nacional, enfrentan grandes dificultades como son los altos consumos energéticos que representa más del 65 % de los costos de producción. La fábrica de cemento Siguaney cuenta con una tecnología de producción muy antigua y deteriorada en comparación con la maquinaria que se utiliza actualmente en la producción de cemento a nivel mundial. Estas condiciones con que cuenta la empresa actualmente llevan consigo a que la utilización de la energía no sea la más apropiada, ya que los consumos durante la producción son mayores que los predeterminados. (Autores, 1998)

Como un resultado del desarrollo de la tecnología de producción del cemento en la dirección de economizar combustible en hornos de gran tamaño, han surgido varios factores que afectan la marcha continuada del horno, fundamentalmente los revestimientos refractarios.

A raíz de todo esto el Ministerio Nacional que controla esta rama industrial, el Grupo nacional de Cemento y las fábricas propiamente dichas se ha propuesto llevar a cabo medidas energéticas, ya que la producción de cemento consume tanto energía eléctrica como térmica, medidas que parten desde crear conciencia de ahorro de energía en cada uno de los trabajadores, hasta actualización de la técnica, equipamientos e infraestructura de toda una fábrica.

### **Conclusiones del capítulo**

- Las tobas zeolitizadas constituyen una interesante alternativa como fuente de material puzolánico debido a su amplia disponibilidad en la región y sus características químicas y estructurales, que permiten su transformación en materiales de carácter puzolánico a partir de su activación térmica y de forma natural finamente molido.
- El aprovechamiento de las características de las tobas zeolitizadas activadas térmicamente para la obtención de materiales puzolánicos es un aspecto todavía poco comprendido y estudiado.

- La activación térmica de las tobas zeolitizadas es un aspecto clave para aumentar su reactividad y con ello incrementar los porcentajes de sustitución en los cementos mezclados.

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

### **2.1 Selección de la materia prima**

Como materia prima para esta investigación se utilizó una roca zeolitizadas proveniente del yacimiento Caimanes (figura 2.1) que se encuentra ubicado cerca del poblado Farallones y limita al norte con el río Cabaña, al sur con el río Moa, al oeste por el río Castro y está situado a unos 24 km, al noroeste del municipio Moa en la provincia Holguín. Es el tercer depósito en cantidad de reservas nacionales con 36 millones de toneladas.

En el área se observan diferencias bien marcadas en el relieve, aunque las rocas zeolitizadas afloran en una meseta, investigaciones anteriores revelaron la presencia de rocas vitroclásticas intensamente alteradas a minerales del grupo de las zeolitas resultando ser éste el mayor depósito natural de la región oriental. Las rocas tienen un color verde claro y son de grano muy fino, con variaciones en las tonalidades llegando en ocasiones a ser casi blancas.

Existen experiencias de trabajos precedentes sobre la utilización de estas tobas y otros materiales similares de la región para obtener un aditivo puzolánico. Los materiales resultantes mostraron propiedades cementantes pero con bajas reactividad (Almenares, 2011).

Las grandes reservas de este material y su potencial para su utilización como material cementicio suplementario, dado por su composición química y mineralógica, descritas por Orozco, (1996), Rodríguez et al (2000), Frazao, (2007) y Almenares, (2011), junto a la necesidad de desarrollar materiales que se puedan emplear para diferentes prestaciones en la construcción, requiere de investigaciones que permitan probar la posibilidad de incrementar la reactividad de las tobas zeolitizadas.



Figura 2.1 Yacimiento de zeolita en la región Caimanes

## 2.2 Caracterización de la toba natural y calcinada

Las determinaciones de la composición química cualitativa superficial mediante Microscopia electrónica de barrido, fueron realizadas utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB-EDS), modelo Quanta 200 FEI, con detector de electrones retrodispersados (EDS), voltaje de trabajo 200 V a 30 kV, corriente >100 nA, resolución de 1,6 nm a 30 kV en alto vacío. La composición química cuantitativa fue determinada mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX) utilizando un espectrómetro Bruker AXS S4 operado a una potencia de 1 kW con un cátodo de Rh. Los cristales analizadores utilizados fueron OVO55FC para el Na, el F y el Cl con un colimador con un ángulo de divergencia de 0,46°; PET para Al, Si, P y Mn con un colimador con un ángulo de divergencia de 0,23° y LiF220 con un colimador con un ángulo de divergencia de 0,23° para el resto de los elementos analizados.

En la figura 2.2 se aprecia el grano fino de las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes. Se aprecia una ligera presencia de material arcilloso (a), y masa vitroclástica con presencia de zeolita del tipo heulandita – clinoptilolita (b) y cristales bien desarrollados de heulandita (c), con típico aspecto tabular producto de la transformación del vidrio volcánico.

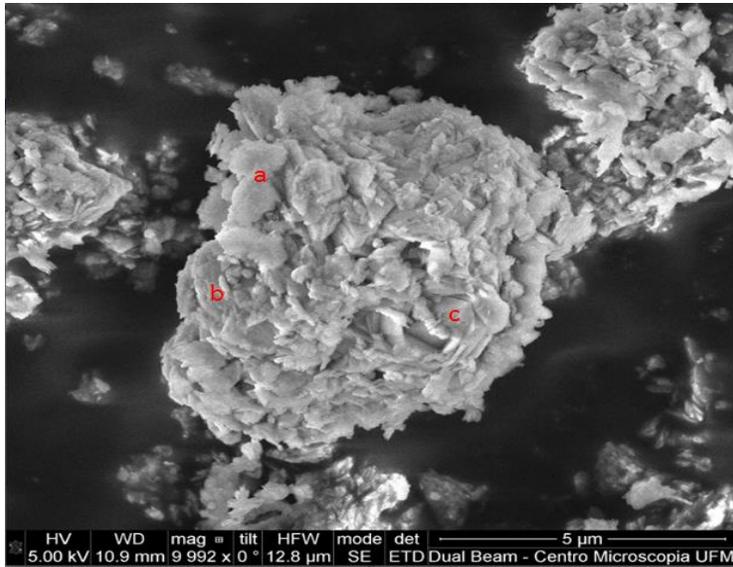


Figura 2.2. Cristales de heulandita dentro de la masa vitroclástica. a) material arcilloso, b) masa vitroclástica y c) cristales de heulandita. Guerra 2015.

