

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Construcciones

**Departamento de Ingeniería Civil**

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Título : Evaluación de los tipos tecnológicos de arcillas del yacimiento  
Yaguajay, para la producción de cemento de bajo carbono LC3.**

**Autor : Daniel Herrera del Sol**

**Tutores : Dr. C. Adrián Alujas Díaz**

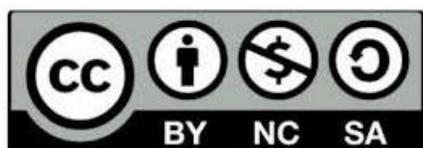
**Ing. Luis Alberto Pérez García**

Santa Clara Junio 2018  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

# PENSAMIENTO

“El genio comienza las obras grandes, pero sólo el trabajo las termina”.

Joubert

# DEDICATORIA

“A todas las personas que quisieron mi bien e hicieron realidad el sueño de convertirme en Ingeniero Civil, sin ustedes no hubiese podido conseguirlo...”.

# AGRADECIMIENTOS

Agradecer se hace muy difícil cuando hay tanta gente involucrada en la realización de este trabajo...

A mi Mamá Damaris, por ser “todo en mi vida” y cargar con mis triunfos y derrotas.

A mi Papadrastro Lester y Hermanito David, por todo el apoyo y cariño que me dan con sus acciones.

A mi Novia Laura, por los malos ratos que le hice pasar, por siempre estar ahí en todos los momentos y demostrarme que existe el amor verdadero...

A la familia de mi Novia, por acogermé como uno más de ellos, en especial a mis suegros Juliet, Rafe y Yosvani.

A mi Tía Ismary, Tío Yoelxis, Abuela Sonia, Papá Albertico, Primo Josué, Sobrinita Shyglá, Hermanas Yosleidys y Danita, a Edel y Marisol, por demostrarme que la distancia no corta los lazos de familia y amor.

A mi familia materna por estar cerca de mí, en especial a mi primo Sergio, una de las personas en quien más confío y quiero.

A mis compañeros de cuarto Nisbel, Dasizl, Jürgen, Mario, Raúl y Yadian; por las noches sin dormir, por los difíciles proyectos juntos, por los momentos de enfermedad... por su amistad.

A los “astros” por los momentos compartidos, en especial al Kmi por las cosas que me enseñó e hizo por todos...

A mis amistades y hermanos del IPVCE por seguir  
unidos a pesar de separarse nuestros caminos.

A Giselle por estar ahí para orientarnos siempre.

A mis tutores Luis Alberto y Adrián por enseñarme  
geología y química respectivamente, por ensuciarse junto  
conmigo en el muestrero, por salvar las distancias con respeto y  
sabiduría.

A Arcial por su inmensa sabiduría y apoyo en los  
trabajos en el yacimiento y molienda.

A los trabajadores del laboratorio de Siguanay: Jorgito,  
Lianet, Ligitsi, Maria Luisa, Gladis, Carmen, Gilbert, Maurén por  
todos los momentos que compartimos, por su ayuda con los  
ensayos y apoyo en todo lo que necesité.

A los trabajadores del laboratorio de la facultad Felipe  
y Joel por su ayuda en la realización de los ensayos de  
resistencia.

A las tías del merendero, por complacerme siempre.

A David, Adrián y su papá, por todo el cariño y los  
consejos, por tratarnos como familia...

A mis compañeros de año por la unión del grupo  
durante estos 5 años...

A todos los profesores de la universidad y los de toda  
mi vida como estudiante, en especial a mis maestras de primaria  
y secundaria: Annia, Yarita, Yoleiky y Arianna.

A todos los que se me quedaron por mencionar y que  
dedicaron parte de su tiempo para que este trabajo de diploma  
fuese un éxito.

## RESUMEN

El trabajo presentado aborda el estudio de los tipos tecnológicos que conforman las arcillas del yacimiento Yaguajay, para su explotación como material cementicio suplementario. Para ello se realiza una caracterización química - mineralógica de cada tipo tecnológico, mediante los ensayos de Difracción de Rayos X (DRX), análisis químico de los pozos involucrados en el muestreo y el análisis termo – gravimétrico de una serie de muestras representativas de cada tipo de arcilla extraída del yacimiento. Se determinaron los porcentajes de las diferentes fases minerales presentes en las muestras analizadas; así como la paragénesis mineral general constituida por: caolinita y nacrita como representantes del grupo de la caolinita, y cuarzo, hematita, calcita, birnessita, anatasa y goethita como fases acompañantes. Por otro lado, se hizo una valoración de la influencia de la temperatura de calcinación y la composición mineralógica de los tipos arcillosos como factores determinantes de la reactividad puzolánica de cada compuesto y la resistencia a compresión de morteros con sustitución del 30 % de CPO, por material arcilloso calcinado a temperaturas de 750, 800 y 850 °C. Para ello se realizaron ensayos de calorimetría isotérmica (protocolo R<sup>3</sup>) y resistencia a compresión mecánica a diferentes edades, revelando los 800 °C como temperatura óptima de calcinación, siendo el compuesto B el de mayor reactividad puzolánica debido a la presencia de calcita en el mismo y el compuesto A calcinado a 800 °C como el de mayor resistencia a la compresión.

**Palabras claves:** arcillas calcinadas, calcita, caolinita, reactividad puzolánica, resistencia a la compresión

## **ABSTRACT**

The presented work approaches the study of the technological types that make up the clays of the Yaguajay deposit, for its exploitation as supplementary cement material. To do this, a chemical - mineralogical characterization of each technological type is carried out, by X - ray Diffraction (XRD) tests, chemical analysis of the wells involved in the sampling and thermo - gravimetric analysis of a series of representative samples of each type of clay extracted from the deposit. The percentages of the different mineral phases present in the samples analyzed were determined; as well as the general mineral paragenesis constituted by: kaolinite and nacrite as representatives of the kaolinite group, and quartz, hematite, calcite, birnessite, anatase and goethite as accompanying phases. On the other hand, an assessment was made of the influence of the calcination temperature and the mineralogical composition of clay types as determinants of the pozzolanic reactivity of each composite and the compressive strength of mortars with 30% substitution of CPO, for Calcined clay material at temperatures of 750, 800 and 850 °C. For this, isothermal calorimetry tests (protocol R3) and resistance to mechanical compression at different ages were carried out, revealing the 800 °C as the optimum calcination temperature, the B composite being the one with the highest pozzolanic reactivity due to the presence of calcite in it, and Compound A calcined at 800 ° C as the one with the highest compressive strength.

**Keys words:** calcined clay, calcite, kaolinite, pozzolanic reactivity, compressive strength

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.....</b>	<b>14</b>
1.1 Introducción.....	14
1.2 Generalidades en la producción de CPO.....	14
1.2.1 Proceso de producción de CPO .....	15
1.2.2 Producción de CPO en Cuba .....	18
1.2.3 Estrategias para disminuir las afectaciones al medio ambiente de la producción de cemento.....	21
1.3 Los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) .....	23
1.3.1 Reacciones puzolánicas .....	25
1.3.2 Empleo de MCS en Cuba .....	26
1.4 Arcillas: clasificación, características y origen.....	28
1.4.1 Las arcillas calcinadas como MCS .....	30
1.4.2 Activación térmica .....	32
1.4.3 Reacción puzolánica.....	34
1.4.4 Métodos para determinar de reactividad puzolánica .....	36
1.5 Perspectivas del empleo de las arcillas calcinadas como MCS en Cuba .....	38
1.6 Conclusiones parciales del capítulo.....	40
<b>CAPÍTULO II: MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....</b>	<b>41</b>
2.1 Introducción.....	41
2.2 Características del área de estudio.....	41
2.2.1 Ubicación geográfica.....	41
2.2.2 Geología del área de estudio.....	42
2.3 Trabajos de campo y muestreos.....	45
2.4 Preparación de las muestras y realización de los ensayos.....	48
2.4.1 Análisis termo – gravimétrico (ATG).....	48

2.4.2 Difracción de Rayos X (DRX) .....	49
2.4.3 Calorimetría isotérmica.....	49
2.4.4 Ensayos de resistencia a la compresión.....	51
2.5 Conclusiones parciales del capítulo. ....	52
<b>CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
3.1 Introducción.....	53
3.2 Influencia de la génesis geológica del Yacimiento Yaguajay sobre la composición mineralógica.....	53
3.3 Caracterización química y mineralógica de las arcillas del yacimiento Yaguajay. ....	54
3.3.1 Resultados de la difracción de Rayos X. ....	54
3.3.2 Caracterización química .....	56
3.3.3 Resultados de análisis termo-gravimétrico (TGA). ....	57
3.4 Evaluación de la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la reactividad puzolánica en los productos de calcinación.....	59
3.5 Evaluación de la resistencia a la compresión de los morteros elaborados con productos de calcinación de las arcillas del yacimiento Yaguajay. ....	61
3.5.1 Resultados de la resistencia a compresión a los 3 días. ....	61
3.5.2 Resultados de la resistencia a compresión a los 7 días. ....	62
3.5.3 Resultados de la resistencia a compresión a los 28 días. ....	62
3.6 Conclusiones parciales del capítulo.....	63
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>70</b>

## INTRODUCCIÓN

El cemento Portland se encuentra entre los materiales más empleados y con mayor nivel de producción a escala mundial, es uno de los principales contribuidores al desarrollo de la humanidad y es considerado como el material más usado en la industria de la construcción. Sin embargo, los procesos de su fabricación demandan altas cantidades de energía, y consecuentemente grandes volúmenes de emisiones de gases de efecto invernadero, factor que influye negativamente en sus costos y sostenibilidad ambiental. Desde el punto de vista técnico-económico la solución de mayor potencial a mediano y corto plazo para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> es incrementar los niveles de sustitución parcial de clínquer por materiales cementicios suplementarios (MCS), dado que aproximadamente el 60 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de producción del cemento Portland ordinario, están asociadas a la descomposición de la caliza durante la obtención del clínquer. (MARTÍNEZ, 2014).

El empleo de adiciones minerales con carácter puzolánico, o puzolana ha sido hasta el momento la solución empleada por los productores de cemento, lo que incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad en los hormigones (Martirena, 2004). A su vez, la utilización de materiales cementicios suplementarios, favorece la disminución en el empleo de energías no renovables y contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por cantidad de aglomerante (Habert, Billard, Rossi, Chen, & Roussel, 2010).

El desarrollo y aplicación de los materiales puzolánicos en la fabricación de CPO ha sido hasta ahora una estrategia desarrollada sobre todo a partir de las características propias de los países industrializados. Sin embargo, el consumo del aglomerante, en los últimos años, se ha desplazado hacia las naciones menos industrializadas. Esto implica el desarrollo de tecnologías y estrategias que permitan la obtención y empleo de materiales puzolánicos bajo las condiciones propias de los países en vías de desarrollo (Alujas, 2010). Las cenizas volantes, las escorias de altos hornos y el humo de sílice se encuentran dentro de las puzolanas de más amplia utilización, pero todos estos materiales derivan de procesos y tecnologías industriales no siempre disponibles. Por tales motivos existe un creciente interés en la búsqueda y desarrollo de nuevas como fuentes de materiales puzolánicos. Entre la amplia variedad de materiales que pueden ser empleados como adiciones puzolánicas, existe creciente interés en el empleo de las arcillas activadas térmicamente, por su amplia

disponibilidad al estar ampliamente diseminados por toda la corteza terrestre, relativa facilidad de tratamiento al ser activadas mediante procesos térmicos que requieren mucho menos energía que la demandada por la elaboración del clínquer y demostradas propiedades puzolánicas una vez calcinadas bajo condiciones específicas (Murray, 2000) (Souza & Dal Molin, 2005).

Durante varios años el Centro de Investigaciones y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas ha desarrollado valiosas investigaciones, donde se han obtenido resultados muy satisfactorios, ya que se ha desarrollado un producto, consistente en un tipo de cemento mezclado a partir de la combinación de clínquer, caliza y arcilla calcinada (cemento de bajo carbono), que se basa en el mismo principio de De Weerd, aprovechando la reacción sinérgica entre la alúmina presente en el metacaolín y el carbonato de calcio contenido en la caliza (Estopiñales, 2016).

En el año 2015 se realizó un estudio del yacimiento arcilloso de Yaguajay debido a que este se encuentra a 60 km de la planta Cementos de Siguaney y posee una reserva hipotética de 11 millones de toneladas, pero solo se muestreó el compuesto YG2. El cual expuso como resultado que esta arcilla posee una mejor reactividad a una menor temperatura, debido a los contenidos de calcita que posee. Pero todo ello no es suficiente, ya que son pocas las investigaciones referentes las características químicas y mineralógicas de dicha arcilla, por lo que es necesario continuar con el estudio detallado de todo el yacimiento, que exponga realmente sus potencialidades en la producción de cemento de bajo carbono. Por lo cual es necesario un muestreo que permita realizar una mejor caracterización al analizar más a fondo el yacimiento.

Valorando, la disponibilidad de estas materias primas arcillosas y la posibilidad de utilizarlas activadas térmicamente como materiales cementicios suplementarios, se formula el siguiente **problema científico de la investigación**: ¿Cómo se relacionan las características geológicas, químicas y mineralógicas del yacimiento arcilloso Yaguajay y su utilización potencial como fuente de puzolanas?

El **objeto de estudio** del presente trabajo son los tipos tecnológicos de arcilla del yacimiento Yaguajay.

**Campo de acción:** Propiedades mineralógicas y químicas de las fases arcillosas del yacimiento Yaguajay.

**Objetivo General:** Evaluación de las características geológicas, químicas y mineralógicas de los tipos tecnológicos de la arcilla del yacimiento Yaguajay para la producción de cemento de bajo carbono (LC3).

**Objetivos específicos:**

1. Sistematizar el conocimiento sobre el empleo de arcillas calcinadas como materiales cementicios suplementarios en la fabricación de cementos de bajo carbono.
2. Caracterizar química y mineralógicamente los tipos tecnológicos de arcilla del yacimiento Yaguajay.
3. Evaluar la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la reactividad puzolánica producto de la calcinación de los diferentes tipos tecnológicos de arcilla del yacimiento Yaguajay.
4. Evaluar la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la resistencia a la compresión de los morteros confeccionados con productos de calcinación de las arcillas del yacimiento Yaguajay.

**Hipótesis:** Si se evalúa la influencia de las características geológicas, mineralógicas y química de los tipos tecnológicos del Yacimiento Yaguajay, se podrán determinar su posible utilización como materia prima para la fabricación de cemento de bajo carbono.

**Tareas de la Investigación:**

- Búsqueda y revisión de la literatura científica referente a los materiales arcillosos y la actividad puzolánica de arcillas calcinadas a usar como MCS.
- Toma de muestras en yacimiento arcilloso Yaguajay.
- Calcinación y molienda de los tipos tecnológicos.
- Caracterización del comportamiento térmico y la reactividad puzolánica de las muestras de arcilla.
- Evaluación de reactividad (protocolo R3) de los tipos tecnológicos

**Novedad científica:** Con la presente investigación se pretende demostrar que los diferentes tipos tecnológicos de arcillas calcinadas del depósito arcilloso Yaguajay pueden ser utilizadas para la producción de cemento de bajo carbono con el fin de disminuir los grandes volúmenes de clínquer en la producción de cemento.

**Aporte científico-técnico:** Determinación de la influencia de la temperatura de calcinación de las arcillas del yacimiento de Yaguajay, Sancti Spíritus para materiales puzolánicos para ser utilizados en la producción de cemento de bajo carbono.

**Aporte medio-ambiental:** Con la utilización de arcillas como materiales cementicios suplementarios se reduce las cantidades de clínquer a utilizar en la producción de cemento Portland por lo tanto disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

**Aportes prácticos:** El estudio realizado permite elevar el grado de conocimiento sobre los yacimientos arcillosos en nuestro país. La evaluación de arcillas caoliníticas en el yacimiento de Yaguajay muestra la potencialidad de ser explotado a escala industrial para la producción de puzolanas.

Con el presente trabajo se persigue lograr un grado de conocimiento científico que permita definir las proporciones óptimas en que pueden ser mezclados en el futuro los diferentes tipos tecnológicos del yacimiento en cuestión, partiendo de la caracterización mineralógica, química y térmica.

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

## **1.1 Introducción**

Es intención del presente capítulo realizar una definición panorámica de la producción de uno de los materiales más empleados en la construcción, el CPO, y lo que las arcillas calcinadas como Materiales Cementicios Suplementarios (MSC) puedan aportar a dicho material para favorecer al desarrollo y factibilidad tanto económica, estructural y ambiental de los procesos constructivos.

## **1.2 Generalidades en la producción de CPO.**

El (CPO), resultado innegable del desarrollo histórico de la humanidad, es hoy día uno de los materiales más empleados en la vida moderna. Su uso universal en prácticamente todos los trabajos de la construcción, su costo relativamente bajo, la posibilidad de su 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, que han quedado relegados a aplicaciones menores en trabajos de albañilería. Se le reconoce hoy en día como uno de los elementos que más ha contribuido al desarrollo de la humanidad, e incluso se asocia con el nivel de desarrollo de un país (Aïtcin, 2000; Hendriks, Worrell, De Jager, Blok, & Riemer, 1998; John, 2003)

Este es el principal constituyente del hormigón, sustancia más consumida a nivel mundial después del agua. Todo ello se debe a que la sociedad requiere una infraestructura que se encuentre a la altura de las necesidades debido al aumento de la población mundial y el desarrollo de las llamadas economías emergentes. Aunque se le reconoce por haber sido uno de los elementos que más ha contribuido al desarrollo de la humanidad y hoy se le asocia con el nivel de desarrollo de un país, su proceso productivo se basa en la explotación de recursos no renovables (materias primas y combustibles) lo cual lo convierten en uno de los principales responsables de la degradación del medio ambiente del planeta (Aïtcin, 2000; Hendriks et al., 1998; John, 2003), al punto de que llegase a ser el responsable de aproximadamente el 7% de emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera (MACPHEE D. E., 2010).

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

El proceso de obtención del cemento Portland se encuentra montado sobre la base de la explotación intensiva de recursos no renovables (materias primas y combustibles), y se emiten a través del mismo significativos volúmenes de gases de efecto invernadero, sobre todo en los procesos asociados a la producción de clínquer, el principal componente del CPO (Martirena, 2004). Para solucionar los problemas medioambientales asociados a la producción de CPO la industria del cemento ha definido como medidas fundamentales mejorar la eficiencia energética, el uso de desechos como combustibles fósiles y la reducción de la relación clínquer / cemento en el aglomerante (R Castillo, 2010).

El proceso de producción de cemento demanda grandes cantidades de energía, básicamente en la combustión de las materias primas en el horno y en la molienda, para reducir hasta polvo el clínquer. Aunque el requerimiento mínimo teórico de energía del proceso es de  $1.75 \pm 0.1$  MJ por Kg. de cemento producido (Hendriks et al., 1998), se estima que la producción de 1 Kg. de clínquer requiere, de forma efectiva, entre 3.2 y 6 MJ de energía térmica, en dependencia del tipo de proceso utilizado.

La reducción de los consumos de clínquer para la producción de diversos y nuevos tipos de cemento, se ha convertido en la temática de mayor interés por parte de productores e investigadores (R. Castillo, 2010). Sobre la base de esto se desarrolla intensamente las investigaciones de nuevas formulaciones de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer, buscando al mismo tiempo mantener o mejorar las prestaciones físico-mecánicas y la durabilidad (Schneider, Romer, Tschudin, & Bolio, 2011).

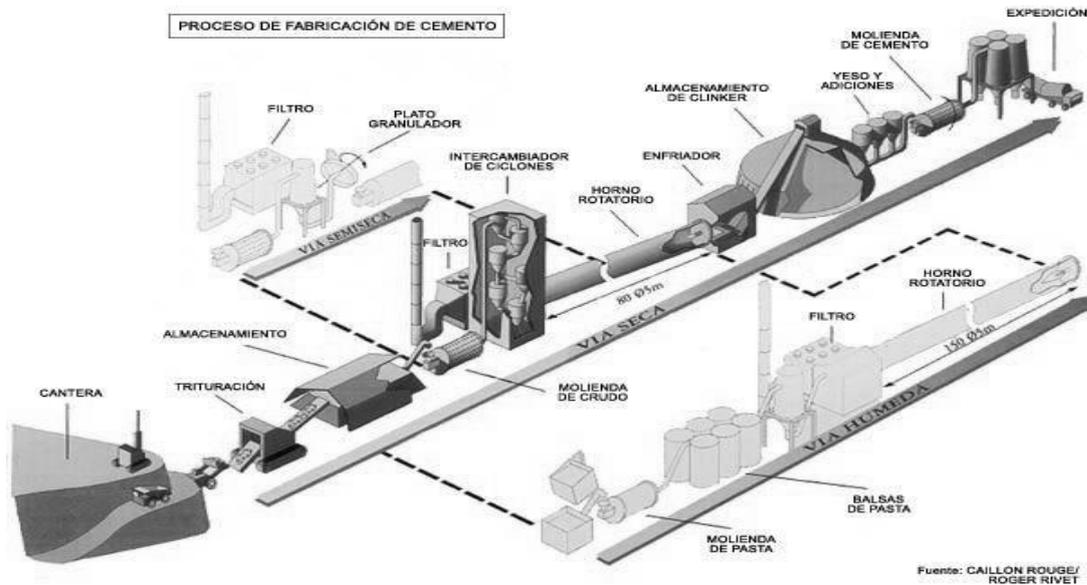
## **1.2.1 Proceso de producción de CPO**

El proceso de producción del cemento está compuesto de 4 etapas principales:

1. Extracción, preparación y molienda de las materias primas
2. Dosificación y homogeneizado de la mezcla cruda

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

3. Cocción (obtención del clínquer)
4. Molienda del clínquer (obtención del cemento)



**Figura 1.1:** Proceso de fabricación del cemento Portland (Betancourt, 2012).

Inicialmente todo el proceso comienza con la extracción de las materias primas en la cantera, donde los minerales contienen óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de hierro, etc. Posteriormente son transportadas a la planta donde son trituradas hasta 25 cm, seguido de una verificación de su composición química. A continuación, se realiza una segunda trituración hasta 2 mm aproximadamente, se analizan sus propiedades y se pre homogeneiza la muestra.