El espectro de la composición química cualitativa superficial de la toba zeolitizada determinada por microscopía electrónica de barrido con rayos X acoplado se muestra en la figura 3.2, que indica la presencia de aluminio, silicio, hierro, oxígeno, magnesio, potasio, sodio, calcio y titanio.

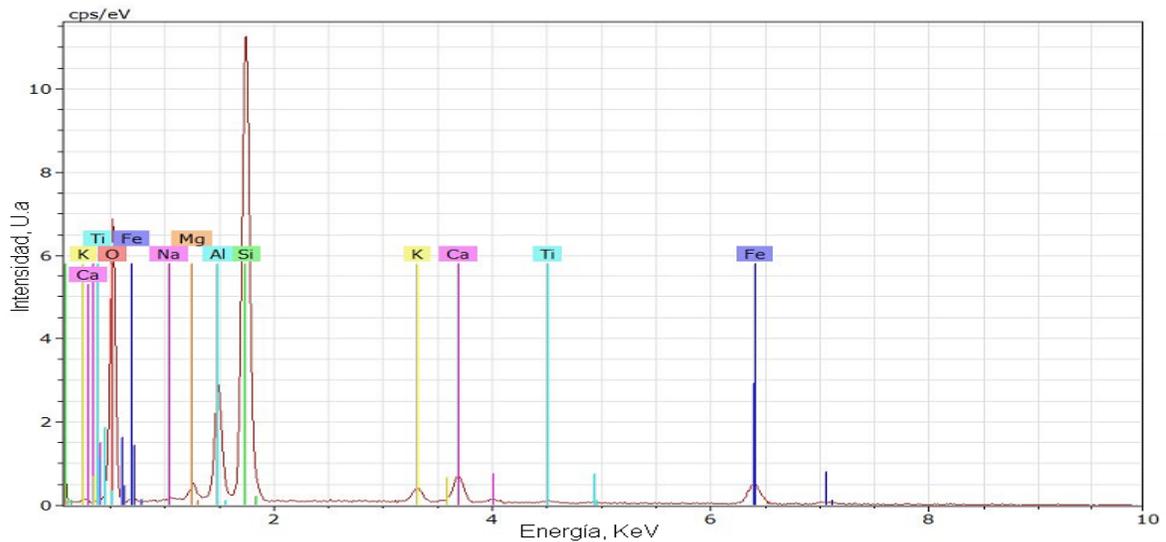


Figura 2.3. Espectro MEB - EDS de la composición química cualitativa superficial de la toba zeolitizada. Guerra 2015.

En la tabla 2.1 se muestra la composición química cuantitativa por FRX de la zeolita del yacimiento Caimanes realizadas por diferentes investigadores en las últimas dos décadas. Se puede apreciar que existe total correspondencia en la composición química donde todos coinciden que este material está compuesto fundamentalmente de óxido de silicio, aluminio e hierro, seguido de los óxidos de calcio, potasio, magnesio, sodio y titanio.

La composición de esta muestra se corresponde con la exigida para su utilización como puzolana, pues el contenido total de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es superior al 70 %, que es el valor mínimo exigido de acuerdo con las recomendaciones expresadas en la NC-TS 528: 2007 para materiales puzolánicos.

Tabla 2.1 Composición química de la muestra de toba zeolitizada del yacimiento Caimanes en su estado natural. Guerra 2015.

Compuestos	Orozco 1996	Rodríguez et al 2000	Frazae et al 2007	Almenares 2011	Guerra 2015
$\text{SiO}_2$	59,8	63,2	57,9	68,950	62,12
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12,32	12,32	14,5	13,570	13,32
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,91	2,66	2,09	4,030	4,99
$\text{FeO}$	0,97	0,39	0,2	-	-
$\text{CaO}$	6,32	3,92	5,99	6,120	5,25
$\text{MgO}$	1,48	1,3	1,05	2,540	1,83
$\text{Na}_2\text{O}$	1,42	0,93	0,36	1,830	1,83
$\text{K}_2\text{O}$	1,45	1,42	1,2	2,120	2,02
PPI	11	13	15,9	8,570	8,73

La presencia potasio, sodio y calcio en la composición química de la muestra de toba zeolitizada está asociada mayoritariamente con la presencia de minerales del grupo de la zeolita y arcillosos. Estos resultados están en correspondencia con los obtenidos por Frazzae (2007) y Almenares (2011).

La caracterización mineralógica de la materia prima natural y calcinada por Difracción de Rayos X (DRX) se realizó en un difractómetro Panalytical Xpert Pro MPD. Las muestras fueron leídas entre los 5 y los 45° ( $2\theta$ ), a un paso angular de

0,017° y un tiempo por paso de 60 segundos y radiación de Cu y una rejilla de divergencia de 0,5°. Los difractogramas fueron procesados empleando el software X'Pert HighScore Plus versión 3.0.4 del 2011.

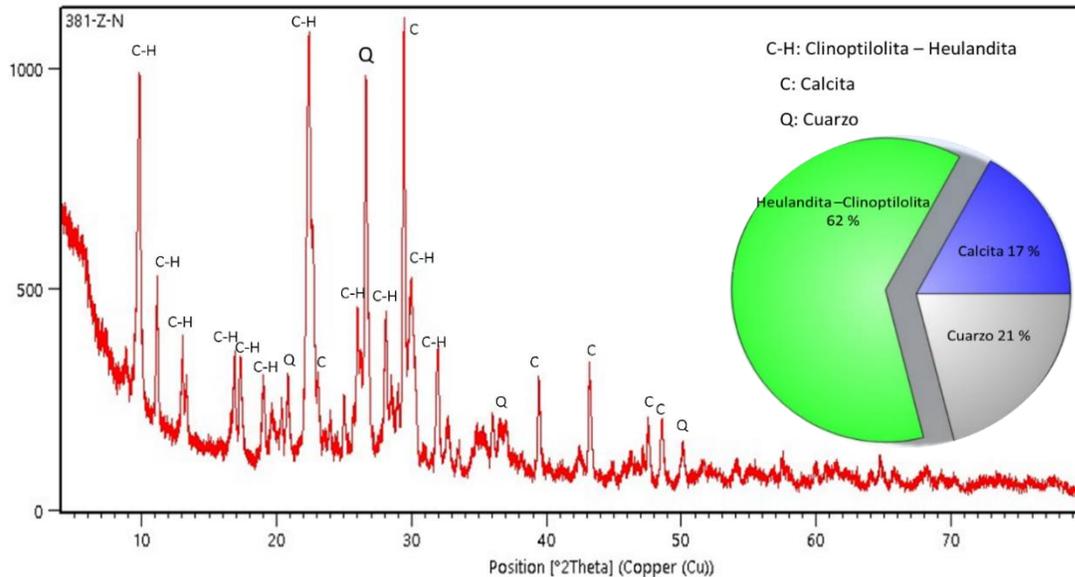


Figura 2.4. Difractograma de la muestra de toba zeolitizada natural. Guerra et al 2015

En el análisis realizado por DRX a la muestra de tobas zeolitizadas en su estado natural se muestra en la figura 2.4 se pueden identificar como la principal fase heulandita-clinoptilolita, además se identifica cuarzo y calcita, resultados que corresponden con la composición química cualitativa expuesta en la figura 2.3.

Las fases zeolíticas presentes en el material tobáceo son las de mayor influencia para el análisis de las propiedades puzolánicas. La cuantificación de las fases realizadas mediante el software X'Pert HighScore Plus versión 3.0.4 del 2011, mostró que en mayor cuantía aparece la heulandita-clinoptilolita con un 62 %, luego con 21% el cuarzo y con 17% la calcita (figura 2.4).

### 2.3 Descripción del tratamiento

La preparación de la zeolita para el proceso de producción del material cementicio suplementario comienza con la extracción del mineral en el yacimiento. El mineral es mezclado para garantizar una hogenización en la alimentación al proceso.

El material es sometido a un proceso de reducción de tamaño mediante dos etapas de trituración, cada una por separado en trituradoras de mandíbulas con 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 utilizó 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 pasa al proceso de activación térmica.

La activación constituye el único método para alcanzar un material más reactivo, logrando con esto una mayor superficie específica, desorden estructural y cambios en la composición química. El proceso de activación puede realizarse a través de métodos mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales, la activación térmica es la forma más empleada y efectiva, desde el punto de vista técnico – económico, para alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica (Alujas, 2010). Es por ello que el trabajo se centra en la obtención de un material puzolánico a partir de la activación térmica de las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes.

Las principales fases mineralógicas del yacimiento Caimanes son zeolitas del tipo heulandita-Ca-K y clinoptilolita-Ca y subordinado a ellos aparece cuarzo y minerales arcillosos del grupo de las esmecitas (Frazao, 2007 y Almenares, 2011).

La selección de la temperatura de activación se centra primeramente en la investigación realizada por Frazao (2007), donde realiza un análisis térmico diferencial y termogravimétrico de las zeolitas de este yacimiento, el cual se muestra en la figura 2.5 donde se puede observar picos endotérmicos a los 80 y 320°C, características del mineral heulandita (Gottardi y Galli, 1985), mientras que los picos endotérmicos a los 480 y 620°C revelan la presencia de fases arcillosas (Nemecz, 1981). El efecto exotérmico a los 830°C se atribuye a la cristalización de una nueva fase. La curva TG tiene una forma escalonada, siendo el escalón entre los 50 y 300°C el más importante ya que el que aparece a los 620°C es poco perceptible, lo que indica contenidos muy bajos de arcilla.

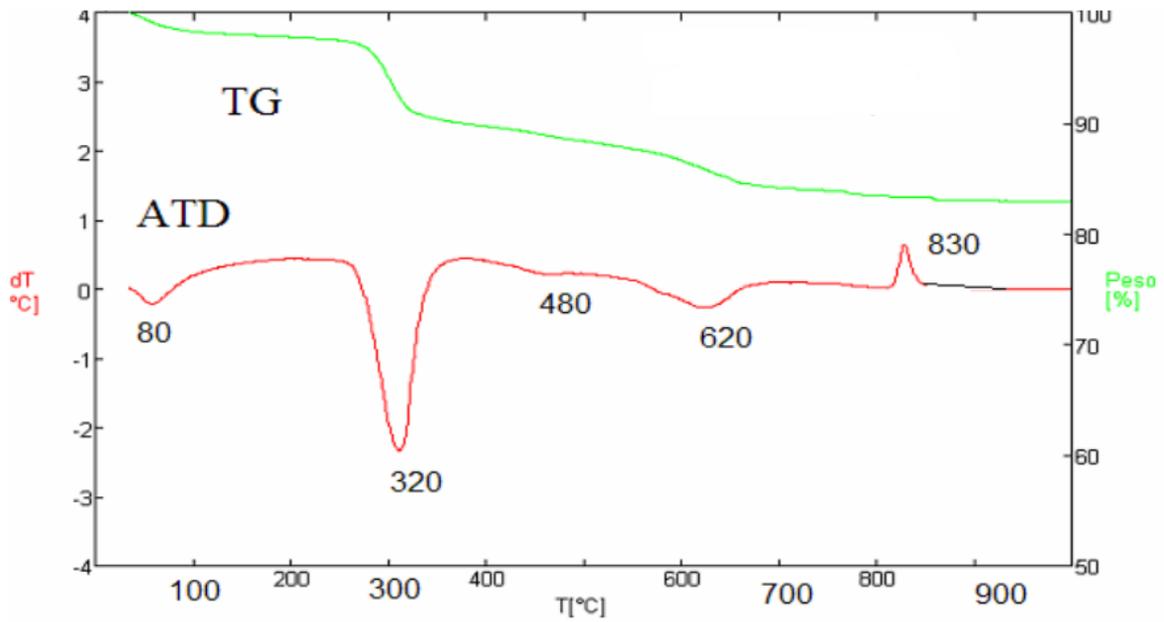


Figura 2.5 Curvas térmicas ATD y TG fuente Frazao, 2007.