Luego del procesamiento de las materias primas en función de sus características y del método de producción empleado (seco, semi-seco, húmedo), las mismas se someten a la cocción en un horno. La calcinación de la mezcla cruda obtenida tanto por vía seca como por la húmeda, se realiza generalmente en hornos giratorios. Los hornos verticales se usan a veces sólo para el procedimiento seco. Los grandes hornos giratorios, de 150 – 250 m de longitud, se instalan con una cierta pendiente para posibilitar que el material vaya penetrando dentro del mismo, obligado además por su rotación, con una velocidad entre uno y dos revoluciones por minuto (Betancourt, 2012)

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

En los hornos giratorios, la mezcla de materias primas se suministra por la parte superior, que es la más fría, mientras que en la parte inferior se ubican los quemadores que pueden funcionar con distintos tipos de combustible, según el tipo (petróleo, carbón, petcoke, gas, etc.). Dichos quemadores producen una llama en forma de dardo con una longitud entre 15-30 m. La materia prima cruda, la cual se suministra en forma de polvo o de un lodo plástico (procedimiento seco y húmedo respectivamente), va sufriendo distintos procesos según se eleva la temperatura al transitar por las distintas secciones del horno.

Dentro del horno existen seis etapas:

1. La desecación hasta los 200 °C es donde las materias primas pierden la humedad.
2. El calentamiento de los 200 hasta los 700 °C provoca la quema de impurezas orgánicas.
3. La calcinación de los 700 hasta los 1100 °C los carbonatos se disocian y los minerales arcillosos se descomponen.
4. La formación de aluminatos y ferritos ocurre de los 1100 hasta los 1250 °C.
5. La formación del clínquer ocurre de los 1250 hasta los 1450 °C, a esta temperatura el silicato dicálcico (belita) y la cal reaccionan formando el silicato tricálcico (alita), el cual constituye el principal componente del clínquer.
6. El proceso de enfriamiento ocurre en dos etapas, primero antes de salir del horno (1300 hasta 1000 °C) se forma por completo la estructura del clínquer, donde la alita y la belita son sus minerales fundamentales.; y la segunda etapa al salir del horno (1000 hasta 200 °C) posterior a esto se enfría y se almacena durante 2 semanas aproximadamente.

Todo este proceso culmina con una molienda conjunta del clínquer, yeso y adiciones en equipos mecánicos que someten dicha mezcla a impactos metálicos o fuerzas de compresión elevadas, ya sea por prensas de rodillos, molinos verticales de rodillos, molinos de bolas o molinos horizontales de rodillos.

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

Luego de la molturación ya se obtiene el producto final, “el cemento”, el cual se despacha para su comercialización y uso, ya sea a granel, en sacos o en big bags (Betancourt, 2012)

Durante la elaboración del cemento, es la producción de clínquer la responsable de ser la de mayor consumo de energía y a su vez la de mayores emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera. Ello ha llevado a disminuir el contenido de clínquer a partir del empleo de materiales puzolánicos, cuya demanda se ha incrementado desde principios de la década de los 80, y se prevé que en un futuro cercano se incremente más aún.

## **1.2.2 Producción de CPO en Cuba**

La industria del cemento en Cuba comenzó a finales del siglo XIX cuando se inauguró en La Habana la primera fábrica de cemento gris tipo Portland de Iberoamérica, el 7 de julio de 1895. Esta planta tenía una capacidad de 20 t/día o sea 6 mil t/año (por vía seca), lo cual bastaba para abastecer la demanda nacional, se comercializaba con la marca “Cuba” (Batista, 2007). A principios del siglo XX comienza su producción la segunda fábrica de cemento en las cercanías del río Almendares, con una capacidad de unas 60 000 ton por año. Las producciones se realizaban con tecnologías aún muy rústicas y muy poco productivas, pero que podían abastecer la demanda nacional. Tras el triunfo de la Revolución el país invirtió 465 millones de pesos en la industria del cemento lo que multiplicó la capacidad de producción instalada en 5 veces más a la existente hasta 1959. (Martirena, 2004).

A partir de la década de 1980 se comenzaron a utilizar las puzolanas como sustitutas parciales del clínquer del CPO en Cuba. Todo ello fue posible ya que en Cuba existen numerosos yacimientos de rocas zeolitizadas y de vidrio volcánico diseminado en todo el territorio nacional los cuales generalmente muestran una elevada actividad puzolánica. Dichas puzolanas fueron utilizadas como adiciones para producir diferentes tipos de CPO, las cuales se conocen como PP-350, PP-250 y CA-160 (Rabilero, 1993).

En la década de 1990 con la caída del campo Socialista nuestro país tuvo que centrarse en alternativas más económicas que la producción de cemento en grandes

## CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

plantas. En este momento es que surge el llamado "Cemento Romano" el cual comenzó a producirse en Santiago de Cuba. Desde 1996 comenzó un período de recuperación para la industria del cemento Portland en Cuba debido al incremento de las inversiones nacionales en zonas estratégicas como el turismo y a la inserción de Cuba en el mercado caribeño.

La Figura 1.2 muestra cómo ha evolucionado la producción de cemento en Cuba entre 2002 y 2012 (ONEI, 2012).

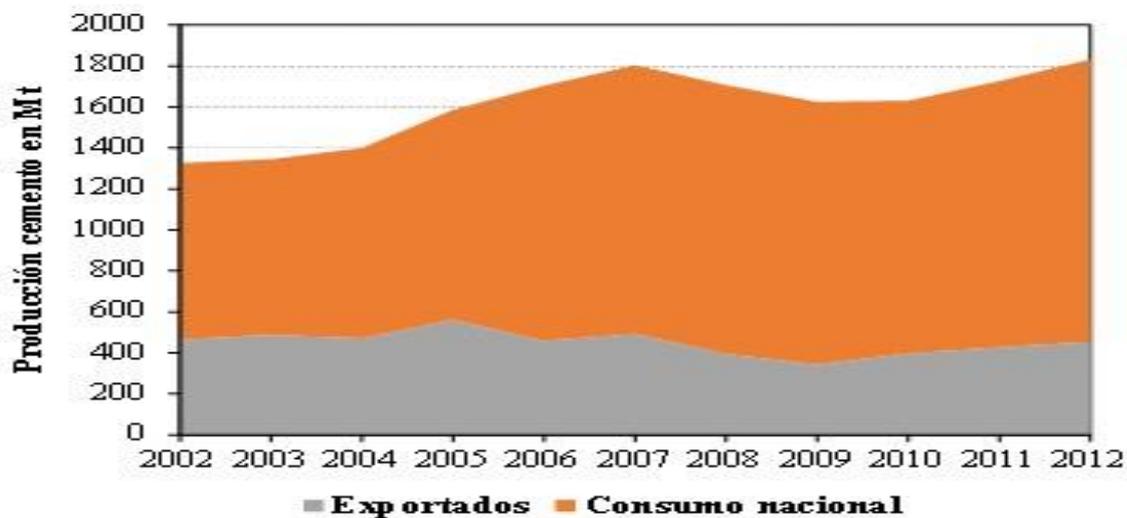
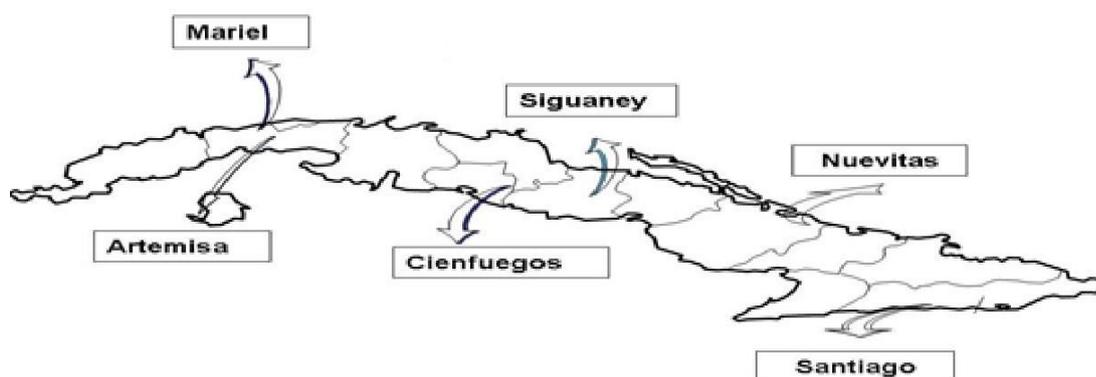


Figura 1.2: Producción de cemento en Cuba entre 2002 y 2012 (ONEI, 2012)

Actualmente Cuba cuenta con 6 fábricas, con una capacidad disponible para producir **Cemento Gris** de 3,564 millones de toneladas anuales y **Cemento Blanco** de 0,08 millones de toneladas anuales, algunas por vía seca y otras por vía húmeda (GALLO, 2010). Estas fábricas están ubicadas en El Mariel y Artemisa provincia Artemisa, Guaos en Cienfuegos, Siguaney en Sancti Spíritus, Nuevitas en Camagüey y en Santiago de Cuba como se puede apreciar a continuación en la Figura 1.3.

## CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.



**Figura 1.3:** Distribución de las fábricas de cemento en Cuba (Siverio Fernández, 2016)

La Tabla 1.1 nos muestra las fábricas de cemento en operación en Cuba, sus tipos de procesos tecnológicos de producción y su producción en el año 2012 (Anuario Estadístico GECEM).

**Tabla 1.1:** Procesos tecnológicos de producción y producción de cemento de cada una de las fábricas en Cuba (GECEM, 2012)

Fábrica	Ubicación	Tipo de Proceso	Líneas de producción	Producción de cemento 2012 (Mt)	% respecto a la producción anual
<b>Mártires de Artemisa</b>	Artemisa	Vía húmeda	1 Gris	196.1	10.7
<b>René Arcay</b>	Mariel, Artemisa	Vía seca	2 Gris	624.2	34.2
<b>Karl Marx</b>	Guabairo, Cienfuegos	Vía seca	2 Gris	675.9	37.0
<b>Siguaney</b>	Siguaney, Sancti Spíritus	Vía húmeda	2 Gris 1 Blanco	128.4	7.0
<b>26 de Julio</b>	Nuevitas, Camagüey	Vía húmeda	2 Gris	104.5	5.7
<b>José Merceron</b>	Santiago de Cuba	Vía húmeda	1 Gris	95.6	5.2
<b>Total</b>				1824.7	100 %

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

## **1.2.3 Estrategias para disminuir las afectaciones al medio ambiente de la producción de cemento.**

En la elaboración del cemento Portland, la producción de clínquer representa el mayor consumo de energía y es responsable también de los mayores volúmenes de emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que 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). Se estima que por cada tonelada de cemento producida se emite entre 0.65 – 0.90 toneladas de CO<sub>2</sub> (Habert et al., 2010), lo que llevado a los datos de producción anual, sitúan a la industria del cemento como responsable de la emisión de entre 5 – 8 % del CO<sub>2</sub> a escala global (CSI, 2010)

Según la *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* para el 2050 habrá un incremento de la producción que alcanzará los 4400 millones de toneladas de cemento y otros pronósticos sitúan la demanda por encima de los 5000 millones. Este incremento elevará a su vez los niveles de emisiones de CO<sub>2</sub>, si se mantienen las condiciones de producción actuales (Vizcaíno, 2014). Debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> y las grandes cantidades de energía que demanda la fabricación de cemento que influyen significativamente en sus costos de producción y sostenibilidad ambiental se hace necesario poner en práctica estrategias que contribuyan al crecimiento de su producción de manera sustentable. Entre estas se encuentra la mejora en la eficiencia de los procesos, el uso de fuentes alternativas de combustibles y la reducción del factor de clínquer (R. Castillo, 2010).

Como se mencionó anteriormente una de las nuevas estrategias que se vienen desarrollando es la mejora en la eficiencia de los procesos de producción de cemento. Con la transición tecnológica del proceso húmedo al semi-húmedo, semi-seco o seco, se puede lograr una reducción considerable en los consumos energéticos requeridos durante la combustión de las materias primas. Se estima que los procesos húmedos consumen como promedio entre 5.3 – 7.1 GJ/t de clínquer y el proceso seco consume entre 3.2 – 3.5 GJ/t de clínquer. En el proceso de molienda también se han evidenciado algunas innovaciones como son el desarrollo e implementación de nuevos tipos de molinos como el de rodillos de alta presión y el de rodillos horizontales

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

donde se emplea de un 20 – 50 % menos de energía eléctrica que con los tradicionales molinos de bolas (Vizcaíno, 2014).

Otra de las medidas que se han puesto en práctica en la industria del cemento es el uso de combustibles alternativos ya que más del 90 % de la energía usada en la producción de cemento procede originalmente de la quema de combustibles. La fuente energética más usada para la producción de cemento la constituye el carbón, que por su composición es muy contaminante, por lo que al reducir el contenido de carbón de los combustibles se logra reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Una práctica de ello es el empleo de gas natural, pero los precios de este último se han elevado de manera sostenida en el mercado internacional y no son competitivos con los precios del carbón, además de ser una fuente altamente demandada por otros sectores (CEMBUREAU, 2013). La utilización de productos de desecho provenientes de otras industrias como combustibles alternativos ofrece una gran oportunidad ante esta problemática. Estos pueden ser gaseosos como lo son el gases de refinería, los gases del proceso de craqueado del petróleo, pueden ser líquidos como los solventes libres de halógeno, aceites minerales o pueden ser sólidos como los residuos de la agricultura, neumáticos y plásticos. El uso de estos combustibles no solo es menos costoso, sino que puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de 0.1 – 0.5 toneladas por tonelada de cemento, comparado con los combustibles fósiles, además de contribuir al reciclaje de residuales industriales (Vizcaíno, 2014).

**La reducción del factor de clínquer** en el cemento a través del empleo de otros productos reactivos constituye una de las líneas de trabajo establecidas por la industria del cemento en su camino hacia la sostenibilidad ambiental. Del total de emisiones de CO<sub>2</sub>, aproximadamente el 40 % proviene de la quema de combustibles y el consumo de energía eléctrica, mientras que el 60 % restante es causado por la descarbonatación de las materias primas durante el proceso de fabricación del clínquer (CSI, 2010). Los materiales que se emplean como sustitutos del clínquer y que reaccionan con hidróxido de calcio son llamados comúnmente Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).

El factor de reducción de clínquer es limitado por la reducción de la resistencia, sobre todo a edades tempranas y algunos MCS provocan un incremento en la demanda de

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

agua, que tiene un efecto negativo en la reología. De acuerdo a las especificaciones de la ASTM C61803 para cenizas volantes y puzolanas naturales o artificiales y su empleo en hormigones, la composición química debe ser tal que la suma de los óxidos de Si, Al y Fe expresados como por ciento en masa, sea superior al 70% (Alujas, 2010). A pesar de los efectos mencionados anteriormente, el impacto que causa la utilización de estos materiales con respecto a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y la posibilidad de aumentar de los volúmenes de producción de cemento sin grandes costos de inversión asociados, el empleo de MCS como sustitutos del clínquer en la producción de cementos mezclados constituye una de las mejores alternativas para contrarrestar el daño al medio ambiente en nuestro país (F. Martirena, 2011).

El aumento de los niveles de sustitución de clínquer ha estado liderado por las regiones con economías emergentes, como Latinoamérica, India y China, que se encuentran por encima de la media mundial (Vizcaíno, 2014).

## **1.3 Los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS)**

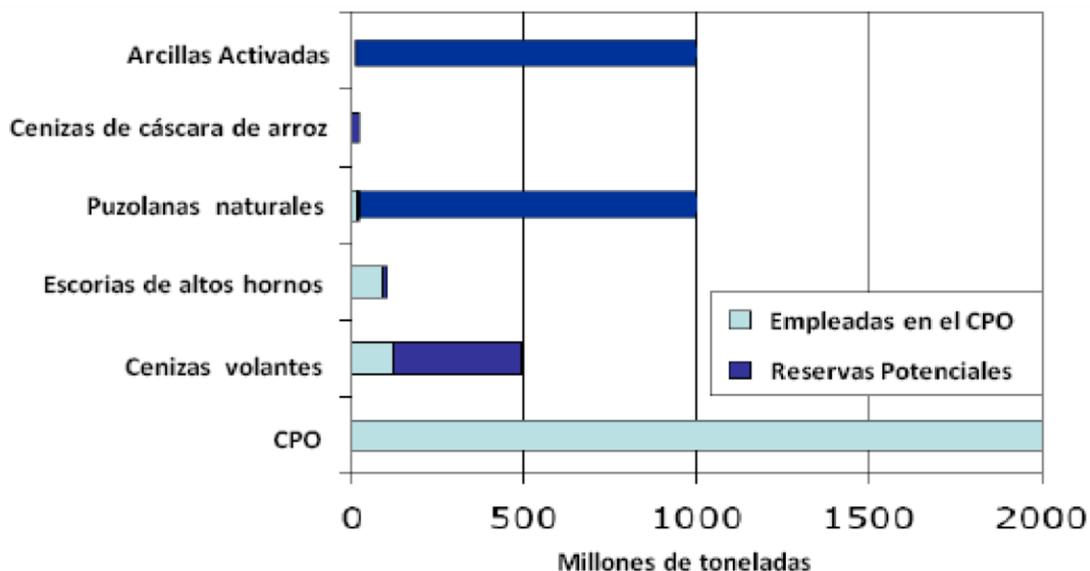
Los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) son aquellos materiales que, a través de su actividad de carácter hidráulico o puzolánico, contribuyen a mantener o incrementar las propiedades de los hormigones en su estado endurecido. Dentro del amplio grupo de MCS se encuentran las puzolanas, que se definen como aquellos materiales naturales o artificiales, ricos en sílice y alúmina, capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio en presencia de agua para formar compuestos con propiedades cementantes" (Massazza, 1976). Las puzolanas se clasifican en dos grandes grupos: naturales y artificiales, aunque existe un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que necesitan tratamientos térmicos de activación. En este último grupo se encuentran los materiales arcillosos que permiten la formación de compuestos puzolánicamente activos en dependencia de su estructura, constitución mineralógica, composición química, temperatura y tiempo de cocción y de enfriado (Massazza, 1993).

A través de la combinación de las puzolanas y el cemento Portland, el hidróxido de calcio del sistema reacciona con los aluminosilicatos presentes en ella durante el proceso de hidratación, formando compuestos cementantes. El empleo de esta

## CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

combinación se manifiesta a través de varias características fundamentales: el relativamente lento desarrollo de la resistencia mecánica, la disminución de la liberación del calor por masa de aglomerante, la disminución del contenido del hidróxido de calcio a través de la reacción puzolánica y el refinamiento de la estructura de poros, que trae consigo el incremento de la durabilidad y la resistencia mecánicas. El lento desarrollo de la reacción puzolánica permite que los productos que se generan en la misma rellenen de forma muy eficiente los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento (Quintana, 2005).

La mayor parte de los materiales puzolánicos empleados lo constituyen las puzolanas de origen artificial: subproductos del sector industrial como las escorias de altos hornos (subproducto de la industria siderúrgica), las cenizas volantes (subproducto de la quema del carbón en las plantas de generación eléctrica), y el humo de sílice (subproducto de la producción de silicio y ferrosilicio). Pero existe un grupo poco explotado, el cual posee abundantes reservas, como es el caso de las puzolanas naturales, la ceniza de la cáscara de arroz y las arcillas activadas térmicamente (Martirena, 2004) (Alujas, 2010).



**Figura 1.4:** Empleo de materiales puzolánicos en la sustitución parcial del CPO.  
(SCRIVENER, 2007)

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

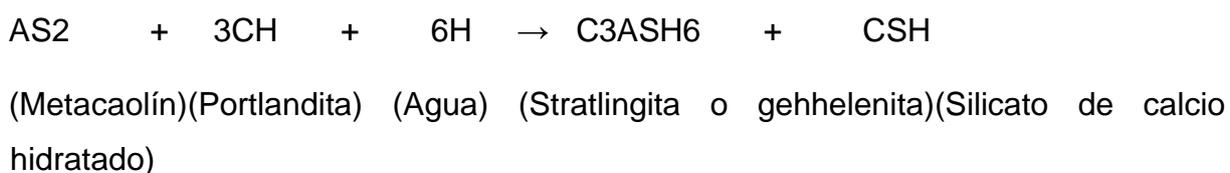
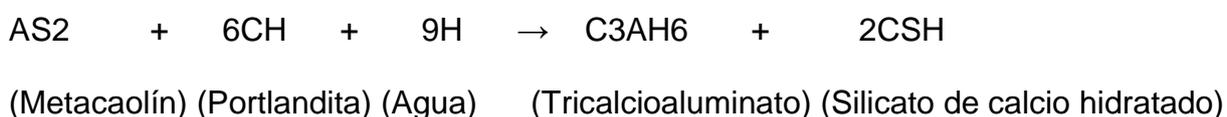
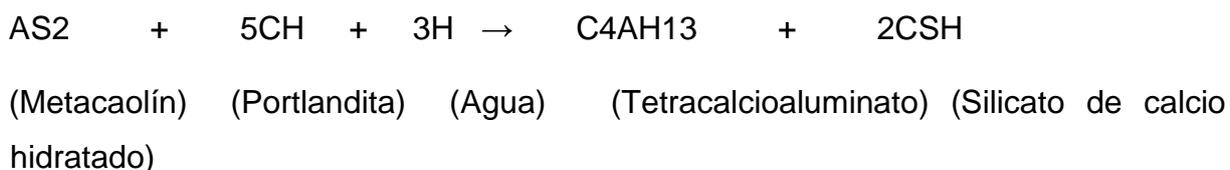
## 1.3.1 Reacciones puzolánicas

Las reacciones puzolánicas, al igual que los procesos de hidratación del cemento, transcurren de acuerdo con las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido, con presencia de fenómenos difusivos y marcada influencia de factores de tipo interno y externo de las puzolanas. La reacción principal de cualquier material puzolánico es un ataque a las estructuras de silicatos o aluminosilicatos por parte de iones  $\text{OH}^-$ , para así formar productos similares a aquellos formados por la hidratación del cemento Portland.

La reactividad puzolánica de materiales provenientes de la activación térmica de las arcillas, dependen casi en su totalidad del tamaño de la partícula, el área de superficie específica y la mineralogía de las fases arcillosas. Si el material posee mayor superficie específica o finura provoca que aumente la velocidad de reacción cal-puzolana (R. Castillo, 2010).

A partir de la reacción de las puzolanas con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento se forman nuevos productos de hidratación que son los responsables de la mejora en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón (Alujas, 2010).

Durante la interacción entre el hidróxido de calcio, la sílice y la alúmina de las arcillas calcinadas, ocurren las siguientes reacciones:



Uno de los efectos físicos que ocurren producto de la adición de una puzolana al Cemento Portland Ordinario (CPO), es el aumento de la compacidad por efecto filler

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

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. Otro efecto es el de dilución, debido al cual se produce un mayor espacio para la formación y crecimiento de las fases hidratadas, lo que favorece la reacción de hidratación (Dopico et al., 2008).

La actividad puzolánica trae consigo un grupo de ventajas como son la disminución del contenido de cal libre en la mezcla para valores menores a un 30% de sustitución del CPO, proporciona un efecto acelerador en la hidratación de la fase alita del clínquer, acelera el tiempo de fraguado (inicial y final) de la mezcla, provoca un desplazamiento de los diámetros de poros hacia valores más pequeños (refinamiento de la estructura de poros) que conlleva a la disminución de la permeabilidad y el aumento de la resistencia mecánica. Al mismo tiempo, como la portlandita 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 (RODRÍGUEZ, 2014).

### **1.3.2 Empleo de MCS en Cuba**

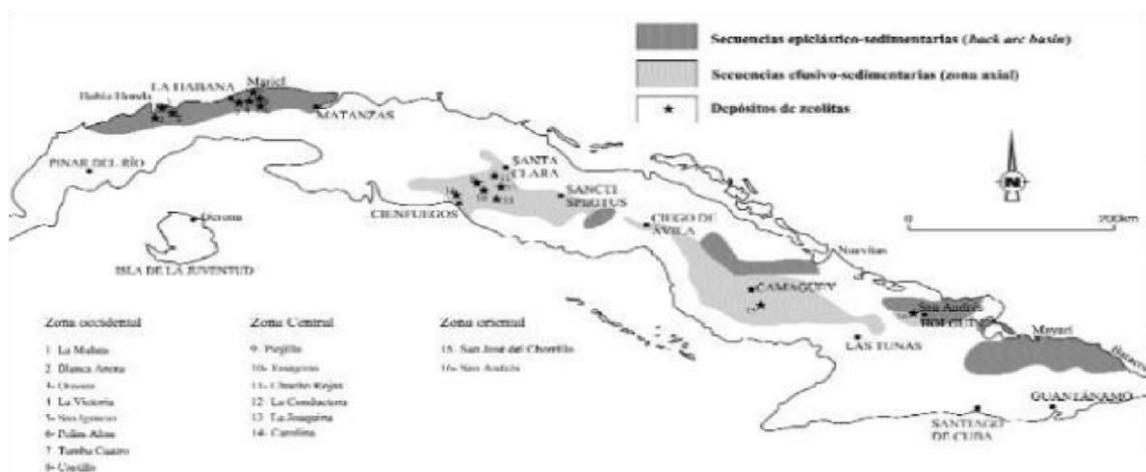
En nuestro país desde la época colonial se comenzó a utilizar la roca zeolita como material de construcción en las edificaciones de la barriada del Vedado, como consecuencia de la crisis energética durante la Segunda Guerra Mundial. Aunque el descubrimiento de roca zeolíticas de importancia industrial en Cuba data de la década del 70, donde Coutin y Brito publicaron los resultados de los estudios realizados durante varios años en Cuba oriental y central, y mencionaron la presencia de cuatro zeolitas: clinoptilolita, mordenita, heulandita y analcima y tres más: estilbita, thomsonita y laumontita rellenando vetillas, grietas y poros en rocas efusivas y piroclásticas.

A partir de 1972 se acometió la elaboración de un proyecto técnico-económico de búsqueda y explotación de zeolitas en Villa Clara y aunque a escala mundial no existía una metodología económica de evaluación de este tipo de yacimiento, en 1981 el

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

colectivo de técnicos cubanos culminó el primer informe geólogo sobre reservas industriales y los recursos pronósticos. Esta determinación de reservas industriales, como tales, fueron las primeras que se calcularon en todo el campo socialista. Los yacimientos de zeolita cubanos son de alto rendimiento en clinoptilolita y modernita, llegando en algunos casos a más de 90%.

En Cuba se conocen más de 25 yacimientos y manifestaciones de zeolitas naturales, distribuidas a todo lo largo y ancho del país. De acuerdo con datos de la Oficina Nacional de Recursos Minerales del Ministerio de la Industria Básica, estos yacimientos se encuentran distribuidos prácticamente en todo el territorio nacional: Pinar del Río, La Habana, Villa Clara, Cienfuegos, Camagüey, Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba y en Guantánamo. Se han estudiado a profundidad 16 yacimientos que totalizan unos 20,9 millones de toneladas de recursos medidos, 69,95 millones de toneladas en recursos indicados y 214,61 millones de toneladas en recursos inferidos (Rebelde, 2007)



**Figura 1.5:** Ubicación de los yacimientos y manifestaciones de zeolitas naturales en Cuba (Rebelde, 2007)

El país cuenta con tres plantas en funcionamiento, con una capacidad instalada de 150.000 toneladas al año en cada una, aunque en la práctica, la capacidad de las plantas depende de la demanda. Actualmente, las de mayor demanda son Tasajeras (San Juan de los Yeras) y San Andrés, y en menor medida, El Chorrillo, en Camagüey.

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

Existen experiencias de la explotación de otras fuentes de materiales puzolánicos en la isla, como las cenizas de bagazo y paja de caña para la fabricación de aglomerantes alternativos (Alujas, 2010; Martirena, 2004). Las investigaciones llevadas a cabo por Alujas, Castillo y Fernández (Alujas, 2010; R. Castillo, 2010; Fernández, 2009) reportan el potencial puzolánico que ofrece la activación de arcillas cubanas multicomponentes con bajos contenidos de caolinita para la fabricación de un aglomerante con rendimiento similar al cemento Portland. Sin embargo, los datos del Instituto de Geología y Paleontología consideran las reservas de arcillas caoliníticas como bajas, poco más de 65 MMt, pero su potencial no ha sido debidamente investigado, pues los cálculos han estado limitados a las características demandadas por las industrias de la cerámica y para la producción de cemento blanco (Batista, 2007), que requieren de depósitos de arcillas de alta pureza de caolinita y/o bajo contenido de hierro.

Más reciente se ha reportado la activación térmica de arcillas multicomponentes y la producción de un aglomerante con solo 50 % de clínquer mezclado con 30 % de arcilla calcinada y 15 % de caliza molida que mostró un comportamiento similar el cemento PP-35 y a menor costo que este (Vizcaíno, 2014). Es por ello que, el estudio de nuevas fuentes de materiales arcillosos con bajos contenidos de caolinita, material ampliamente diseminado y de menor competencia de utilización con otras industrias de mayor valor agregado, resulta una importante alternativa para suplir la demanda cemento, disminuir sus costos, mitigar las emisiones CO<sub>2</sub> de su producción, y en la medida de lo posible aprovechar las tecnologías existentes sin grandes inversiones. Extender estos estudios permite además, tener un mayor grado de conocimiento de las reservas existentes en todo el país, vinculado particularmente al empleo de estos materiales arcillosos con características adecuadas para su uso como materiales cementicios suplementarios.

## **1.4 Arcillas: clasificación, características y origen**

Existen varias definiciones para el término arcilla, las que caracterizan estas, como el granulométrico que designa a los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 5  $\mu$ m. Pero al verlo desde un punto de vista mineralógico este criterio

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

no es adecuado porque asume que incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos como cuarzos y feldespatos podrían ser considerados arcillas cuando sus tamaños son lo suficientemente pequeños. Por tal motivo se empleará la definición dada por Dr. Adrián Alujas Díaz, ya que se ajusta en gran medida a los objetivos de esta investigación: "bajo el término arcillas se engloba un vasto grupo de minerales cuyos elementos predominantes son el Si, el Al, el H y el O, y cuyas propiedades físico-químicas derivan de su composición química, de su particular estructura interna en forma de capas (filosilicatos) y de su tamaño de grano muy fino".

Los minerales arcillosos son el producto de la meteorización sobre minerales primariamente ígneos como los feldespatos o formados durante la alteración diagenética a bajas temperaturas. En dependencia de las condiciones de intemperismo y de la composición química de la roca original, varios minerales arcillosos son favorecidos en su formación. Dentro de ellos, los más comunes son la caolinita, las esmectitas (montmorillonita), illita, clorita y palygorskite-sepiolita. Las illitas y las cloritas son formadas predominantemente en climas fríos o templados, las esmectitas en climas mediterráneos y zonas tropicales con diferencias entre las estaciones, mientras que la formación de caolinita es más común bajo condiciones húmedas tropicales y ecuatoriales.

Las arcillas están ampliamente distribuidas como constituyente esencial de los suelos y sedimentos, debido a que son mayoritariamente los productos finales de los distintos procesos de degradación de los aluminosilicatos formados a mayores presiones y temperaturas y que constituyen más del 70% de la corteza terrestre. Cuando están presentes en gran cantidad se presentan bajo la forma de rocas arcillosas. En este trabajo se empleará la definición de roca desde el punto de vista mineralógico, o sea, como la asociación natural de varias fases minerales. Por tanto, se entienden como rocas arcillosas aquellas asociaciones de minerales donde los pertenecientes al grupo de las arcillas constituyen la fracción dominante. La roca arcillosa puede a su vez subdividirse en la fracción arcillosa, que contiene a las fases minerales que responden a las características estructurales de las arcillas, y la fracción no arcillosa, constituida generalmente

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

por minerales con una composición química similar a la de las arcillas, pero con una estructura cristalina diferente (Brown, 1961).

La presencia de rocas arcillosas donde predomine un solo tipo de fase mineral arcillosa es poco frecuente, y solo se da para orígenes muy específicos del yacimiento, como los de tipo hidrotérmico. Lo más común es encontrarlas bajo la forma de depósitos de origen y tamaño variable y donde se mezclan más de un tipo de fases minerales arcillosas con otros minerales no arcillosos como cuarzo y feldespatos (Drits, 2003).

Cada partícula de arcilla está formada por varias capas compuestas fundamentalmente por láminas alternas de  $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$  tetraédricas con láminas octaédricas de  $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$ . Es común encontrar sustituciones isomórficas de la alúmina por  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$ . Si el catión es trivalente, la coordinación se torna di-octaédrica y es el caso de la gibsita; en cambio, si el catión es divalente, como en el caso del magnesio, las coordinaciones son tri-octaédricas (Fernández, 2009).

De acuerdo con la manera en que en 2 o 3 capas de los filosilicatos que conforman su estructura interna se agrupan y mantienen enlazados, las arcillas son divididas en dos grupos principales como se muestra en la Tabla 2 (Fernández, 2009).

**Tabla 1.2:** Minerales arcillosos más comunes (Siverio Fernández, 2016).

Grupo	Distribución de los filosilicatos	Principales minerales arcillosos que integran el grupo
1:1	Sílice-alúmina	Caolinita
2:1	Sílice-alúmina-sílice	Montmorillonita, Illita

## 1.4.1 Las arcillas calcinadas como MCS

Las investigaciones enfocadas al empleo de las arcillas calcinadas como materiales cementicios suplementarios parten del estudio de rocas arcillosas con

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

alto grado de pureza donde existe un predominio de la fase arcillosa, que determina el desarrollo del carácter puzolánico por activación térmica. Los minerales arcillosos de la familia de las caolinitas se presentan en abundancia en las zonas tropicales, donde su formación es favorecida por las condiciones ambientales de altas temperaturas y abundante humedad, en comparación con la formación de otros tipos de minerales arcillosos, como las illitas y las esmectitas, que predominan en climas más secos y fríos (Deer, Howie, & Zussman, 1992). Sin embargo, el comportamiento de los depósitos arcillosos con fracción arcillosa multicomponente es mucho más abundante y con menor interés comercial, es todavía poco comprendido y estudiado (Habert et al., 2010).

El metacaolín (MK) es el resultado de la activación térmica de arcillas caoliníticas de alta pureza, es el material puzolánico más estudiado y el único que existe en el mercado como un producto comercial. El MK, una puzolana de alta reactividad que se obtiene a partir de la calcinación, bajo condiciones controladas, de arcillas caoliníticas de alta pureza, ha demostrado un excelente potencial para, mezclado con el CPO, mejorar significativamente la resistencia y la durabilidad del hormigón (Poon, Lam, Kou, Wong, & Wong, 2001), además es capaz de reaccionar con la portlandita (CH) para formar hidratos suplementarios de silicio y calcio de similar composición y estructura que los obtenidos en el cemento Portland sin adiciones. Independientemente de las reconocidas buenas prestaciones del MK, este es aún un producto relativamente caro, con un precio en el mercado internacional que puede oscilar entre un 49 % y un 70 % del precio del CPO (J. MARTIRENA, 2011). A diferencia de otros materiales cementicios suplementarios, como las cenizas volantes, el humo de sílice y las escorias de altos hornos, el MK no es el subproducto de un proceso industrial, sino que es manufacturado con propósitos específicos mediante la calcinación a temperaturas controladas de arcillas con un contenido de caolinita superior al 70 % (Sabir, Wild, & Bai, 2001).

Las arcillas caoliníticas no pueden ser empleadas como puzolanas en su estado natural. La presencia de estructuras cristalinas estables impide la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica. (Shi & Day, 2001). Para alcanzar el máximo potencial de las mismas se activan

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

térmicamente, a partir de un intervalo de temperatura que depende del tipo de arcilla, grado de cristalinidad y distribución granulométrica (Todor, 1976).

## **1.4.2 Activación térmica**

En su estado natural las arcillas caoliníticas no pueden ser empleadas como puzolanas debido a que su estructura cristalina estable impide la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica (Shi & Day, 2001). La estructura en forma de capas propensas al deslizamiento y al agrietamiento, y la capacidad para inmovilizar grandes cantidades de moléculas de agua en su superficie son factores que pueden afectar de forma negativa la resistencia mecánica y la reología en un material cementicio, mientras que la alta capacidad de adsorción de iones puede modificar la composición química de las soluciones acuosas, afectando las propiedades tecnológicas del hormigón. Por lo tanto, las arcillas deben modificarse estructuralmente para ser empleadas como materiales puzolánicos. (Alujas, 2010).

El proceso de activación puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales es la activación térmica la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas y alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica (Shi & Day, 2001). El intervalo de temperatura depende del tipo de arcilla, grado de cristalinidad y distribución granulométrica (Todor, 1976). Aunque generalmente este rango oscila entre los 700°C y los 900 °C lo cual es significativamente inferior a la temperatura necesaria para la clínquerización (1450 °C). Esto se traduce como menor consumo de energía y a su vez una disminución en la emisión de  $CO_2$ . Además, uno de los productos de reacción en la activación de las arcillas es  $H_2O$  y no  $CO_2$  como en el caso del clínquer (Sabir et al., 2001).

La calcinación de las arcillas se produce de la siguiente forma: calentamiento desde la temperatura ambiente hasta los 250°C donde ocurre la pérdida (reversible en algunos casos) del agua adsorbida y absorbida en las superficies externas e internas de la arcilla (deshidratación). Entre los 400 °C y los 850 °C ocurre la remoción de los  $OH^-$  estructurales (desoxhidrilación) acompañada por

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

el desorden parcial de la estructura cristalina y la formación de fases metaestables, caracterizadas por una alta reactividad química (Heller-Kallai, 2006). La pérdida de los OH<sup>-</sup> desestabiliza eléctricamente la estructura, especialmente en la zona de la capa octaédrica. Es por eso que en las arcillas calcinadas las fases de alúmina juegan un papel muy importante en la reactividad puzolánica, pues son estas zonas de la estructura las primeras en desestabilizarse estructuralmente durante el proceso de deshidroxilación. Cuando la temperatura se acerca a los 900 °C, se produce una drástica caída en la superficie específica, que se refleja en una disminución de la actividad puzolánica (Alujas, 2010).

Para fases con un bajo grado de orden estructural la reactividad puzolánica se alcanza más rápido y a menores temperaturas que para fases minerales del mismo tipo, pero con un alto grado de orden en su estructura (He, Osbaeck, & Makovicky, 1995; Samet, Mnif, & Chaabouni, 2007). Independientemente del tipo de mineral arcilloso, se ha observado que alrededor de los 950 °C toma lugar la reorganización de la estructura para formar nuevas fases cristalinas estables a altas temperaturas y químicamente poco reactivas. La presencia de impurezas de tipo no arcilloso como cuarzo y feldespatos tienden a reducir la temperatura a la cual ocurre este fenómeno, acortando el intervalo para el cual es posible la activación térmica de la arcilla (He et al., 1995). 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 desoxhidrilación y el inicio de la recristalización, fenómenos que delimitan, desde el punto de vista estructural, el intervalo dentro del cual una fase arcillosa puede ser convertida en un material puzolánico mediante activación térmica. (Figura 1.6)

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

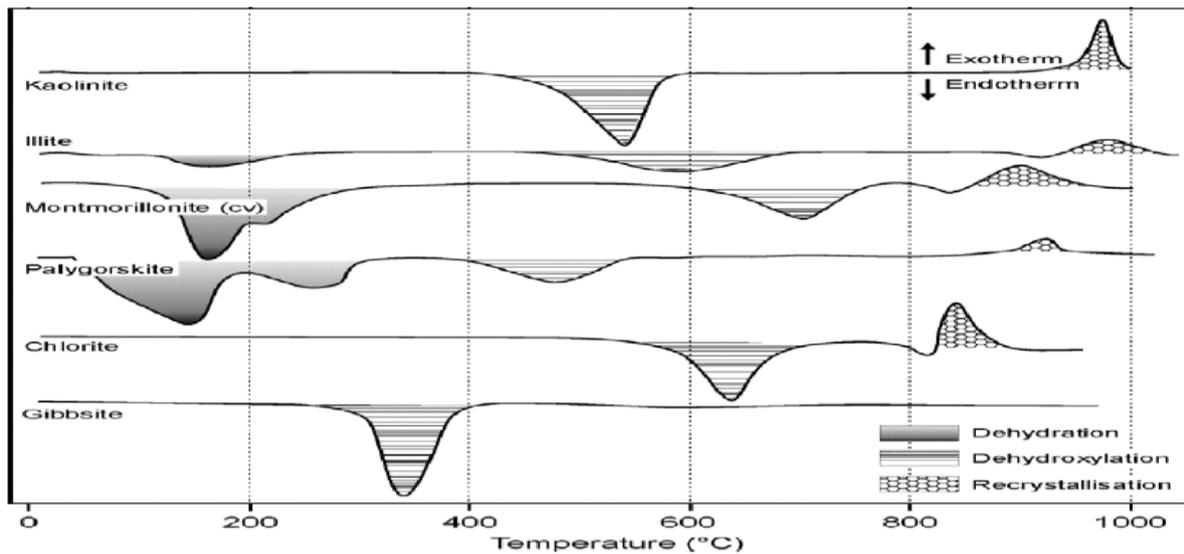


Figura 1.6: Comportamiento térmico de los minerales arcillosos (Snellings, 2011).

## 1.4.3 Reacción puzolánica

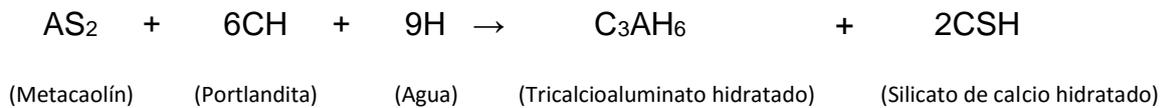
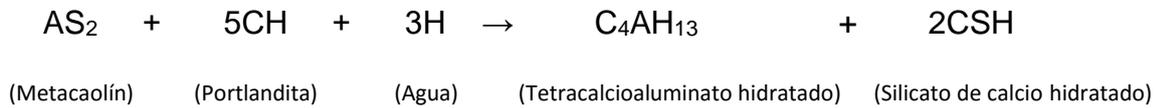
Las bases para el empleo de los materiales puzolánicos como sustitutos parciales del clínquer en el CPO o como materiales mezclados con el propio CPO, se fundamentan en la reacción ácido-base en su concepción más general. El ataque químico de los iones  $\text{OH}^-$  que provienen de la disolución del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  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 y de las fases AFt y AFm 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 generada durante la hidratación del CPO, son los responsables de la mejora en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón (Taylor, 1997).

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

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

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, en cuyo caso se refiere a estas fases como CASH (Fernández, 2009; Taylor, 1997). 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 & Beaudoin, 2000).

Para el caso particular de las arcillas calcinadas, tres reacciones químicas pueden ser planteadas de forma hipotética para describir la interacción entre el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y la sílice y la alúmina que se encuentran en un estado de alto desorden estructural. En este caso, las reacciones son planteadas tomando como base el Metacaolín (MK) (Baronio & Binda, 1997).



Los productos predominantes de esta reacción son los silicatos de calcio hidratados (CSH), acompañados de las fases ricas en alúmina como la Stratlingita ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) y los hidroaluminatos de calcio ( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ) (Fernández, 2009).

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

En los cementos modernos, el contenido de sulfatos o carbonatos puede ser relativamente alto formando preferencialmente ettringita, monosulfatos y carboaluminatos, inhibiendo de esta manera la precipitación de las fases mencionadas (CABRERA, 2015).

## **1.4.4 Métodos para determinar de reactividad puzolánica**

Son varias las técnicas para evaluar la reactividad puzolánica, la mayoría basadas en la medición, durante un intervalo de tiempo, de distintas propiedades físicas o químicas 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 (Alujas, 2010). Se han hecho intentos para comparar la puzolanidad y los índices de actividad puzolánicas medidos por varios métodos. En la mayoría de los casos, la relación entre los resultados obtenidos en las técnicas químicas y mecánicas ha sido pobres, por lo cual, ha sido necesario el uso combinado de varias técnicas para poder comprender los fenómenos de actividad puzolánica.

La mayoría de los métodos utilizados para la evaluación de la actividad puzolánica se basan en la determinación del consumo de cal (Tironi, 2013). Sin embargo, las propiedades mecánicas de los nuevos sistemas cementicios donde hay combinación de arcilla calcinada y caliza no correlacionan generalmente con los resultados de los métodos comunes de evaluación de la actividad puzolánica (Avet, Snellings, Alujas, Ben, & Scrivener, 2016).