También es considerado el trabajo realizado por Guerra en 2015 donde evalúa el índice de actividad de resistencia del material natural y luego de la activación a 350, 500 y 75 $^{\circ}\text{C}$ , sustituyendo 30 % de clínquer. (figura 2.6)

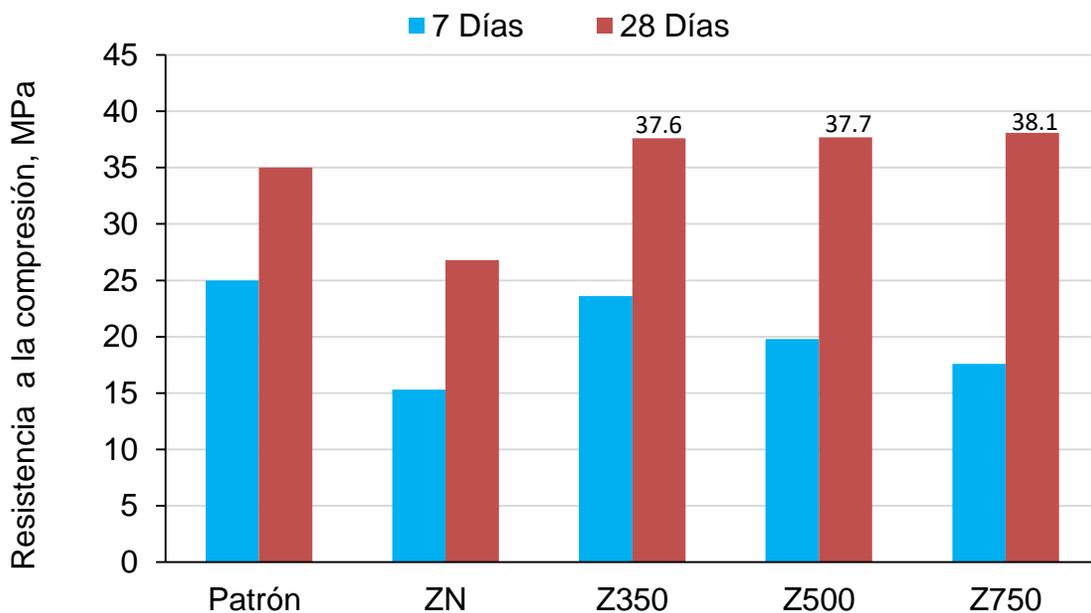


Figura 2.6. Resistencia a la compresión de los morteros con sustitución de 30 % de toba zeolitizada calcinadas por cemento Portland. Guerra 2015.

Los resultados muestran que Los morteros elaborados con toba zeolitizada calcinada y natural, a la edad de ensayo de 7 días muestran menores resistencias que el patrón, característica correspondiente a este tipo material en su estado natural, sin embargo, la resistencia desarrollada por los sistemas calcinados tiene valores superiores al natural, como resultado de su activación. El mejor comportamiento a esta edad lo posee la toba calcinada a 350°C.

A los 28 días de fraguado las resistencias desarrolladas por los morteros con material tobáceo calcinado son superiores a la referencia, mientras que el natural se mantiene por debajo de esta, lo que indica que se logra mayor reactividad con el proceso de activación térmica.

El proceso de activación se desarrolla en un horno de tambor rotatorio capaz de procesar 100 kg/h de material garantizando 45 minutos de tiempo de residencia para lograr la transformación de la zeolita.

Luego del proceso de activación el material es sometido al proceso de molienda en molinos de bolas durante 45 minutos para garantizar que el 95% del material pase por el tamiz de 90  $\mu\text{m}$ .

#### **2.4 Cálculo del Índice de consumo de combustible**

Para el cálculo del índice de consumo de combustible se utiliza la metodología descrita por Chang e Yuzhaninov (1997), donde se calcula primeramente el balance de masa para conocer la composición racional y los productos de las transformaciones del mineral, luego se realiza un balance de combustible con el objetivo de determinar el volumen de aire necesario para la combustión del combustible y el volumen de gases producto de las reacciones de combustión. Una vez determinado estos datos se procede al alcance de energía para conocer la demanda energética del horno. Se realiza un balance entre los acápite que aportan calor y los que consumen, en función del déficit de energía se calcula la cantidad de combustible necesario para producir dicha energía.

### 2.4.1 Balance de masa

El balance de masa se realiza para 100 kg de toba zeolitizadas, se parte de la composición química determinada por FRX y mineralógica DRX.

Cálculo de la composición racional del mineral de entradas

$$m(\text{CaO}) = \frac{m(\text{mineral}) * \text{Ley}(\text{CaO})}{100}$$

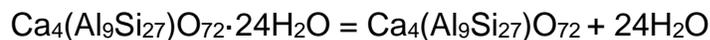
Basado en la ley de la estequiometría y con la masa del CaO se determina la masa de calcio y oxígeno presente de la siguiente forma.

$$m(\text{Ca}) = \frac{m(\text{CaO}) \cdot \text{MM}(\text{Ca})}{\text{MM}(\text{CaO})} \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{g/mol}}{\text{g/mol}}$$

### Cálculo del agua externa

El porcentaje de humedad se toma basado en el análisis térmico realizado por frazao en 2007 (figura 2.5) donde plantea que pérdida de masa correspondiente al agua de humedad corresponde al 5% del total de la masa.

La transformación que experimenta la zeolita a 350°C (temperatura de activación) corresponde a la transformación endotérmica descrita por Frazao, 2007 en el cual la zeolita pierde el agua de constitución. La transformación se muestra en la reacción siguiente.



Para el cálculo de los elementos que intervienen en la transformación del material se utiliza la ley de estequiometría.

### 2.4.2 Balance de Energía

El balance de energía de los hornos es el desglose por diferentes índices de entrada y salida de calor, a través de la ley de la conservación de la energía.

$\sum Q_{ent} = \sum Q_{sal}$ , la cual se basa en que la energía, ni se crea ni se destruye, sino que se transforma. En nuestro caso se realiza el balance de energía en un horno de tambor rotatorio para el tratamiento a 350°C de zeolitas para la producción de un material cementicio suplementario.

Los acápites que se tuvieron en cuenta fueron

### **Acápites de entrada de energía.**

#### **Q<sub>1</sub> Calor aportado por la combustión del combustible**

$$Q_1 = Q_m^T \cdot X$$

donde:

$Q_m^T$  es la potencia térmica menor del fuel – oil,  $kJ / kg_{comb}$

$X$  : es el consumo de fuel-oil,  $kg$

#### **Q<sub>2</sub>. Calor físico del combustible.**

El combustible se precalienta hasta una temperatura de 110 °c.

$$Q_2 = m(comb) \cdot Cp \cdot t$$

Donde:

M(comb) es la masa del combustible

Cp es la capacidad calorífica del combustible

t es la temperatura del combustible a la entrada

#### **Q<sub>3</sub>. Calor físico del aire de combustión**

$$Q_3 = Va \cdot Cp \cdot t \cdot X$$

Donde:

Va es el volumen de aire necesario para la combustión del combustible

Cp es la capacidad calorífica del aire

T es la temperatura del aire a la entrada

X es la cantidad de combustible

### **Acápites de consumo de energía.**

Q<sub>4</sub>. Calor necesario para calentar y evaporar de la materia prima a procesar.

$$Q_4 = m(H_2O)_{ext} \cdot Cp(H_2O) \cdot (\Delta T) + m(H_2O)_{Ext} \cdot \lambda(H_2O)$$

Donde :

M(H<sub>2</sub>O) masa del agua externa

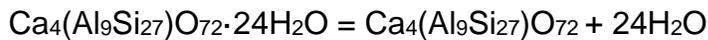
C<sub>p</sub> capacidad calorífica del agua

DT es la diferencia de temperatura desde la temperatura de ebullición y la temperatura de entrada

λ(H<sub>2</sub>O) El calor latente de evaporación del agua se tomó de la tabla LVI, PAULOV, K, F:

#### **Q<sub>5</sub>. Calor necesario para transformar material.**

La transformación del material está caracterizada por la pérdida de agua de la heulandita que es el componente fundamental de esta zeolita.



$$Q_5 = m_{\text{Heulandita}} \cdot \frac{\Delta H_{r_T}}{n \cdot MM_{\text{Heulandita}}}$$

$$\Delta H_T = \sum n\Delta H_{fP} - \sum n\Delta H_{fR}$$

#### **Q<sub>6</sub>. Calor físico del producto.**

$$Q_6 = m(p) \cdot C_p(pf) \cdot T_{Sal.}$$

#### **Q<sub>7</sub>. Calor sensible de los gases salientes (gases tecnológicos y de combustión).**

$$Q_7 = Q_{7.1} + Q_{7.2}$$

$$Q_{7.1} = \sum (Vg.t \cdot Cpg) \cdot T_{Ssl.g}$$

$$Q_{7.2} = \sum (Vg.c \cdot Cpg.c) \cdot T_{Sal.} \cdot X$$

#### **Q<sub>8</sub>. Calor arrastrado por el polvo.**

$$Q_8 = m(polvo) \cdot C_{p_{polvo}} \cdot T^S_{Polvo}$$

La masa de polvo se asume el 5% de la masa del mineral seco inicial debido que la granulometría de alimentación al horno es el producto de la segunda etapa de trituración (-3,15 mm)., es decir, es un material grueso para estos procesos.

Q<sub>9</sub>. Calor que se pierde al medio ambiente.

Para el cálculo aplicamos la ecuación de conductividad térmica para el flujo térmico de la pared cilíndrica y muchas capas Chang e Yuzhaninov (1997).

$$Q_9 = \frac{(t_{int} - t_{ext.}) \cdot 2\pi \cdot L}{\sum \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{d_{ext}}{d_{int}}}$$

### **Conclusiones del capítulo**

- Las características geólogo - tecnológicas del depósito Caimanes avalan su empleo como fuente materia prima para su uso en la construcción.
- La metodología empleada para la investigación permite conocer la composición másica del mineral, los principales indicadores que aportan y consumen energía y el consumo de combustible para procesar 100 kg de zeolita en un horno de tambor rotatorio.

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El índice de consumo de combustible del proceso de producción del material cementicio suplementario a partir de la activación térmica de la zeolita de caimanes en un horno rotatorio está condicionado por las cantidades de material a procesar y la demanda energética del horno para lograr la transformación del material. Mostrar la composición del mineral alimentado, la cantidad y composición de los gases de combustión, el balance energético del horno, la cantidad de combustible necesaria para procesar el material y el análisis técnico-económico y ambiental es el objetivo fundamental de este capítulo

#### 3.1 Resultados del balance de masa

La tabla 3.1. muestra la composición racional de 100kg mineral húmedo teniendo en cuenta la cuantificación de las fases mostrada . Se puede observar que los principales constituyentes del mineral son Si, Ca y Al con 26,95; 10,43 y 5,48 kg respectivamente.

Tabla 3.1. Composición racional del mineral inicial

	Ca	Al	Si	O	H	C	Total	%
$\text{Ca}_4(\text{Al}_9\text{Si}_{27})\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$			17,13	34,67				59,04
O	3,622	5,486	1	7	1,084		62,000	8
$\text{CaCO}_3$	6,809			8,150		2,041	17,000	16,190
$\text{SiO}_2$			9,819	11,181			21,000	20,000
$\text{H}_2\text{O}$				4,444	0,556		5,000	4,762
Total	10,431	5,486	26,950	58,452	1,640	2,041	105,000	
%	9,934	5,225	25,667	55,669	1,562	1,943		

El balance de masa del proceso de activación de la zeolita de Caimanes para producir un material cementicio suplementario se muestra en la tabla 3.2. en la cual se puede observar la composición del mineral a la entrada y luego del proceso de activación el cual se encuentra caracterizado por la pérdida de alrededor de 10 kg de agua de constitución de la zeolita.

Tabla 3.2. Balance de masa del proceso

Entrada								
	Ca	Al	Si	O	H	C	total	%
Ca <sub>4</sub> (Al <sub>9</sub> Si <sub>27</sub> )O <sub>72</sub> ·24H <sub>2</sub> O	3,622	5,486	17,131	34,677	1,084		62,000	59,048
CaCO <sub>3</sub>	6,809			8,150		2,041	17,000	16,190
SiO <sub>2</sub>			9,819	11,181			21,000	20,000
H <sub>2</sub> O				4,444	0,556		5,000	4,762
Total	10,431	5,486	26,950	58,452	1,640	2,041	105,000	
%	9,934	5,225	25,667	55,669	1,562	1,943		
Salida								
Ca <sub>4</sub> (Al <sub>9</sub> Si <sub>27</sub> )O <sub>72</sub>	3,622	5,486	17,131	26,008			52,246	49,758
CaCO <sub>3</sub>	6,809			8,150		2,041	17,000	16,190
SiO <sub>2</sub>			9,819	11,181			21,000	20,000
H <sub>2</sub> O				13,113	1,640		14,754	14,051
Total	10,431	5,486	26,950	58,452	1,640	2,041	105,000	
%	9,934	5,225	25,667	55,669	1,562	1,943		

### 3.2 Balance masa para 1 kg de combustible

El combustible utilizado para el cálculo es el petcoke que es el uno de los más utilizados en la industria del cemento para la producción de clínquer.