Los ensayos de resistencia mecánica 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. Sin embargo, por sí solos ofrecen poca información sobre los procesos responsables de la reactividad puzolánica y no pueden ser utilizados como única vía para entender el comportamiento de nuevos materiales puzolánicos. Con este propósito,

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

modernas técnicas de caracterización han ido ganando creciente importancia en el estudio de la reacción puzolánica.

La Calorimetría Isotérmica, técnica de análisis térmico que ha ganado creciente importancia en los estudios de la hidratación del CPO, se basa en la medición de la velocidad de liberación de calor en función del tiempo bajo un régimen isotérmico y aprovecha el carácter altamente exotérmico de las reacciones de hidratación del CPO y de las reacciones puzolánicas y su cinética relativamente lenta (Pane & Hansen, 2005). De esta forma, la cantidad de calor total acumulado es directamente proporcional a la cantidad de productos de hidratación generados y puede tomarse como una medida del grado de reacción alcanzado por el sistema. La medida de la velocidad o flujo de liberación de calor provee información acerca de la cinética y los mecanismos de hidratación (Alonso & Palomo, 2001).

Una técnica más sencilla de implementar, pero que brinda una información semejante a la Calorimetría Isotérmica es la Contracción Química, tiene su fundamento en los cambios que ocurren en el volumen total del sistema durante las reacciones de hidratación (Ramachandran & Beaudoin, 2000). Teniendo en cuenta que el volumen específico del agua es menor cuando está enlazada químicamente que cuando está en estado no asociado, las reacciones de hidratación van acompañadas generalmente de una reducción en el volumen total del sistema. Como ejemplo del principio de esta técnica puede observarse cómo, durante la reacción de hidratación del CPO, el volumen del sólido aumenta por la formación de los productos de hidratación, pero el volumen total decrece (Taylor, 1997).



$$V_t = 2.318$$

$$V_t = 2.167$$

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

Los estudios por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) son muy útiles para identificar y evaluar la estructura de los hidratos formados en las pastas de CPO y de CPO con adiciones puzolánicas (ANDERSEN, 2003) (NAYA, 2007). Los recientes avances reportados por Scrivener en el estudio de la microestructura de pastas y morteros mediante MEB en su modo de electrones de retrodispersión permiten no solo la identificación y descripción de los productos de hidratación, sino también su cuantificación, haciendo uso de modernos software para el análisis y procesamiento estadísticos de las imágenes (SCRIVENER, 2007).

Reciente se ha reportado la aplicación de un nuevo protocolo experimental para la evaluación de la actividad puzolánicas de arcillas calcinadas, denominado Ensayo R<sup>3</sup> (*Rapid, Relevant and Reliable*) (Avet et al., 2016), desarrollado de conjunto por investigadores del Centro de Estudios de Química Aplicada (CEQA) de la UCLV “Marta Abreu” de las Villas y el Laboratorio de Materiales de Construcción del Instituto Federal Suizo de Investigaciones de Lausana, Suiza, que evalúa la reactividad puzolánica monitoreando el calor liberado durante la reacción puzolánica en sistemas hidróxido de calcio - arcilla calcinada - caliza. Este ensayo, que ha sido validado a escala de laboratorio para varias arcillas calcinadas, se basa en medir el calor total liberado por una pasta cal-puzolana, a la cual se le adicionan también álcalis y sulfatos, de manera que se simulan las condiciones que existen en un sistema mezclado cemento – puzolana. El calor liberado durante un periodo de tiempo determinado es directamente proporcional a la reactividad puzolánica de los productos de calcinación y los ensayos a escala de laboratorio para varias arcillas calcinadas han demostrado que los resultados guardan una correlación lineal con los ensayos normados de resistencia a la compresión (Siverio Fernández, 2016)

## **1.5 Perspectivas del empleo de las arcillas calcinadas como MCS en Cuba**

Cuba no cuenta con grandes reservas de caolines de alta pureza. Sin embargo, investigaciones precedentes han demostrado que, si se conocen y aprovechan las características estructurales, químicas y mineralógicas de una fracción arcillosa multicomponente, esta puede, aun para contenidos moderados de arcillas caoliníticas, ser convertidas mediante activación térmica en un material puzolánico

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

capaz de ser empleado en la sustitución parcial del CPO en mezclas aglomerantes, con reactividades tales que le permiten mantener e incluso incrementar las propiedades mecánicas y de durabilidad (Alujas, 2010). En nuestro país existen 45 yacimientos donde hay presencia de arcillas caoliníticas con bajo grado de caolín que poseen grandes reservas distribuidas en todo el territorio nacional. De esta reserva 14 millones se encuentran concesionados para su explotación a diferentes industrias. La mayor cantidad de depósitos de caolín se encuentran en el occidente del país, particularmente en la isla de la Juventud y Pinar del Río; también se ubican depósitos con diferente grado de interés en Villa Clara, Ciego de Ávila, Sancti Spíritus y Camagüey (IGP, 2010), de igual forma en la zona oriental, Las Tunas, Holguín y Santiago de Cuba. En el resto del territorio nacional, según la Oficina Nacional de Recursos Minerales, aparecen manifestaciones de forma diseminada, los de mayor interés para la producción de puzolanas de alta reactividad son las de composición rica en caolín como mineral arcilloso (Méndez Herrada, 2015).

Las condiciones actuales posibilitan y requieren que las puzolanas naturales cubanas, sean evaluadas con más profundidad debido a varios factores como son: el aumento considerable del precio de los combustibles fósiles (con precios para el barril de crudo por encima de los 80 USD), el auge de planes de desarrollo constructivo a corto y mediano plazo, las medidas de protección ambiental (disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>).

Actualmente a partir de los trabajos e investigaciones desarrollados como parte de proyectos del Centro de Investigaciones y Desarrollo de Materiales (CIDEM) de la Universidad Central "Marta Abreu de las Villas" se han demostrado las potencialidades de activación térmica de arcillas cubanas de bajo grado para la obtención de materiales puzolánicos de alta reactividad y con ella producir materiales puzolánicos con altas potencialidades de empleo como MCS (Alujas, 2010). El empleo de estos ha sido avalado a escala industrial para el caso del yacimiento Pontezuela en la obtención de cementos base de Clínquer- Arcilla Calcinada – Yeso, que alcanzaron en morteros normalizados resistencias a la compresión superiores a la serie de control (CPO), con una reducción en el contenido de casi un 50% en masa (ANDRÉS, 2014).

Es necesario señalar que la ubicación actual de las fábricas de cemento en nuestro país responde a estudios de prospección geológica donde no se consideró el empleo

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.**

de arcillas calcinadas como fuente de materiales puzolánicos (GALLO, 2010). Esto trae consigo que la posible explotación de un yacimiento arcilloso no está concesionada solo por sus características químicas y mineralógicas, sino también por las reservas calculadas y su ubicación geográfica, relativamente cercana a algunas de las fábricas de cemento existentes en el país (NAZCO, 2014). Tomando en cuenta lo expuesto anteriormente el depósito el Yigre posee una gran perspectiva para la producción de materiales cementicios suplementarios.

## **1.6 Conclusiones parciales del capítulo.**

- ✓ Como consecuencia de las particulares características químicas y estructurales, que permiten su transformación en materiales de carácter puzolánico a partir de su activación térmica, y a su amplia disponibilidad, los minerales arcillosos constituyen una atractiva alternativa como fuente de materiales puzolánicos.
- ✓ Al sustituir el factor clínquer por materiales puzolánicos, se mantienen y/o mejoran las propiedades físicas y de durabilidad, ya que minimiza la expansión volumétrica, lo que reduce las grietas y a su vez aumenta la resistencia mecánica. De igual forma constituye un menor costo de producción.
- ✓ El empleo de los productos de calcinación de arcillas multicomponentes con bajos contenidos de caolinita es la mejor alternativa para la producción de materiales puzolánicos en nuestro país, ya que no contamos con grandes reservas de caolínitas de alta pureza en el territorio nacional.

## CAPÍTULO II: MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.

### 2.1 Introducción

El presente capítulo aborda la caracterización del yacimiento Yaguajay y los procedimientos seguidos en el procesamiento del material arcilloso. Así como los métodos utilizados para determinar la composición química y mineralógica de la materia a examinar. Para ello se tendrá en consideración las pruebas de Análisis Termo gravimétrico (TGA), reactividad puzolánica a través del protocolo R3, calorimetría isotérmica y los ensayos de resistencia a la compresión de morteros normalizados con sustitución de un 30 % de cemento PP-35 por polvo de arcilla calcinada a diferentes temperaturas. Se hace una descripción detallada de cada una de las pruebas y de los equipos utilizados para el correcto desarrollo de las mismas.

### 2.2 Características del área de estudio.

#### 2.2.1 Ubicación geográfica.

La zona de los trabajos se ubica 200 m al sur de la ciudad de Yaguajay. El acceso para T-1 y T-2 es por la carretera Yaguajay-Meneses que limita el área por su Flanco Occidental.

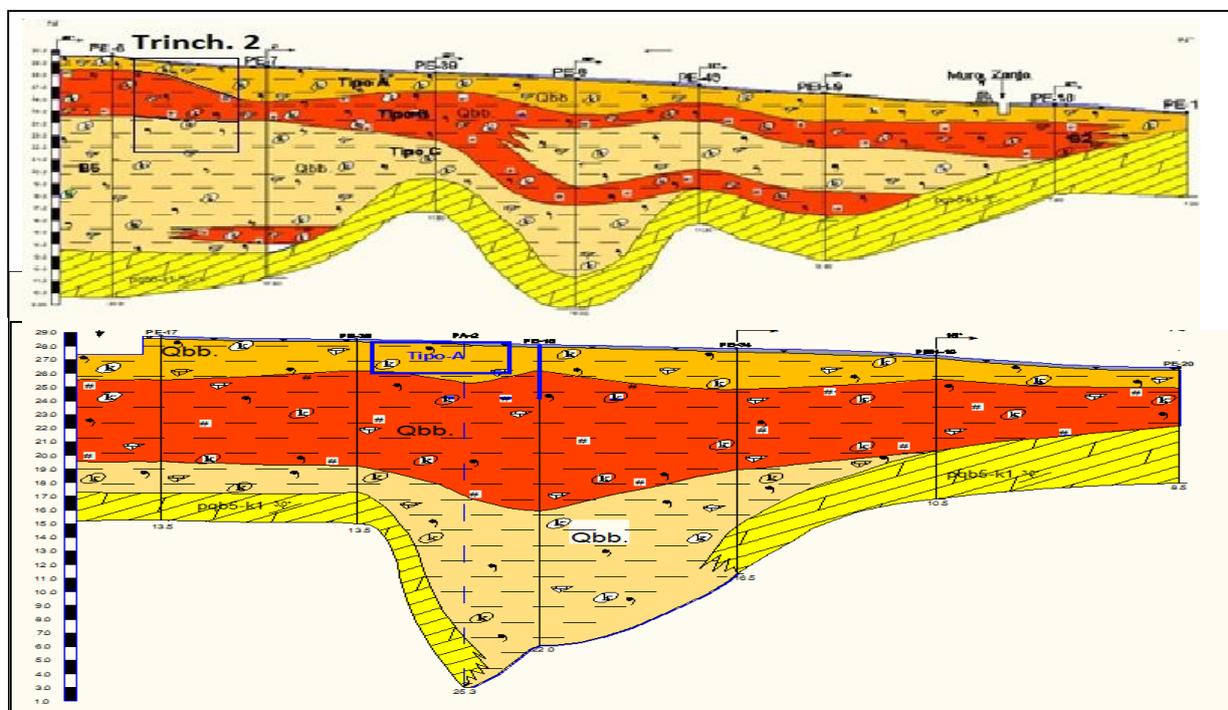


Figura 2.1: Distribución de los tres tipos de Arcillas.

En los años 2016-17 la Geominera del Centro realizó la prospección de la zona de Yaguajay; este estudio ha permitido establecer que existen recursos entre 4-5 MM ton de arcilla que han demostrado ser adecuada para la producción de cemento LC3, las que garantizan un horizonte productivo de 35 años con una producción sostenida de aproximadamente 400 M toneladas de cemento LC3-50, distribuidos en profundidad (Figura 2.1)

### 2.2.2 Geología del área de estudio.

El yacimiento seleccionado para este estudio forma parte de la secuencia arcillosa denominada como Arcillas Bamburanao (PEÑALVER HERNÁNDEZ, 1997; Siverio Fernández, 2016), que se distribuye en la zona norte de los municipios Remedios, Yaguajay y Chambas, en el centro del país. Los primeros estudios que se realizaron de esta secuencia arcillosa datan de la década de 1980, específicamente entre 1985 y 1990 cuando se realiza el Levantamiento Geológico 1:50000 Las Villas II y Búsquedas acompañantes en coordinación Cuba-Bulgaria, ellos reportaron la presencia de arcillas caoliníticas en una franja de 120 Km de largo en la porción norte de las hojas 1:25000 Remedios, Dolores, Yaguajay y Chambas (Siverio Fernández, 2016).

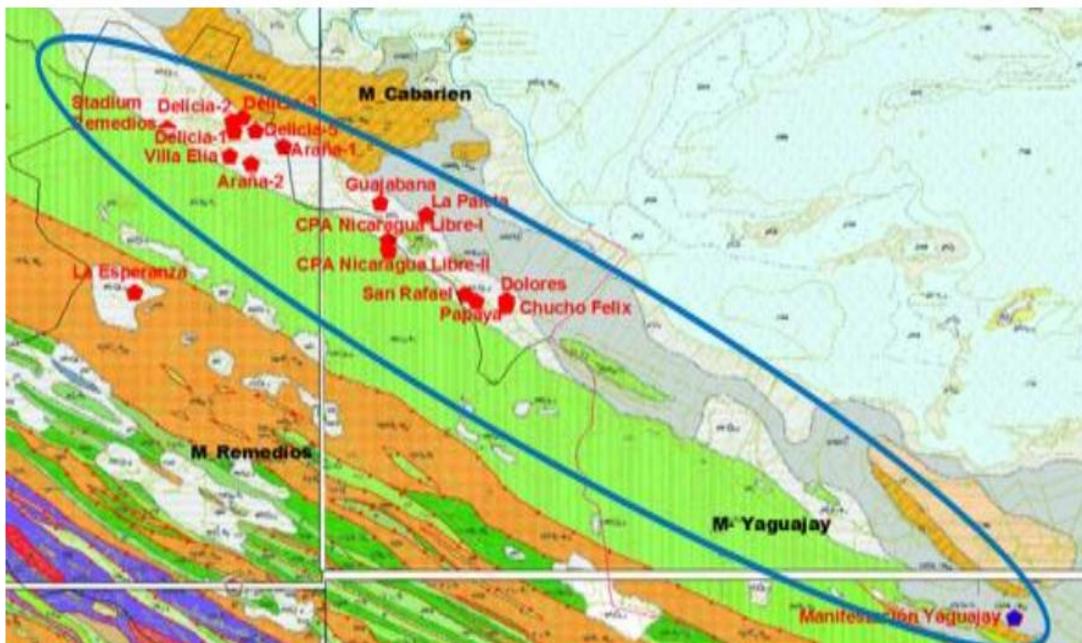


Figura 2.2: Ubicación del área de estudio, tomado de (Siverio Fernández, 2016).

Los sedimentos pertenecen a la Plataforma Neogénico-Cuaternario, clasificados como sedimentos marinos redepositados, que estuvieron en estrecha relación con las transgresiones y regresiones del nivel del mar, formando la Unidad Informal Arcillas Bamburanao, de edad Cuaternario. La geología de este sector está marcada por su ubicación en la porción norte de la región central de Cuba, donde se establecieron lagunas interiores producto de la repetidas transgresiones y regresiones del mar ocasionadas por los períodos de glaciación depositando grandes volúmenes de sedimentos terrígenos, calcáreos y arcillosos en capas horizontales de espesores hasta las primeras decenas de metros, tal como se observa en la actualidad. Los sedimentos provenientes de una fuente rica en minerales aluminosilicatados formaron las Arcillas Bamburanao (Siverio Fernández, 2016).

El cuerpo de arcillas se depositó en un ambiente lacustre con comunicación intermitente o ninguna comunicación con el mar, dado que el yeso pudo ser redepositado en una laguna interior. Las calizas parecen ser de agua dulce. Pueden haber existido, aunque no necesariamente, condiciones de aridización del clima (AUTORES, 1992) .

En cuanto al basamento rocoso se puede decir que está compuesto por rocas del Grupo Formacional Remedios de edad: Jurásico Superior (Tithoniano) - Cretácico Superior (Maastrichtiano). (Colectivo de Autores 2013). Este Se desarrolla en forma de bandas discontinuas y alargadas al norte de Cuba, en las provincias de Villa Clara, Sancti Spíritus, Ciego de Ávila, Camagüey y Holguín. Las litologías constituyentes son bioesparitas, micritas y dolomitas. En menor grado, turbiditas calcáreas y, muy localmente, calizas laminares. A diferentes niveles del corte de sus formaciones se observan espesores, de hasta 30 m, de brechas calcáreas con matriz calcárea.

Sobre la base del quimismo (Contenido de  $\text{CaO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) del cuerpo arcilloso se pueden definir tres tipos tecnológicos, estos son los tipos A, B y C (AUTORES, 2018).

### **Tipo A**

Las arcillas son muy plásticas y de color amarillento; con perdigones de hierro y manganeso de tamaño hasta 5mm, fragmentos de calizas de color blanco en ocasiones abundantes, nidos de caolín blanco azulado de 3 a 5 cm dispersos.



**Figura 2.3:** Arcilla tipo A.

### **Tipo B.**

Las arcillas son de color ocre a pardo hasta rojizo de oxidación, por su abundante contenido de óxido de hierro. Con perdigones de óxido de hierro y de manganeso, de diámetro hasta 1 cm. Se observan nidos y lentes de caolín blanco azulado de 5-10 cm, fragmentos aislados de silicita y calizas en toda su masa, plásticas, se disuelven fácilmente en presencia del agua.



**Figura 2.4:** Arcilla tipo B.

### **Tipo C.**

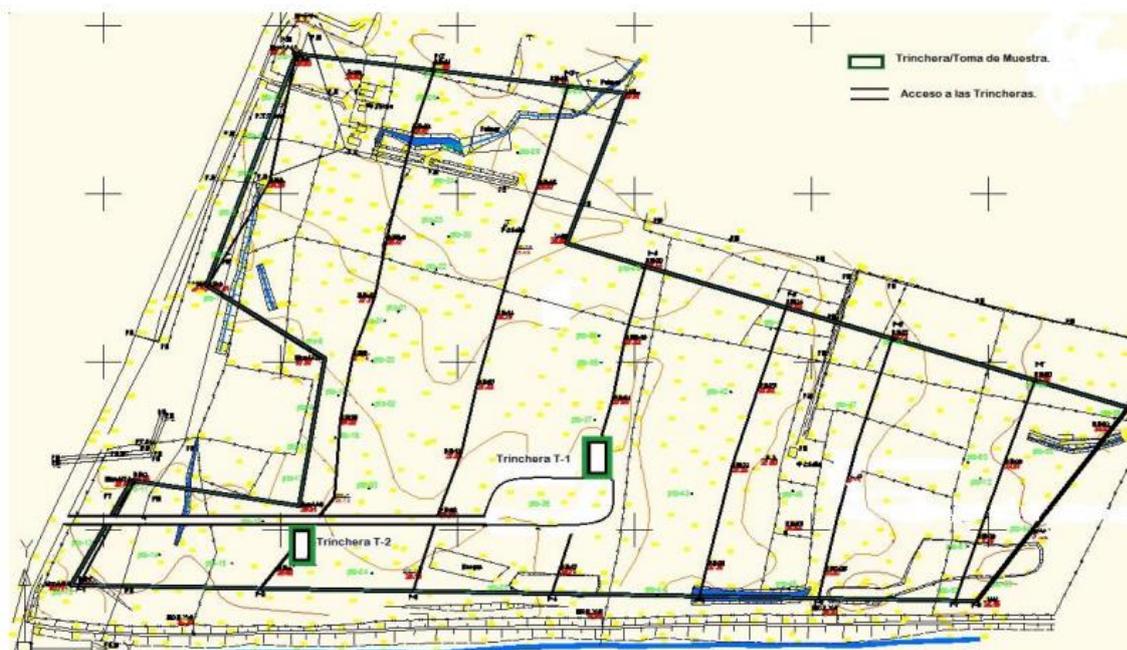
Son arcillas de color amarillento, de estructura muy fina, de estratificación incipiente y en ocasiones bien estratificadas. Con dispersos perdigones óxido de hierro, manganeso y fragmentos de caliza, nidos y lentes de caolín de hasta 15 cm y por

toda su masa cristalitas de yeso de 0.5 a 1.5 cm confirmando su origen marino. Son muy plásticas y se disuelven fácilmente en agua



**Figura 2.5:** Arcilla tipo C.

### 2.3 Trabajos de campo y muestreos.



**Figura 2.6:** Ubicación y Accesos a las trincheras (AUTORES, 2018)

Se muestrearon dos trincheras: trinchera T1 ubicada en el perfil 44' y entre los pozos PE 35 y PE 18, y la trinchera T2 ubicada en el perfil 22' y entre los pozos PE 8 y PE 40. Se tomaron un total de 7 muestras compósito en las dos trincheras según lo referido en la Tabla 2.1.

Para el elaborar el compósito A, se tomaron dos muestras puntuales a 25 y 40 metros (teniendo en cuenta que la trinchera 1 se extendía 90 metros en dirección norte). Una muestra compósito que abarcó desde los 15 hasta los 40 metros, partiendo del pozo 35 y dirección norte.

Siguiendo esta línea de trabajo y según se muestra en la Tabla 2.1, se elaboraron el Compósito B (la suma de dos muestras) y el Compósito C (la unión de dos muestras puntuales a dos profundidades diferentes).