La tabla 3.3. muestra el balance de combustible para 1kg de combustible (necesario para realizar los cálculos energéticos del horno). Se puede observar que para combustionar 1kg de este combustible se necesitan 12,866 kg para producir fundamentalmente 3,173 kg de CO<sub>2</sub>.

Tabla 3.3. balance de 1kg de petcoke.

Entrada									
	C	H	O	N	S	A	H <sub>2</sub> O	Total,kg	%
Combus.	0,866	0,123	0,001	0,001	0,008	0,0004	0,001	1,000	7,212
Aire			3,083	9,784				12,866	92,788
Total	0,866	0,123	3,084	9,785	0,008	0,0004	0,001	13,866	100,000
Salida									
CO <sub>2</sub>	0,866		2,307					3,173	22,89
SO <sub>2</sub>			0,008		0,008			0,016	0,11
H <sub>2</sub> O		0,123	0,488				0,001	0,612	4,41
O <sub>2</sub> libre			0,280					0,280	2,02
N <sub>2</sub>				9,784				9,784	70,56
A						0,0004		0,0004	0,00
Total	0,866	0,123	3,084	9,784	0,008	0,0004	0,001	13,865	100,00

### 3.3 Cálculo de la cantidad de combustible.

El consumo de combustible para procesar 100 kg de zeolita en un horno de tambor rotatorio se realiza mediante el balance energético del horno teniendo en cuenta los indicadores que consumen calor y los que aportan calor al proceso de la siguiente forma:

$$\text{Masa de comb} = \frac{(Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_{7.1} + Q_8 + Q_9)}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{7.2}}$$

Masa de comb= 4,22 kg

Luego de calculada la masa de combustible se realiza el balance energético del horno.

Tabla 3.4. Balance energético del horno

Entrada	kJ	%
Q <sub>1</sub> Calor aportado por la combustión del combustible	180733,992	97,827
Q <sub>2</sub> . Calor físico del combustible.	1131,014	0,612
Q <sub>3</sub> . Calor físico del aire de combustión	2883,108	1,561
Total	184748,114	
Salida		
Q <sub>4</sub> . Calor necesario para calentar, evaporar y sobrecalentar el agua del mineral.	13000,037	7,027
Q <sub>5</sub> . Calor necesario para transformar material.	86807,692	46,923
Q <sub>6</sub> . Calor físico del producto.	39570,581	21,389
Q <sub>7</sub> . Calor sensible de los gases salientes (gases tecnológicos y de combustión).	34031,840	18,395
Q <sub>8</sub> . Calor arrastrado por el polvo.	1669,064	0,902
Q <sub>9</sub> . Calor que se pierde al medio ambiente.	9923,000	5,364
total	185002,214	

La tabla 3.4 muestra el balance de los principales indicadores energéticos del horno donde se puede observar que la principal fuente de energía está dada por la combustión del combustible (180733,992 kJ) que representa el 97 % y los máximos

consumos se encuentran en los necesarios para activar la zeolita que representan el 47 % (86807,692 kJ), seguido del calor físico del producto final con un 21,4 % y el calor sensible de los gases salientes con 34031,840 kJ (18,4 %).

### 3.4 Análisis técnico económico y ambiental

En este acápite se desarrolla un análisis de los principales indicadores técnicos económicos y ambiental es de la producción de un cemento utilizando como material puzolánico la zeolita activada térmicamente (PZ-35) con respecto al cemento PP-35 ya comercializado actualmente en nuestro país.

#### 3.4.1 Análisis técnico

La producción del cemento PP-35 que se produce actualmente contiene 80 % de clínquer, 5 % de yeso y 15 % de zeolita natural y la variante que se propone PZ – 35 tiene una composición de 5 % de regulador de fraguado, 30 % de zeolita activada y 65 % de clínquer.

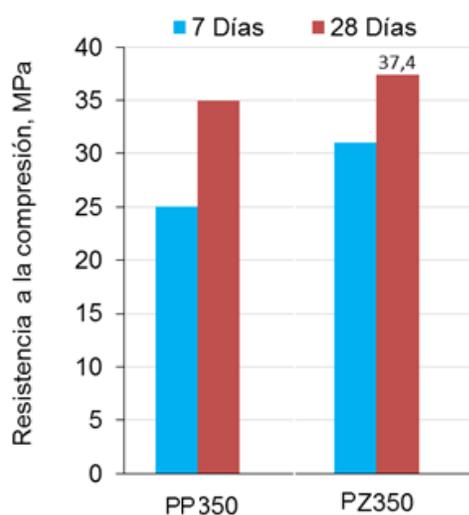


Figura 3.1. Resistencia a la compresión de los cementos PP-35 y Pz 35

Como se puede observar en los resultados de resistencia a la compresión mostrados en la figura 3.1 el cemento PZ-35 muestra mayor resistencia a la compresión a edades tempranas lo que influiría considerablemente en la producción de prefabricados que es un mercado que los cementos puzolánicos se encuentra limitado por la baja reactividad a edades tempranas. A edades de 28 días se

comporta similar al PP-35 con ligeramente mayores valores, esto indica que se pueden utilizar indistintamente estos dos cementos cuando la resistencia que se necesite sea a edades mayores.

### 3.4.2 Análisis económico

El análisis económico se realiza para la producción de una tonelada de cemento y teniendo en cuenta fundamentalmente el consumo de combustible en la producción del clínquer.

Tabla 3.5. Comparación económica de los cementos PP-35 y PZ-35

Indicadores	PP-35	PZ-35
Consumo de clínquer, kg	800	650
Consumo de combustible, kg	80	29,25
Costo por consumo de combustible, USD	14,24	5,21

Como se puede observar debido al mayor porcentaje de sustitución de clínquer por zeolitas activadas se reduce el consumo de clínquer en un 15 % lo que influye en el consumo de combustible en una reducción de alrededor de 50 kg de combustible por cada tonelada de cemento producida. Esta reducción teniendo en cuenta el precio del petcoke actual (178 USD/t), la producción se vería beneficiada en 9.03 USD por cada tonelada de cemento producida.

Si analizamos por ejemplo la fábrica de cemento de Siguaney que produce 500 toneladas de clínquer al día. Considerando que todo el clínquer se utiliza para producir el cemento PZ-35, la producción asciende a 769,23 t/d y traería consigo un ahorro de 6946.15 USD solo por el concepto de ahorro de combustible en la producción de clínquer.

### 3.4.3 Análisis Ambiental

La producción de este nuevo cemento (PZ-35) en comparación con el PP-350 acarrearía una disminución de un 15%, en el consumo de clínquer, que por ser el proceso clave del ciclo de producción implicaría significativos ahorros económicos, energéticos y ambientales. Fundamentados en que el costo de los aditivos es

sustancialmente inferior al costo del clínquer, se debe tener en cuenta que casi el 90% de la energía consumida en el sistema corresponde a la producción de clínquer; consecuentemente, los cementos que utilizan menores cantidades de clínquer consumen menos energía.

Las emisiones de SOX, NOX, CO<sub>2</sub> dependen de la cantidad de clínquer que tiene el cemento, es por ello que si se reduce la cantidad de clínquer se afectaría positivamente las categorías de impacto de mayor importancia (energías no renovables, respiración de sustancias inorgánicas y calentamiento global).

La disminución de un 15% en la cantidad clínquer del cemento PZ-35, habría significado en el año 2020 alrededor de 49.220,06 toneladas menos de CO<sub>2</sub>, 1,69 toneladas menos de NOX y 991,18 toneladas menos de SOX a la atmósfera, además de los correspondientes ahorros energéticos.

### **Conclusiones del capítulo**

- El material está compuesto fundamentalmente por silicio calcio y aluminio representando 25,67; 9,93 y 5,225 % respectivamente y en el tratamiento se extraen de la fase zeolítica alrededor del 10% como agua de constitución.
- La principal fuente de energía del horno está dada por la combustión del petcoke, representando el 97 % de los aportes de calor en el horno y el mayor consumo se encuentran en el calor necesario para transformar la zeolita en el producto activado consumiendo el 47 % del calor aportado.
- Para producir el material cementicio suplementario a partir de las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes activadas térmicamente se consumen 4.22 kg de petcoke por cada 100 kg de mineral lo que significa un ahorro con respecto a la producción de clínquer de 5,8 kg de combustible por cada 100 kg de clínquer.

## **CONCLUSIÓN**

La activación térmica de las zeolitas permite producir un cemento PZ-35 con porcentajes de sustitución de 30 % de clínquer, la activación térmica de las zeolitas en un horno de tambor rotatorio muestra un índice de consumo de combustible de 4,2 kg de petcoke por cada 100 kg de zeolita a procesar lo que representa una disminución de consumo con respecto a la producción de clínquer de 5,8 kg de combustible por cada 100 kg de clínquer producido y la producción del cemento PZ-35 representa un ahorro de 9,03 USD por cada tonelada de cemento producida.

## **RECOMENDACIÓN**

- Realizar el balance técnico económico y ambiental del proceso de producción del cemento en comparación con todos los cementos que se comercializan en Cuba hoy y teniendo en cuenta todos los indicadores que intervienen en el proceso de producción de cemento.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AITCIN, P. 2000. Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow.
2. Aite, L. (2010). "Hidratación del Cemento."
3. ALMENARES, R. 2011. Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como aditivo puzolánico. Carlos Alberto Leyva Rodríguez (Tutor). Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 78 p.
4. ALUJAS, A. 2010. Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente. Universidad Central de Las Villas. p. 10
5. AMBROISE, J., MAXIMILIEN, S., AND PERA, J. 1994. Properties of
6. Anónimo. (2009). CARMELO DAIDONE DIRECTOR DE FÁBRICA DE HOLCIM DE LORCA. La Verdad, p. 3, from <http://servicios.laverdad.es/extras/aridosyhormig06/suscr/nec14.htm>
7. ANÓNIMO. 2010. The home of International Cement Review. CemNet.com [Online]. Available: <http://www.cemnet.com/public/icr/archive.asp>
8. Autores, C. d. (1998). Diagnóstico Energético, Rama: Cemento. Situación Energética de la Industria, 84.
9. 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.

10. Becker, E. (2001). Cemento Pórtland Puzolánico- Características y Recomendaciones de Uso-Asesoría Técnica—, Publicación de LOMA NEGRA CIASA.
11. BENVINDO DA LUZ, A. 1995. Zeolitas: Propriedades e usos industriais. Série tecnologia mineral Nº 68. CETEM - CNPq Río de Janeiro. 35 p.
12. Betancourt Rodríguez, S. (2013). Puzolanas y cementos puzolánicos. UCLV.  
Betancourt, S. (2013). "Tecnología del Hormigón."
13. **BOLETIN. 2020. BOLETIN SAPIENCIA. 2020. Vol 1, No 1.**
14. BOSCH, P. Y SCHIFTER, I. 1997. La zeolita una piedra que hierve. Fondo de Cultura Económica de México. 73 p.
15. BRUSSELS, 1995. Determination of Strength, European Committee for standardization. EN 196-1, Methods of Testing Cement: Part 1.
16. 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.
17. Calleja, J. (1983). "Adiciones y cementos con adiciones."
18. CASTELLANOS, J. y SOCA, M. 2002. Zeolita, contribución al desarrollo sostenible. Curso internacional de zeolita y sus aplicaciones. Ecuador. 10 p.
19. Cement and Concrete Research, 30: p. 1349-1359.
20. Control Technologies.: Interlaken.
21. COSTA, U. y MASSAZZA, F. (1977). In fluence of thermal treatment on the activity of somenatural pozzolans with lime, Cemento 74 (3) 105–122.