**Tabla 1:** Distribución de los tipos tecnológicos por trincheras.

<b>Trinchera</b>	<b>Tipo tecnológico</b>	<b>Muestra.</b>	<b>Perfil</b>	<b>Entre los Pozos</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Longitudes</b>
T1	Tipo A	TR1 - CA-01	44	PE 35- PE 18	0.4m – 1.4m	Puntualmente a los 25 metros
T1	Tipo A	TR1 - CA-02	44	PE 35- PE 18	0.4m - 1.4m	Puntualmente a los 40 metros
T1	Tipo A	TR1 – CA- COMP	44	PE 35- PE 18	0.3m - 1.4m	Desde los 15 y hasta los 40 metros
T1	Tipo B	TR1 – CB – M1	44	PE 35- PE 18	4.0m - 7.0m	Desde los 70 y hasta los 80 metros
T1	Tipo B	TR1 – CB – M2	44	PE 35- PE 18	4.0m - 7.0m	Desde los 35 y hasta los 65 metros
T2	Tipo C	TR2 – CC – M1	22	P E8 - PE 40	3.0m - 4.5m	Puntualmente en el pozo 8
T2	Tipo C	TR2 – CC – M2	22	P E8 - PE 40	4.5m – 6.0m	Puntualmente en el pozo 8

Las trincheras fueron abiertas con una retroexcavadora Hyundai, (Ver Figura 2.7).



**Figura 2.7:** a) Retroexcavadora en operaciones, b) Destape de la trinchera 1 (T1).

Para poder acceder a los diferentes tipos tecnológicos primero fue necesario realizar un destape de la capa de suelo y gramíneas que existe en el yacimiento.

El tipo de muestreo empleado fue el muestreo por surcos (ver Figura 2.8), desde la superficie y despreciando la capa de suelo, hasta la base, ya que a partir de este tipo de muestreo se abarca toda la potencia del corte. Se aplicaron siete surcos, las muestras de éstos fueron mezcladas para constituir una muestra compuesta homogénea de 20 kg.



**Figura 2.8:** Surcos en la pared de la trinchera (T1).

El total de muestras acumuladas se trasladó hasta la Universidad Central de las Villas, lugar desde donde se distribuyeron a los diferentes laboratorios donde fueron analizadas.

## 2.4 Preparación de las muestras y realización de los ensayos.

### 2.4.1 Análisis termo – gravimétrico (ATG)

Las muestras tomadas del yacimiento se almacenaron en bolsas y sacos rotulados (Figura 2.9) para su correcta identificación y fueron trasladados del yacimiento a la fábrica de cemento de Siguaney, Sancti Spiritus; donde se hizo el cuarteo de las muestras para llenar dos bandejas con 15 kg de muestra lo más homogénea y representativamente posible del compósito muestreado (Figura 2.10)



**Figura 2.9:** Bolsa rotulada e identificada con muestra proveniente del yacimiento



**Figura 2.10:** Bandeja con 15 kg de muestra

Este proceso se efectuó para cada uno de los sacos y posteriormente se pasó al secado de cada bandeja a una temperatura de 200° C durante 24 horas en una estufa marca **Controls** (Figura 2.11) para eliminar todo resto de humedad del material. Pasadas las 24 horas se sacó de la estufa y se dejó enfriar en una desecadora de vacío con gel de sílica. Luego de enfriarse la muestra se pasó a la molienda de cada una de las bandejas por separado, limpiándose el molino antes de cambiar de muestra evitando alteraciones en los ensayos. La molienda se realizó en un molino de anillos (Figura 2.12) por un minuto y se almacenó en bolsas pequeñas rotuladas con las especificaciones de la muestra. Para el análisis del comportamiento térmico mediante

análisis termogravimétrico (ATG) se usó un instrumento Mettler-Toledo TGA/SDTA 851, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min desde 30 °C hasta 1000 °C.



**Figura 2.11:** Estufa CONTROLS usada en el secado de muestras



**Figura 2.12:** Molino de anillos usado en la molienda de muestras

#### **2.4.2 Difracción de Rayos X (DRX)**

El análisis preliminar de la composición mineralógica a partir de los resultados de la difracción de rayos X se realizó utilizando el software HighScore Plus 3.0.2 (2011), mediante subrutinas programadas para la identificación de fases minerales utilizando las bases de datos PDF 2 (2004) y COD (2015), teniendo en cuenta la composición química de las muestras. El difractograma se realizó empleando un difractómetro Panalytical Xpert Pro MPD, con radiación  $\text{CuK}\alpha$  y una rejilla de divergencia de  $0,5^\circ$ . Las muestras fueron analizadas entre los  $4$  y los  $70^\circ$  ( $2\theta$ ), a un paso angular de  $0,017^\circ$  y un tiempo por paso de 80 segundos.

#### **2.4.3 Calorimetría isotérmica.**

Para los ensayos de calorimetría isotérmica se prepararon pastas de 100 % cemento CPO y pastas de 70 % CPO y 30 % arcilla calcinada de Yaguajay con una relación

agua / sólido = 0,45. Fueron mezclados aproximadamente 40 g de pasta a 1600 rpm durante dos minutos empleando una hélice de cuatro palas y 10 g de cada mezcla fueron colocados en frascos de vidrio, los cuales se cerraron y fueron puestos en el calorímetro. Se realizaron lecturas durante 3 días. Se utilizó cemento Portland (P – 35). También se empleó un procedimiento desarrollado por investigadores de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, en conjunto con la Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza; los cuales proponen una técnica rápida, relevante y confiable más conocido como R<sup>3</sup>. Se prepararon pastas  $Ca(OH)_2$  / Puzolana utilizando un 30 % de sustitución del  $Ca(OH)_2$  por arcilla calcinada y una relación agua / sólido = 1,2 para asegurar en cada sistema un exceso de agua para la reacción de hidratación, y obtener además una buena operabilidad de las pastas. Alrededor de 110 g de pasta fueron mezclados a 1600 rpm durante dos minutos utilizando una hélice de cuatro palas y 15 g de cada mezcla se colocaron en frascos de vidrio, las cuales se cerraron y posteriormente fueron colocadas en el calorímetro. Se ajustaron los niveles de sulfato y álcalis para reproducir el ambiente de la reacción de hidratación de la mezcla, la solución de poros del cemento y asegurar la formación de los productos de reacción y de las fases ettringita y Afm. Se realizaron lecturas durante 5 días.

Se empleó un calorímetro TAM AIR 3238 de la firma Thermometric (Figura 2.13). Primeramente el equipo se calibró para una escala de 600 mW, a una temperatura de 30°C. Agua destilada fue utilizada como referencia para cada una de las muestras y lecturas cada 60 segundos fueron tomadas usando un ordenador conectado al equipo. Las curvas de flujo de calor registradas fueron normalizadas a la masa de puzolana e integradas para convertirlas en curvas de calor total liberado en el tiempo.



**Figura 2.13** Calorímetro TAM AIR

#### 2.4.4 Ensayos de resistencia a la compresión.

La arcilla necesaria para elaborar el mortero normalizado se tomó de la calcinada y molida para la prueba de calorimetría, este mortero se hizo con una sustitución del 30% de cemento P-35 por arcilla calcinada a 750, 800 y 850 ° C, lo que significa que se elaboró el mortero con 315 g de cemento P-35, 135 g de arcilla calcinada, una bolsa con 1350 g de arena normalizada, 225 ml de agua y 2.2 g de plastificante Sika Plast para alcanzar la fluidez requerida, el gramaje de estos materiales se determinó en una balanza marca YP5001 (Figura 2.14) con capacidad de 5 kg. Primero se vertió en un vaso, el cemento con la adición de arcilla calcinada y el agua, se colocó el vaso y se comenzó el proceso de mezclado en una mezcladora (Figura 2.15) a la cual a los 30 segundos se le agregó la arena normalizada y se esperó a que concluyera el proceso. Luego de tenerse el mortero, se conformaron las probetas con el mortero y se compactó en una compactadora de golpes (Figura 2.16), se taparon los moldes con las probetas por un período de 24 horas. Transcurrido ese tiempo se separaron las probetas de los moldes, se identificaron con ayuda de un rotulador permanente cada una con el tipo tecnológico al cual pertenecían, temperatura a la que se calcinó la arcilla, edad a la que se ensayarían las probetas y se colocaron en recipientes con agua para el curado del mortero. Pasado el tiempo en que debía ensayarse la resistencia de los morteros, se sacaron del agua, dejaron escurrir el agua superficial y comenzaron a ensayarse en una prensa (Figura 2.17).



**Figura 2.14:** Balanza YP5001 para el pesaje de los materiales .



**Figura 2.15:** Mezcladora



**Figura 2.16:** Compactadora de golpes.



**Figura 2.17:** Prensa usada para ensayos de resistencia a compresión

## 2.5 Conclusiones parciales del capítulo.

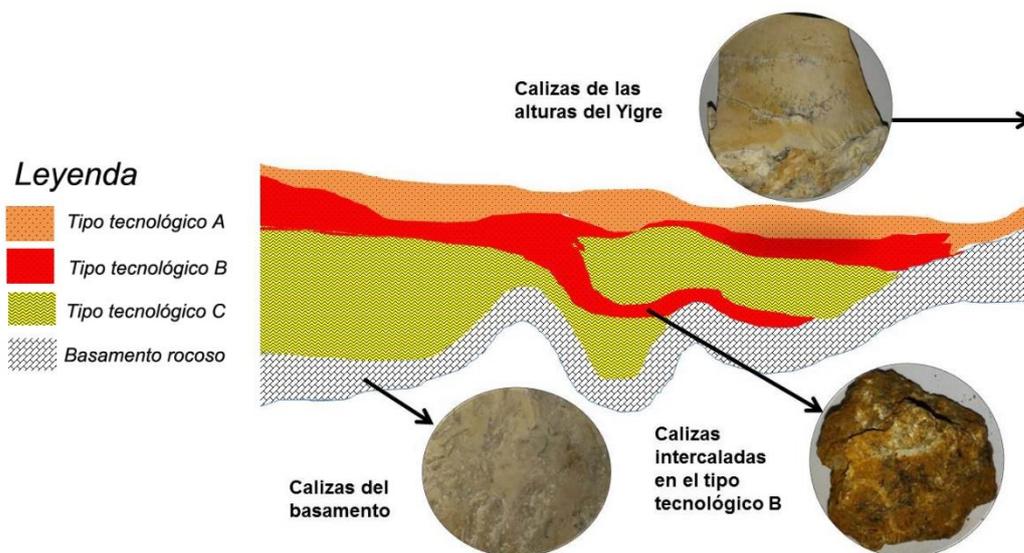
- ✓ Fue necesario realizar un muestreo representativo en forma de surcos transversales de cada una de las capas con los distintos tipos tecnológicos de arcilla del yacimiento Yaguajay.
- ✓ Se utilizaron técnicas analíticas como: Análisis Termo-Gravimétrico (ATG), Difracción de Rayos X (DRX), calorimetría isotérmica (protocolo R<sup>3</sup>), para la caracterización de los tres tipos tecnológicos.
- ✓ Para los ensayos de resistencia a la compresión de las probetas confeccionadas con el material calcinado se siguió lo establecido en la norma (NC506:2007).

## CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 3.1 Introducción.

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el capítulo anterior, los que permiten elaborar la caracterización química y mineralógica de las arcillas del yacimiento Yaguajay, conocer la reactividad puzolánica y las temperaturas óptimas de calcinación de cada tipo tecnológico, así como la resistencia a compresión de los morteros normalizados elaborados con sustitución del 30 % de cemento P-35 por productos de calcinación a diferentes temperaturas de cada uno de los tipos tecnológicos pertenecientes al yacimiento arcilloso Yaguajay .

### 3.2 Influencia de la génesis geológica del Yacimiento Yaguajay sobre la composición mineralógica.



**Figura 3.1: Distribución de las calizas y tipos tecnológicos en el yacimiento Yaguajay.**

La génesis geológica del yacimiento definida como una redeposición, en el capítulo II de este trabajo, marca un punto importante a la hora de su análisis. La formación de lagunas interiores en la zona Yaguajay propició la precipitación de fases minerales carbonatadas lo que constituyen un factor negativo a la hora de la explotación del yacimiento. El carbonato formado bajo estas condiciones es la calcita y está distribuida en forma de caliza en toda el área de estudio, como se puede apreciar en la figura 3.1. El propio proceso de redeposición propició la alternancia de capas ricas en fragmentos de carbonato (Tipo B) y capas ricas en arcillas contaminadas con óxidos de hierro y aluminio. Otro factor a tener en cuenta es la meteorización posterior al emplazamiento

de las arcillas, que ha propiciado la desintegración de las calizas aportando los valores de óxidos y carbonato que hoy presenta el cuerpo arcilloso.

### **3.3 Caracterización química y mineralógica de las arcillas del yacimiento Yaguajay.**

#### **3.3.1 Resultados de la difracción de Rayos X.**

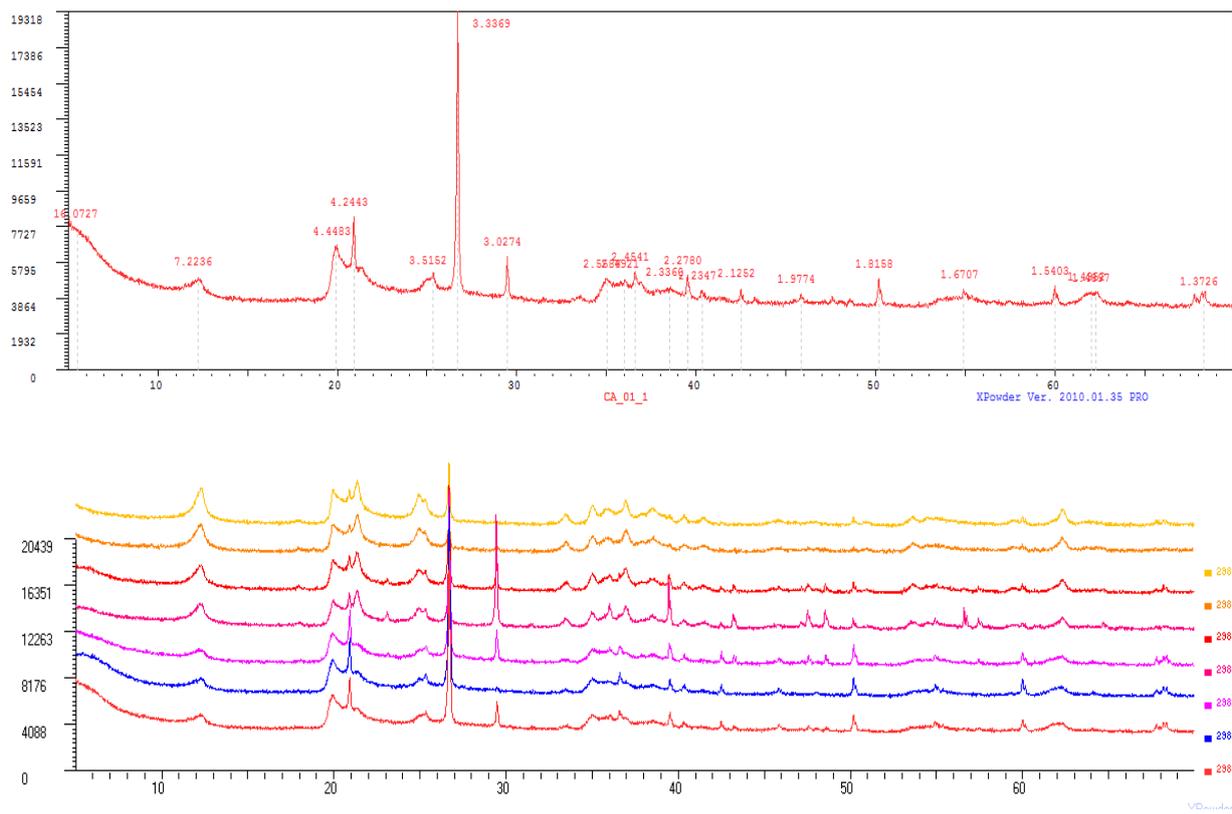
La difracción de Rayos X (Ver anexo 1) arrojó como resultado una paragénesis general compuesta por: caolinita y nacrita, con vermiculita ocasional representando al grupo de las arcillas. Se encontró además cuarzo, goethita, calcita, birnessita y ocasionalmente anatasa y hematita como minerales acompañantes (ver tabla 3.1).

Los reflejos más intensos, que son los de cuarzo, solapan a los minerales de grupo de la arcilla que poseen una menor cristalinidad (ver figura 3.2a). La distribución de las distintas fases minerales encontradas es bastante homogénea en los tres tipos tecnológicos (Ver figura 3.2 b).

El cuarzo y la calcita acompañan a los minerales del grupo de la caolinita en los tres tipos tecnológicos.

El cuarzo es un mineral acompañante común en los depósitos de arcillas, probablemente sea redepositado al igual que el cuerpo arcilloso que se depositó en el Yacimiento Yaguajay. La calcita puede ser el resultado de la desintegración de las calizas que rodean al cuerpo arcilloso, pero la principal fuente probablemente sea la propia precipitación de carbonato cálcico en condiciones marinas de sedimentación.

La propia desintegración y meteorización de las calizas que rodean al cuerpo de arcillas pudo liberar los óxidos de manganeso y hierro presente en las dendritas presentes en las mismas para dar al traste con la formación de birnessita, anatasa, goethita y hematita.



**Figura 3.2 a (arriba) y b (abajo): Resultados de la Difracción de Rayos X (DRX)**

**Tabla 3.1:** Resultados de la Difracción de Rayos X para cada muestra.

<b>Muestra</b>	<b>Minerales arcillosos</b>	<b>Minerales no arcillosos</b>
<b>CA-01</b>	<b>Caolinita, Nacrita, Vermiculita</b>	<b>Cuarzo, Calcita, Birnessita, Goethita,</b>
<b>CA-02</b>	<b>Caolinita, Nacrita</b>	<b>Cuarzo, Goethita, Fajausita</b>
<b>CA-COMP</b>	<b>Caolinita, Nacrita</b>	<b>Cuarzo, Calcita, Goethita, Anatasa</b>
<b>CB-01</b>	<b>Caolinita, Nacrita</b>	<b>Calcita, Cuarzo, Goethita, Birnessita</b>
<b>CB-02</b>	<b>Caolinita, Nacrita</b>	<b>Calcita, Cuarzo, Goethita</b>
<b>CC-01</b>	<b>Caolinita, Nacrita, Vermiculita</b>	<b>Goethita, Birnessita, Cuarzo, Calcita</b>
<b>CC-02</b>	<b>Caolinita, Nacrita</b>	<b>Cuarzo, Goethita, Hematita, Anatasa</b>

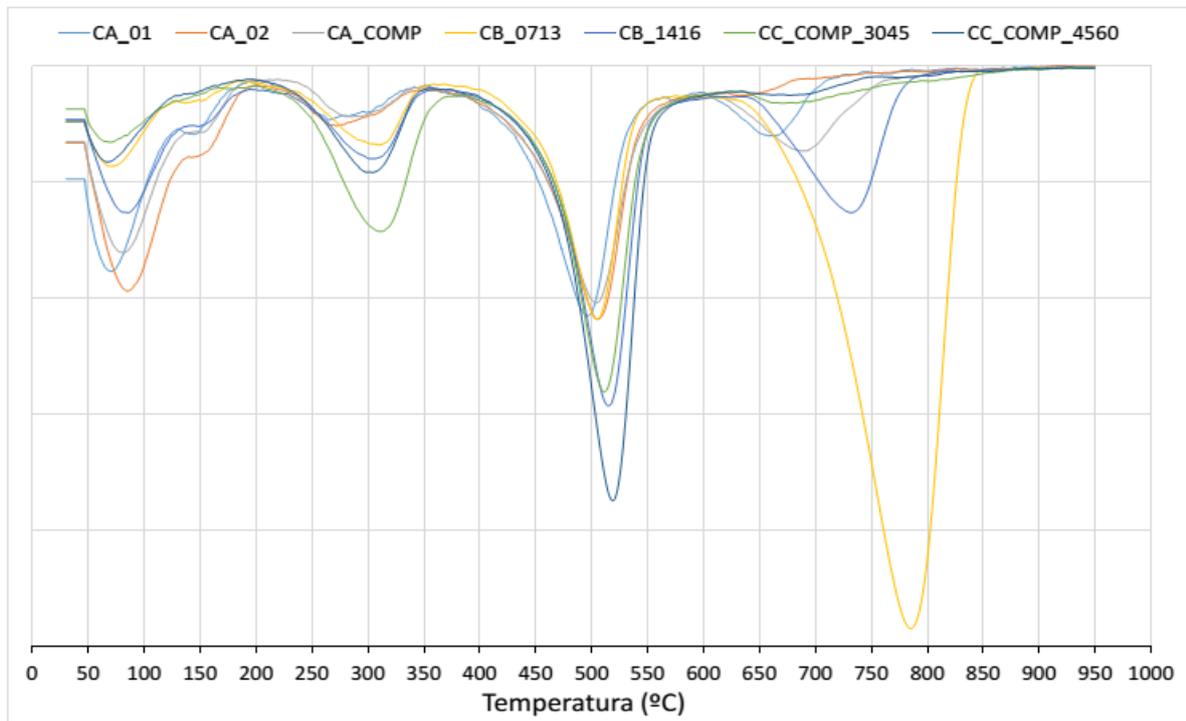
### 3.3.2 Caracterización química

**Tabla 3.2:** Resultados químicos de los pozos involucrados en las labores de muestreo.

No. Pozo.	Intervalo (m)		Pot. Útil (m)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	PPI
	D	H						
PE-18	0.20	1.90	1.70	40.98	21.94	3.03	1.04	12.93
PE-18	1.90	3.90	2.00	32.76	19.48	14.65	0.47	11.72
PE-18	3.90	5.90	2.00	36.58	23.98	2.77	0.34	13.52
PE-18	5.90	7.90	2.00	36.74	27.64	2.52	0.28	13.75
PE-18	7.90	9.90	2.00	36.02	27.32	1.01	0.23	13.13
PE-18	9.90	12.20	2.30	35.74	26.67	1.77	0.29	13.37
PE-18	12.20	14.00	1.80	39.88	28.50	1.89	0.44	13.62
PE-18	14.00	15.80	1.80	37.96	30.02	0.88	0.49	13.49
PE-18	15.80	17.80	2.00	36.50	28.63	0.63	0.39	13.11
PE-18	17.80	19.80	2.00	36.58	30.19	0.50	0.34	13.09
PE-18	19.80	22.00	2.20	35.06	27.33	0.76	0.30	12.85
PE-35	0.20	2.30	2.10	42.18	18.12	5.60	0.58	17.97
PE-35	2.30	4.30	2.00	31.42	17.73	10.85	0.32	21.70
PE-35	4.30	6.80	2.50	37.34	26.29	1.39	0.19	13.11
PE-35	6.80	9.30	2.50	39.18	26.92	1.77	0.20	13.17
PE-35	9.30	11.20	1.90	39.96	24.57	1.44	0.35	12.82
PE-8	0.20	3.00	2.80	31.82	14.16	18.03	0.47	23.29
PE-8	3.00	4.10	1.10	35.38	25.31	1.89	0.12	13.81
PE-8	4.10	5.30	1.20	40.84	28.91	0.63	0.10	13.82
PE-8	5.30	6.00	0.70	34.48	29.08	0.06	0.16	14.24
PE-8	6.00	8.00	2.00	38.62	27.36	0.25	0.18	13.95
PE-8	8.00	9.00	1.00	36.98	25.46	0.75	0.13	13.70
PE-8	9.00	10.00	1.00	33.22	24.85	0.19	0.08	13.44
PE-8	10.00	12.50	2.50	40.74	26.29	0.76	0.38	13.77
PE-8	12.50	14.50	2.00	42.70	27.85	0.63	0.30	13.93
PE-8	14.50	16.50	2.00	43.40	26.24	1.14	0.28	13.76
PE-40	0.20	1.50	1.30	20.12	10.00	31.02	0.35	30.96
PE-40	1.50	3.00	1.50	33.14	18.85	12.82	0.49	20.14
PE-40	3.00	5.00	2.00	37.04	25.58	4.80	0.25	15.34
PE-40	5.00	7.00	2.00	41.72	26.70	0.13	0.37	13.08
PE-40	7.00	8.60	1.60	43.24	25.64	1.51	0.70	13.89

Estos resultados químicos (ver tabla 3.2) son la base para la delimitación de los tipos tecnológicos. En todos los casos los valores más elevados de CaO pertenecen al tipo tecnológico B.

### 3.3.3 Resultados de análisis termo-gravimétrico (TGA).

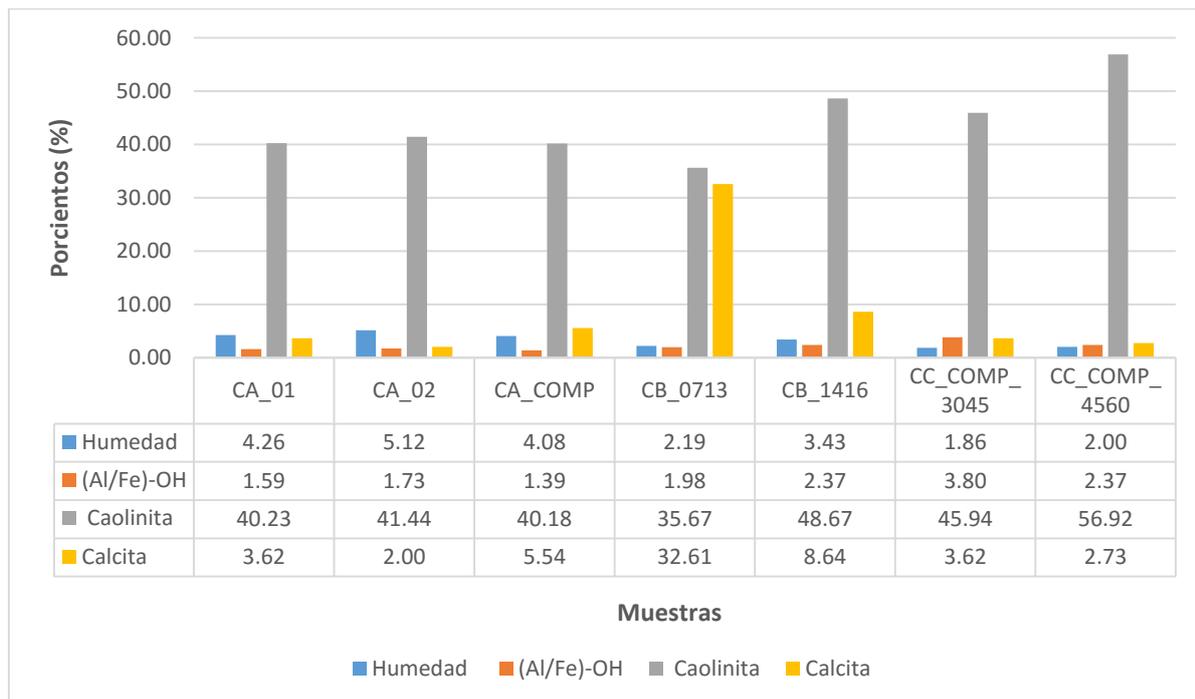


**Figura 3.3:** gráfico con las curvas TGA de los diferentes compósitos del yacimiento Yaguajay.

En las curvas de TGA (figura 3.3), puede verse que entre 50 y 180 °C existen efectos endotérmicos y de pérdida de masa asociado a la deshidratación del sistema, probablemente pérdida de agua no estructural. En ese sentido el tipo tecnológico A, al estar más cerca de la superficie se encuentra más hidratado, ocurriendo todo lo contrario con tipo C que es el más profundo y que muestra el efecto endotérmico menos pronunciado. Este efecto va seguido de otros menos intensos entre los 250 y 370 °C, que puede ser asignado a la descomposición de fases de hierro y aluminio, en este caso los mayores contenidos de óxidos corresponden al tipo tecnológico C. La pérdida de masa en el rango de los 370 a los 570 °C y con una temperatura de pico cercana a los 520 °C, se debe en su mayor parte a la deshidroxilación de fases del grupo de la caolinita y en este caso los contenidos de caolín aumentan en profundidad siendo el tipo C el más enriquecido. También se observa un efecto endotérmico pronunciado en el rango de 650 a 850 °C relacionado con la descarbonatación de la calcita. Es de mencionar que se ha reportado que la temperatura de descarbonatación puede estar por debajo de los 700 °C. En ese

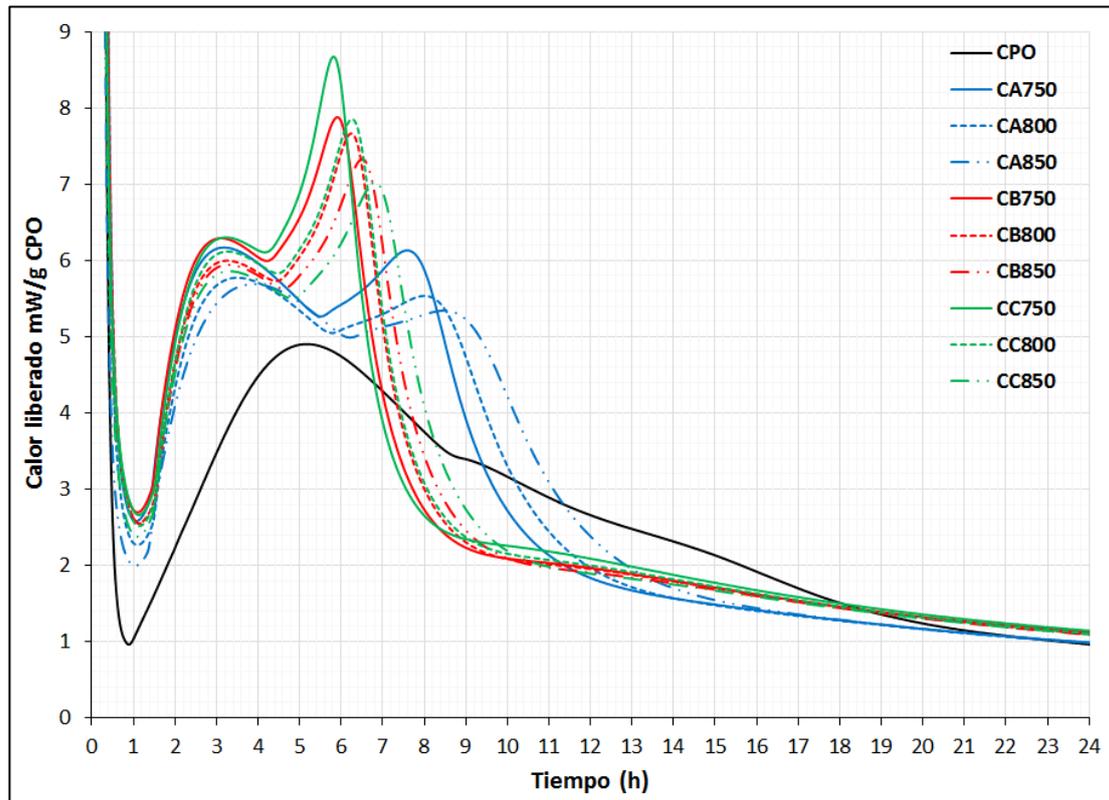
sentido los mayores contenidos de calcita están ubicados en el tipo tecnológico B, que es donde se concentran los fragmentos de calizas alteradas superficialmente a margas.

La figura 3.4 muestra una cuantificación en porcentajes de las diferentes asignaciones: efectos de pérdida de agua absorbida, descomposición de las fases de óxidos de aluminio y hierro, desidroxilación de la caolinita y finalmente descarbonatación de la calcita, de las diferentes muestras compósitos.



**Figura 3.4:** Cuantificación de fases minerales y humedad a partir del TGA.

### 3.4 Evaluación de la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la reactividad puzolánica en los productos de calcinación.



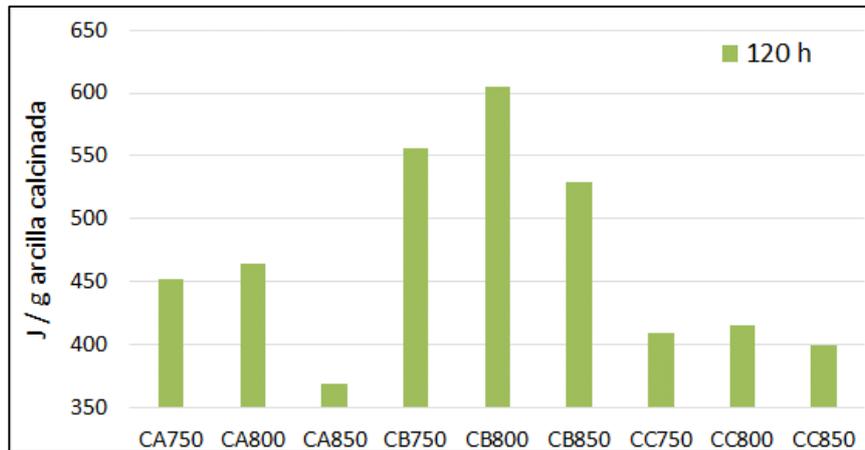
**Figura 3.5:** Resultados de la calorimetría isotérmica.

Las diferentes curvas muestran una tendencia a la formación temprana de productos hidratados que tienen una relación directa con la liberación de calor hasta aproximadamente las 3 horas. El proceso ocurre antes que los sistemas tradicionales y se ha tomado en la figura 3.4 un patrón de CPO como referencia. También se puede decir que los productos de hidratación se han formado más rápido. La formación de etringita a partir del sulfato presente en el sistema ocurre a partir de las 4 horas aproximadamente. Por su parte los ensayos de  $R^3$  muestran la reactividad puzolánica de los diferentes compósitos siendo el B el más reactivo y el C el menos, ver figura 3.5.

La utilización de mezclas de arcillas activadas térmicamente, ha favorecido la formación temprana de productos de hidratación, y basado en la observancia de una mayor liberación de calor en el sistema se asume una mayor reactividad puzolánica de los mismos. En el caso del compósito B se puede asumir que, la presencia de altos valores de calcita, dados por los numerosos fragmentos de rocas calizas diseminados en el cuerpo arcilloso, que en muchos casos están alterados a margas y

con tamaños de grano fino, está influyendo en los valores de reactividad puzolánica del sistema.

Como se verá en el epígrafe 3.5, estos mismos valores de calcita favorecen la disminución de la superficie específica y por tanto cae la resistencia a la compresión del sistema.



**Figura 3.6:** Resultados de ensayo R<sup>3</sup>.

En cuanto a la temperatura de calcinación se puede decir que según la figura 3.6 en todos los tipos tecnológicos se evidencia una disminución de la reactividad a partir de los 800 °C, esto causado por los contenidos de calcita.

En la investigación de (Almenares, 2015) se plantea que la presencia de calcita en el sistema tiene dos efectos fundamentales. El primero está relacionado con una secuencia de transformaciones que forman silicato de calcio y aluminio con una estructura más compacta y de menor superficie interna, provocado por los mecanismos de nucleación y recristalización. En el intervalo de temperatura entre 350 y 700 °C, la caolinita se descompone para formar metacaolín, mientras que alrededor de 700 °C comienza la descarbonatación de la calcita para formar CaO, proceso que puede extenderse hasta alrededor de los 900 °C. La interacción entre ambos productos de descomposición provoca la formación de gehlenita y wollastonita como fases intermedias entre los 800 y los 900 °C, las cuales en presencia de aluminio y silicio son inestables y reaccionan para formar anortita a temperaturas entre los 900 y los 1100 °C. En ambos casos se ha reportado que estos fenómenos pueden ocurrir a más bajas temperaturas. En segundo lugar la calcita puede actuar como fundente durante la calcinación. En las arcillas con contenidos relativamente altos de carbonato de calcio, puede provocar que la fusión comience a temperaturas cercanas a los 800

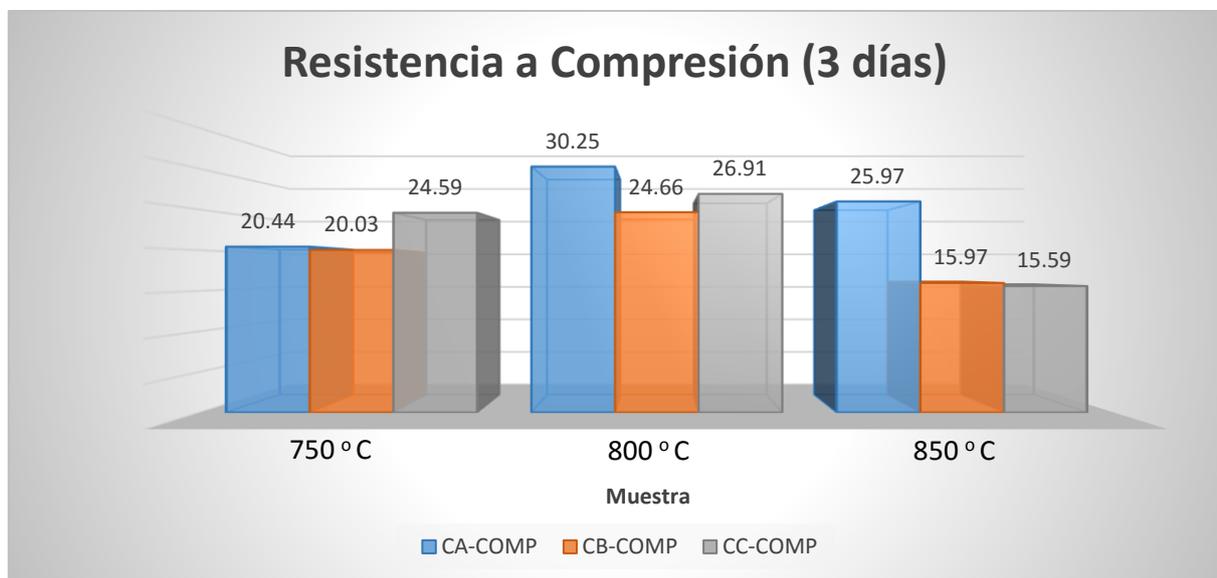
°C, por lo que el crecimiento del tamaño de partículas de arcilla calcinada podría estar relacionada también con los fenómenos de sinterización.

Es criterio del autor que para la calcinación no se debe sobrepasar los 800 ° C para lograr los valores óptimos de reactividad.

### 3.5 Evaluación de la resistencia a la compresión de los morteros elaborados con productos de calcinación de las arcillas del yacimiento Yaguajay.

#### 3.5.1 Resultados de la resistencia a compresión a los 3 días.

Los tres tipos tecnológicos calcinados a las temperaturas de 750, 800 y 850 ° C alcanzaron valores similares de resistencia a compresión a los 750 ° C en las capas A y B, con un aumento mayor en el compósito correspondiente a la capa C, mientras que en las temperaturas de 800 y 850 ° C el compósito que mostró los mejores resultados fue el correspondiente a la capa A, la cual alcanzó su resistencia mayor a 800 ° C. Por lo anteriormente analizado es el mortero elaborado con la muestra CA-COMP calcinada a 800 ° C la de mayor resistencia a la compresión a los tres días.



**Figura 3.7:** Resultados de los ensayos de resistencia a los 3 días.

### 3.5.2 Resultados de la resistencia a compresión a los 7 días.

A los 7 días la resistencia a compresión alcanzó los mayores valores en los morteros elaborados con el compuesto calcinado perteneciente a la capa A, así se comportó en cada una de las temperaturas de calcinación, siendo el mortero con sustitución del 30 % de cemento P-35 por la muestra CA-COMP calcinada a 800 °C el más resistente de cada una de las series ensayadas a compresión a los 7 días.

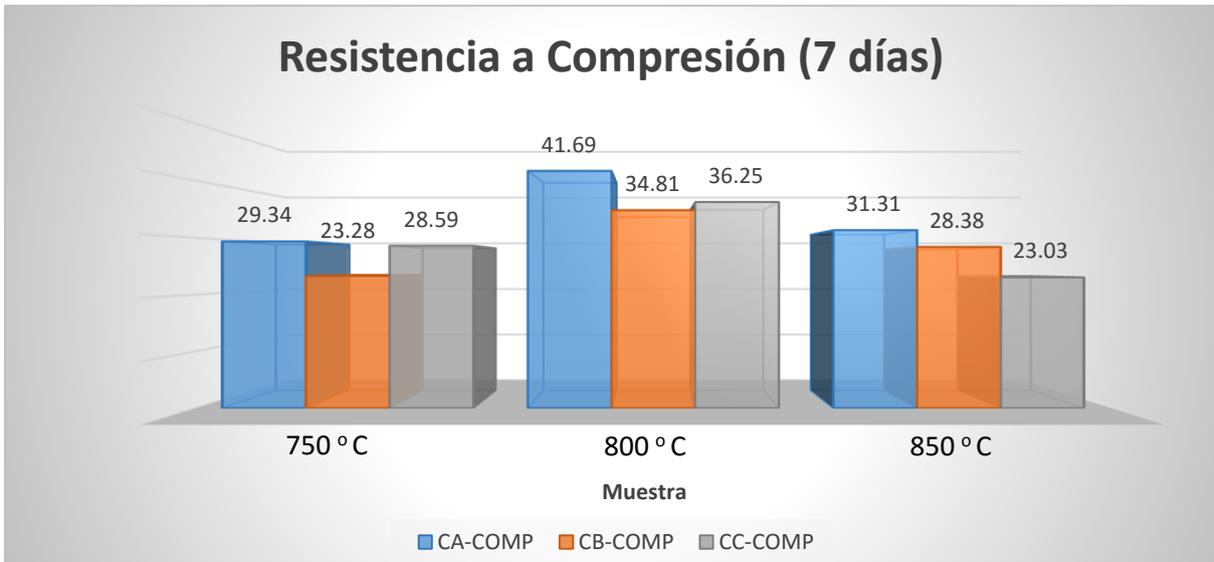


Figura 3.8: Resultados de los ensayos de resistencia a los 7 días

En todos los casos y teniendo en cuenta lo discutido anteriormente en el epígrafe 3.3 la presencia de calcita favorece la pérdida de la resistencia a la compresión a partir de los 800 °C.

### 3.5.3 Resultados de la resistencia a compresión a los 28 días.

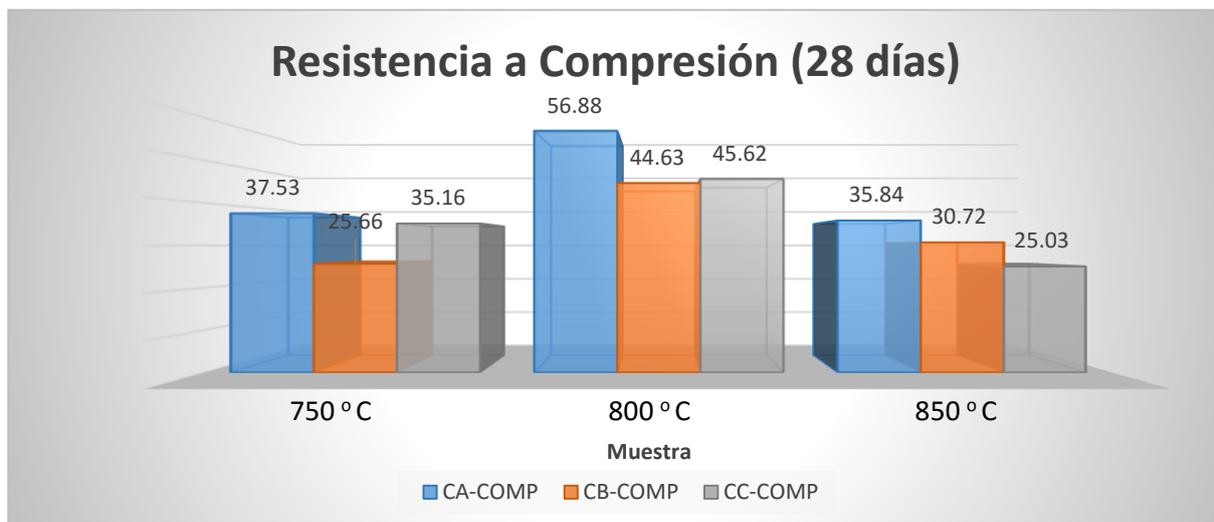


Figura 3.9: Resultados de los ensayos de resistencia a los 28 días

Como valoración de la resistencia mecánica a la compresión a la edad de 28 días, se observa el incremento de las resistencias en cada una de las muestras y temperaturas en comparación a las alcanzadas en las muestras ensayadas a los 7 días, siendo mayores estos incrementos en los compósitos calcinados correspondiente a la capa A (CA-COMP), donde vale señalar la temperatura de calcinación de 800 ° C como la que alcanza mejores resultados en ensayos de resistencia a la compresión.