22. 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.
23. 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. XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales, Oviedo. 20 p. 47
24. COSTAFREDA, J.L., CALVO, B. y ESTÉVEZ, E. 2007. Propiedades y aplicaciones de las rocas zeolitizadas de Cabo de Gata, Almería España. Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007. 18 p.
25. COSTAFREDA, M. J.L. 2008. Geología, Caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). Benjamín Calvo Pérez (Tutor). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 447 p.
26. Donatello, S., M. Tyrer and C. R. Cheeseman (2010). "Comparision of test methods to assess activity." Cement and Concrete Composites.
27. FEBLES, J., ESCOBAR, L. y CARREAU, J. 2007. Empleo de la zeolita natural en el tratamiento de residuales orgánicos. Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007. 8 p.
28. Francisco (2013a). "Cemento portland. Generalidades.": 2-6.
29. 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.
30. FUENTES, E. y MARTÍNEZ, M. 2007. Fabricación de morteros industriales para la construcción. Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007. pp.1-10.

31. GIANNETTO, G., MONTES, A. y RODRÍGUEZ-FUENTES, G. 2000. Zeolitas, Características, propiedades y aplicaciones industriales. Edit. Innovación Tecnológica. Caracas. 351 p.
32. GOTTARDI , G. y G ALLI , E. 1985. Natural Zeolites. Springer Verlag- Berlin-Heidelberg-New York- Tokyo, 409 p.
33. Guadalupe Reyes Echavarría, S. (2009). "Manufactura del cemento pórtland."
34. HENDRIKS, C.A., et al. 1998. Emission reduction of greenhouse gases from
35. JORDÁN, R., RODRÍGUEZ-FUENTES, G. y RODRÍGUEZ, Y. 2007. Aportes de la zeolita (clinoptilolita-heulandita) del yacimiento "Tasajeras" a la química de los vidrios sódico-cálcicos. Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007. 10 p.
36. JUSTO, A. E. 2012. Evaluación preliminar de materiales cementantes suplementarios como aditivos al cemento para su empleo en apoyo a la construcción de viviendas de bajo costo en la Región de Sagua de Tánamo. Roger Samuel Almenares reyes (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.69 p.48.
37. MARTIRENA, F. 2009. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínquer de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
38. MARTIRENA, J.F. 2003. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínquer de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. Tesis en opción del grado de Doctor en Ciencias, in Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones., Universidad Central de Las Villas: Santa Clara.
39. **MENESE. 2019.** *Evaluación de fuentes de carbonato de calcio de la región nordeste de Holguín para la producción de aglomerantes ternarios TAC en Moa.* Moa,Holguin : s.n., 2019.

40. Metakaolin blended cements. *Advanced Cement Based Materials*, 1(4): p. 161- 168.
41. MORANTE, F. 2004. Las zeolitas de la costa de Ecuador: geología, caracterización y aplicaciones. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 307 p.
42. NEMECZ , E. 1981. *Clay Minerals*. Academia Kiadó, Budapest. 547 p.
43. Orcasitas, M. Z. (2015). "Empleo de aditivos en la fabricación de materiales."
44. OROZCO , G. 1996. Caracterización geólogo-mineralógica del yacimiento de tobas zeolitizadas Caimanes, Moa, Holguín. *Minería y Geología*, 13 (3): 27-35.
45. PERRAKI,TH.; KAKALI,G. y KONTOLEON,F. 2003. The effect of natural zeolites on the early hydration of portland cement, *Microporous and Mesoporous Materials* 61 205 –212.
46. POON,C.S.; LAM,L.; KOU, S.C. y LIN,Z.S.A 1999. Study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes, *Construction and Building Materials* 13 427–432.
47. Portland, A. D. F. D. C. (2010). "La industria del cemento y la sostenibilidad." Asociación de fabricantes de cemento portland: 13-20.
48. RABILERO, A. 1988. *Las Puzolanas. Cinética de las reacciones.*, Stgo de Cuba, Cuba: Editorial Oriente.
49. Ramachandran, V.S., 2002. *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. First ed. Construction Materials Science and Technology Series.
50. RODRÍGUEZ. I., RODRÍGUEZ .F. G. y BENÍTEZ .A. G. 2000. The Role of carbonate ions in the ion-exchange  $\text{Ni}^{2+} = 2\text{NH}_4^+$  in natural clinoptilolite. *Microporous and Mesoporous Material* 41:129-136.

51. ROSELL, M. 2007. Influencia del tamaño de partícula de zeolita en su actividad puzolánica. Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007. pp.1-9.
52. 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.
53. ROSELL, M., R. GAYOSO, AND B. CALVO. 2006. Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones. Boletín Geológico Minero, 117(4): p. 783-792.
54. 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.
55. SERSALE, R. y FRIGIONE. G. 1985. Natural zeolites as constituents of blended cements, La Chimica e l'industria 67 (4) 177 –180.
56. SHI,C. y DAY,R.L. 2001. Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans, Cement and Concrete Research 31 813 – 818.
57. Silva, O. J. (2017). "¿Cómo se produce el proceso de hidratación del cemento?".
58. 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.
59. Soria, F. (1972). "Estudio de materiales IV-Conglomerados Hidráulicos."
60. TAYLOR , H.F.W., 1990. Cement Chemistry., London: Academic Press: London, U.K. 491.

61. the cement industry, in Fourth International Conference on Greenhouse Gas
62. TÜRKMENOĞLU, A. G. y TANKUT, A. (2002) Use tuffs from central Turkey as admixture in pozzolanic cements. Assessment of their petrographical properties, Cement and Concrete Research 32 629–637.
63. UCLM (2008). "Cementos (rc-08)."
64. UNE (2000). Cementos Comunes: Definiciones, Denominaciones, Designaciones,
65. Composición, Clasificación y Especificaciones de los mismos. , UNE. 20-2, N. I. (2010).
66. "Ensayos al Hormigón-Parte 2: Propiedades del Hormigón Fresco."
67. VELÁZQUEZ, M., RODRÍGUEZ, T. y ALONSO, J. A. 2007. Aplicaciones de los productos adsorbentes especiales a partir de las zeolitas naturales en la protección del medio ambiente. Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007. pp. 1-9.
68. WORRELL, E. 2009. Energy Efficiency. 2 (109).