### **3.6 Conclusiones parciales del capítulo.**

- Se identificaron como fases minerales principales las siguientes: caolinita, calcita, nacrita, cuarzo, goethita, hematita, birnessita y anatasa.
- Las diferentes curvas muestran una tendencia a la formación temprana de productos hidratados que tienen una relación directa con la liberación de calor hasta aproximadamente las 3 horas, siendo el contenido de calcita y la temperatura factores a tener en cuenta a la hora de la calcinación
- En todos los casos evaluados (compósitos y temperaturas) se obtuvieron valores de resistencia a la compresión dentro de la norma. Sin embargo hay que tener en cuenta que temperaturas superiores a los 800 ° C afectan el sistema debido a los altos contenidos de calcita presentes en los tipos tecnológicos.

## CONCLUSIONES

1. Se logró sistematizar el conocimiento sobre el empleo de arcillas calcinadas como materiales cementicios suplementarios en la fabricación de cementos de bajo carbono.
2. Se determinó que los elevados valores de carbonato presentes en el cuerpo arcilloso se deben: primero, a la propia génesis geológica del Yacimiento Yaguajay, que ha propiciado la precipitación de fases carbonatadas; y segundo, a la intensa meteorización que sufrieron las calizas que rodean al cuerpo de arcillas.
3. Se caracterizó química y mineralógicamente los tipos tecnológicos de arcilla del yacimiento Yaguajay obteniendo como paragénesis fundamental la constituida por: caolinita y nacrita como representantes del grupo de la caolinita, y cuarzo, hematita, calcita, birnessita, anatasa y goethita como fases acompañantes.
4. Se evaluó la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la reactividad puzolánica producto de la calcinación de los diferentes tipos tecnológicos obteniendo como resultados que el tipo tecnológico B es el más reactivo, al tiempo que la temperatura óptima de calcinación son los 800 °C.
5. Se evaluó la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la resistencia a la compresión de los morteros confeccionados con productos de calcinación de las arcillas del yacimiento Yaguajay, resultando en todos los casos valores dentro de la norma (NC95:2011), al tiempo que se establecieron los 800 °C como temperatura óptima de calcinación.

## RECOMENDACIONES

- Profundizar en los trabajos investigativos sobre los tipos tecnológicos de material arcilloso presentes en el yacimiento Yaguajay, debido a su posible explotación como material cementicio suplementario de buena reacción puzolánica y a la vez con capacidades de formar parte de morteros y hormigones de buena resistencia.
- Teniendo en cuenta que una variación de 50 ° C durante el proceso, puede cambiar significativamente los valores de resistencia a la compresión y reactividad puzolánica se propone estudiar a fondo el punto crítico de cambio de las mencionadas propiedades, dado que durante el proceso productivo se hace complejo controlar rangos tan pequeños de temperatura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aïtcin, P.-C. (2000). Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cement and Concrete research*, 30(9), 1349-1359.
- Almenares. (2015). *Evaluación de yacimientos arcillosos cubanos como fuente de materia prima para la producción de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- Alonso, S., & Palomo, A. (2001). Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide–metakaolin solid mixtures. *Cement and Concrete research*, 31(1), 25-30.
- Alujas, A. (2010). *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponentes*. (Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara.
- ANDERSEN, M. D., H.J. JAKOBSEN, AND J. SKIBSTED (2003). Incorporation of Aluminum in the Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) of Hydrated Portland Cements: A High-Field  $^{27}\text{Al}$  and  $^{29}\text{Si}$  MAS NMR Investigation. *Inorganic Chemistry*, 42.
- ANDRÉS, L. M. V. (2014). *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer-arcilla calcinada-caliza*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas., Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- AUTORES, C. D. (1992). *Léxico Estratigráfico de Cuba*. Primera Ed. Ciudad de la Habana: s.n.
- AUTORES, C. D. (2018). *Instructivo Técnico. Prueba Industrial de Producción de Cemento de Bajo Carbono LC3*. . Sancti Spiritus.
- Avet, F., Snellings, R., Alujas, A., Ben, M., & Scrivener, K. (2016). Development of a new rapid , relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete research*, 85, 1-11. doi: 10.1016/j.cemconres.2016.02.015
- Baronio, G., & Binda, L. (1997). Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and Building Materials*, 11(1), 41-46.
- Batista, R. (2007). *Valoración del Potencial de Los Recursos Minerales para la Industria del Cemento en Cuba*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, UCLV: Marta Abreu de Las Villas.
- Betancourt, S. (2012). *Cemento Portland Ordinario. Aglomerantes*.
- Brown, G. (1961). *The X-ray Identification and Clay Structures of Clay Minerals London*. London: Jarrold&Sons Ltd.
- CABRERA, E. (2015). Influencia de las características químico-mineralógicas de arcillas caoliníticas cubanas en la reactividad puzolánica de sus productos de calcinación. *Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas*.
- Castillo, R. (2010). *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*: Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas.
- Castillo, R. (2010). *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara.
- CEMBUREAU. (2013). *The role of cement in the 2050 low carbon economy*. Brussels, Bélgica.

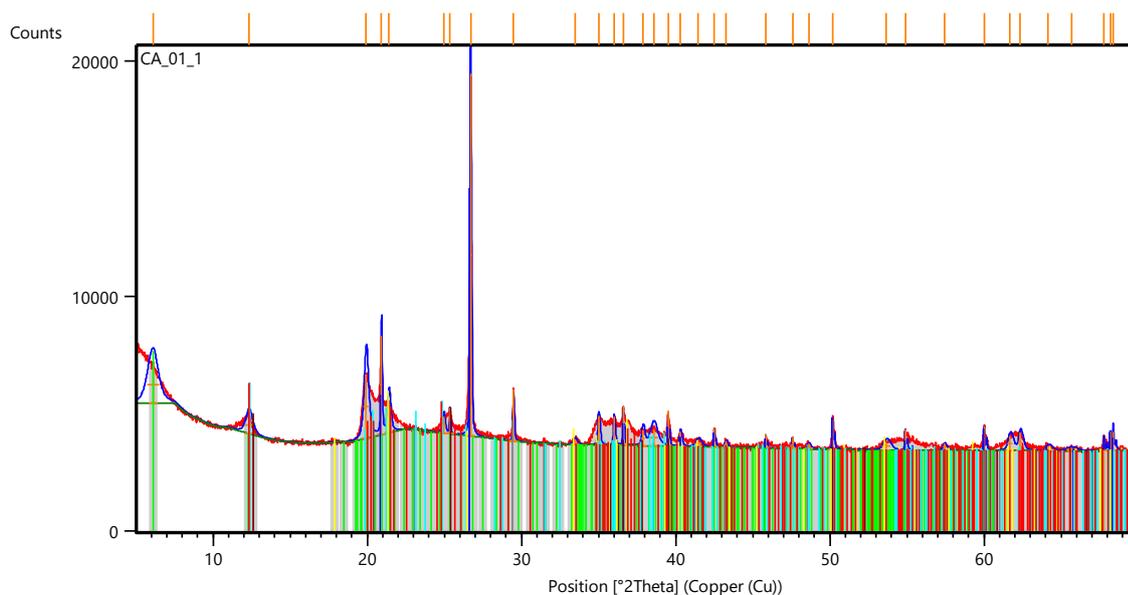
- CSI. (2010). Cement Industry Energy and CO2 Performance "Getting the Numbers Right". from World Business Council for Sustainable [www.wbcscement.org](http://www.wbcscement.org)
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An introduction to the rock-forming minerals* (Vol. 696): Longman Scientific & Technical Hong Kong.
- Dopico, J. J., Martirena Hernandez, F., Day, R. L., Middendorf, B., Gehrke, M., & Martinez, L. (2008). Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario. *Revista ingeniería de construcción*, 23(3), 171-178.
- Drits, V. (2003). Structural and chemical heterogeneity of layer silicates and clay minerals. *Clay Minerals*, 38(4), 403-432.
- Estopiñales, A. (2016). *Proyecto de norma cubana para la utilización de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario basadas en la modificación de las NC 527:2013 y NC 528:2013*. (Tesis de Diploma), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Fernández, L. (2009). *Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries*, in *Faculté Sciences et Techniques de L'Ingenieur*. Lausanne: École Polytechnique Federale de Lausanne.
- GALLO, R. (2010). Valoración del potencial de los recursos minerales para la industria del cemento en Cuba. *IGP, Instituto de reactivos y materiales, CEMVID*.
- GECEM. (2012). Anuario estadístico 2012. Diagnostico del Grupo Empresarial del Cemento.
- Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C., & Roussel, N. (2010). Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete research*, 40(5), 820-826.
- He, C., Osbaeck, B., & Makovicky, E. (1995). Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete research*, 25, 1691-1702.
- Hendriks, C. A., Worrell, E., De Jager, D., Blok, K., & Riemer, P. (1998). *Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry*. Paper presented at the Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies.
- IGP. (2010). *Arcillas caoliniticas cubanas. Estado Actual*.
- John, V. M. (2003). On the sustainability of concrete.
- MACPHEE D. E., S. S., LODEIRO I. G. (2010). Alternative Cementicious binders chemical perspectives.
- MARTÍNEZ, L. C. H., M. A. (2014). *Estudio y caracterización del residuo de la fabricación de tuberías en acero para determinar su uso en la producción de morteros y concretos*. Universidad de Cartagena.
- Martirena, F. (2004). *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa*. (Tesis doctoral), Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Martirena, F. (2011). *Context of Cementicious Materials in developing countries*. Paper presented at the Pre Congresural courses, Madrid, España.
- MARTIRENA, J. (2011). Reporte sobre Estudio de factibilidad para la producción de metakaolín en Cuba: Cuba.
- Massazza, F. (1976). Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements,. *ILCemento*, 1, 3-38.
- Massazza, F. (1993). Pozzolanic cements. *Cement and Concrete composites*, 15(4), 185-214.

- Méndez Herrada, I. (2015). *Evaluación de yacimientos arcillosos cubanos como fuente de materia prima para la producción de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- Murray, H. H. (2000). *Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview*.
- NAYA, S. (2007). Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. *Bulletin of Materials. Science*, 30(3), 235-238.
- NAZCO, K. (2014). Evaluación de arcillas multicomponentes cubanas como fuente de materia prima para la producción de materiales cementicios suplementarios: Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- NC95:2011. *Cemento Portland. Especificaciones. Impreso en Cuba (2011). Oficina Nacional de Normalización (NC)*
- NC506:2007. *Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica. Impreso en Cuba (2007): Oficina Nacional de Normalización (NC)*.
- ONEI. (2012). INDUSTRIA MANUFACTURERA.
- Pane, I., & Hansen, W. (2005). Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete research*, 35 1155-1164.
- PEÑALVER HERNÁNDEZ, L. L., LAVANDERO ILLERA, R. y BERRIENTO DUARTE, A. (1997). PEÑALVER HERNÁNDEZ, L.L., LAVANDERO ILLERA, R. y BERRIENTO DUARTE, A., 1997. El sistema cuaternario. [www.redciencia.cu](http://www.redciencia.cu), pp. 14.
- Poon, C.-S., Lam, L., Kou, S., Wong, Y.-L., & Wong, R. (2001). Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement and Concrete research*, 31(9), 1301-1306.
- Quintana. (2005). RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS Y LOS COMPONENTES PUZOLÁNICOS DE LOS SEDIMENTOS PAMPEANOS. *Faculta de Ciencias Exactas, Física y Naturales. Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba*, 283.
- Rabilero, A. (1993). Una contribución al estudio del aglomerante cal-puzolana. Reporte al IX Forum de Ciencia y Técnica. *Havana. Cuba*.
- Ramachandran, V. S., & Beaudoin, J. J. (2000). *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications*: Elsevier.
- Rebelde, J. (2007). Zeolita: ¿Dónde está el mineral del siglo, *Juventud Rebelde*.
- RODRÍGUEZ, C. (2014). Evaluación de propiedades físico-mecánicas en morteros de albañilería a partir de cementos con sustituciones de clínquer por arcillas calcinadas y caliza. *Departamento de Ingeniería Civil. Santa Clara, Facultad de Construcciones. Universidad Central Marta Abreu de las Villas*.
- Sabir, B. B., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete composites*, 23(6), 441-454. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Samet, B., Mnif, T., & Chaabouni, M. (2007). Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement *Cement and Concrete Composites, In Press, Corrected Proof*.
- SCRIVENER, K. (2007). Durability course. EPFL, Switzerland.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete research*, 41(7), 642-650.

- Shi, C., & Day, R. L. (2001). Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans. *Cement and Concrete research*, 31(5), 813-818.
- Siverio Fernández, S. (2016). *Evaluación de arcillas de bajo grado de caolinita del depósito El Yigre para la producción de cemento de bajo carbono*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.
- Snellings, R. (2011). *Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites*.
- Souza, P. S. L., & Dal Molin, D. C. C. (2005). Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity. *Cement and Concrete research*, 35(10), 1993-1998. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.012>
- Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry*. Thomas Telford.
- Tironi, A. (2013). *Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica*. (Tesis Doctoral), Cuba.
- Todor, D. N. (1976). *Thermal analysis of minerals*: Abacus press.
- Vizcaíno, L. M. (2014). *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer - arcilla calcinada -caliza*. (Tesis para optar por el título de Doctor en Ciencias), Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara.

# ANEXOS

## Difractograma Muestra CA-01



### Lista de reflejos

Pos. [ $^{\circ}2\theta$ .]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}2\theta$ .]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
6.0929	1578.68	0.8029	14.50606	10.22
12.3418	713.61	0.5353	7.17190	4.62
19.9350	2699.24	0.3346	4.45397	17.47
20.9189	4185.23	0.0836	4.24665	27.09
21.4166	1326.41	0.2342	4.14908	8.59
24.9505	685.96	0.2007	3.56886	4.44
25.3561	1136.58	0.0502	3.51268	7.36
26.6981	15447.01	0.0836	3.33908	100.00
29.4709	2166.26	0.0669	3.03093	14.02

---

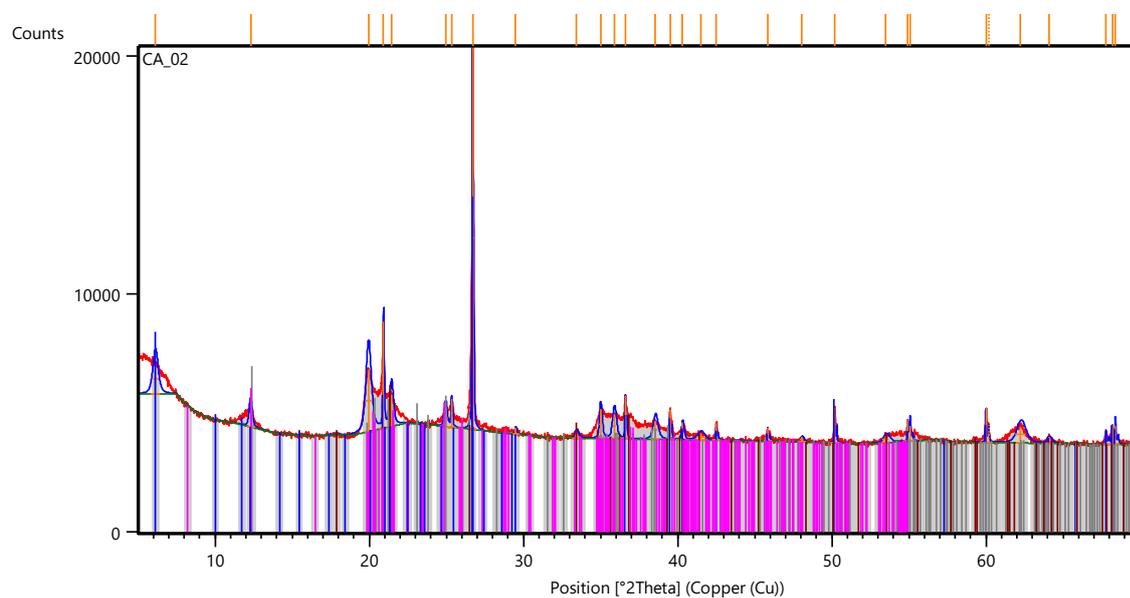
33.4590	220.06	0.2676	2.67823	1.42
35.0077	1228.47	0.1338	2.56321	7.95
36.0117	1230.46	0.1004	2.49402	7.97
36.5961	1661.95	0.0669	2.45553	10.76
37.8833	665.62	0.2007	2.37500	4.31
38.5692	729.45	0.5353	2.33433	4.72
39.5207	1501.66	0.0502	2.28029	9.72
40.3122	638.18	0.1338	2.23733	4.13
41.4675	273.39	0.4015	2.17763	1.77
42.4930	760.00	0.0669	2.12742	4.92
43.2527	263.11	0.1673	2.09180	1.70
45.8495	578.48	0.0612	1.97755	3.74
47.5816	489.39	0.0612	1.90952	3.17
48.6185	236.71	0.2007	1.87275	1.53
50.1857	1291.05	0.0836	1.81788	8.36
53.6578	353.07	0.5353	1.70815	2.29
54.8975	878.85	0.0836	1.67248	5.69
57.4356	278.25	0.2007	1.60446	1.80
60.0015	1022.96	0.0816	1.54056	6.62
61.6847	618.48	0.3346	1.50375	4.00
62.3522	758.23	0.2676	1.48924	4.91
64.1606	203.55	0.4015	1.45156	1.32
65.6732	127.01	0.6691	1.42175	0.82
67.7714	628.51	0.0612	1.38161	4.07
68.1836	802.68	0.0816	1.37426	5.20
68.3644	773.73	0.1020	1.37106	5.01

---

Lista de patrones

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-046-1045	67	Silicon Oxide	0.000	0.510	Si O2
*	96-100-0037	33	Vermiculite	0.000	0.106	Mg12.00 O48.00 Si16.00 H0.00
*	96-900-0966	27	Calcite	0.000	0.042	Ca6.00 C6.00 O18.00
*	96-900-1272	21	Birnessite	0.000	0.054	Mn2.00 O4.00 Mg0.29 At1.70
*	96-900-9231	26	Kaolinite	0.000	0.107	Al2.00 Si2.00 O9.00
*	96-901-0411	21	Goethite	0.000	0.087	Fe3.60 Co0.40 O8.00
*	96-901-2667	22	Nacrite	0.000	0.105	Al8.00 Si8.00 O36.00 H16.00

## Difractograma Muestra CA-02



### Lista de reflejos

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.1352	1277.12	0.4015	14.40622	7.92
12.3026	838.35	0.2342	7.19466	5.20
19.9448	2612.48	0.4015	4.45181	16.20
20.9222	4463.66	0.0669	4.24599	27.68
21.4329	1337.73	0.2676	4.14597	8.30
24.9406	792.63	0.2007	3.57025	4.92
25.3382	1177.55	0.0836	3.51512	7.30
26.6986	16123.75	0.0669	3.33902	100.00
29.4935	281.00	0.1004	3.02866	1.74
33.4467	275.53	0.2676	2.67918	1.71
34.9948	1237.94	0.1673	2.56413	7.68
35.8811	1029.58	0.2676	2.50280	6.39

36.6055	1813.13	0.0669	2.45492	11.25
38.5449	772.29	0.3346	2.33575	4.79
39.5171	1258.19	0.0502	2.28049	7.80
40.3185	719.64	0.1338	2.23700	4.46
41.4814	263.48	0.5353	2.17693	1.63
42.4946	694.44	0.0669	2.12735	4.31
45.8427	572.38	0.0669	1.97947	3.55
48.0537	207.94	0.2007	1.89343	1.29
50.1806	1481.34	0.0669	1.81805	9.19
53.4996	286.91	0.4684	1.71283	1.78
54.9309	886.91	0.0816	1.67016	5.50
55.0725	656.22	0.0836	1.66758	4.07
59.9921	1437.86	0.0816	1.54078	8.92
60.1754	729.65	0.0816	1.54034	4.53
62.2363	683.05	0.6528	1.49050	4.24
64.0673	273.30	0.2448	1.45225	1.70
67.7802	549.49	0.1020	1.38145	3.41
68.1906	789.70	0.0816	1.37413	4.90
68.3749	759.17	0.1020	1.37088	4.71

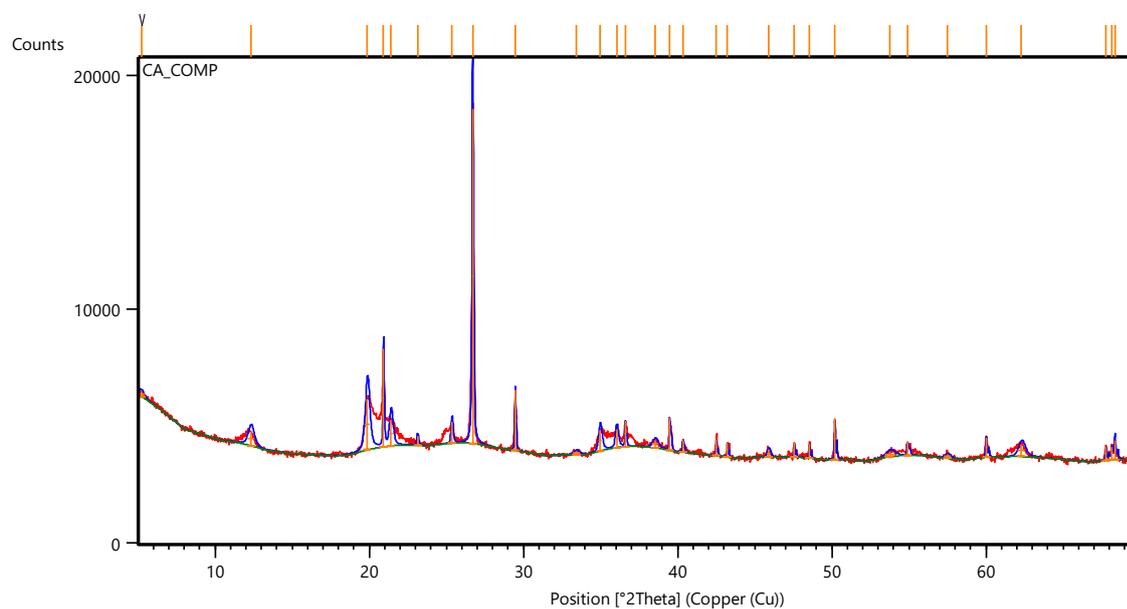
### Lista de patrones

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-500-0036	69	Quartz	0.000	0.478	Si3.00 O6.00
*	96-900-9235	25	Kaolinite	0.000	0.125	Al2.00 Si2.00 O9.00 H4.00

*	96-900-2159	22 Goethite	0.000	0.086 Fe4.00 H4.00 O8.00
*	96-101-1063	21 Nacrite 6M	0.000	0.080 Al24.00 Si24.00 O108.00 H0.00
*	96-901-2055	32 Faujasite-Ca	0.000	0.128 Ca43.28 Si115.20 Al76.80 O384.00

---

## Difractograma Muestra CA-COMP



### Lista de reflejos

Pos. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
5.2247	207.00	0.4015	16.91447	1.45
12.3407	609.89	0.4684	7.17254	4.27
19.8815	2163.65	0.3346	4.46583	15.13
20.9247	4215.39	0.0669	4.24550	29.48
21.4165	1126.03	0.2676	4.14911	7.88
23.1265	382.56	0.1338	3.84604	2.68
25.3555	921.49	0.1338	3.51276	6.45
26.7002	14296.74	0.1004	3.33882	100.00
29.4610	2606.44	0.0669	3.03193	18.23
33.4263	135.20	0.4015	2.68077	0.95
34.9670	879.48	0.2342	2.56610	6.15
36.0449	787.89	0.2007	2.49180	5.51

36.5993	1100.79	0.0669	2.45532	7.70
38.5324	313.91	0.4015	2.33648	2.20
39.4825	1405.95	0.0836	2.28241	9.83
40.3405	514.53	0.1004	2.23582	3.60
42.5070	679.95	0.0612	2.12499	4.76
43.2307	643.07	0.0612	2.09108	4.50
45.8899	327.42	0.2007	1.97754	2.29
47.5631	615.02	0.0612	1.91022	4.30
48.5467	587.99	0.0669	1.87534	4.11
50.1986	1736.43	0.0612	1.81594	12.15
53.7453	216.50	0.6691	1.70558	1.51
54.9151	567.13	0.1171	1.67198	3.97
57.4782	157.86	0.4015	1.60337	1.10
60.0134	855.91	0.0816	1.54029	5.99
62.2879	516.24	0.4684	1.49063	3.61
67.7824	556.58	0.1004	1.38255	3.89
68.1711	551.36	0.1224	1.37448	3.86
68.3567	814.16	0.1020	1.37120	5.69

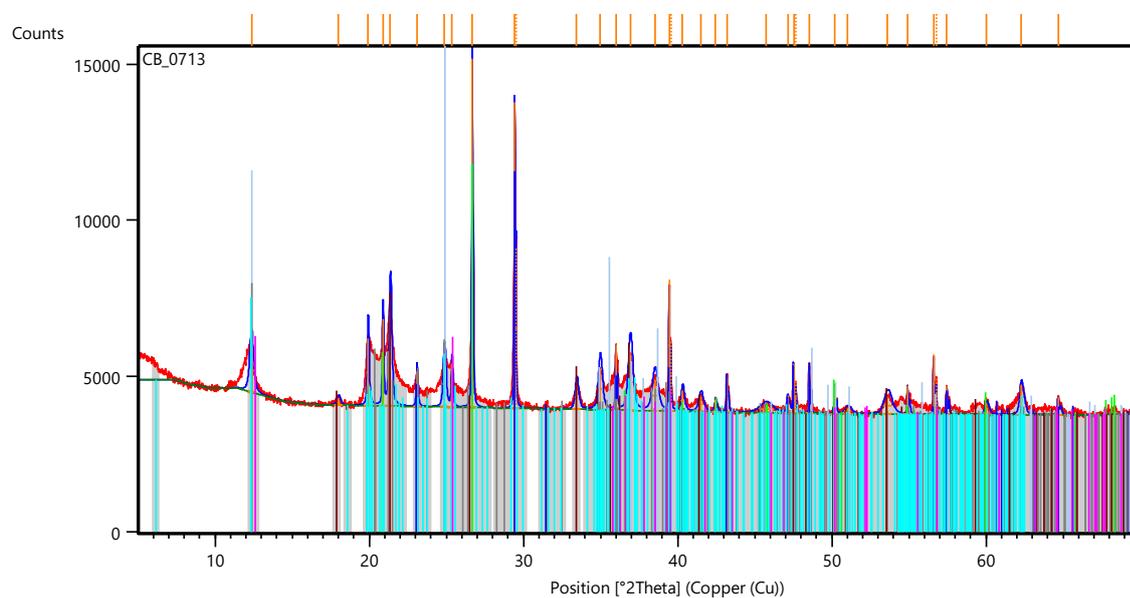
### Lista de patrones

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacemen t [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-500-0036	64	Quartz	0.000	0.466	Si3.00 O6.00
*	96-900-0966	42	Calcite	0.000	0.067	Ca6.00 C6.00 O18.00

*	96-900-9231	23 Kaolinite	0.000	0.092 Al2.00 Si2.00 O9.00
*	96-900-2159	19 Goethite	0.000	0.071 Fe4.00 H4.00 O8.00
*	96-101-1063	15 Nacrite 6M	0.000	0.066 Al24.00 Si24.00 O108.00 H0.00
*	96-900-8214	22 Anatase	0.000	0.055 Ti8.00 O16.00

---

## Difractograma Muestra CB-01



### Lista de reflejos

Pos. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
12.3656	1374.55	0.3011	7.15816	12.27
18.0036	230.01	0.2676	4.92720	2.05
19.9213	2148.10	0.1338	4.45701	19.17
20.8852	2777.65	0.0836	4.25343	24.79
21.3628	3026.47	0.2007	4.15941	27.01
23.0958	1127.67	0.1004	3.85108	10.06
24.8751	1489.51	0.2007	3.57951	13.29
25.3609	1385.15	0.1004	3.51203	12.36
26.6727	11206.17	0.0669	3.34221	100.00
29.4283	9819.31	0.0612	3.03271	87.62
29.5172	5143.89	0.0408	3.03129	45.90
33.4476	762.61	0.2448	2.67690	6.81

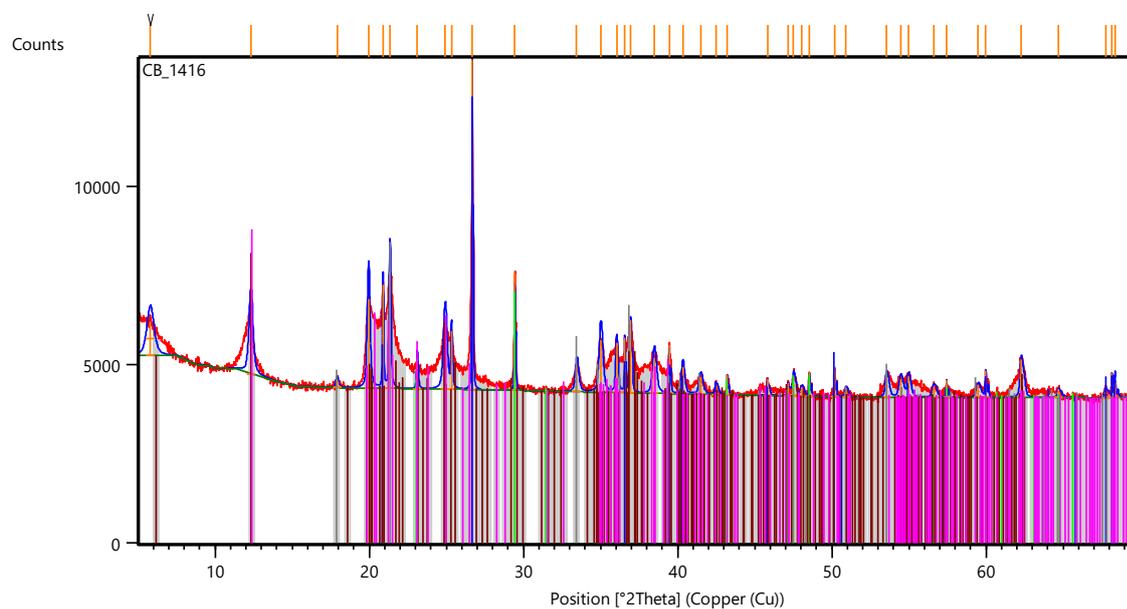
34.9659	1308.27	0.2856	2.56406	11.67
36.0055	2099.39	0.0612	2.49237	18.73
36.9207	1773.54	0.3264	2.43266	15.83
38.5112	988.50	0.4080	2.33578	8.82
39.4494	4206.80	0.0612	2.28236	37.54
39.5560	2278.96	0.0612	2.28211	20.34
40.3120	675.75	0.2040	2.23549	6.03
41.4890	476.77	0.3264	2.17475	4.25
42.4571	395.21	0.1224	2.12738	3.53
43.1917	1158.27	0.0816	2.09288	10.34
45.7212	243.81	0.9792	1.98280	2.18
47.1433	565.10	0.1224	1.92625	5.04
47.5229	1592.72	0.0816	1.91174	14.21
47.6477	1062.88	0.0612	1.91177	9.48
48.5327	1628.33	0.0612	1.87430	14.53
50.1660	924.43	0.0816	1.81704	8.25
51.0298	191.07	0.4896	1.78829	1.71
53.6066	561.94	0.5712	1.70825	5.01
54.9164	926.25	0.0816	1.67056	8.27
56.6034	1925.23	0.0612	1.62471	17.18
56.7593	1209.80	0.0612	1.62465	10.80
57.4382	930.64	0.0816	1.60307	8.30
60.0243	367.85	0.2448	1.54003	3.28
62.2824	964.81	0.2448	1.48951	8.61
64.6789	547.70	0.1224	1.43999	4.89

---

Lista de patrones

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900-0966	59	Calcite	0.000	0.487	Ca6.00 C6.00 O18.00
*	00-033-1161	50	Silicon Oxide	0.000	0.501	Si O2
*	96-900-9231	47	Kaolinite	0.000	0.224	Al2.00 Si2.00 O9.00
*	96-900-2159	39	Goethite	0.000	0.234	Fe4.00 H4.00 O8.00
*	96-101-1081	40	Nacrite 4M	0.000	0.195	Al16.00 Si16.00 O72.00 H0.00
*	96-900-1272	26	Birnessite	0.000	0.144	Mn2.00 O4.00 Mg0.29 At1.70

## Difractograma Muestra CB-02



### Lista de reflejos

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.8056	948.09	0.5353	15.22342	10.25
12.3224	1635.16	0.3011	7.18313	17.68
17.9079	214.35	0.2007	4.95331	2.32
19.9456	2488.23	0.2007	4.45163	26.91
20.8862	2904.60	0.0669	4.25324	31.41
21.3341	3259.14	0.1171	4.16494	35.24
23.1100	871.48	0.1004	3.84876	9.42
24.9084	1705.46	0.2676	3.57479	18.44
25.3306	1628.36	0.0836	3.51615	17.61
26.6778	9247.31	0.0502	3.34158	100.00
29.4360	3317.04	0.0502	3.03445	35.87
33.4518	719.13	0.2342	2.67878	7.78

35.0031	1466.34	0.2676	2.56354	15.86
36.0369	1389.45	0.1338	2.49234	15.03
36.5740	1543.81	0.0669	2.45696	16.69
36.9630	2030.50	0.0836	2.43199	21.96
38.4696	983.28	0.2676	2.34014	10.63
39.4514	1351.10	0.0669	2.28414	14.61
40.3232	757.66	0.2007	2.23675	8.19
41.4842	469.02	0.2676	2.17679	5.07
42.5052	260.68	0.2007	2.12684	2.82
43.2132	563.66	0.0669	2.09362	6.10
45.8296	461.65	0.1004	1.98000	4.99
47.1544	355.58	0.1004	1.92742	3.85
47.5147	577.15	0.2007	1.91364	6.24
48.0544	246.99	0.2007	1.89340	2.67
48.5471	678.52	0.0669	1.87533	7.34
50.1767	822.81	0.0669	1.81818	8.90
50.9183	251.29	0.2007	1.79343	2.72
53.5476	641.99	0.2007	1.71141	6.94
54.4554	514.74	0.2676	1.68501	5.57
54.9650	594.77	0.2007	1.67058	6.43
56.6007	317.23	0.2676	1.62613	3.43
57.4322	497.77	0.0612	1.60322	5.38
59.4744	344.71	0.2676	1.55424	3.73
59.9803	746.90	0.0816	1.54106	8.08
62.2901	1067.72	0.2007	1.49058	11.55
64.7074	233.91	0.2007	1.44061	2.53
67.7586	258.67	0.2007	1.38298	2.80
68.1758	681.52	0.0612	1.37439	7.37

68.3553      420.04                      0.1020                      1.37122                      4.54

---

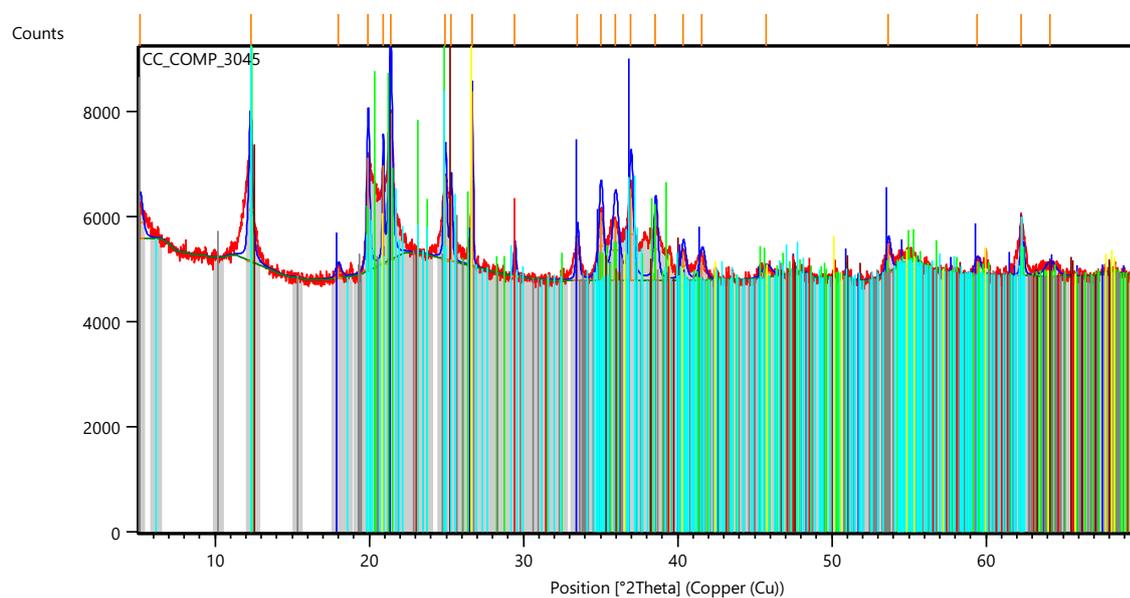
Lista de patrones

---

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacemen t [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-101-1098	55	Quartz low	0.000	0.602	Si3.00 O6.00
*	96-900-0966	53	Calcite	0.000	0.203	Ca6.00 C6.00 O18.00
*	96-900-2159	46	Goethite	0.000	0.301	Fe4.00 H4.00 O8.00
*	96-101-1081	33	Nacrite 4M	0.000	0.248	Al16.00 Si16.00 O72.00 H0.00
*	96-900-9235	33	Kaolinite	0.000	0.298	Al2.00 Si2.00 O9.00 H4.00

---

## Difractograma Muestra CC-01



### Lista de reflejos

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.1448	587.38	0.4015	17.17694	17.69
12.3038	1945.50	0.3011	7.19396	58.58
17.9872	197.78	0.4015	4.93166	5.96
19.9189	2146.92	0.2007	4.45754	64.65
20.8936	1862.13	0.1004	4.25174	56.07
21.3774	2788.03	0.2676	4.15660	83.95
24.9216	1580.19	0.2007	3.57293	47.58
25.3111	1250.60	0.1338	3.51882	37.66
26.6754	3320.89	0.0669	3.34188	100.00
29.4280	540.70	0.1338	3.03526	16.28
33.4910	821.55	0.2007	2.67574	24.74
35.0111	1300.56	0.3346	2.56297	39.16

35.9541	1141.37	0.4684	2.49788	34.37
36.9572	1743.85	0.3011	2.43236	52.51
38.5576	1167.90	0.2676	2.33501	35.17
40.3552	544.51	0.3346	2.23505	16.40
41.5740	444.16	0.4015	2.17230	13.37
45.7471	165.93	0.6691	1.98338	5.00
53.6475	540.22	0.2676	1.70846	16.27
59.4256	260.68	0.4015	1.55540	7.85
62.2793	1116.75	0.1338	1.49081	33.63
64.1293	201.26	0.8029	1.45220	6.06

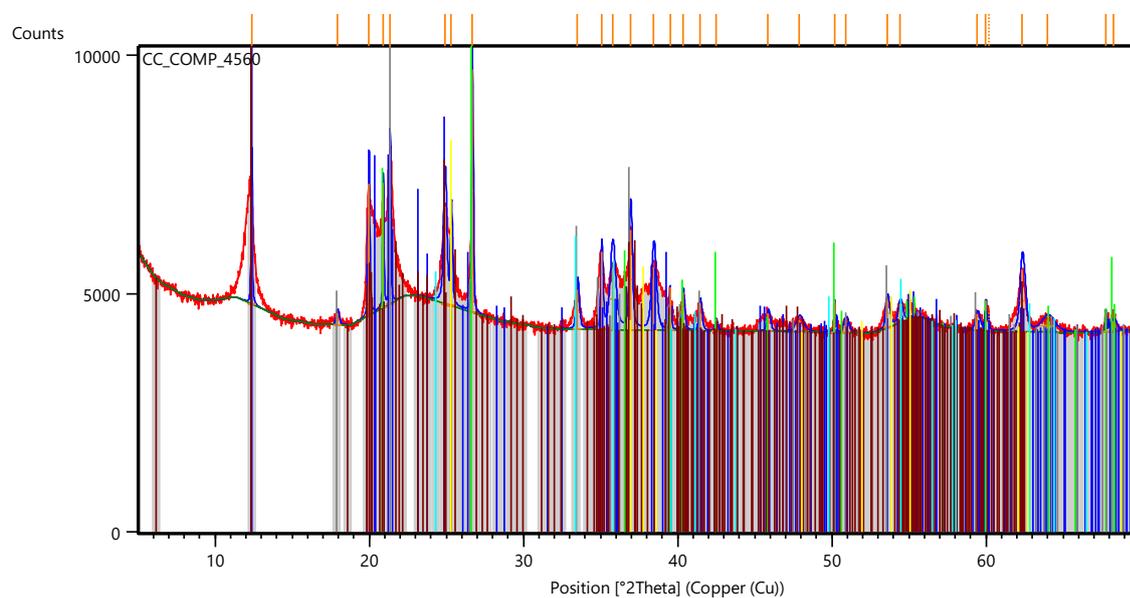
#### Lista de patrones

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900-2159	45	Goethite	0.000	0.761	Fe4.00 H4.00 O8.00
*	96-900-9231	35	Kaolinite	0.000	0.772	Al2.00 Si2.00 O9.00
*	96-900-0209	11	Vermiculite	0.000	0.332	Mg4.74 Fe0.96 Al2.86 Si5.44 O32.00 C24.00 N4.00
*	96-900-1273	23	Birnessite	0.000	0.455	Mn2.00 O4.00 K0.46 At1.40
*	96-101-1081	32	Nacrite 4M	0.000	0.620	Al16.00 Si16.00

					O72.00
					H0.00
*	00-046-1045	30 Silicon Oxide	0.000	0.642	Si O2
*	96-900-0966	12 Calcite	0.000	0.159	Ca6.00
					C6.00
					O18.00

---

## Difractograma Muestra CC-02



### Lista de reflejos

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.3718	2465.97	0.0836	7.15455	48.43
17.9419	233.69	0.2007	4.94400	4.59
19.9737	2758.91	0.1004	4.44544	54.18
20.9003	2604.72	0.0669	4.25040	51.16
21.3426	3127.14	0.0836	4.16330	61.42
24.9045	2036.63	0.2342	3.57535	40.00
25.3215	1700.39	0.1171	3.51740	33.40
26.6776	5091.74	0.0836	3.34161	100.00
33.5018	833.32	0.2007	2.67491	16.37
35.0693	1628.31	0.1171	2.55885	31.98
35.7759	1298.76	0.4015	2.50991	25.51
36.9352	2102.68	0.2007	2.43376	41.30

38.4348	1326.10	0.3346	2.34218	26.04
39.5105	902.96	0.0502	2.28086	17.73
40.3508	802.65	0.1338	2.23528	15.76
41.4500	575.79	0.1673	2.17851	11.31
42.4880	234.30	0.1338	2.12766	4.60
45.8702	372.33	0.2007	1.97834	7.31
47.8900	240.35	0.5353	1.89952	4.72
50.1727	680.09	0.0612	1.81681	13.36
50.9043	256.43	0.3346	1.79389	5.04
53.5878	582.74	0.2342	1.71022	11.44
54.4114	386.74	0.2676	1.68626	7.60
59.4179	332.51	0.2676	1.55558	6.53
59.9886	625.65	0.1020	1.54086	12.29
60.1644	389.37	0.0612	1.54060	7.65
62.3337	1313.28	0.3264	1.48841	25.79
63.9725	245.63	0.9792	1.45417	4.82
67.7698	450.98	0.0612	1.38164	8.86
68.2603	215.48	0.3264	1.37290	4.23

### Lista de patrones

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacemen t [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900-9231	49	Kaolinite	0.000	0.618	Al <sub>2</sub> .00 Si <sub>2</sub> .00 O <sub>9</sub> .00
*	96-900-5018	45	Quartz	0.000	0.637	Si <sub>6</sub> .00 O <sub>6</sub> .00
*	96-900-2159	46	Goethite	0.000	0.560	Fe <sub>4</sub> .00 H <sub>4</sub> .00 O <sub>8</sub> .00

*	96-101-1081	47 Nacrite 4M	0.000	0.529	Al16.00 Si16.00 O72.00 H0.00
*	96-591-0083	29 Hematite	0.000	0.192	Fe12.00 O18.00
*	96-900-9087	41 Anatase	0.000	0.339	Ti8.00 O16.00

---